



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Colegiado do Curso de Eng. Elétrica



Paulo Fernando Oliveira Paim de Mattos

Caracterização da ocorrência de afundamentos de tensão a partir de faltas na Rede Básica da Bahia: uma abordagem estocástica

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa

Salvador - BA - Brasil

2022

Paulo Fernando Oliveira Paim de Mattos

**Caracterização da ocorrência de afundamentos de tensão
a partir de faltas na Rede Básica da Bahia: uma
abordagem estocástica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa

Salvador - BA - Brasil

2022

M444 Mattos, Paulo Fernando Oliveira Paim de.

Caracterização da ocorrência de afundamentos de tensão a partir de faltas na rede básica da Bahia: uma abordagem estocástica/ Paulo Fernando Oliveira Paim de Mattos. – Salvador, 2022.

168f.: il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2022.

1. Sistemas de energia elétrica - potência. 2. Tensão - afundamento. 3. Curto-circuito. I. Barbosa, Daniel. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 621.3191

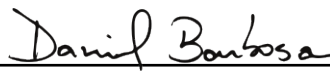
Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete
Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

Paulo Fernando Oliveira Paim de Mattos

Caracterização da ocorrência de afundamentos de tensão a partir de faltas na Rede Básica da Bahia: uma abordagem estocástica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elé-
trica da Universidade Federal da Bahia como
parte dos requisitos para a obtenção do grau
de Engenheiro Eletricista.

Trabalho aprovado. Salvador - BA - Brasil, 2022:



Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa



Prof. Dr. Kleber Freire da Silva



Prof. Dr. Renato José Pino de Araújo

Salvador - BA - Brasil
2022

Este trabalho é dedicado à minha doce avó Jacy Nascimento de Oliveira (in memoriam)

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Nilza Nascimento de Oliveira e José Fernando Paim de Mattos, por desde cedo me mostrarem a importância dos estudos e da educação na construção do senso crítico e como agente de grandes mudanças.

Ao professor Dr. Daniel Barbosa, pela paciência, disponibilidade e por acreditar no meu trabalho.

Aos professores Dr. Kleber Freire da Silva e Dr. Renato José Pino de Araújo, pela disponibilidade e aceite do convite em compor a minha banca.

Ao professor Dr. Roberto Chouhy Leborgne (UFRGS), pelas contribuições e trocas que resultaram na inspiração do tema deste trabalho.

Aos pesquisadores Juan Rossi (CEPEL) e Sergio Roméro (CEPEL), pelos esclarecimento a respeito das melhores práticas de uso do ANAFAS.

A todos os docentes que me acompanharam desde a educação básica ao ensino superior, pelas referências e por me fazerem admirar a mais nobre das profissões.

Aos queridos colegas e amigos que fiz nas trajetórias do curso técnico e graduação, tornando a minha desafiadora e longa caminhada mais leve. Em especial: Renan Rodrigues, Evelyn Pereira, Rodrigo Rosário, Luiz Carlos, Arnaldo Júnior, Péricles Oliveira, Luan Aleixo e Adriana Aparecida.

Aos egressos e atuais membros das entidades estudantis as quais tive a honra de fazer parte, vivenciando a universidade para além do ambiente da sala de aula (CAEEL, Onda Elétrica, PET Elétrica e G-SEPi) e aos tutores professor Dr. Márcio Fontana, professora Dra. Luciana Martinez e professora Dra. Ana Isabela Araújo Cunha.

Aos colegas e gestores das empresas por onde passei, seja na condição de estagiário, mas sobretudo como empregado efetivado, pela troca de experiências, compreensão e disponibilidade na flexibilização dos meus horários, indispensável para a conclusão da árdua caminhada de dupla jornada na conciliação do trabalho e estudos. Em especial: Edmar Egídio, Luís Santiago, Elielson Purificação, Romildo Fausto, Bráulio Ribeiro e Daniel Moyano.

A toda a minha família e amigos, pela compreensão e carinho nos momentos de ausência, em decorrência dos estudos. Prometo que estarei mais presente a partir de agora.

A todos que por alguma razão tenha esquecido de nomear pelo calor da emoção, peço desculpas mas deixo expresso meus mais sinceros sentimentos de gratidão.

*“Há uma força motriz
mais poderosa que o vapor,
a eletricidade e a energia
atômica: a vontade ”
(Albert Eistein)*

Resumo

A crescente evolução tecnológica com o uso cada vez mais frequente da Microeletrônica associada à Eletrônica de Potência em diversos segmentos econômicos, sobretudo o campo industrial, tem influenciado o aumento progressivo da presença de cargas sensíveis, o que resulta em registros cada vez mais frequentes de intercorrências relacionadas a defeitos no Sistema Elétrico de Potência (**SEP**). Os afundamentos de tensão (também chamados *voltage sags* ou *voltage dips*) destacam-se como uma das Variações de Tensão de Curta Duração (**VTCDs**) mais frequentes, representando enormes prejuízos à cadeia produtiva e aos consumidores de uma maneira geral (**RAMOS, 2009**). A aplicação de medidas preventivas tanto no planejamento como na especificação do **SEP** tem se mostrado como uma alternativa para minimizar ou evitar problemas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (**QEE**) e neste sentido, análises estatísticas de predição se fazem necessárias.

Diante disso, o presente trabalho se propõe a apresentar um estudo de caso aplicado à Rede Básica (**RB**) da Bahia (barras de 230 e 500 kV) utilizando duas abordagens estocásticas na estimação quantitativa e qualitativa da ocorrência de afundamentos de tensão originados a partir de curtos-circuitos nas linhas de transmissão (**LTs**): Método de Posição de Falta (**MPF**) e Simulação de Monte Carlo (**SMC**).

Conforme observado pelos resultados, com poucas simulações o método **MPF** permitiu o mapeamento da zona de vulnerabilidade do sistema ao passo que a técnica da **SMC** validou a área de maior criticidade possibilitando adicionar aleatoriedade às variáveis de influência na ocorrência do defeito (linha de transmissão, posição de falta, tipo de falta e impedância de falta), sorteadas a partir de distribuições de probabilidade conhecidas. Os gráficos comparativos mostraram que ao considerar a impedância de falta de forma aleatória as frequências cumulativas ficaram entre as duas curvas que representam os valores extremos mínimo (0Ω) e máximo (15Ω) do número de afundamentos de tensão esperados anualmente. Além disso, as funções densidade de probabilidade associadas a outras classes de valores de tensão para afundamentos de tensão indicam um deslocamento para a direita (aumento do número de afundamentos) ou esquerda (diminuição do quantitativo de defeitos) das curvas de densidade, sendo notada, de uma maneira geral, a redução nos afundamentos com o aumento da impedância de falta. No entanto, o estudo revela que a redução de afundamentos não necessariamente irá implicar em menos severidades de afundamentos do **SEP** uma vez que tendem a aumentar a densidade de probabilidade nas classes abaixo de 0,5 p.u.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência. Curto-circuito. Afundamento de Tensão. *Software* ANAFAS. Método das Posições de Falta. Simulação Monte Carlo.

Abstract

The growing technological evolution with the expanding use of Microelectronics associated with Power Electronics in various economic segments, especially the industrial field, has influenced the progressive increase in the presence of sensitive loads, which results in increasingly frequent records of interferences related to faults in the Electric Power System. Voltage sags (or *voltage dips*) stand out as one of the most frequent Short Duration Voltage Variations, representing enormous damage to the production chain and consumers in general. The application of preventive measures both in the planning and in the Electric Power System specification has been shown to be an alternative to minimize or avoid Power Quality Problems and therefore statistical prediction analyses are necessary.

Given this, the present work presents a case study applied to the Basic Power Grid of Bahia (230 and 500 kV bars) using two stochastic approaches in the quantitative and qualitative estimation of the occurrence of voltage sags originated from short circuits on transmission lines: Method of Fault Positions and Monte Carlo Simulation.

As observed by the results, with few simulations the Method of Fault Positions allowed the mapping of the system's vulnerability zone, while the Monte Carlo Simulation technique validated the critical area, making it possible to add randomness to the variables that influence the occurrence of the fault (transmission line, fault position, fault type, and fault impedance), given from known probability distributions. The comparative graphs showed that when considering the fault impedance at random, the cumulative frequencies were between the two curves that represent the minimum (0Ω) and maximum (15Ω) extreme values of the number of voltage sags expected annually. In addition, the probability density functions associated with other classes of voltage values for voltage sags indicate a shift to the right (increase in the number of sags) or left (decrease in the number of defects) of the density curves, being noted in an overall, the reduction in sags with increasing fault impedance. However, the study reveals that the reduction of sags will not necessarily imply fewer severities of sags in the Electric Power System since they tend to increase the probability density in classes below 0.5 p.u.

Keywords: Electric Power System. Short Circuit. Voltage Sags. Software Anafas. Method of Fault Positions. Monte Carlo Simulation.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Histograma SARFI-X de um barramento hipotético. | 33 |
| Figura 2 – Tensão valor eficaz (Root Mean Square) (RMS) no Tempo Durante a Ocorrência de um Afundamento de Tensão. | 35 |
| Figura 3 – Propostas de Agregação de Fases para Afundamentos Trifásicos. | 36 |
| Figura 4 – Esquemático Representativo Área de Vulnerabilidade e Carga Sensível. | 37 |
| Figura 5 – Representação da área de vulnerabilidade. | 38 |
| Figura 6 – Esquemático do sistema indicando posições de falta para estimação de afundamentos de tensão. | 40 |
| Figura 7 – Diagrama unifilar da RB da Bahia. | 42 |
| Figura 8 – Sorteio por Monte Carlo: Tamanho da linha de transmissão (LT), tipo de falta e localização da falta. | 55 |
| Figura 9 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento falta monofásica - Curto-Circuito Máximo (2022). | 58 |
| Figura 10 – Número de barramentos afetados para falta monofásica na metade das linhas de transmissão - Curto-Circuito Máximo (2022). | 58 |
| Figura 11 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento para os diferentes tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022). | 59 |
| Figura 12 – Índice SARFI-90 acumulado de todos os tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022). | 60 |
| Figura 13 – Número de barramentos afetados por falta em LT - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022). | 61 |
| Figura 14 – Frequência Acumulada do Número de Ocorrências por Nível de Afundamentos de Tensão - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022). | 61 |
| Figura 15 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022). | 62 |
| Figura 16 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento falta monofásica - Curto-Circuito Máximo (2025). | 63 |
| Figura 17 – Número de barramentos afetados para falta monofásica nas metade das linhas de transmissão - Curto-Circuito Máximo (2025). | 64 |
| Figura 18 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento para os diferentes tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 66 |
| Figura 19 – Índice SARFI-90 acumulado de todos os tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 66 |
| Figura 20 – Número de barramentos afetados por falta em LT - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 – Frequência Acumulada do Número de Ocorrências por Nível de Afundamentos de Tensão - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 68 |
| Figura 22 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 69 |
| Figura 23 – Frequência Absoluta de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 70 |
| Figura 24 – Número de barramentos afetados para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Curto-Circuito Máximo (2025). | 71 |
| Figura 25 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025). | 71 |
| Figura 26 – Mapa Geométrico - Rede de Operação da Bahia e Zona de Vulnerabilidade Identificada - Horizonte 2025. | 72 |
| Figura 27 – Barramentos 230 kV da zona de vulnerabilidade identificada (Sul e Centro-Sul Baiano) Base de dados 2022. | 73 |
| Figura 28 – Barramentos 230 kV da zona de vulnerabilidade identificada (Sul e Centro-Sul Baiano) Base de dados 2025. | 73 |
| Figura 29 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213(subestação (SE) Itagibá 230 kV) para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 75 |
| Figura 30 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 76 |
| Figura 31 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 77 |
| Figura 32 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 78 |
| Figura 33 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 79 |
| Figura 34 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 80 |

| | |
|--|----|
| Figura 35 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15 Ω | 80 |
| Figura 36 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0 Ω , variável aleatória e igual a 15 Ω | 81 |
| Figura 37 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0 Ω , aleatória e 15 Ω | 82 |
| Figura 38 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0 Ω , aleatória e 15 Ω | 82 |
| Figura 39 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2 Ω , 5 Ω e 10 Ω | 83 |
| Figura 40 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0 Ω | 84 |
| Figura 41 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0 Ω | 84 |
| Figura 42 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0 Ω | 85 |
| Figura 43 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 86 |
| Figura 44 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 86 |
| Figura 45 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω | 87 |
| Figura 46 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15 Ω | 87 |
| Figura 47 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0 Ω , variável aleatória e igual a 15 Ω | 88 |
| Figura 48 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0 Ω , aleatória e 15 Ω | 89 |

| | |
|--|----|
| Figura 49 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 89 |
| Figura 50 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω | 90 |
| Figura 51 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω . | 90 |
| Figura 52 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω . | 91 |
| Figura 53 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω . | 92 |
| Figura 54 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 92 |
| Figura 55 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 93 |
| Figura 56 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω . | 93 |
| Figura 57 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15Ω . | 94 |
| Figura 58 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω | 94 |
| Figura 59 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 95 |
| Figura 60 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 95 |
| Figura 61 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω | 96 |
| Figura 62 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω . | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 63 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 97 |
| Figura 64 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 98 |
| Figura 65 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 99 |
| Figura 66 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 99 |
| Figura 67 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 100 |
| Figura 68 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 101 |
| Figura 69 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω | 101 |
| Figura 70 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 102 |
| Figura 71 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 102 |
| Figura 72 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω | 103 |
| Figura 73 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 104 |
| Figura 74 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 104 |
| Figura 75 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figura 76 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 106 |
| Figura 77 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória. | 106 |
| Figura 78 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 107 |
| Figura 79 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 107 |
| Figura 80 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω | 108 |
| Figura 81 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 108 |
| Figura 82 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω | 109 |
| Figura 83 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω | 109 |
| Figura 84 – Curto-Circuito Trifásico (a) e Curto-Circuito Trifásico-Terra (b). | 143 |
| Figura 85 – Representação de um sistema de potência formado n-barras para uma falta na barra k. | 144 |
| Figura 86 – Representação de rede para cálculo de $[\Delta \vec{V}_{bar}]$ | 145 |
| Figura 87 – Exemplo Ilustrativo de um Equivalente Monofásico de um SEP. | 148 |
| Figura 88 – Equivalente de Rede de Sequência Positiva. | 149 |
| Figura 89 – Equivalente de Rede de Sequência Negativa. | 149 |
| Figura 90 – Equivalente de Rede de Sequência Zero. | 150 |
| Figura 91 – Curto-Circuito Fase-Terra. | 151 |
| Figura 92 – Curto-Circuito Fase-Fase. | 152 |
| Figura 93 – Curto-Circuito Fase-Fase-Terra. | 153 |
| Figura 94 – Curto-Circuito Fase-Fase-Terra. | 157 |
| Figura 95 – Formato dos dados do defeito. | 158 |
| Figura 96 – Formato dos dados dos parâmetros de controle. | 160 |
| Figura 97 – Acesso à Execução do Batch no ANAFAS. | 162 |
| Figura 98 – Janela Execução Batch. | 162 |
| Figura 99 – Janela Resultados. | 163 |

| | |
|--|-----|
| Figura 100–Especificação de Impedância de Falta | 166 |
| Figura 101–Formato dos Dados das Impedâncias de Falta para Curtos-Circuitos Shunt | 166 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD. | 31 |
| Tabela 2 – Capacidade de geração de energia elétrica da Bahia. | 45 |
| Tabela 3 – Unidades geradoras previstas na Bahia. | 45 |
| Tabela 4 – Intervalo mínimo de monitoramento do SEP para uma determinada precisão. | 49 |
| Tabela 5 – Taxas de faltas em Linhas de Transmissão no Brasil. | 50 |
| Tabela 6 – Tensões remanescentes na Barra “k” e taxas de ocorrência devido à falta “i”. | 51 |
| Tabela 7 – Taxas de falha para linhas de transmissão e distribuição. | 53 |
| Tabela 8 – Ocorrência dos curtos-circuitos. | 54 |
| Tabela 9 – Distribuição de probabilidade de impedância de falta. | 55 |
| Tabela 10 – Correntes de curto-circuito referentes ao ano 2021 sem a SE 230 kV Feira de Santana III. | 65 |
| Tabela 11 – Correntes de curto-circuito referentes ao ano 2021 com a SE 230 kV Feira de Santana III. | 65 |
| Tabela 12 – Dados dos barramentos para a configuração curto-máximo do SIN: Ano 2022. | 118 |
| Tabela 13 – Dados das linhas de transmissão para configuração curto-máximo do SIN: Ano 2022. | 121 |
| Tabela 14 – Dados dos transformadores para a configuração do SIN em 2022. | 126 |
| Tabela 15 – Dados das unidades geradoras atuais simulados na configuração curto- máximo do SIN: Ano 2022. | 127 |
| Tabela 16 – Dados dos barramentos para a configuração curto-máximo do SIN: Ano 2025. | 129 |
| Tabela 17 – Dados das linhas de transmissão para configuração curto-máximo do SIN: Ano 2025. | 132 |
| Tabela 18 – Dados dos transformadores para a configuração do SIN em 2025. | 137 |
| Tabela 19 – Dados das unidades geradoras futuras simulados na configuração curto- máximo do SIN: Ano 2025. | 138 |
| Tabela 20 – Códigos de Execução e significados para o estudo individual orientado a ponto de falta | 158 |
| Tabela 21 – Códigos de Execução e significados para o estudo individual orientado a ponto de falta | 159 |
| Tabela 22 – Principais parâmetros de controle e descrição utilizados no modo batch. | 161 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------------------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANAFAS | Análise de Falhas Simultâneas |
| ATP | Alternative Transients Program |
| AMT | Afundamento Momentâneo de Tensão |
| ATT | Afundamento Temporário de Tensão |
| AL | Alagoas |
| BDCC | Base de Dados de Curto-Circuito |
| BA | Bahia |
| CGH | Central Geradora Hidrelétrica |
| CGE | Central Geradora Eólica |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EPRI | Electric Power Research Institute |
| ELECTROTEK | Electrotek Concepts, Inc. |
| FT | Fase-Terra |
| FF | Fase-Fase |
| FFT | Fase-Fase-Terra |
| FFF | Fase-Fase-Fase |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| LT | linha de transmissão |
| MEE | Método de Enumeração de Estados |
| MPF | Método de Posição de Falta |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PAR | Plano de Ampliações de Reforços |
| PDE | Plano Decenal de Expansão de Energia |
| PCH | Pequena Central Hidrelétrica |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |

| | |
|---------------|--|
| PE | Pernambuco |
| QEE | Qualidade da Energia Elétrica |
| RMS | valor eficaz (Root Mean Square) |
| RB | Rede Básica |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SEB | Sistema Elétrico Brasileiro |
| SINDAT | Dados Técnicos do Sistema Interligado Nacional |
| SE | subestação |
| SARFI | System Average RMS Variation Frequency Index |
| SMC | Simulação de Monte Carlo |
| SIGA | Sistema de Informações de Geração da ANEEL |
| TC | Transformador de Corrente |
| UHE | Usina Hidrelétrica |
| UFV | Usinas Fotovoltaicas |
| VTCD | Variações de Tensão de Curta Duração |

Lista de símbolos

| | |
|-------------|--|
| Hz | Hertz: Unidade de frequência |
| p.u. | Por Unidade |
| kHz | Quilo hertz: Unidade de frequência |
| km | Quilômetro: Unidade de distância |
| V | Volts: Unidade de Tensão elétrica |
| VA | Volt-Ampére: Unidade de potência aparente |
| VAr | Volt-Ampére reativo: Unidade de potência reativa |
| W | Watts: Unidade de potência ativa |
| % | Percentual |
| $ V_{t0+} $ | Magnitude de tensão pós-falta |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 | Relevância do Tema | 23 |
| 1.2 | Motivação | 24 |
| 1.3 | Objetivos | 25 |
| 1.3.1 | Gerais | 25 |
| 1.3.2 | Específicos | 25 |
| 1.4 | Metodologia de Pesquisa | 25 |
| 1.5 | Estrutura do Trabalho | 26 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1 | Abordagem Método de Posição de Falta (MPF) | 27 |
| 2.2 | Abordagem Simulação de Monte Carlo (SMC) | 28 |
| 2.3 | Zona De Vulnerabilidade | 29 |
| 2.4 | Considerações Parciais | 29 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 30 |
| 3.1 | Afundamentos de Tensão | 30 |
| 3.1.1 | Conceitos e Definições | 30 |
| 3.1.2 | Índices de Afundamentos de Tensão (SARFI-x) | 33 |
| 3.1.3 | Origem dos Afundamentos de Tensão | 34 |
| 3.1.4 | Parâmetros para Análise de Afundamentos de Tensão | 34 |
| 3.1.5 | Cálculo da Amplitude das Tensões de Afundamentos | 36 |
| 3.1.6 | Área de Vulnerabilidade | 37 |
| 3.2 | Métodos de Simulação de Faltas | 39 |
| 3.2.1 | Método de Posição de Falta (MPF) | 39 |
| 3.2.2 | Método pela Simulação de Monte Carlo (SMC) | 41 |
| 3.3 | Rede Básica (RB) da Bahia | 42 |
| 3.3.1 | Sistema Nordeste: Área Centro | 43 |
| 3.3.2 | Sistema Nordeste: Área Sudoeste | 43 |
| 3.3.3 | Sistema Nordeste: Área Sul | 43 |
| 3.3.4 | Região Metropolitana de Salvador e Polo Petroquímico de Camaçari | 44 |
| 3.4 | Matriz de Energia Elétrica da Bahia e sua Expansão | 44 |
| 3.5 | Considerações Parciais | 45 |
| 4 | METODOLOGIA | 46 |
| 4.1 | Aquisição dos dados do SIN | 46 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.2 | Considerações da Implementação e Simulação no ANAFAS | 47 |
| 4.3 | Obtenção de Parâmetros pelo Método das Posições de Faltas | 48 |
| 4.3.1 | Frequência de Ocorrência | 49 |
| 4.3.2 | Magnitude das Tensões das Barras e Contagem dos Afundamentos de Tensão | 51 |
| 4.4 | Obtenção de Parâmetros pelo Método de Monte Carlo | 52 |
| 4.5 | Considerações Parciais | 56 |
| 5 | RESULTADOS | 57 |
| 5.1 | Descrição dos Cenários Analisados Considerando Método das Posições de Faltas | 57 |
| 5.1.1 | Desempenho da Configuração Curto-Circuito Máximo (Cenário Atual - Ano 2022) | 57 |
| 5.1.2 | Desempenho da Configuração Curto-Circuito Máximo (Ano 2025) | 62 |
| 5.2 | Descrição dos Cenários Analisados Considerado Método das Simulações de Monte Carlo, relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE)-2031 | 69 |
| 5.2.1 | Análise do Impacto de Faltas Sólidas Aleatórias na Ocorrência de Afundamentos de Tensão na Rede Considerando-se o Horizonte de 1 Ano | 69 |
| 5.2.2 | Impacto da Impedância de Falta nas Barras Sensíveis a Afundamentos de Tensão | 72 |
| 5.2.2.1 | Resultados na Barra 213 (SE Itagibá 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031 | 75 |
| 5.2.2.1.1 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 0Ω | 75 |
| 5.2.2.1.2 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória | 78 |
| 5.2.2.1.3 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 79 |
| 5.2.2.1.4 | Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo | 81 |
| 5.2.2.2 | Resultados na Barra 276 (Usina Funil 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031 | 83 |
| 5.2.2.2.1 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória | 85 |
| 5.2.2.2.2 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 87 |
| 5.2.2.2.3 | Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo | 88 |
| 5.2.2.3 | Resultados na Barra 345 (SE Itabuna 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031 | 90 |
| 5.2.2.3.1 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória | 92 |
| 5.2.2.3.2 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω | 93 |
| 5.2.2.3.3 | Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo | 94 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2.2.4 | Resultados na Barra 376 (SE Brumado II 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031 | 96 |
| 5.2.2.4.1 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória | 98 |
| 5.2.2.4.2 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω | 100 |
| 5.2.2.4.3 | Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo | 101 |
| 5.2.2.5 | Resultados na Barra 21045 (SE Mineração Mirabela 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031 | 103 |
| 5.2.2.5.1 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória | 105 |
| 5.2.2.5.2 | Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω | 107 |
| 5.2.2.5.3 | Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo | 107 |
| 6 | CONCLUSÃO | 110 |
| 6.1 | Trabalhos Futuros | 111 |
| | REFERÊNCIAS | 113 |
| | APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS DO SEP DA BAHIA RELATIVOS AO PDE 2025 (ANO 2022) PARA A CONFIGURAÇÃO DE CURTO-MÁXIMO | 118 |
| | APÊNDICE B – DADOS UTILIZADOS DO SEP DA BAHIA RELATIVOS AO PDE 2031 (ANO 2025) PARA A CONFIGURAÇÃO DE CURTO-MÁXIMO | 129 |
| | APÊNDICE C – CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO | 141 |
| C.1 | Curtos-Circuitos | 141 |
| C.2 | Faltas Simétricas Trifásicas | 143 |
| C.2.1 | Cálculo da Corrente de Falta e das Tensões Pós-Falta | 143 |
| C.3 | Faltas Assimétricas | 147 |
| C.3.1 | Falta Fase-Terra - Cálculo da Corrente de Falta | 150 |
| C.3.2 | Falta Fase-Fase - Cálculo da Corrente de Falta | 152 |
| C.3.3 | Falta Fase-Fase-Terra - Cálculo da Corrente de Falta | 153 |
| C.3.4 | Cálculo das Tensões Pós-Falta e Correntes nas Linhas Durante a Falta | 154 |
| | APÊNDICE D – NOTA INFORMATIVA -CASOS DE CURTO-CIRCUITO | 155 |
| D.1 | Descrição | 155 |
| D.2 | Organização da Base de Dados | 155 |
| D.2.1 | Casos de curto-circuito máximo | 155 |

| | | |
|-------|--|------------|
| D.2.2 | Casos de curto-circuito mínimo | 156 |
| D.3 | Forma de utilização | 156 |

**APÊNDICE E – TUTORIAL - PROCESSAMENTO BATCH NO
PROGRAMA DE ANÁLISE DE FALTAS SIMUL-
TÂNEAS (ANAFAS) 157**

| | | |
|-------|--|------------|
| E.1 | Arquivo com sequência de comandos | 158 |
| E.2 | Estudo individual orientado a ponto de falta | 158 |
| E.2.1 | Execução " <i>Batch</i> " dentro do ANAFAS | 162 |
| E.2.2 | Execução por meio de arquivo .bat | 163 |
| E.2.3 | Simulação de curtos shunt francos | 164 |
| E.2.4 | Simulação de curtos shunt através de impedâncias (não-francos) | 166 |

1 Introdução

1.1 Relevância do Tema

A QEE tem se mostrado um tema de destaque tanto do ponto de vista das empresas de transmissão e distribuição como dos consumidores de um modo geral. O progressivo interesse nesta área de estudo deve-se, principalmente, à evolução tecnológica que requer aplicação crescente da Eletrônica de Potência, Microeletrônica e Microprocessadores, somada à entrada de geração distribuída (sobretudo fotovoltaica e eólica) resultando no aumento da sensibilização dos equipamentos em relação aos distúrbios relacionados à QEE e à maior ocorrência destes defeitos na rede (LEBORGNE, 2003).

As principais análises relacionadas à verificação dos distúrbios que impactam a QEE dizem respeito à sensibilização das cargas frente às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), inevitáveis no SEP e resultantes, sobretudo, de curtos-circuitos nas redes de transmissão e de distribuição; por este motivo, as VTCDs costumam ser estudadas a partir dos resultados dos métodos de cálculos de falta (BOLLEN; SPEYCHAL; LINDEN, 2006).

Sabe-se que apenas a continuidade do fornecimento de energia elétrica está longe de ser uma condição *sine qua non* para o adequado funcionamento de cargas sensíveis encontradas em diversos seguimentos do campo industrial, comercial, hospitalar, residencial, dentre outros (OLGUIN, 2005). Pode-se citar, por exemplo, as falhas ou mesmo interrupções do processo produtivo, causadas no ambiente industrial, perante a ocorrência de Variações de Tensão de Curta Durações (VTCDs) como afundamentos e elevações de tensão na rede elétrica, mesmo com a continuidade no fornecimento, fazendo com que muitos processos acabem necessitando de novas inicializações resultando em considerável prejuízo econômico seja pela parada não programada ou mesmo pela queima de alguns equipamentos diante destes distúrbios (HIRT, 2015).

Dentre as VTCDs, são mais frequentes os afundamentos de tensão, conhecidos na literatura internacional como *voltage sags* ou *voltage dips*. Os afundamentos são caracterizados pela amplitude e duração da ocorrência, sendo representados por uma diminuição na magnitude da tensão eficaz entre 0,1 e 0,9 p.u. do valor da tensão nominal de operação e cuja duração é inferior ou igual a um minuto, nas referências internacionais (BOLLEN, 2000) ou três minutos, segundo as recomendações do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2021).

Diversos autores como McGranaghan, Mueller e Samotyj (1991) e Bollen (2000) concordam que os afundamentos de tensão representam, atualmente, o principal desafio

a ser enfrentado por empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos de modo geral, uma vez que as ocorrências de afundamentos de tensão, combinadas à sensibilização de equipamentos, resultam em um número expressivo de interrupções de processos, com prejuízos para os consumidores, comprometendo, muitas vezes, a imagem empresarial das concessionárias por conta dos danos causados aos equipamentos, perdas elétricas adicionais, perdas por energia não suprida e multas por não cumprimento dos limites dos indicadores estabelecidos pelos regulamentos da Agência Nacional de Energia Elétrica ([ANEEL](#)) resultando em processos judiciais e possíveis ressarcimentos devido ao desligamento de consumidores com cargas sensíveis ([SANTOS; SILVA, 2003](#)).

1.2 Motivação

Dentre as abordagens disponíveis para a avaliação da influência dos atuais, bem como da inserção de futuros empreendimentos à rede, destaca-se a predição do número de afundamentos de tensão baseada em análise estocástica, que pode ser utilizada como ferramenta auxiliar executada nas análises de curto-circuito dos estudos de acesso realizados junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico ([ONS](#)) ([ONS, 2022a](#)).

Essas análises se fazem cada vez mais necessárias uma vez que a crescente demanda das últimas décadas tornou o Sistema Interligado Nacional ([SIN](#)) cada vez mais complexo e extenso para a realização de um estudo completo de faltas sem o auxílio de ferramentas computacionais ([HIRT, 2015](#)).

Neste contexto, pode-se utilizar de bases de dados disponíveis para a modelagem do [SIN](#) utilizando-se de fontes de dados confiáveis, como as periodicamente disponibilizadas pela Empresa de Pesquisa Energética ([EPE](#)) e [ONS](#).

A principal maneira de minimizar ou evitar problemas relacionados à [QEE](#) é a aplicação de medidas preventivas tanto no planejamento como na especificação do [SEP](#) e ferramentas de previsão de defeitos presentes no sistema a partir de análises estatísticas se fazem cada vez mais necessárias ([SANTOS; SILVA, 2003](#)). Conforme é de conhecimento do autor, poucas referências foram encontradas na literatura com vistas a analisar os impactos da ocorrência dos diferentes tipos de faltas simétricas e assimétricas no [SEP](#) da Bahia a partir de análises preditivas; Portanto, o presente trabalho se propõe a aplicar duas abordagens estocásticas na estimação quantitativa e qualitativa dos afundamentos de tensão à [RB](#) da Bahia, formada por barras de 230 kV e 500kV: Método de Posição de Falta ([MPF](#)) e Simulação de Monte Carlo ([SMC](#)).

O conhecimento deste ferramental poderá ser útil e necessário como auxiliar nos estudos de comissionamento e proteção, por exemplo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Gerais

- Apresentar análises preditivas e estocásticas para a caracterização quantitativa e qualitativa de afundamentos de tensão, quando da ocorrência de curtos-circuitos nas **LTs** presentes nas configurações atuais e futuras do **SEP** representativo da **RB** do estado da Bahia, a partir de métodos de simulação de faltas na rede.

1.3.2 Específicos

- Elaborar um levantamento detalhado e simular o comportamento do **SEP** da Bahia ao integrar as atuais e futuras unidades geradoras bem como linhas de transmissão futuras, sob a égide do **PDE-2025** (ano 2022) e **PDE-2031** (ano 2025);
- Simular as consequências da ocorrência de curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos na rede elétrica básica da Bahia;
- Apresentar metodologias de predição estocástica ao utilizar da ferramenta computacional (Análise de Faltas Simultâneas (**ANAFAS**)) para predição da magnitude e frequência de ocorrência anual de afundamento de tensão na rede;
- Analisar casos específicos para barramentos e linhas de transmissão que apresentam desempenho crítico quando da ocorrência de curtos-circuitos;
- Aprofundar as análises descritas nos tópicos anteriores para a realização de um estudo de acesso em uma das zonas de vulnerabilidade mapeada.

1.4 Metodologia de Pesquisa

Dentre as abordagens utilizadas para a caracterização de afundamentos de tensão na rede, destacam-se a monitoração das tensões do sistema elétrico em tempo real ou através da utilização de metodologias de predição. As metodologias de predição baseiam-se na utilização de programas computacionais destinados ao cálculo de tensões e correntes de pós-falta, uso dos tempos de sensibilização e atuação de relés de proteção e utilização de dados estatísticos das faltas em linhas de transmissão e distribuição (**LEBORGNE, 2005**).

Ao optar por ferramentas de simulação na predição de eventos aleatórios, deve dispor de uma base de dados confiável e de extrema relevância. Neste sentido, foram escolhidas as bases de dados disponibilizadas pela **EPE** e **ONS**, devido à sua facilidade de obtenção e de utilização e validações em diversos trabalhos acadêmicos (**CARVALHO FILHO, 2000**), (**SILVA, 2004**), (**ARGENTA, 2013**), (**HIRT, 2015**), (**ZAPPE, 2016**).

Após análise e tratamento dos dados, optou-se, dentre as diversas opções de *softwares* computacionais destinados para realizações de análises de faltas, pelo programa [ANAFAS](#), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica ([CEPEL](#)). O [ANAFAS](#) permite a execução automática de uma grande variedade de faltas, sendo amplamente utilizado no setor elétrico nacional.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho compõe-se deste capítulo introdutório e por mais cinco capítulos subsequentes distribuídos conforme a seguir:

- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: são discutidas publicações científicas de relevância nacional e internacional a respeito da temática dos afundamentos de tensão e predições estocásticas do mesmo sob as abordagens [MPF](#) e [SMC](#), bem como, zona de vulnerabilidade.
- Capítulo 3 - Fundamentação Teórica: apresenta uma visão geral sobre os principais conceitos encontrados na descrição dos afundamentos de tensão e metodologias estocásticas de predição dos mesmos. Descreve brevemente a configuração da [RB](#) e matriz energética do Estado da Bahia, objeto de estudo desta monografia.
- Capítulo 4- Metodologia: são apresentadas as principais considerações utilizadas para a modelagem e obtenção dos dados apresentados no capítulo seguinte.
- Capítulo 5 - Resultados: traz uma abordagem por meio da apresentação gráfica do tratamento de dados para as duas abordagens de predição estocástica de afundamentos de tensão no estado da Bahia: [MPF](#) e [SMC](#).
- Capítulo 6 - Conclusão: são registradas as principais conclusões bem como propostas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

No presente capítulo, serão apresentados e discutidos alguns textos disponíveis na literatura que abordam a temática de predição dos afundamentos de tensão e mapeamento de zonas de vulnerabilidade. Serão dados destaques às publicações que se concentraram nas predições estocásticas de eventos relacionados ao defeito devido à ocorrência de curtos-circuitos na rede, sobretudo às abordagens que se utilizaram dos métodos [MPF](#) e [SMC](#), objetos de estudo desta monografia.

2.1 Abordagem Método de Posição de Falta ([MPF](#))

Uma das primeiras propostas de estudo de predição estocástica baseada em simulação de falta para afundamentos de tensão foi trazida por [Conrad, Little e Grigg \(1991\)](#), que destacaram a relevância do estudo de afundamentos de tensão oriundos de faltas no sistema, informando que os parâmetros que os caracterizam (amplitude, duração e frequência) podem ser obtidos, respectivamente, por três formas: simulação de curto, característica do dispositivo de eliminação da falta e taxa de falhas e dados de confiabilidade.

Em seguida, [Qader, Bollen e Allan \(1991\)](#) aprofundaram esta técnica passando a denominá-la de Método de Posição de Falta ([MPF](#)). Além disso, os autores fizeram uma análise comparativa dos resultados para uma mesma rede de 400 kV considerando os métodos da distância crítica e [MPF](#), possibilitando concluir que o embora o método da distância crítica possa ser utilizado em grandes sistemas de transmissão para a obtenção de resultados aproximados do desempenho de uma ou mais barras, para maiores precisões o [MPF](#) é o mais recomendado ([LEBORGNE, 2003](#)).

[Bollen \(1996\)](#) propôs o Método da Distância Crítica como alternativa ao [MPF](#) na estimativa de afundamentos de tensão na rede. O autor conclui que esta abordagem apresenta uma grande relevância para o tema, sendo mais indicado para sistemas radiais, no entanto o método adotado não determinou a tensão do afundamento, mas sim a posição da falta para determinado valor esperado de tensão.

[Carvalho Filho \(2000\)](#) foi um dos primeiros autores brasileiros a aplicar o conceito do [MPF](#), também chamado Curto-Circuito Deslizante, para uma análise quantitativa e qualitativa dos afundamentos de tensão aplicado a consumidores com cargas sensíveis. O autor enfatiza quanto à relevância da utilização de indicadores de gerenciamento da [QEE](#) no tocante a afundamentos de tensão, tanto do ponto de vista das concessionárias como dos consumidores. O índice adotado neste trabalho foi o System Average RMS Variation Frequency Index ([SARFI](#)) que será discutido na seção [3.1.2](#) do Capítulo 3. Por fim, a tese

recomenda quanto à utilização destes índices na realização de estudos para a avaliação do atendimento a consumidores possuidores de cargas sensíveis.

[Silva \(2004\)](#) apresentou um estudo de caso aplicado ao sistema elétrico de suprimento do Estado do Mato Grosso, utilizando os programas Alternative Transients Program ([ATP](#)) e [ANAFAS](#) de simulação transitórios eletromagnéticos e curto-circuito, respectivamente.

Em ([ARGENTA, 2013](#)), discorre-se um estudo de predição do número de afundamentos de tensão em relação a diferentes tipos de falta aplicado ao Estado do Rio Grande do Sul, também utilizando o [ANAFAS](#) e mais tarde, [Hirt \(2015\)](#) faz um novo estudo, também aplicado ao estado do RS, com dados mais atualizados, considerando apenas o impacto da ocorrência de faltas monofásicas. [Zappe \(2016\)](#) estende a análise do mesmo sistema para as demais faltas (trifásica, fase-terra e fase-fase-terra) utilizando o Método das Posições de Falta para análise do desempenho do sistema.

2.2 Abordagem Simulação de Monte Carlo ([SMC](#))

Um dos primeiros artigos a considerar abordagem de Monte Carlo em Sistemas de Distribuição foi o de [Faried e Aboreshaid \(2003\)](#), que apresenta uma abordagem baseada em [SMC](#) para avaliar as magnitudes máximas dos afundamentos de tensão em sistemas de distribuição radial com compensação por capacitor série, modelado considerando-se a incerteza de vários fatores associados com os cenários de falta como tipo de falta, impedância de falta, tempo de eliminação da falta e localização da falta.

[Olguin, Karlsson e Leborgne \(2003\)](#) fazem uma abordagem comparativa do [MPF](#) e [SMC](#) para a previsão de desempenho de afundamentos de tensão em um ano e conclui que o Método das Posições de Falta fornece valores médios apenas a longo prazo enquanto a [SMC](#) descreve melhor o comportamento dos eventos pois fornece a função de distribuição completa, possibilitando maior número de análises.

[Martinez e Arnedo \(2004\)](#) apresentaram uma análise estocástica de afundamentos de tensão, considerando, dentre os diversos fatores de influência na análise de afundamentos de tensão, a impedância de falta. Para cada sorteio aleatório da posição de falta, é feito também o sorteio aleatório da impedância de falta, variando em uma faixa de valores preestabelecida ou típica. Apesar de considerar a impedância de falta na análise estocástica de afundamentos de tensão, os efeitos desta impedância não são mostrados.

[Ramos \(2009\)](#) apresentou um estudo dos impactos da impedância de falta e da geração distribuída na amplitude e quantidade média anual de afundamentos de tensão em consumidores sensíveis, para tal, utilizou-se da Metodologia de Monte Carlo a partir de um grande número de simulações executadas numa aplicação em Java para eliminar algumas limitações e aumentar a flexibilidade com automação do [ANAFAS](#). O trabalho conclui

que se as impedâncias de falta forem consideradas variáveis aleatórias, a quantidade e a severidade dos afundamentos previstos em uma barra de consumidores sensíveis serão mais precisos comparando-se aos casos nos quais estas não são consideradas aleatórias. Adicionalmente, o autor afirma que a inserção de empreendimentos de geração distribuída resulta em um decréscimo da quantidade e na severidade de afundamentos na barra.

2.3 Zona De Vulnerabilidade

[McGranaghan e Mueller \(1998\)](#) incorporaram o conceito de área de vulnerabilidade no sentido de caracterizar as cargas quanto à sensibilidade frente a faltas elétricas em determinadas regiões que podem gerar eventos de afundamentos de tensão com valor inferior a uma certa magnitude. Os autores destacam que a sensibilização de equipamentos depende não somente das conexões do mesmos mas ainda da conexão do transformador que os alimenta. Concluem por fim que os afundamentos de tensão tem se mostrado como uma preocupação crescente para consumidores industriais, devido à alta sensibilização dos mesmos e apresentam como alternativa da mitigação do problema a inserção de transformadores de tensão constante. Esses transformadores são excitados no alto de sua curva de saturação, de modo que a tensão de saída não é significativamente afetada pelas variações na tensão de entrada e oferecem um suporte a cargas constantes, podendo fornecer mais de 90% da tensão nominal, durante os afundamentos.

2.4 Considerações Parciais

A presente monografia se propõe a utilizar o programa [ANAFAS \(CEPEL, 2022\)](#) para a leitura das bases de dados de curtos-circuitos, disponibilizadas regularmente pela [EPE](#) por meio do [PDE](#). Essas apresentam uma modelagem do [SIN](#), permitindo, no entanto, a geração de relatórios individuais de resultados pós-falta, para zonas isoladas, que neste caso será a formada pela [RB](#) da Bahia.

Após a leitura e disponibilização dos relatórios, será possível tratar os dados adotando as duas metodologias de predição estocástica da ocorrência de eventos ([MPF](#) e [SMC](#)). A partir do conhecimento das barras mais suscetíveis a afundamentos de tensão, será possível mapear uma zona de vulnerabilidade específica e realizar um estudo mais profundo para cada uma das barras, ampliando-se as simulações da técnica [SMC](#) para um horizonte temporal maior que no presente estudo, foi adotado com o cenário de 1000 anos.

Nos próximos capítulos serão feitas as considerações teóricas e de metodologia utilizadas para a geração dos resultados estatísticos analisados tanto do ponto de vista da [MPF](#) como [SMC](#).

3 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, serão apresentadas as definições básicas para os principais termos encontrados na literatura relacionados aos a fundamentos de tensão. Estes conceitos são utilizados em uma infinidade de documentos e estão constantemente sujeitos a confusões; em vista disso, surge-se a necessidade de padronizações.

No Brasil, os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica estão preconizados no Módulo 8 do [PRODIST](#). Pretende-se, portanto, fazer uma análise mais detalhada do distúrbio afundamento de tensão tanto qualitativa, com a descrição dos parâmetros, causas e efeitos que o caracterizam, quanto quantitativamente, que resumidamente será descrita por meio da definição de um índice de desempenho do sistema, utilizado na predição do evento a partir dos resultados apresentados nas simulações do Capítulo 5.

Por fim, será apresentada uma breve caracterização à [RB](#) e matriz energética do estado da Bahia e sua expansão. A partir deste ponto, ter-se-á o ferramental necessário para as metodologias de simulação de falta consagradas pela literatura que serão descritas ao final deste capítulo, cujas análises utilizadas para a obtenção dos resultados serão detalhadas no Capítulo 4.

3.1 Afundamentos de Tensão

3.1.1 Conceitos e Definições

O termo Qualidade da Energia Elétrica ([QEE](#)) está associado a uma variedade de fenômenos que podem ocorrer no Sistema Elétrico de Potência ([SEP](#)) e é constantemente relacionado a qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência que resulta em falha ou má operação do equipamento dos consumidores ([DUGAN et al., 2004](#)).

Segundo a literatura internacional, [VTCDs](#) constituem variações nos valores de referência das tensões (valor eficaz) com duração inferior a um minuto e geralmente causadas por curtos-circuitos, operação de cargas com elevada requisição de corrente ou perda intermitente de conexões (condutores abertos) ([DUGAN et al., 2004](#)). Tais variações podem ser classificadas como instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo do intervalo de duração.

No entanto, a [ANEEL](#), por meio do Módulo 8 do [PRODIST](#) amplia o intervalo de duração das [VTCDs](#) para um limite não superior a 3 minutos ([ANEEL, 2021](#)). A Tabela 1

traz um resumo da categorização das VTCDs segundo o Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD.

| Classificação | Denominação | Duração da Variação | Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência |
|-------------------------------|--|--|--|
| Variação Momentânea de Tensão | Interrupção Momentânea de Tensão - IMT | Inferior ou igual a 3 segundos | Inferior a 0,1 p.u. |
| | Afundamento Momentâneo de Tensão - AMT | Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u. |
| | Elevação Momentânea de Tensão - EMT | Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos | Superior a 1,1 p.u |
| Variação Temporária de Tensão | Interrupção Temporária de Tensão - ITT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento Temporária de Tensão - ATT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u. |
| | Elevação Temporária de Tensão - ETT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Superior a 1,1 p.u |

Fonte: (ANEEL, 2021)

Conforme observado na Tabela 1, as VTCDs apenas são classificadas em momentâneas ou temporárias no Módulo 8 do PRODIST. Tais variações podem ser denominadas de acordo com o efeito na amplitude da tensão em relação à tensão de referência como interrupção de curta duração, elevação de tensão (*swell*) e afundamento de tensão (*voltage sags* ou *voltage dips*).

Entende-se por afundamento de tensão a redução momentânea ou temporária na amplitude da tensão eficaz em relação à tensão de referência, dentro de uma faixa limite, em um dado período (ARGENTA, 2013). Logo, pode-se afirmar que esse fenômeno é observado como uma subtensão de curta duração no fornecimento de energia (ZAPPE,

2016).

De acordo com [Bollen \(2000\)](#), o afundamento de tensão é uma redução na amplitude da tensão de fornecimento, seguida do reestabelecimento da tensão normal de operação, após um curto período. Já [Olguin \(2005\)](#), descreve a variação como um distúrbio eletromagnético multidimensional determinado, principalmente, pela magnitude e duração.

Fazendo-se uma análise a respeito das principais referências do tema, observa-se que não há um consenso quanto aos limites de tensão e período desse defeito. A literatura internacional traz duas interpretações distintas: a primeira estabelecida pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* e a segunda pela *International Electrotechnical Commission (IEC)*.

O [IEEE](#), em sua Norma [Std.1159 \(2019\)](#), define afundamento de tensão (utiliza-se do termo em inglês *voltage sag*) como uma redução do valor da tensão eficaz entre 0,1 a 0,9 p.u., durante um período de tempo de 0,5 ciclo a 1 minuto, classificando-o em três categorias:

- Instantâneos: entre 0,5 ciclo a 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos a 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos a 1 minuto.

As magnitudes avaliadas nas considerações do [IEEE](#) são feitas em relação à tensão remanescente do sistema, ou seja, após a ocorrência do defeito; para um sistema com barras operando em *flat* numa condição pré-falta (1,0 p.u.), por exemplo, um afundamento de tensão de 0,8 p.u. significa uma queda de 0,2 p.u.; além disso, convém destacar que intensidades inferiores a 0,1 p.u. são tratadas como interrupção pela Norma [Std.1159 \(2019\)](#).

A [IEC](#), através da Norma [Std.61000-4-30 \(2015\)](#), se refere a afundamento de tensão (utiliza-se do termo em inglês *voltage dip*) como sendo a redução do valor da tensão eficaz entre 0,01 a 0,90 p.u., durante o período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo a 1 minuto.

No Brasil, a [ANEEL](#) conceitua o fenômeno afundamento de tensão, por meio do Módulo 8 do [PRODIST](#), como uma redução da tensão de 0,1 a 0,9 p.u., durante um período de 1 ciclo a 3 minutos; adicionalmente, o [PRODIST](#) classifica os afundamentos em Afundamento Momentâneo de Tensão ([AMT](#)) (entre 1 ciclo a 3 segundos) e Afundamento Temporário de Tensão ([ATT](#)) (entre 3 segundos a 3 minutos). Além disso, assim como o [IEEE](#), a [ANEEL](#) também irá considerar valores eficazes de tensão inferiores a 0,1 p.u. no grupo das interrupções temporária de tensão ([ANEEL, 2021](#)).

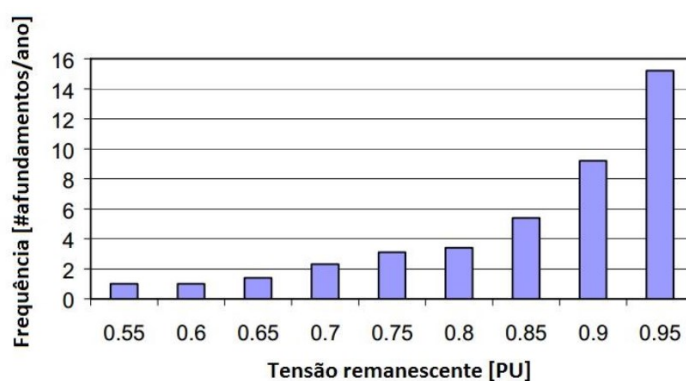
3.1.2 Índices de Afundamentos de Tensão (SARFI-x)

Dentre as diversas propostas de indicadores disponíveis para avaliar afundamentos de tensão, considerar-se-á, neste trabalho, a metodologia proposta pelo Electric Power Research Institute (EPRI)/ Electrotek Concepts, Inc. (ELECTROTEK) (BROOKS et al., 1998), que define o índice SARFI (IEEE-STD.1564, 2004). Tal indicador fornece, basicamente, com qual frequência a amplitude de um barramento fica abaixo de um determinado limite, no período de um ano (OLIVEIRA, 2008) (ZAPPE, 2016).

Neste caso, considera-se uma abordagem menos rigorosa, uma vez que são englobados não somente as ocorrências relacionadas a afundamentos como também as interrupções de curta duração no SEP; não obstante, a abordagem se revela interessante do ponto de vista da carga sensível, visto que todas as subtensões remanescentes abaixo de um determinado valor irão causar diversos problemas a estas cargas (OLGUIN, 2005).

Conforme discutido por Leborgne (2007), há dois tipos de indicadores SARFI: o SARFI-X e o SARFI-curva. O SARFI-X descreve uma certa amplitude X (ou $X\%$), que considera afundamentos e interrupções com magnitude inferior a X p.u. ou $X\%$ da tensão de referência. Comumente costuma-se escolher o SARFI-90 que exhibe o número de afundamentos e interrupções com magnitude até 0,9 p.u. ou 90% da tensão de referência. O SARFI-curva revela o número de eventos abaixo de uma curva de sensibilidade de referência e não será utilizado neste estudo. Nas análises apresentadas no Capítulo 5 serão feitas considerações tanto a respeito do SARFI-90 quanto do SARFI-X. Na Figura 1 observa-se um histograma para a utilização do índice SARFI-X, em uma barra hipotética.

Figura 1 – Histograma SARFI-X de um barramento hipotético.



Fonte: Adaptado Zappe (2016).

Como esperado, a frequência acumulada tende a diminuir à medida que se considera um menor valor de comparação com a tensão de referência. Nos Capítulos 4 e 5 serão descritas as teorias e cálculos utilizados para a obtenção das análises estatísticas para

todas as barras do [SEP](#).

3.1.3 Origem dos Afundamentos de Tensão

Dentre as causas relacionadas ao surgimento de afundamentos de tensão, estão a partida de motores de grande porte ([BOLLEN, 1994](#)), energização de transformadores ([CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991](#)) e curtos-circuitos na rede ([ORTMEYER; HIYAMA; SALEHFAR, 1996](#)).

A grande maioria dos pesquisadores concordam que curtos-circuitos- causados pela quebra do dielétrico em sistema de isolamento ([OLGUIN, 2005](#))- estão entre as principais causas dos afundamentos de tensão na rede. Isso se explica sobretudo pela enorme extensão das linhas áreas de transmissão e de distribuição, sujeitas a fenômenos naturais, em sua grande maioria decorrentes das descargas atmosféricas, temporais e ventos que dão origem às chamadas faltas temporárias. As faltas temporárias normalmente não provocam danos permanentes ao sistema de isolamento, uma vez que o sistema é prontamente reestabelecido por meio de religamentos temporários ao passo que as faltas permanentes, provocadas por danos físicos em algum elemento de isolamento do sistema, necessitam da intervenção humana para o reestabelecimento da normalidade da operação do sistema ([BROWN, 2002](#)).

Esses problemas se tornam ainda mais agravados em sistemas de distribuição por eles serem desprovidos de cabos-guarda, em grande parte da sua extensão ([CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991](#)), ([CARVALHO FILHO, 2000](#)), ([LEBORGNE, 2005](#)). Em razão disso, percebe-se existência de uma intrínseca correlação da ocorrência de afundamentos de tensão com o índice ceráunico, dado pelo número de dias com trovoadas que ocorrem em um determinado local onde as linhas estão instaladas ([INPE, 2022](#)).

A duração de um afundamento de tensão causado por um curto-circuito transcorre durante o período de existência da falta; ou seja, desde o instante de início do curto-circuito até a atuação do sistema de proteção ou completa eliminação do fenômeno; conseqüentemente, diversas causas que dão origem a curtos-circuitos também são apontadas como originárias dos afundamentos ([CARVALHO FILHO, 2000](#)).

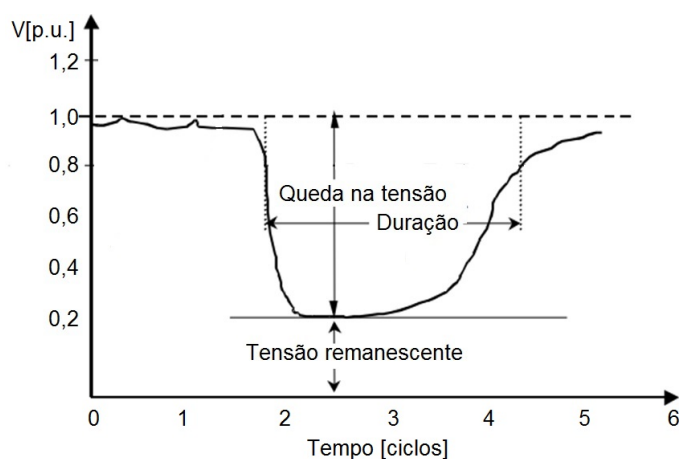
3.1.4 Parâmetros para Análise de Afundamentos de Tensão

De acordo com [Carvalho Filho \(2000\)](#), os principais parâmetros utilizados para descrever um afundamento de tensão monofásico são a amplitude e a duração, que em conjunto com a frequência de ocorrência, fornecem informações satisfatórias sobre o fenômeno. O mesmo autor destaca ainda que, em se tratando de afundamentos trifásicos, parâmetros adicionais podem ser incorporados como a assimetria e o desequilíbrio. Além disso, o comportamento dinâmico associado à forma de onda pode ser utilizado tanto para a caracterização de afundamentos de tensão monofásicos quanto trifásicos.

A amplitude do afundamento pode ser encontrada por simulação, a duração pelos valores típicos dos ajustes de proteções existentes ao passo que a frequência pelas taxas de falhas e dados de confiabilidade (RAMOS, 2009).

Na Figura 2, pode-se observar a variação da tensão RMS monofásica no tempo submetida a afundamento de tensão, onde são destacadas a duração do afundamento, bem como a sua amplitude, dada pela tensão remanescente.

Figura 2 – Tensão RMS no Tempo Durante a Ocorrência de um Afundamento de Tensão.



Fonte: Adaptado Olguin (2005).

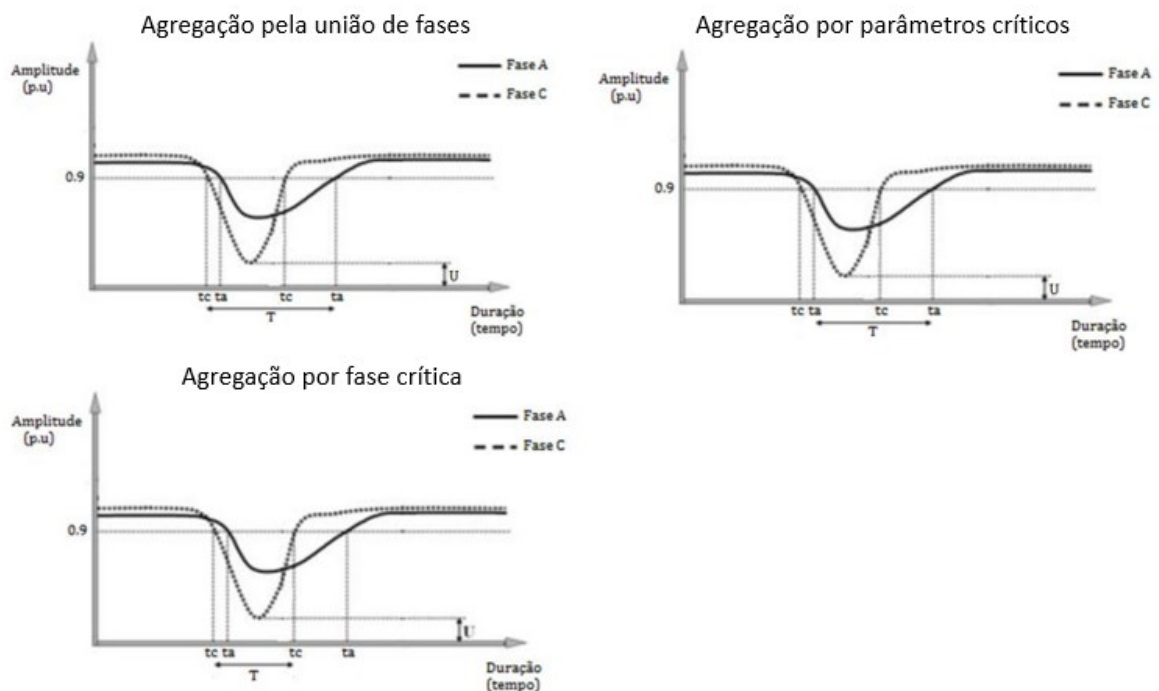
Em se tratando dos afundamentos de tensão em sistemas trifásicos, algumas dificuldades podem ser encontradas em razão da diferença temporal da intensidade e da duração nas três fases. De modo a contornar estes problemas, duas abordagens costumam ser utilizadas visando uma melhor descrição de eventos trifásicos: a agregação de fases e a agregação temporal. A agregação de fases consiste em atribuir um par de parâmetros (amplitude e duração) a uma ocorrência que ocasione registros do fenômeno em mais de uma fase (OLIVEIRA, 2015). A agregação temporal considera a agregação de eventos sucessivos, ocorridos em um curto intervalo temporal, devido às ações de religamentos automáticos das concessionárias diante de curtos-circuitos (CARVALHO FILHO, 2000).

Na Figura 3, encontram-se algumas propostas de agregação de fases (OLIVEIRA, 2015):

- Agregação pela união das fases - a duração da ocorrência é definida pelo tempo compreendido entre o instante em que a primeira das fases fica abaixo do limite estabelecido (0,90 p.u. para SARFI-90, por exemplo) e o tempo em que a última das fases passa a superar este limite;

- Agregação por parâmetros críticos - neste caso, calcula-se a duração do evento para cada uma das fases individualmente e toma-se a máxima duração entre as fases;
- Agregação pela fase crítica - a fase que apresentar a menor magnitude de tensão remanescente determina a duração do fenômeno, essa abordagem foi adotada para as metodologias de predição estocástica utilizadas nesta monografia, conforme será discutido no Capítulo 4.

Figura 3 – Propostas de Agregação de Fases para Afundamentos Trifásicos.



Fonte: Adaptado Oliveira (2015).

3.1.5 Cálculo da Amplitude das Tensões de Afundamentos

Para o cálculo da amplitude das tensões de afundamentos, as tensões remanescentes serão analisadas nas barras (tensões pós-falta) que deverão ser comparadas ao índice SARFI escolhido; para tal, deverão ser consideradas a tensão de pré-falta e a tensão puramente faltosa (GRAINGER; STEVENSON, 1994), conforme a Equação 3.1.

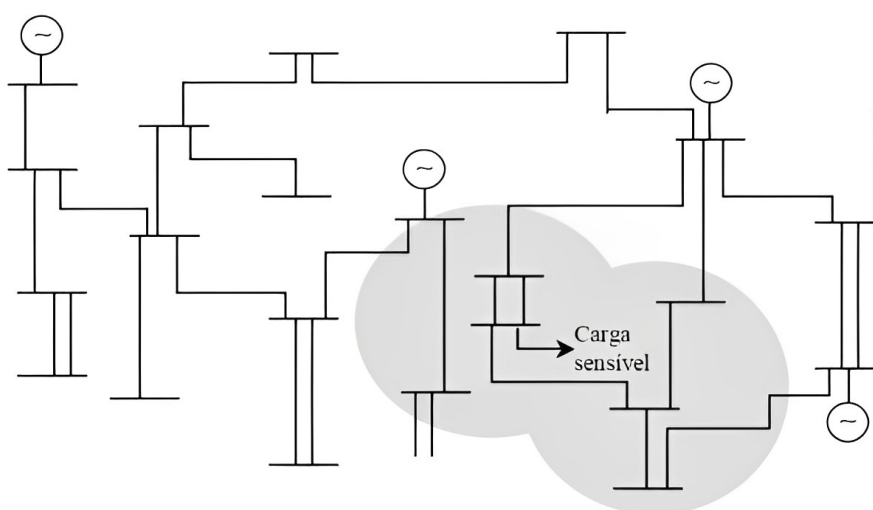
$$\vec{V} = \vec{V}_{pf} + \vec{V}_f \quad (3.1)$$

na qual: \vec{V} é a magnitude remanescente na barra (tensão pós-falta), \vec{V}_{pf} é a tensão pré-falta e \vec{V}_f a tensão oriunda da falta, cujo detalhamento dos cálculos são apresentados no Apêndice C.

3.1.6 Área de Vulnerabilidade

Entende-se por área de vulnerabilidade a região de um SEP suscetível a afundamentos de tensão, abaixo de um limite especificado, numa barra de análise, quando da ocorrência de um curto-circuito, o que pode provocar o desligamento da carga (RAMOS, 2009; HONORATO, 2014; MCGRANAGHAN; MUELLER; SAMOTYJ, 1991). A Figura 4 apresenta uma ilustração da área de vulnerabilidade de uma rede, com a presença de carga sensível.

Figura 4 – Esquemático Representativo Área de Vulnerabilidade e Carga Sensível.



Fonte: Adaptado IEEE (1995).

Utiliza-se recorrentemente o conceito de área de vulnerabilidade em análises de afundamentos de tensão, conforme observado na Figura 4. Essa pode ser traçada tomando-se por base um ponto de referência do SEP e a sensibilidade da carga nele instalada e a sua extensão é geralmente dada pela quilometragem das linhas de transmissão e distribuição a ela associada (LEBORGNE, 2003). A partir dessas informações, pode-se fazer estimativas de desligamentos de consumidores sensíveis, em um determinado período, o que é muito útil em se tratando de cargas mais críticas localizadas em sua maioria nas indústrias.

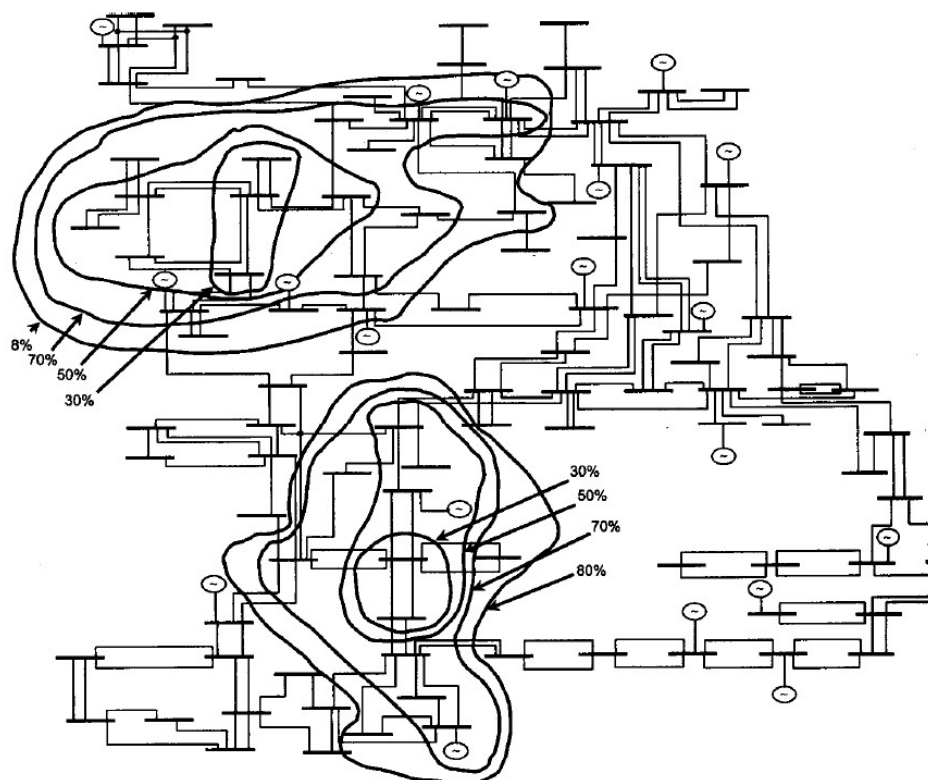
Do ponto de vista da indústria, o afundamento de tensão é mais frequente que as interrupções momentâneas e está diretamente correlacionado ao grau de sensibilidade das cargas industriais, logo, quanto maior a sensibilidade da carga, maiores as probabilidades desta falhar na ocorrência de afundamentos menos severos, provocados por faltas localizadas em regiões mais distantes, por exemplo. (RAMOS, 2009).

Leborgne (2003) destaca uma relação direta da topologia do sistema com a área

de vulnerabilidade, bem como a sensibilidade da carga, sendo que quanto maior for a sensibilidade do consumidor maior a extensão da área de vulnerabilidade e vice-versa. O autor menciona ainda que não necessariamente a “distância física”, mas sim a “distância elétrica”, entre o ponto da falta e carga sensível irão interferir na definição da zona de vulnerabilidade.

A Figura 5 deixa claro que o contorno da área de vulnerabilidade tende a ser modificado ou deformar-se no sentido das fontes geradoras; ou seja, espera-se das regiões que possuem fontes geradoras melhor desempenho com menor número de afundamentos de tensão por ano ao passo que nas regiões que não possuem geração maior concentração do defeito (QADER; BOLLEN; ALLAN, 1999).

Figura 5 – Representação da área de vulnerabilidade.



Fonte: (QADER; BOLLEN; ALLAN, 1999)

A determinação da área de vulnerabilidade é um ferramental extremamente útil em abordagens estocásticas, uma vez que se conhecendo os trechos da rede que não provocam afundamentos de tensão em cargas sensíveis, pode-se minimizar o tempo de simulação a partir da supressão dos trechos externos à área de vulnerabilidade (HONORATO, 2014).

3.2 Métodos de Simulação de Faltas

As ferramentas computacionais destinadas à determinação dos parâmetros e estatísticas dos afundamentos de tensão podem ser agrupadas em simulações da forma de onda, dinâmica e de faltas, sendo esta última a mais indicada em razão da grande maioria dos afundamentos serem decorrentes da ocorrência de faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) (SILVA, 2004).

Segundo Silva (2012), a avaliação de desempenho da rede com relação às VTCDs pode ser considerada em duas abordagens: histórica e preditiva; a primeira tem um custo de implementação relativamente elevado, uma vez que envolve a aquisição e instalação de medidores de QEE em diversos locais da rede de distribuição (e transmissão). Já a avaliação preditiva das VTCDs é caracterizada pela previsão de índices com base em diversos parâmetros, como topologia da rede elétrica, taxas de falhas transitórias e permanentes e resposta do sistema de proteção.

Silva (2012) destaca ainda que a avaliação preditiva pode ser realizada a partir de duas técnicas: Método de Enumeração de Estados (MEE) (MPF e Distância Crítica) e SMC. Neste sentido, serão feitas a seguir as principais considerações relativas às duas abordagens.

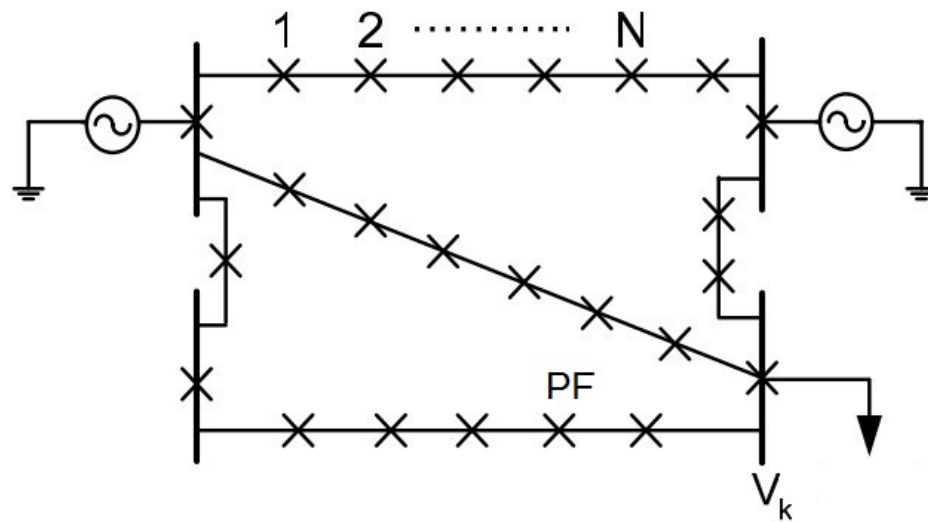
3.2.1 Método de Posição de Falta (MPF)

O MPF, também conhecido na literatura como método do curto-circuito deslizante, é baseado na técnica de simulação de faltas em diferentes pontos ao longo do sistema elétrico, principalmente nas linhas de transmissão e de distribuição, estimando a tensão remanescente nas barras. Trata-se de uma abordagem estocástica baseada nos resultados obtidos a partir de programas de simulações de curtos-circuitos, como o ANAFAS (CEPEL, 2022).

Essa metodologia se propõe a avaliar a influência da posição de ocorrência do defeito tanto na amplitude como na duração da falta (CARVALHO FILHO, 2000), sendo bastante direto para determinar o número esperado de afundamentos de tensão (BOLLEN, 2000). Cada local de falta, assim como a amplitude de afundamento, são associados a uma frequência de ocorrência, permitindo uma análise estatística a partir das tensões remanescentes nas barras avaliadas (LEBORGNE, 2007).

Na Figura 6, encontra-se ilustrado um esquemático de um sistema elétrico em que o Método das Posições de Faltas é utilizado. Pode-se observar que existem diversos pontos de simulação de curto-circuito ao longo da linha, na qual "PF" é uma das posições de falta, que varia de 1 até N ; e, V_K é a tensão do afundamento na barra "k".

Figura 6 – Esquemático do sistema indicando posições de falta para estimação de afundamentos de tensão.



Fonte: Adaptado de [Leborgne \(2005\)](#).

[Bollen \(2000\)](#) resume descritivamente o método nos seguintes passos:

- Escolha da área do sistema onde as faltas serão simuladas;
- Divisão dessa região em pequenos segmentos, de sorte que uma falta em cada uma dessas partes resulte em afundamentos com características semelhantes, cada segmento é representado por uma posição de falta em um modelo de circuito elétrico do SEP;
- Para cada posição de falta, a frequência de curto-circuito é determinada, sendo normalmente as taxas de ocorrência de faltas anuais das linhas de transmissão divididas pelo número de segmentos em que as linhas foram seccionadas, dessa forma, todas as posições de falta em uma linha tem a mesma taxa de falta;
- Cálculo das características de afundamento para cada posição de falta, utilizando um modelo elétrico adequado para a rede e método de cálculo apropriado. A escolha dependerá da disponibilidade de ferramentas e das características que precisam ser calculadas;
- Combinação dos resultados das duas etapas anteriores (características de afundamento e frequência de ocorrência) para obter informações estocásticas sobre o número de afundamentos com características dentro de certas faixas.

3.2.2 Método pela Simulação de Monte Carlo (SMC)

Diferente da abordagem anterior, o Método SMC traz como proposta principal a inserção de resultados que considerem tantas incertezas quanto possível (HONORATO, 2014). Por ser um método estatístico, em que as variáveis são escolhidas aleatoriamente, se utiliza de um número grande de simulações. Neste sentido, várias iterações devem ser realizadas, de sorte que em cada uma dessas os índices desejados sejam recalculados até que o método consiga a sua estabilidade chamada também de estabilidade de Monte Carlo (AMASIFEN, 2008).

O valor esperado da simulação (\bar{x}) pode ser calculado pela média dos resultados quando o número de simulações (N) tende a infinito, a partir da Equação 3.2:

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \quad (3.2)$$

sendo x_i , o resultado da "i-ésima" simulação.

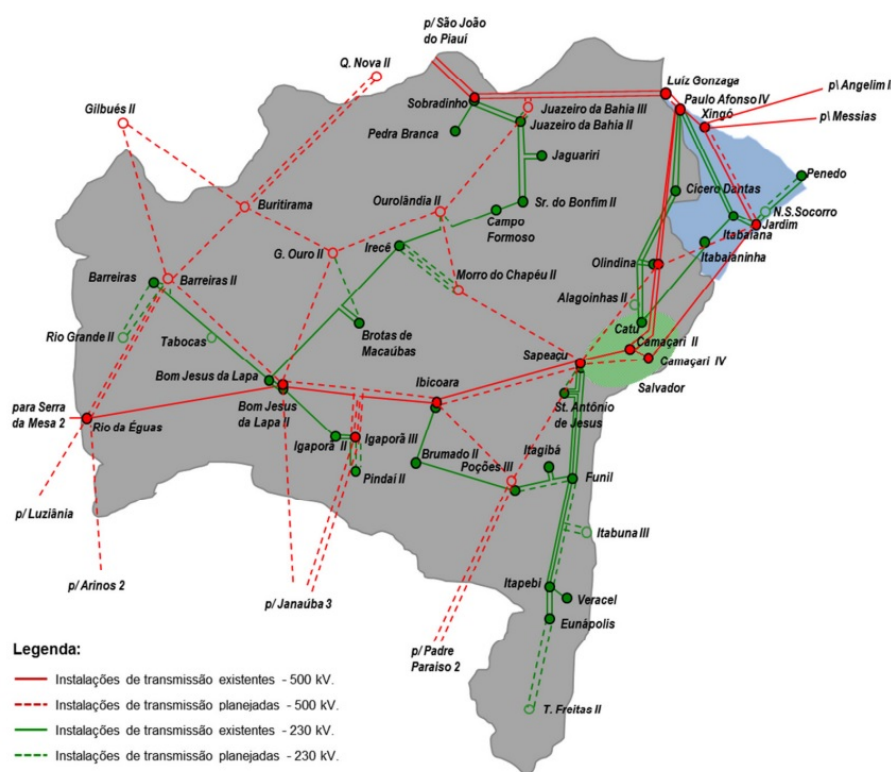
Ao se utilizar da estratégia SMC deve-se considerar, sobretudo, o número necessário de simulações para que os resultados convirjam para os valores esperados. Para tal, compare-se o resultado com valor esperado e realizam-se tantas simulações quanto necessário para que todos os resultados convirjam para valores estáveis. Na hipótese de simulação de eventos raros ou de baixa probabilidade de ocorrência, faz-se necessário um longo período de simulação (que pode chegar a vários anos) para que a ocorrência do evento em questão torne-se possível (SILVA, 2012).

De acordo com Silva (2012), a SMC pode ser considerada em duas abordagens: sequencial e não-sequencial. Contudo, às duas técnicas utilizam de análise preditiva para sistemas de distribuição, sendo a primeira aplicada quando se deseja representar os aspectos temporais intrínsecos à operação do SEP como a duração e a taxa de falha. Já a técnica não-sequencial é aplicável quando não é necessário representar os aspectos temporais do sistema para o caso de eventos exclusivos e não dependentes dos estados passados. A metodologia não-sequencial é caracterizada pela escolha do estado dos parâmetros de maneira aleatória sem considerar a ordem em que estes ocorrem e pela combinação final destes para a obtenção do estado do sistema. Esta é realizada de acordo com dois paradigmas: a amostragem de estados e a amostragem do número de falhas. A amostragem de estados prevê a utilização de um grande número de simulações quando o índice probabilístico via enumeração torna-se elevado sendo amplamente utilizada em estudos de confiabilidade de sistemas compostos (geração e transmissão). Já a amostragem do número de falhas se utiliza da distribuição de Poisson para um componente i qualquer a partir de dois parâmetros: a taxa de falha (λ) e o período de estudo (T) que combinados irão gerar um número aleatório com distribuição de Poisson a partir de um algoritmo que após a sua finalização conterà o número de eventos observados na janela temporal do estudo simulado.

3.3 Rede Básica (RB) da Bahia

Segundo a Resolução Normativa nº 66/1999 da ANEEL (BRASIL, 1999), atualizada pela Resolução Normativa nº 67/2004 (BRASIL, 2004), a Rede Básica (RB) é composta por LTs com tensão superior ou igual a 230 kV e transformadores cuja tensão no enrolamento de alta seja superior a 230 kV, com exceção das linhas de uso exclusivo compartilhadas por Consumidores Livres ou Agentes de Geração de Energia. Na Figura 7, apresenta-se o diagrama unifilar da RB da Bahia que é formada por LTs e barramentos com valores de tensão de 230 e 500 kV.

Figura 7 – Diagrama unifilar da RB da Bahia.



Fonte: EPE (2017).

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é formado por alguns sistemas isolados nos estados do Amapá, Amazonas e Roraima e pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que corresponde à rede elétrica responsável pela interligação dos demais estados do país. O SIN é composto por quatro subsistemas: Norte, Nordeste, Sudoeste/Centro-Oeste e Sul/Mato Grosso do Sul. O Sistema Nordeste é formado pelas áreas: Oeste, Norte, Leste, Centro, Sul e Sudoeste, sendo a Bahia atendida pelas três últimas (ONS, 2022a; NEGREIROS, 2011). Nas seções a seguir, serão apresentadas abordagens gerais para cada uma dessas regiões, destacando-se o suprimento do Estado da Bahia. Discutir-se-á ainda, brevemente,

a Região Metropolitana de Salvador em conjunto com o Polo Petroquímico de Camaçari, em razão de sua notória expansão e relevância econômica dos últimos anos, com aumento expressivo da concentração de cargas sensíveis.

3.3.1 Sistema Nordeste: Área Centro

A área Centro do Sistema Nordeste é formada pela região de localização das usinas hidrelétricas de Sobradinho (Bahia (BA)), Luiz Gonzaga (Pernambuco (PE)), Xingó (Alagoas (AL)/Sergipe) e do Complexo de Geração de Paulo Afonso (BA). A integração das instalações da RB com o sistema de distribuição da Neoenergia Pernambuco, Equatorial Alagoas, Energisa Sergipe e Neoenergia Coelba é feita por meio da SE 230/69 kV Abaixadora de Cícero Dantas (BA) (ONS, 2022d).

3.3.2 Sistema Nordeste: Área Sudoeste

A Área Sudoeste do subsistema Nordeste atende a região Oeste do Estado da Bahia, sendo suprida por um longo sistema em 230 kV que parte da Usina Hidrelétrica (UHE) Sobradinho, passando pelas SEs Juazeiro II, Senhor do Bonfim, Irecê, Bom Jesus da Lapa até a SE Barreiras. Integram ainda a área Sudoeste parte da LT Sudeste-Nordeste, LT 500 kV Serra da Mesa-Camaçari II e trecho Serra da Mesa-Bom Jesus da Lapa II com dois autotransformadores 500/230 kV-300MVA na SE Bom Jesus da Lapa II (ONS, 2022d).

A integração da malha de transmissão da RB com o sistema de distribuição é realizada pela Neoenergia Coelba por meio das SEs 230/69 kV Senhor do Bonfim, Bom Jesus da Lapa e Juazeiro II, sendo a última supridora das cargas da Neoenergia Coelba e da Neoenergia Pernambuco, e das SEs 230/138/69 kV de Irecê e Barreiras (ONS, 2022d).

3.3.3 Sistema Nordeste: Área Sul

A área Sul do Sistema Nordeste compreende o estado de Sergipe e aproximadamente 88 % do consumo do estado da Bahia. É atendida através das LTs da RB em 500 kV e 230 kV que partem das usinas hidrelétricas de Luiz Gonzaga, Complexo Paulo Afonso e Xingó, além da linha de interligação Sudeste-Nordeste (LT 500 kV Serra da Mesa-Rio das Éguas- Bom Jesus da Lapa II-Ibicoara-Sapeaçu-Camaçari II). No estado da Bahia, a RB da área Sul subdividi-se nas áreas metropolitana de Salvador e extremo Sul da Bahia (NEGREIROS, 2011).

A integração da malha de transmissão da RB com o sistema de distribuição de energia elétrica é feita pela Neoenergia Coelba por meio das SEs 500/230/69 kV Camaçari II, 230/69 kV Catu, Governador Mangabeira, Santo Antônio de Jesus, Tomba, Brumado, Jacaranga, Cotegipe, Pituaçu e Matatu, estas quatro últimas localizadas na

região metropolitana de Salvador, além da Usina Funil e da SE 230/138 kV Eunápolis no extremo sul do estado (ONS, 2022d).

3.3.4 Região Metropolitana de Salvador e Polo Petroquímico de Camaçari

Segundo Negreiros (2011), a região metropolitana de Salvador, em conjunto com o polo petroquímico de Camaçari concentram 56 % do consumo do estado, realizado pelas LTs em 500 kV e 230 kV ligadas ao Complexo de Paulo Afonso, Luiz Gonzaga e Xingó, dessas usinas partem 3 circuitos em 500 kV que convergem para a SE Camaçari II 500/230/69 kV que é responsável pelo atendimento às cargas de toda área metropolitana de Salvador além das cargas do Polo Petroquímico de Camaçari e do Complexo Industrial de Aratu. Além disso, parte da SE Camaçari II sete circuitos em 230 kV alimentando respectivamente as SEs 230/69 kV Jacarangá (2 circuitos), Cotegipe (dois circuitos), Pituauçu (dois circuitos) e Matatu (um circuito) responsáveis pelo atendimento aos sistema de distribuição da região (ONS, 2022d).

Na SE de Catu chegam três circuitos de 230 kV oriundos de Paulo Afonso com pontos intermediários nas SEs 230/69 kV (Cícero Dantas) e Itabaianinha, esta última localizada no estado de Sergipe a 298 km de Paulo Afonso. Da SE Catu derivam dois circuitos 230 kV para a SE Camaçari II e um terceiro 230 kV para a SE Governador Mangabeira. Das SEs Camaçari II e Catu partem três circuitos para a SE Governador Mangabeira, sendo dois oriundos de Camaçari II e outro da SE Catu. Da SE Governador Mangabeira partem três circuitos em 230 kV para Sapeaçu e desta para a Usina de Funil, sendo um destes seccionado em Santo Antônio de Jesus. De Funil segue-se um circuito em 230 kV para a SE Brumado e dois circuitos 230 kV para a SE Itapebi e daí para a SE Eunápolis, última estação da RB no extremo sul da Bahia(ONS, 2022d).

3.4 Matriz de Energia Elétrica da Bahia e sua Expansão

Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), a Bahia possui 14,72 GW de potência outorgada e a geração de energia é predominantemente do tipo eólica - representando 40,54% do total estadual, isto é evidenciado na Tabela 2 que apresenta a divisão da matriz de energia do estado. Assim como o Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, o estado da Bahia tem se firmado como um dos grandes produtores de energia eólica no País, sobretudo nas regiões central e sul do estado (MME, 2021).

A Tabela 3 ilustra as unidades geradoras previstas nos próximos anos, tanto em fase de construção como aguardando o início das obras, contratadas com base no PDE-2031. Nota-se uma espera de aumento em aproximadamente 86% da potência instalada, onde menos de 1% dos novos empreendimentos serão de Pequena Central Hidrelétrica (PCH),

sendo a maioria de Central Geradora Hidrelétrica (CGH) seguidas das Usinas Fotovoltaicas (UFV).

Tabela 2 – Capacidade de geração de energia elétrica da Bahia.

| Tipo | Quantidade[un] | Potência [MW] | [%] |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| Central Geradora Hidrelétrica | 19 | 13,475 | 0,09 |
| Central Geradora Eólica | 227 | 5.968,41 | 40,54 |
| Pequena Central Hidrelétrica | 7 | 89,75 | 0,61 |
| Usina Fotovoltaica | 44 | 1.354,74 | 9,21 |
| Usina Hidrelétrica | 10 | 5.612,57 | 38,17 |
| Usina Termelétrica | 105 | 1.682,24 | 11,38 |
| Total | 412 | 14.721,18 | 100 |

Fonte: SIGA (ANEEL, 2022).

Tabela 3 – Unidades geradoras previstas na Bahia.

| Tipo | Quantidade[un] | Potência [MW] | [%] |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| Central Geradora Eólica | 176 | 5.985,26 | 48,41 |
| Pequena Central Hidrelétrica | 1 | 15,50 | 0,12 |
| Usina Fotovoltaica | 153 | 5.958,08 | 48,16 |
| Usina Termelétrica | 5 | 403,93 | 3,31 |
| Total | 335 | 12.362,77 | 100 |

Fonte: SIGA (ANEEL, 2022).

3.5 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram discutidos os principais conceitos necessários para a caracterização dos afundamentos de tensão, seja qualitativamente, com a definição dos parâmetros que descrevem o defeito, às abordagens de previsões estocásticas disponíveis na literatura que tem como objetivo a estimativa do quantitativo anual de ocorrência do defeito.

Além disso, trouxe o conceito relevante de mapeamento de zona de vulnerabilidade, que permite identificar regiões de maior suscetibilidade de ocorrência do fenômeno orientando um olhar mais atento por parte das empresas de energia e consumidores.

As considerações de metodologia estocástica e de modelagem da rede serão aprofundadas no Capítulo 4 que trará o ferramental chave utilizado para a obtenção dos resultados apresentados no Capítulo 5.

4 Metodologia

Este capítulo apresenta as considerações relativas à modelagem da rede, bem como ferramental matemático que possibilitou as análises estatísticas do estudo de caso, cujos resultados serão discutidos no Capítulo 5.

4.1 Aquisição dos dados do SIN

A realização de simulações computacionais próximas da realidade encontrada no [SEP](#) da Bahia foi possível a partir da obtenção de dados de fontes confiáveis e de relevância significativa. Neste sentido, utilizou-se, principalmente, a Base de Dados de Curto-Circuito ([BDCC](#)) disponibilizada pela [EPE](#) onde estão detalhadas as informações de barras, impedâncias mútuas e impedâncias de sequência positiva e zero das linhas de transmissão e dos transformadores que integram o [SIN](#) ([EPE, 2022](#)). A [BDCC](#) faz parte das publicações periódicas da [EPE](#) e até a data de publicação deste trabalho foi obtida no contexto do [PDE-2031](#), disponibilizado em Novembro de 2021.

Adicionalmente, foram feitas análises a partir da base de estudos de curtos-circuitos do [PDE-2025](#), uma vez que esta base foi a última onde foram disponibilizados parâmetros relativos ao ano 2022, considerado como o "cenário atual", nas primeiras análises dessa monografia, pautadas pelo Método das Posições de Faltas. A [SMC](#) permitiu previsões futuras escolhendo-se apenas uma das base de estudos, devido ao maior número de simulações.

A escolha da base de curtos-circuitos dependerá da barra de interesse, uma vez que algumas correspondem a empreendimentos futuros, ao passo que outros deixam de existir. Logo, é indispensável mencionar que as análises por [SMC](#) ou Método das Posições de Falta representam um ferramental matemático que desconsidera características dinâmicas próprias do sistema, como as mudanças de infra-estrutura do [SIN](#), por exemplo, cuja previsibilidade pode ser prevista com a troca da base de estudos.

Maiores detalhes das considerações dos estudos de curto-circuito da [BDCC](#) podem ser consultados na nota explicativa disponibilizada no Apêndice C.

Além disso, fez-se necessário um cadastro no Portal SINtegre ([ONS, 2022b](#)), canal colaborativo de comunicação do [ONS](#) com os Agentes. No portal, é disponibilizada periodicamente a Base de Dados de Operação para Estudos de Curto-Circuito ([ONS, 2022c](#)) alternativa, além da ferramenta gráfica de Dados Técnicos do Sistema Interligado Nacional ([SINDAT](#)) ([ONS, 2022e](#)). Nessa base estão reunidas as informações relevantes a respeito do cadastro de usinas, subestações e linhas de transmissão integrantes da rede

de operação do [ONS](#). Convém mencionar que em razão do comprimento da linha de transmissão não ser imprescindível para a representação no programa de curto-circuito, muitos circuitos cadastrados na base de curto-circuito não possuem esse dado disponível, o que pode ser obtido rapidamente por meio do [SINDAT](#).

Adicionalmente, destaca-se que as informações reportadas ao cadastro de usinas em operação na [RB](#), bem como as destinadas às ampliações da rede de transmissão e de novas subestações pode ser obtida nos Casos de Referência do Plano de Ampliações de Reforços ([PAR](#)) que até foi disponibilizada no horizonte 2022-2026 ([ONS, 2022d](#)), até a data de publicação desta monografia. O [PAR](#) integra as Diretrizes e os Casos de Referência para Estudos de Acesso. Periodicamente, o [ONS](#) disponibiliza as bases de dados para estudos elétricos de fluxo de potência que consideram os despachos de geração mais críticos. Essas bases são comumente utilizadas em estudos específicos de acesso ao sistema de transmissão, no entanto, para efeitos de simplificação, todas as análises reportadas foram feitas na condição de "flat", ou seja, com as tensões de pré-falta em 1 p.u.

4.2 Considerações da Implementação e Simulação no ANAFAS

Após a obtenção e o tratamento dos dados técnicos de entrada referentes ao [SEP](#) da Bahia, procedeu-se à implementação da modelagem e a simulação no *software* [ANAFAS](#), sendo considerados os seguintes critérios relativos à implementação dos elementos do sistema ([SILVA, 2004](#)):

- Geradores: representados por uma tensão constante atrás de uma impedância;
- Linhas de Transmissão: modeladas pelo modelo “ π concentrado”, desprezando-se os elementos *shunt* independente do seu comprimento e classe de tensão. As impedâncias mútuas entre as linhas, por ser um parâmetro de fácil acesso na base de dados do [ONS](#), foram consideradas;
- Transformadores: representados pelas impedâncias de sequência positiva e zero. O grupo vetorial deverá ser considerado, em função do tipo de conexão dos enrolamentos;
- Cargas: não foram representadas neste estudo. Quando houver necessidade, devem ser modeladas através do modelo de impedância constante;
- Capacitores série: não foram considerados na modelagem deste trabalho. Podem ser representados através de sua reatância capacitiva;
- Capacitores e reatores de barra: não foram representados. Quando necessário, podem ser modelados por impedâncias ligadas à terra ou não, dependendo do tipo de conexão do equipamento.

Optou-se pela realização de simulações apenas na **RB** da Bahia, que é representada por barras com tensões de 230 kV e 500 kV. No entanto, é preciso levar em consideração que diversas unidades geradoras não estão conectadas diretamente a barramentos com estas tensões ([HIRT, 2015](#)). Neste sentido, a utilização dos equivalentes de rede de cada uma das barras foi indispensável para a obtenção de resultados mais confiáveis. Foram consideradas tanto as interligações das barras da **RB** com os demais barramentos do **SEP** da Bahia, como também aos dos outros estados do Brasil, uma vez que o **ANAFAS** permite a análise de áreas específicas do **SEP** levando-se em consideração toda a circunvizinhança cujos parâmetros são omitidos nos resultados dos relatórios individuais através do comando "NBAC", descrito no Apêndice **E** deste trabalho.

Adicionalmente, dados pertinentes às informações das unidades geradoras ligadas a estes barramentos, foi possível de ser obtida a partir do **PAR 2022-2026** ([ONS, 2022d](#)), mas é preciso destacar que a grande maioria das unidades geradoras informadas para a **RB**, nesta documentação, foi informada para Central Geradora Eólica (**CGE**) e **UFV** nas mesorregiões Oeste e Sudoeste da Bahia, além de **PCH**, presentes nos equivalentes de rede da **BDCC** da **EPE**.

Não obstante, convém destacar que a grande maioria dos estudos relacionadas à análise de afundamentos de tensão tem por prática considerar sistemas *flat*, ou seja, sem carga, onde as tensões de pré-falta são consideradas como iguais a 1 p.u. ([SILVA, 2004](#); [HIRT, 2015](#); [ARGENTA, 2013](#); [ZAPPE, 2016](#)). Desta forma, este estudo também fez tal consideração, visto que essa simplificação dos cálculos apresenta de um erro relativo, considerado satisfatório ([ARGENTA, 2013](#)).

Os dados completos utilizados tanto para a modelagem quanto para a simulação e tratamento dos resultados obtidos se encontram no Apêndice **A** no contexto do Curto-Circuito Máximo das barras do **SIN** considerando-se o **PDE-2031** e no Apêndice **B** para Curto-Circuito Máximo relativas ao **PDE-2025**.

4.3 Obtenção de Parâmetros pelo Método das Posições de Faltas

O Método das Posições de Falta foi aplicado à **RB** localizada na Bahia correspondentes aos anos 2022 e 2025, cujos dados se encontram, respectivamente, nos Apêndices **A** e **B**, deste trabalho.

Foram simuladas uma falta para cada linha de transmissão e registraram-se as tensões de pós-falta para as barras de interesse. Esse procedimento foi realizado para faltas sólidas (francas) de natureza Fase-Terra (**FT**), Fase-Fase (**FF**), Fase-Fase-Terra (**FFT**) e Fase-Fase-Fase (**FFF**). Após tratamento dos dados, via *software* MathWorks Matlab ([MATHWORKS, 2022](#)), pode-se obter os gráficos apresentados na seção 5.1 do Capítulo 5.

A posição da falta foi convencionada em metade de cada linha de transmissão do sistema e as tensões de pré-falta nas barras foram consideradas na condição de *flat* (1 p.u.) evitando-se a necessidade de execução prévia de fluxo de potência; convém destacar que estas considerações simplificam significativamente os cálculos, apesar de apresentar um erro relativo, sendo de maneira geral considerado satisfatório sendo adotada na maior parte dos trabalhos acadêmicos que utilizam o MPF (LEBORGNE, 2007); (ARGENTA, 2013); (SILVA, 2004).

4.3.1 Frequência de Ocorrência

Considera-se frequência de ocorrência de afundamentos de tensão o número de vezes que estes eventos ocorrem em um determinado período temporal de monitoramento do barramento, geralmente dado em afundamentos por ano (IEEE, 2007). Para tal, faz-se necessária a conexão de um medidor a uma barra do sistema para monitoração da combinação dos parâmetros amplitude e duração, e após o período de um ano, tem-se a informação do desempenho da mesma (DUGAN et al., 2004).

Na Tabela 4, são apresentados resultados de um estudo de monitoramento de afundamentos de tensão em um determinado barramento, baseada na distribuição de Poisson (CONRAD; LITTLE; GRIGG, 1991). Observa-se a necessidade de maiores intervalos de monitoração para resultados estatísticos mais confiáveis; no entanto, nota-se que à medida que o evento ocorre com menor frequência, medições *in loco* tornam-se impraticáveis. Convém mencionar ainda que tais registros necessitam de grandes recursos financeiros com a implantação de sofisticadas redes de medição para realizá-las (ZAPPE, 2016).

Tabela 4 – Intervalo mínimo de monitoramento do SEP para uma determinada precisão.

| Frequência do evento | 50% de precisão | 90% de precisão | 98% de precisão |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 por dia | 2 semanas | 1 ano | 25 anos |
| 1 por semana | 4 meses | 7 anos | 200 anos |
| 1 por mês | 1 ano | 30 anos | 800 anos |
| 1 por ano | 16 anos | 400 anos | 10.000 anos |

Fonte: Adaptado de Bollen (2000).

Para estimativas adequadas da ocorrência de afundamentos de tensão na rede, é de extrema importância informações estatísticas a respeito da frequência de ocorrência das faltas no sistema, quanto mais próximo ao real estes dados estiverem mais precisa será a estimativa (CABRAL, 2010). Na Tabela 5 é apresentada uma estimativa percentual com base na natureza da falta (CARVALHO FILHO et al., 2002).

Desta forma, é possível perceber que o número de faltas/ano, dado para cada 100 km de linha, depende dos diferentes tipos de falta da qual esta poderá sofrer influências. Além do nível de tensão da mesma, cada um destes parâmetros irá representar uma

Tabela 5 – Taxas de faltas em Linhas de Transmissão no Brasil.

| Tensão[kV] | faltas/100km.ano | FFF[%] | FFT[%] | FF[%] | FT[%] |
|------------|------------------|--------|--------|-------|-------|
| 500 | 2,09 | 1 | 4 | 1 | 94 |
| 440 | 1,1 | 1 | 5 | 2 | 92 |
| 345 | 1,1 | 1 | 5 | 2 | 92 |
| 230 | 1,9 | 2 | 15 | 3 | 80 |

Fonte: Adaptado de [Carvalho Filho et al. \(2002\)](#).

taxa de ocorrência, em termos percentuais. Logo, fazendo-se as devidas ponderações do comprimento da linha, tipo de falta e nível de tensão, pode-se calcular a taxa de ocorrência anual da falta i através da Equação (4.1):

$$\lambda_i = F_i \cdot \frac{L_i}{100} \cdot C_i \quad (4.1)$$

na qual: F_i é o coeficiente faltas/100km.ano, obtido da Tabela 5; L_i é o comprimento da linha i , em km; e, C_i corresponde à porcentagem do tipo da falta, também dado na Tabela 5.

A taxa de ocorrência das faltas de um SEP pode ser representada por um vetor coluna $[\lambda]$ dado pela Equação 4.2.

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

sendo: λ_i , a taxa de ocorrência anual de faltas da posição de falta “ i ”, obtidos através de dados estatísticos de um determinado período. Neste sentido, ainda que os métodos de predição estocástica sejam amplamente utilizados a realização de monitoramentos ainda se faz necessária ([ZAPPE, 2016](#)).

Supondo-se uma barra “ k ” do SEP, para cada posição de falta “ i ” pode-se representar os resultados da taxa de ocorrência do evento, em um dado período, que irá depender das características físicas e natureza da falta, como visto na Equação 4.1 da seção 4.3.1. Tal representação é ilustrada na Tabela 6, onde a primeira coluna indica a tensão de pós-falta na barra “ k ”, devido à falta na posição “ i ” e a segunda é o vetor λ , número de vezes ao ano, que é esperado que aconteça uma falta na posição “ i ” ([ZAPPE, 2016](#)).

Tabela 6 – Tensões remanescentes na Barra “k” e taxas de ocorrência devido à falta “i”.

| Tensão remanescente(V_{ki}) | Taxa de ocorrência (λ_{ki}) |
|------------------------------------|--|
| V_{k1} | λ_{k1} |
| V_{k2} | λ_{k2} |
| \vdots | \vdots |
| V_{ki} | λ_{ki} |
| \vdots | \vdots |
| V_{kN} | λ_{kN} |

4.3.2 Magnitude das Tensões das Barras e Contagem dos Afundamentos de Tensão

A magnitude das tensões remanescentes nas barras, após a ocorrência de cada uma das faltas, pode ser calculada utilizando-se dos cálculos apresentados no Capítulo 3, esses valores podem ser armazenados em uma matriz chamada de matriz de afundamento (na literatura inglesa, $[\vec{V}_{sag}]$, onde o subíndice *sag* descreve "afundamento") que é representada pela Equação (4.3):

$$[\vec{V}_{sag}] = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1N} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{B1} & V_{B2} & \cdots & V_{BN} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A dimensão da matriz $[\vec{V}_{sag}]_{BN}$ é (B) x (N), na qual (B) é o número de barras observadas e (N) o número de pontos de faltas simuladas. Cada elemento desta matriz, V_k é a tensão remanescente na barra k devido a uma falta na posição i, que neste trabalho está situada na metade da linha de transmissão.

Após a simulação de todas as faltas, e o armazenamento das tensões de pós-falta na matriz de afundamentos, transforma-se $[\vec{V}_{sag}]$ em uma matriz binária $[\vec{V}_{sag_b}]$, *i.e.*, formada apenas por “0’s” e “1’s”, onde são atribuídos “1” se a V_{ki} correspondente ao elemento estiver dentro da faixa definida para o defeito e “0” se estiverem fora da faixa. Para os afundamentos de tensão, foi considerada a faixa definida pelo índice SARFI-90 apresentado na seção 3.1.2 do Capítulo 3, de sorte que todas as magnitudes cujo valor dentro da faixa se tornam “1” e as com magnitude acima ou abaixo da faixa tornam-se “0”. Logo, caso sejam somados todos os valores de uma coluna *i* de $[V_{sag_b}]$, por exemplo, ter-se-á o quantitativo de afundamentos causados por uma falta na posição *i*– com magnitude determinada pela faixa definida pelo SARFI adotado. Da mesma forma, se forem somados os valores da linha k da matriz $[V_{sag_b}]$, pode-se obter a quantidade de afundamentos na barra k- com magnitude definida pelo índice SARFI escolhido.

No entanto, apenas o quantitativo definido pela matriz $[V_{sagb}]$ não é o suficiente para se fazer uma predição adequada da taxa de ocorrência anual do defeito; neste sentido, deve-se considerar o vetor $[\lambda]$ formado pela taxa de ocorrência anual das faltas nas barras simuladas, conforme definido na seção 4.3.1 pela Equação 4.2, que traz a informação das estatísticas de ocorrência das faltas simuladas.

Multiplicando-se a matriz $[V_{sagb}]$ pelo vetor $[\lambda]$, obtém-se, portanto, um vetor coluna $[f]$ com a predição de número de faltas anuais em cada barra, de acordo com o índice de afundamento (SARFI) escolhido. Este vetor, representado pela Equação 4.4 tem dimensão $[B \times 1]$ e cada elemento f_k representa o SARFI-x na barra k (ZAPPE, 2016).

$$[f] = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ f_B \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A partir do que foi visto até aqui, tem-se o ferramental necessário para gerar os gráficos das análises estatísticas de afundamentos de tensão com base na simulação de faltas simétricas e assimétricas da rede, cujos resultados serão analisados na seção 5.1.

4.4 Obtenção de Parâmetros pelo Método de Monte Carlo

Para o tratamento estatístico e estocástico dos dados fez-se necessário implementar um algoritmo de SMC, em linguagem *Python* que executasse as simulações do ANAFAS em modo *batch*, otimizando as simulações. Novamente, foram utilizadas as bases de curto-circuito máximas relativas ao PDE-2025 e PDE-2031 correspondentes ao cenário dos anos 2022 e 2025, respectivamente.

O algoritmo de SMC foi replicado às bases de dados de curtos-circuitos relativas à RB no Estado da Bahia nos anos 2022 e 2025 (Apêndices A e B) e tiveram como motivação a tese de mestrado de Ramos (2009), com as devidas adaptações cujos passos necessários para implementação do código são descritos a seguir:

- Escolhe-se o número de cenários ou anos de simulação; neste trabalho, serão apresentados resultados para 1, 100 e 1000 anos (ou cenários);
- Obtém-se a quantidade de faltas previstas no sistema de acordo com a taxa de faltas de cada linha que o compõe, baseada nos níveis de tensão, a partir deste ponto é

possível obter a previsão do quantitativo de faltas que irão ocorrer no sistema em análise para cada cenário, correspondente a 1 ano em [SMC](#); nesta etapa é fundamental observar que o número de faltas por ano pode ser interpretada como uma variável estocástica que irá depender das informações de comprimento das linhas extraídas da base de dados da [EPE](#) e do [ONS](#). A Tabela 7 apresenta um descritivo matemático para a obtenção das taxas de falta das linhas (referidas à unidade de 1 km x ano) de acordo com os níveis de tensão. Logo, multiplicando-se os valores indicados na segunda coluna da Tabela 7 pelo comprimento da linha (em km) obtém-se a taxa individualizada para cada linha, que somadas resultaram em uma estimativa de aproximadamente 292 e 294 faltas que irão ocorrer nos sistemas correspondentes às redes básicas relativas aos anos 2022 ([PDE-2025](#)) e 2025 ([PDE-2031](#)), representadas nos Apêndices [A](#) e [B](#), respectivamente;

Tabela 7 – Taxas de falha para linhas de transmissão e distribuição.

| Tensão (kV) | Taxa de falhas (Ocorrências/km.ano) |
|-------------|-------------------------------------|
| 138 | 0,0399 |
| 230 | 0,0232 |
| 500 | 0,0183 |

Fonte: Adaptado de [Ramos \(2009\)](#) e [Negreiros \(2011\)](#).

- Escolhe-se as barras onde serão feitos os estudos. Essa escolha será pautada nos resultados observados na primeira [SMC](#), correspondente ao primeiro ano do estudo, para todos os barramentos da [RB](#) de cada uma das bases; de maneira complementar, pode-se comparar a zona de vulnerabilidade da [SMC](#) com a identificada pelo [MPF](#) que também foi implementando para o cenário de 1 ano;
- Para os próximos passos, adota-se uma estratégia de processamento e identificação dos casos do estudo para as definições da linha de transmissão sob falta, localização da falta, tipo de falta e valor da resistência de falta que será simulada no [SEP](#) em análise. Dentre as diversas estratégias disponibilizadas pela literatura, optou-se pela lógica de sorteios das variáveis aleatórias ([FISHMAN, 2003](#)) que consiste na adoção de uma fila à qual é atribuído o valor 0 (zero) à extremidade inicial do primeiro elemento e o valor 1 (um) à extremidade final do último elemento.

A Figura 8 ilustra graficamente esses conceitos cujas considerações individualizadas para cada variável sorteada são as seguintes:

- Sorteia-se, para cada cenário (ou ano de simulação) um número aleatório entre 0 e 1 correspondente à probabilidade da linha sob falta que irá depender do comprimento da linha conforme a Equação 4.5:

$$P_i = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^{N_{casos}} l_i} \quad (4.5)$$

sendo: P_i , a probabilidade de ocorrência de falta na linha de transmissão “i”; l_i , o comprimento da linha de transmissão “i”; e N_{casos} , o número total de casos (linhas) do SEP.

- Sorteia-se um número aleatório (entre 0 e 1) que irá representar o tipo da falta, para isso, deve-se considerar as porcentagens médias de ocorrência de cada tipo de falta, haja vista que a probabilidade um curto-circuito trifásico é mais rara que a dos demais tipos de falta. A Tabela 8 ilustra os critérios de porcentagens de ocorrência adotados no código. A título de ilustração, caso o número sorteado esteja entre 0 e 0,06 a falta será de natureza trifásica, já no intervalo entre 0,37 e 7 a falta é do tipo monofásica, por exemplo;

Tabela 8 – Ocorrência dos curtos-circuitos.

| Tipo de Curto-Circuito | Ocorrência (%) |
|------------------------|----------------|
| FFF | 06 |
| FF | 15 |
| FFT | 16 |
| FT | 63 |

Fonte: Adaptado de Kindermann (1997).

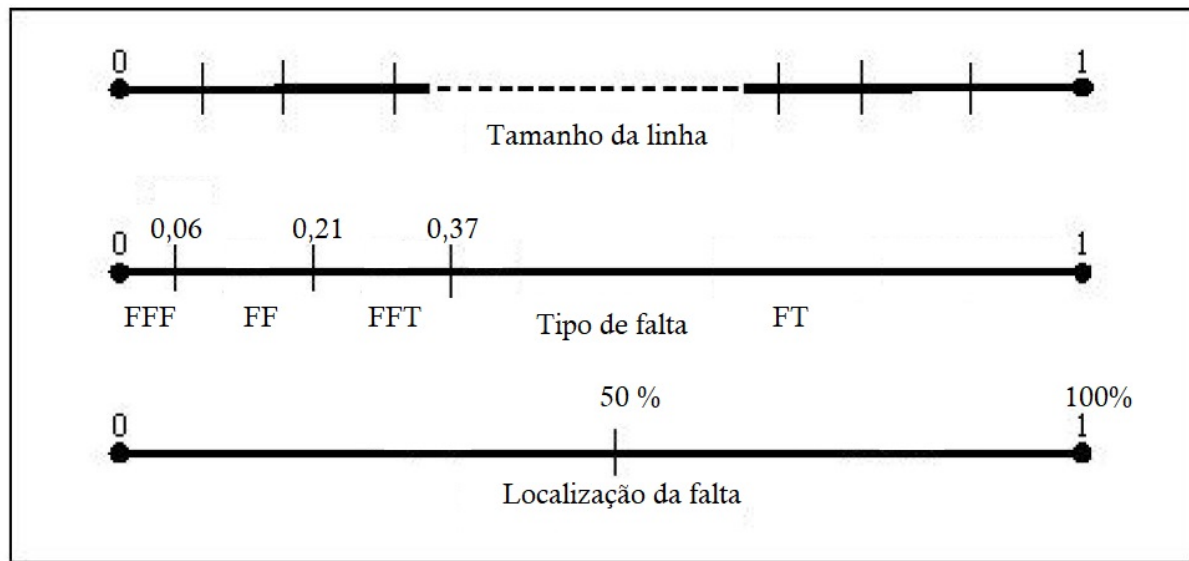
- Sorteia-se um número aleatório que irá representar a posição da falta. Se este número não for inteiro, deve-se arredondar para o inteiro mais próximo, uma vez que o passo mínimo do ANAFAS é de 1%;
- Incrementa-se o número de anos de simulação (cenários). Se o resultado for menor ou igual ao valor inicialmente definido, o programa retorna ao passo anterior. Do contrário, gera os dados de saída e termina a execução

A quantidade de afundamentos por ano, levando-se em conta o índice SARFI-90, representa o número de vezes que a magnitude dos barramentos estiver entre 0,1 e 0,9 p.u. Para um determinado número de anos, a média de afundamentos pode ser dada pela Equação 4.6 (RAMOS, 2009).

$$N_{sag} = \frac{1}{N_{anos}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{anos}} X_i \quad (4.6)$$

na qual: N_{sag} é o número médio de afundamentos esperado para um cenário de N_{anos} ; N_{anos} é o número de anos de simulação; e, X_i é número de afundamentos de tensão em um dado ano.

Figura 8 – Sorteio por Monte Carlo: Tamanho da LT, tipo de falta e localização da falta.



Fonte: Adaptado de [Silva \(2004\)](#).

Convém mencionar que inicialmente o valor da impedância de falta foi fixado em 0Ω uma vez que o escopo do trabalho se concentrou nas faltas de natureza sólida. No entanto, análises correspondentes à impedância de falta como variável aleatória também foram feitas, sendo adotada a distribuição de probabilidade apresentada no trabalho de [RAMOS](#) que é ilustrada na Tabela 9. De acordo com esta tabela, as impedâncias de falta de 0 e 15Ω tem as menores probabilidades de ocorrência, enquanto o valor de maior probabilidade de ocorrência é o de 2Ω .

Tabela 9 – Distribuição de probabilidade de impedância de falta.

| Impedância de falta (Ω) | Probabilidade (%) |
|----------------------------------|-------------------|
| 0 | 5 |
| 2 | 60 |
| 5 | 20 |
| 10 | 10 |
| 15 | 5 |

Fonte: Adaptado de ([RAMOS, 2009](#))

4.5 Considerações Parciais

Para a obtenção dos gráficos apresentados no Capítulo 5, fez-se necessário um considerável número de execuções repetidas de simulações de falhas em cada uma das bases. Neste sentido, utilizou-se do modo *BATCH* do [ANAFAS](#) que permite que um grande número de comandos repetidos sejam executados em uma menor fração de tempo ([CEPEL, 2022](#)).

No Apêndice E, é apresentado um breve tutorial do Modo de Execução *BATCH* que foi essencial para aumentar o número de simulações implementadas neste trabalho, permitindo um grande número de execuções repetidas com menor incidência de erros para cada um dos casos correspondentes aos cenários de 1000 anos em cada uma das bases, por exemplo.

A partir desse ponto, dispõe-se das técnicas necessárias para as análises estocásticas do [MPF](#) e da [SMC](#), que serão feitas, respectivamente, nas seções 5.1 e 5.2 do Capítulo 5.

5 Resultados

Este capítulo tem por intuito apresentar um estudo de caso aplicado ao [SEP](#) da Bahia. Neste sentido, a partir das considerações de modelagem para a rede elétrica apresentadas no Capítulo 4, procede-se à simulação e análise do desempenho com relação a afundamentos de tensão considerando-se as duas abordagens de simulação de faltas anteriormente discutidas.

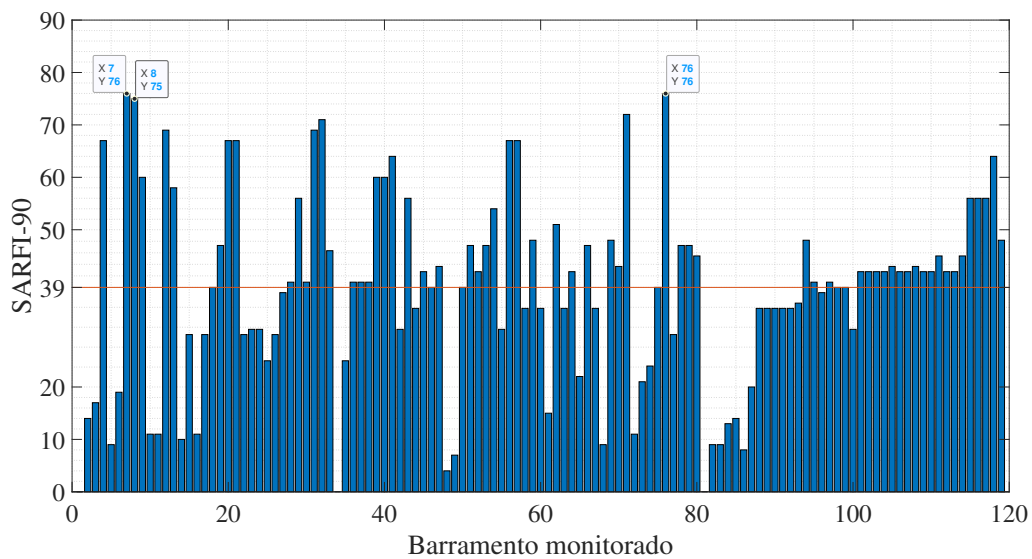
5.1 Descrição dos Cenários Analisados Considerando Método das Posições de Faltas

5.1.1 Desempenho da Configuração Curto-Circuito Máximo (Cenário Atual - Ano 2022)

As primeiras simulações dizem respeito à previsão de afundamentos de tensão no contexto da base de dados da configuração de curto-circuito máximo do [PDE-2025](#) no [SEP](#) da Bahia, para o ano de 2022. As primeiras análises foram feitas para o casos de curtos-circuitos monofásicos por serem essas faltas responsáveis pelas maiores taxas de ocorrência no [SEP](#), de uma maneira geral.

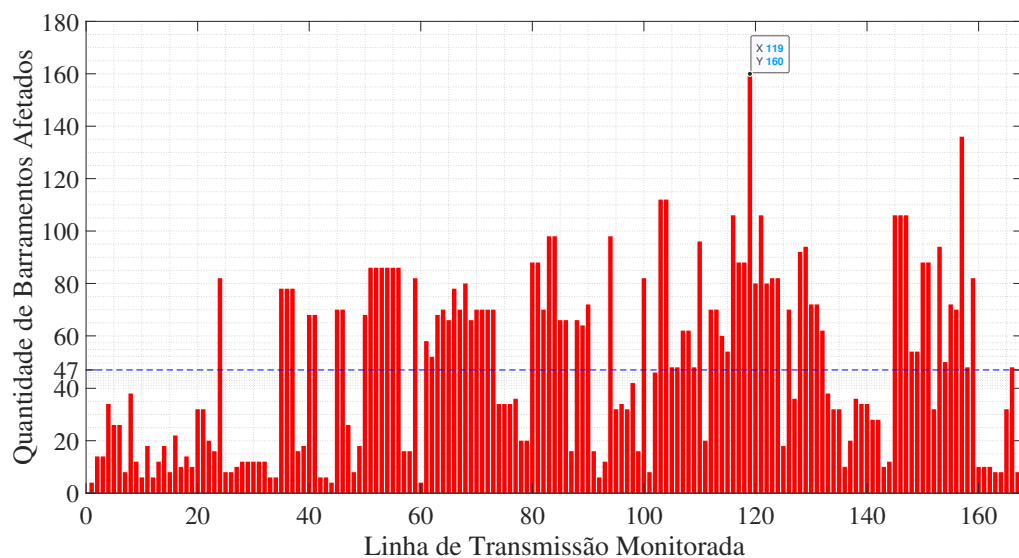
A Figura 9 apresenta os resultados correspondentes ao número de afundamentos de tensão [SARFI-90](#), após 167 simulações em cada uma das [LTs](#) do sistema representativo da [RB](#) no Estado da Bahia, para o ano de 2022, representada no Apêndice A. Pode-se observar que a média registrada do defeito foi de 39 ocorrências, conforme observado na curva em vermelho. Os maiores registros de afundamentos de tensão foram observados nas barras das [SE](#) Poções II 230 kV e Poções III 230 kV, correspondentes às posições 7 (Barra 209) e 76 (Barra 18612), respectivamente, ambas com 76 eventos. Foram observados ainda um grande número de afundamentos de tensão na barra correspondente à [SE](#) Itagibá 230 kV, posição 8 (Barra 213) com 75 registros. Alguns barramentos não registraram afundamentos de tensão: Posição 1 (Barra 200 [SE](#) Paulo Afonso III 230 kV), Posição 34 (Barra 300 [SE](#) Paulo Afonso III 230 kV) e Posição 81 ([SE](#) Apodi 230 kV).

Figura 9 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento falta monofásica - Curto-Circuito Máximo (2022).



O gráfico da Figura 10 traz a informação do número de barramentos afetados para cada uma das faltas localizadas na metade das linhas de transmissão do sistema. Pode-se concluir que a média de barramentos afetados é de 47, para a falta FT. É importante ressaltar que esta análise não considera ocorrências de faltas em diferentes posições da linha, uma vez que foi convencionada uma única posição para análise do fenômeno. Diferentes posições de curto-circuito estão previstas na abordagem SMC, conforme será elucidado na seção 5.2.

Figura 10 – Número de barramentos afetados para falta monofásica na metade das linhas de transmissão - Curto-Circuito Máximo (2022).

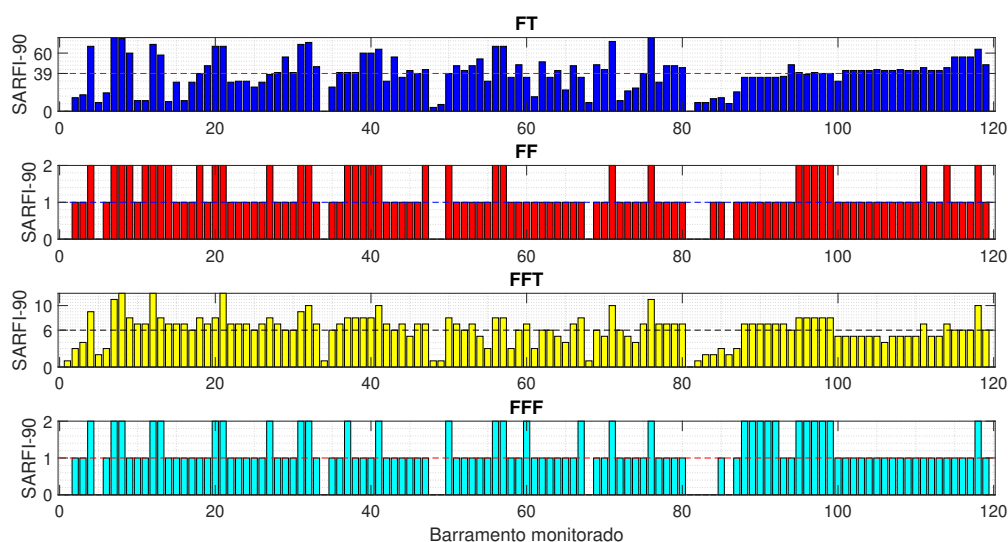


Nota-se que a linha de transmissão do caso 119, Camaçari IV - Camaçari II (500 kV), apresentou um maior percentual previsto de barramentos afetados (160 barramentos), o que já era esperado, uma vez que esta região apresenta um grande número de cargas sensíveis, decorrente à localização do Polo Industrial de Camaçari. As linhas que apresentaram as menores taxas de incidência de faltas foram as das posições 1, 44 e 60 correspondentes às **LTs** Paulo Afonso III A - Cícero Dantas 230 kV, Paulo Afonso III B - Cícero Dantas 230 kV e Sapeaçu - Funil 230 kV, respectivamente, cada uma dessas com apenas 4 ocorrências do distúrbio.

A abordagem anterior pode ser estendida para os demais tipos de faltas; logo, foram simuladas 167 ocorrências-para cada **LT**- estendendo-se a análise para curtos-circuitos **FF**, **FFT** e **FFF** totalizando-se 668 relatórios do **ANAFAS** (CEPEL, 2022) cujos valores de tensões pós-falta foram exportados via arquivos de texto (extensão .txt) e tratados no ambiente Matlab® (MATHWORKS, 2022), tomando-se por base o índice **SARFI-90**, para cada barramento monitorado.

Neste sentido, observa-se na Figura 11, uma comparação quantitativa para simulações de curtos localizados em metade das **LTs**. Nota-se que foram estimadas uma média anual de 6 ocorrências do distúrbio relacionadas a curtos de natureza **FFT** e somente uma estimativa média de afundamento tanto para faltas **FF** quanto **FFF**.

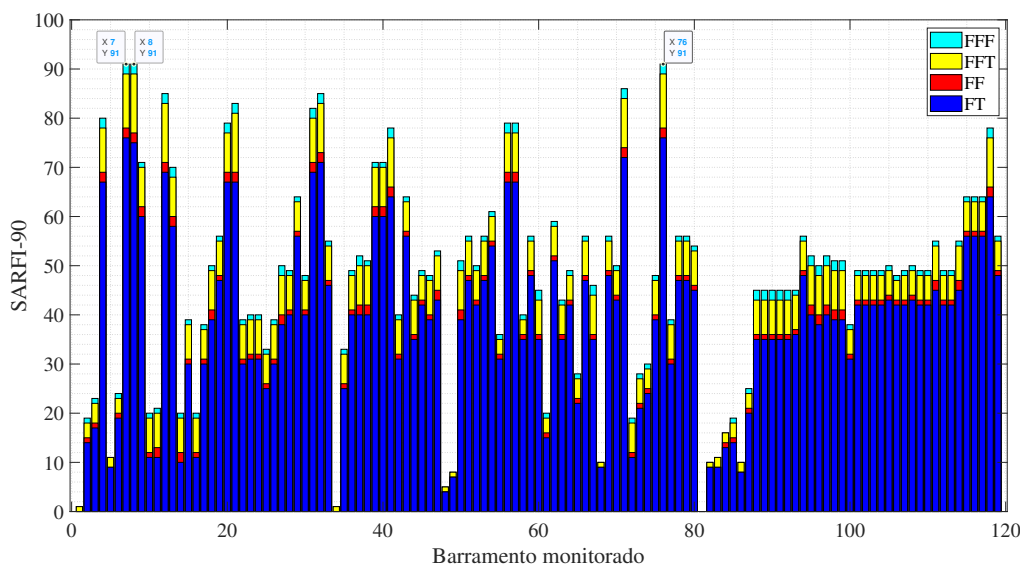
Figura 11 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento para os diferentes tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022).



No gráfico da Figura 12 está representada a distribuição acumulada de ocorrências do distúrbio, considerando todas as faltas, para cada uma das barras. Fica evidenciado o que a Figura 11 já sugeria: a predição do quantitativo de afundamentos de tensão causados

pelas faltas **FT** é a maior, representando, inclusive, um maior número que os provenientes dos outros três tipos de curtos somados, para todos os barramentos analisados.

Figura 12 – Índice SARFI-90 acumulado de todos os tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022).



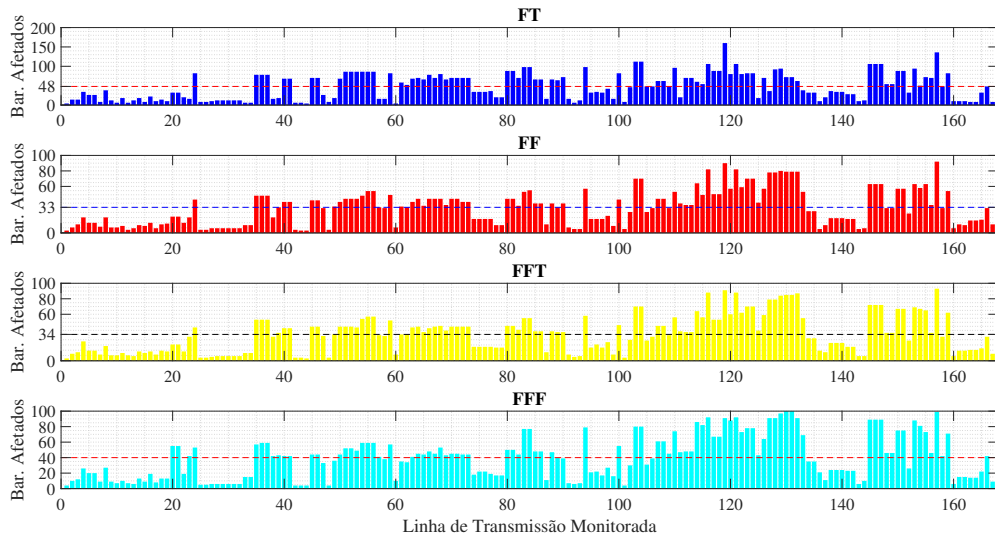
O gráfico da Figura 13 exibe o número de barramentos da **RB** da Bahia nos quais foi observada a ocorrência de afundamentos de tensão para cada uma das faltas. Nota-se que a média de barras sujeitas ao distúrbio é de 48 para curto **FT**, 40 para **FFF**, 34 para **FFT** e 33 para **FF**. As faltas de natureza monofásica-terra apresentaram a maior influência na ocorrência de afundamentos no **SEP**. Curiosamente, embora sejam menos frequentes, as faltas trifásicas são as responsáveis por maiores danos no sistema, o que fica evidenciado pelo impacto razoável delas nas barras superando os curtos-circuitos bifásico e bifásico-terra. No Apêndice C são feitas breves considerações a respeito do cálculo de magnitudes pós-falta e correntes de contribuição para faltas trifásicas e assimétricas.

A **LT** do caso 157 (Reniga BA 500 kV - Igaporã III 500 kV) apresentou o maior índice de afundamentos originários de faltas **FF** e **FFT**, afetando 92 e 93 barras do sistema, respectivamente. Para curtos trifásico as **LTs** dos casos 130 (Igaporã III 500 kV - Ibicoara 500 kV - Circuito 1) e 131 (Igaporã III 500 kV - Ibicoara 500 kV - Circuito 2) foram as mais críticas, originando 100 ocorrências do defeito.

Os barramentos das posições 7 (Barra 209, **SE** Poções II 230 kV), 8 (Barra 213, **SE** Itagibá 230 kV), 12 (Barra 264, **SE** Santo Antônio de Jesus 230 kV), 21 (Barra 276, Usina Funil 230 kV) e 76 (Barra 18612, **SE** Poções III 230 kV), por apresentarem maior criticidade, afetando grandes extensões do **SEP** da Bahia sugerem uma zona de maior vulnerabilidade, sendo analisados com mais profundidade na seção relativa aos estudos da

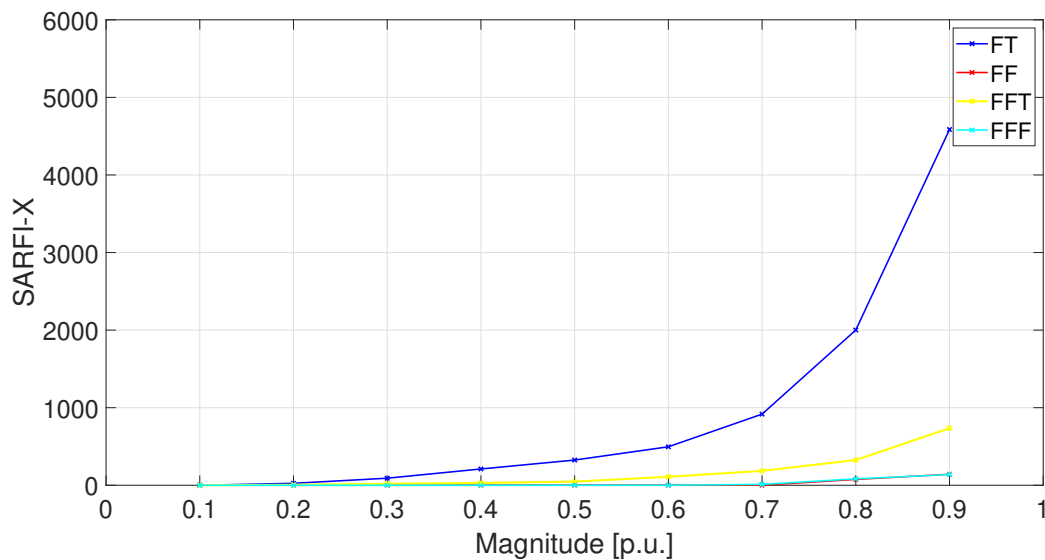
SMC.

Figura 13 – Número de barramentos afetados por falta em LT - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022).



Observa-se na Figura 14 a distribuição acumulada considerando outros índices SARFI-x. Como esperado, a partir da interpretação dos gráficos anteriores, o sistema apresentou registros de afundamentos para faltas de natureza FT consideravelmente maiores em comparação às demais faltas, essa característica foi observada independente do indicador SARFI escolhido.

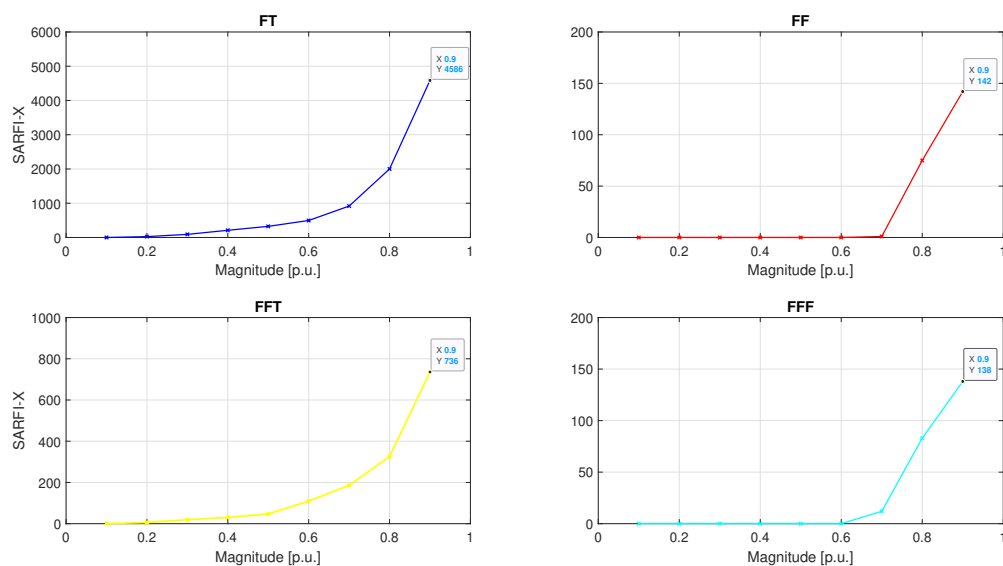
Figura 14 – Frequência Acumulada do Número de Ocorrências por Nível de Afundamentos de Tensão - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022).



As curvas de frequências acumuladas para as faltas **FF** e **FFF** praticamente se sobrepõe, apresentando um registro consideravelmente menor da curva do curto **FFT**.

A Figura 15 apresenta a distribuição acumulada dos índices **SARFI-X** de cada falta separadamente. Percebe-se um comportamento semelhante para as curvas das frequências acumuladas das faltas **FT** e **FFT** caracterizadas pela presença de aclives mais acentuados revelando que os afundamentos são mais rasos, nestes tipos, de faltas, ou seja apresentam maior tensão remanescente. Já para as faltas **FF** e **FFF**, há pouca variação entre as magnitudes dos **SARFI-X**, com curvas menos acentuadas o que significa que a maior parte dos afundamentos provenientes destas faltas são mais profundos, *i.e.*, com menor tensão remanescente. No total, o sistema apresentou 4586 ocorrências para **FT**, 736 para **FFT**, 142 para **FF** e 138 para **FFF**.

Figura 15 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2022).



5.1.2 Desempenho da Configuração Curto-Circuito Máximo (Ano 2025)

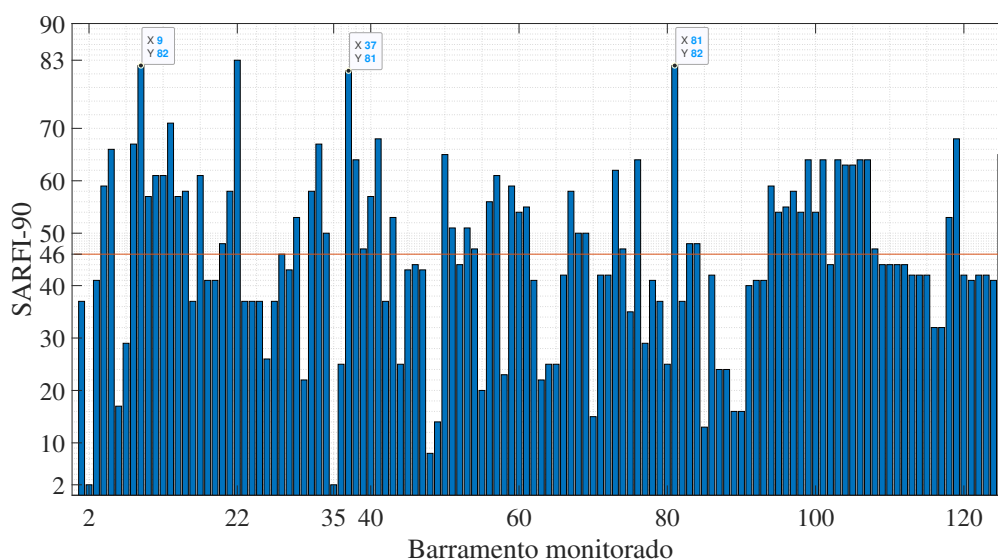
Utilizando-se da previsão de afundamentos tomando por base a configuração de curto-circuito máximo do **PDE-2031** no **SEP** da Bahia, para o ano de 2025, cujas descrições estão explicitadas na documentação do Apêndice **C**. Assim como o caso anterior, inicialmente, as análises serão feitas apenas para faltas de natureza **FT**.

A Figura 16 exibe uma análise quantitativa do total de afundamentos de tensão, previsto para o ano de 2025, considerando o índice **SARFI-90**, para cada barramento monitorado, para a falta monofásica. Simulou-se 172 ocorrências de falta sólida franca monofásica para todas as linhas pertencentes à **RB**, adotando-se como posição de falta, metade da linha. Pode-se observar um aumento do registro de afundamentos de tensão,

com a mudança da base de curtos-circuitos no Horizonte do ano 2025 em comparação ao caso anterior (ano 2022) com uma média de 46 afundamentos para curtos do tipo FT, conforme registrado na curva em vermelho. Isso pode ser explicado pela presença de maiores empreendimentos de geração distribuída registrados nas bases do PDE-2031, que não foram cadastrados no PDE anterior.

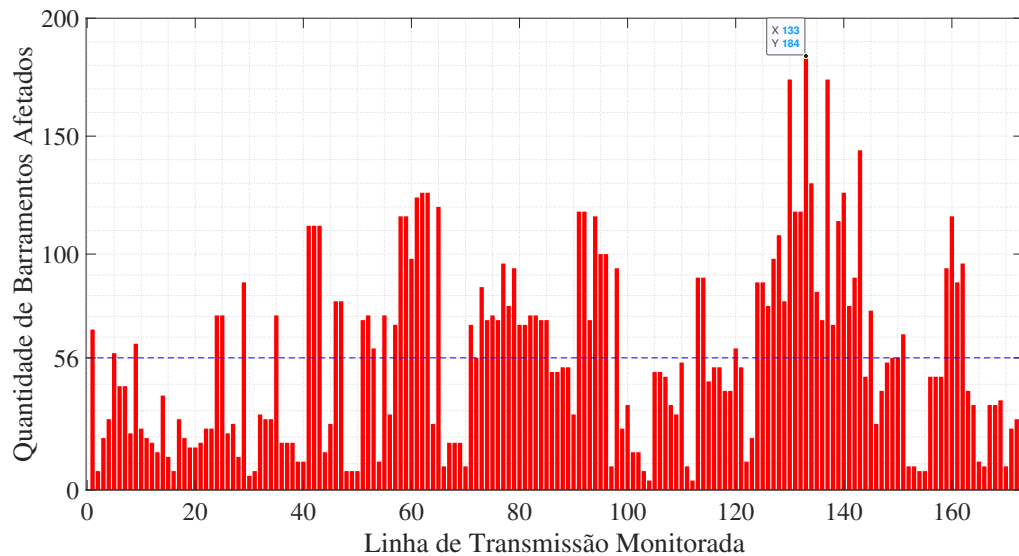
Além disso, pode-se destacar que a barra 276 (posição 22, no eixo das abscissas), correspondente à Usina de Funil-BA 230 kV, localizada no município de Ubaitaba, apresentou um maior quantitativo, registrando uma previsão média de 83 afundamentos de tensão, no período em análise. As barras 200 e 300 (posições 2 e 35, respectivamente, no eixo horizontal), correspondentes às SEs de Paulo Afonso III (PAF3-A-BA230 e PAF3-B-BA230), foram as que apresentaram menores estimativas, com apenas 2 ocorrências. Convém mencionar ainda que os registros consideráveis do defeito nos barramentos correspondentes às SEs Itagibá-BA 230 kV (posição 9 e barra 213), Itabuna-BA 230 kV (posição 37 e barra 345) e Mineração Mirabela -BA 230 kV (posição 81 e barra 21045) com 82, 81 e 82 afundamentos.

Figura 16 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento falta monofásica - Curto-Circuito Máximo (2025).



Conforme observado nos resultados do gráfico da Figura 17, a média de barramentos afetados é maior que a observada na base de dados de curto-circuito máximo do ano 2022, sendo registrados 56 afundamentos em média. Assim como no caso anterior, a LT Camaçari IV - Camaçari II (500 kV), desta vez correspondente ao caso 133, apresentou a maior criticidade com um total de 184 barramentos afetados, o que revela a forte presença de cargas sensíveis no Polo Industrial de Camaçari.

Figura 17 – Número de barramentos afetados para falta monofásica nas metade das linhas de transmissão - Curto-Circuito Máximo (2025).



Não obstante, os casos 104 e 112, correspondentes às [LTs](#) que ligam a [SE](#) Feira de Santana-III à [SE](#) Camaçari-II (230 kV) e a [SE](#) Brumado-II à [SE](#) Ibicoara foram os apresentaram as menores estimativas de ocorrência do evento, com apenas 4 barramentos afetados da [RB](#) da Bahia.

A [SE](#) Feira de Santana-III é recente e sua implantação foi tema de um estudo da [EPE](#) para suprimento das cargas da região central da Bahia, supridas à época a partir da [SE](#) 230/69 kV de Tomba, localizada na cidade de Feira de Santana (Bahia). O relatório recomendou a implantação da [SE](#) 230/69 kV Feira de Santana III para o ano de 2021 com dois transformadores de 150 MVA e um banco de capacitor shunt de 20 Mvar – 69 kV, alimentada através do seccionamento em *loop* da [LT](#) 230 kV Governador Mangabeira – Camaçari II (C2) ([EPE, 2017](#)). Os resultados das análises de curto-circuito do estudo podem ser visualizados nas Tabelas 10 e 11 que foram obtidas a partir de dados relativos à base de curtos referente ao [PDE](#) 2016-2024, nota-se que as análises do estudo já indicavam a redução das correntes de curto das [SEs](#) vizinhas à [SE](#) Feira de Santana-III, após o seccionamento da [LT](#) 230 kV Governador Mangabeira – Camaçari II.

Tabela 10 – Correntes de curto-circuito referentes ao ano 2021 sem a SE 230 kV Feira de Santana III.

| Subestação | Ano 2021 | | | | Disjuntor [kA] |
|-----------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|----------------|
| | Curto Máximo | | | | |
| | 3 ϕ [kA] | X/R | 1 ϕ [kA] | X/R | |
| SE Tomba - 230 kV | 8,03 | 6,22 | 8,59 | 7,62 | 31,5 |
| SE Tomba - 69 kV | 8,95 | 18,49 | 5,55 | 42,51 | 20 |
| SE Governador Mangabeira - 230 kV | 20,55 | 10,55 | 19,38 | 7,92 | 26,3 |
| SE Camaçari II - 230 kV | 37,81 | 19,66 | 42,46 | 16,06 | 40 |

Fonte: EPE (2017).

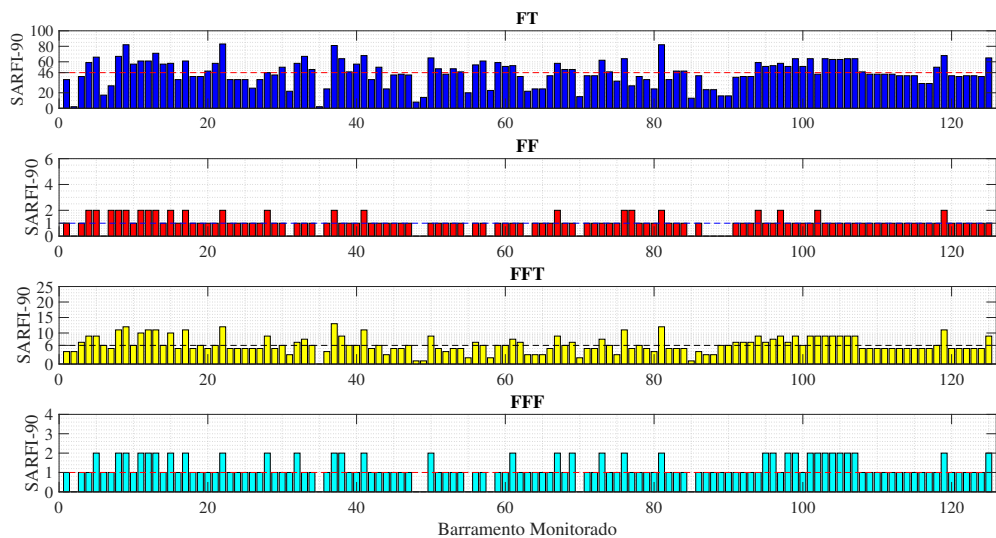
Tabela 11 – Correntes de curto-circuito referentes ao ano 2021 com a SE 230 kV Feira de Santana III.

| Subestação | Ano 2021 | | | | Disjuntor [kA] |
|-----------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|----------------|
| | Curto Máximo | | | | |
| | 3 ϕ [kA] | X/R | 1 ϕ [kA] | X/R | |
| SE Feira de Santana III - 230 kV | 4,73 | 5,56 | 5,07 | 7,40 | 50 |
| SE Feira de Santana III - 69 kV | 8,42 | 10,46 | 5,84 | 22,72 | 31,5 |
| SE Tomba - 230 kV | 7,91 | 6,28 | 8,49 | 7,68 | 31,5 |
| SE Tomba - 69 kV | 8,91 | 18,49 | 5,54 | 45,09 | 20 |
| SE Governador Mangabeira - 230 kV | 19,76 | 10,74 | 18,74 | 8,13 | 26,3 |
| SE Camaçari II - 230 kV | 37,58 | 19,88 | 42,22 | 16,27 | 40 |

Fonte: EPE (2017).

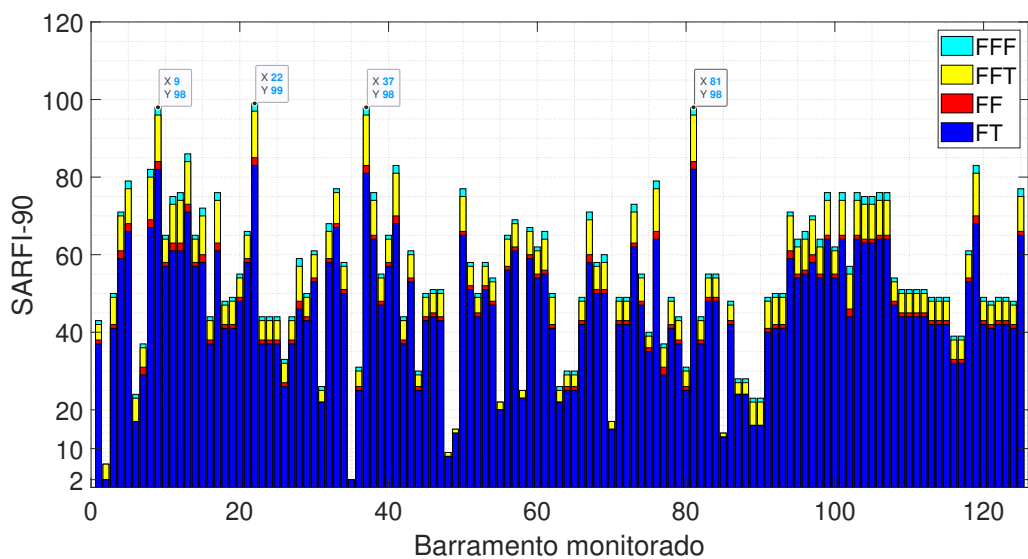
De maneira análoga ao caso anterior, foram simuladas 172 ocorrências-para cada LT- estendendo-se a análise para falhas de natureza FF, FFT e FFF totalizando-se 688 relatórios do ANAFAS resultando nos gráficos da Figura 18. Nota-se que a média de afundamentos resultantes dos demais tipos de curtos-circuitos foi idêntica ao caso anterior, ou seja, 6 ocorrências relacionadas a curtos de natureza FFT e um registro para faltas FF e FFF.

Figura 18 – Número de ocorrências do distúrbio ao ano por barramento para os diferentes tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



A distribuição acumulada dos afundamentos decorrentes de todos os curtos-circuitos está ilustrada na Figura 19. Novamente as ocorrências causadas pelas faltas FT são mais frequentes que os originados pelos demais tipos de faltas em conjunto.

Figura 19 – Índice SARFI-90 acumulado de todos os tipos de falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



Além disso, observa-se que a falta de natureza FFT é a segunda que mais gera afundamentos, seguida da falta FFF e por fim a FF. Sabe-se que apesar de causar as piores condições de VTCDs, a falta do tipo FFF representa em média apenas 5% das ocorrências

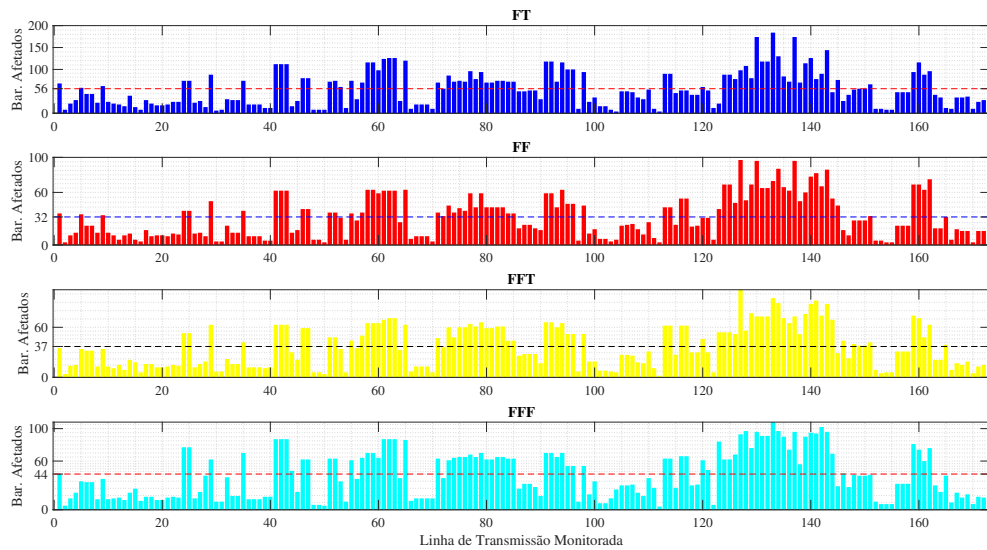
mais relevantes, nos SEP's em geral, enquanto a falta **FT** é mais frequente, representando em média, até 70% das ocorrências ([SANTOS; SILVA, 2003](#)). Especificamente para o cenário de curto máximo (2025) tem-se um percentual de 84,29 % para as faltas **FT** e 2,23% e para os defeitos do tipo **FFF**.

Comparando-se as colunas do gráfico da Figura 19 com a Tabela 16 do Apêndice B, verifica-se que menores quantidades de afundamentos de tensão foram observadas na barra 300 que corresponde à **SE** Paulo Afonso III (PAF3-B-BA230) registrando-se 2 ocorrências, seguidas da barras 200 (PAF3-A-BA230) e 500 (PAF4—BA500) correspondentes às **SEs** Paulo Afonso III (230 kV) e Paulo Afonso IV (500 kV), com 6 e 9 registros do defeito, respectivamente. A partir destas observações, pode-se inferir que a região de Paulo Afonso apresenta a menor sensibilidade aos eventos de falta. Isso ocorre em decorrência da forte presença de geração e compensação crítica associada à rede desta região.

Em contrapartida, o barramento da Usina de Funil (Barra 276, posição 22) apresentou o maior número de ocorrências com 99 eventos do defeito registrados, seguido das barras correspondentes às **SEs** Itagibá 230 kV (Barra 213, posição 9), Itabuna 230 kV (Barra 345, posição 37) e Mineração Mirabela 230 kV (Barra 21045, posição 81) todas essas com 98 afundamentos registrados para o total de faltas simuladas. Todas essas barras são supridoras de cargas da meso região do Extremo Sul da Bahia e estão interconectadas à Usina de Funil. A criticidade da Usina de Funil já havia sido observada quando observada apenas a influência das faltas de natureza monofásica e já foi temática de estudos da **EPE** que diagnosticou na contingência da **LT** 230 kV Funil – Itapebi C1 a sobrecarga na **LT** 230 kV Funil – Itabuna III C1 e subtensão nas **SE** Itabuna III, Itapebi, Veracel, Eunápolis e Teixeira de Freitas ([EPE, 2020](#)). Em razão disso, será dada uma atenção especial ao barramento 276 nas análises por **SMC** do tópico seguinte.

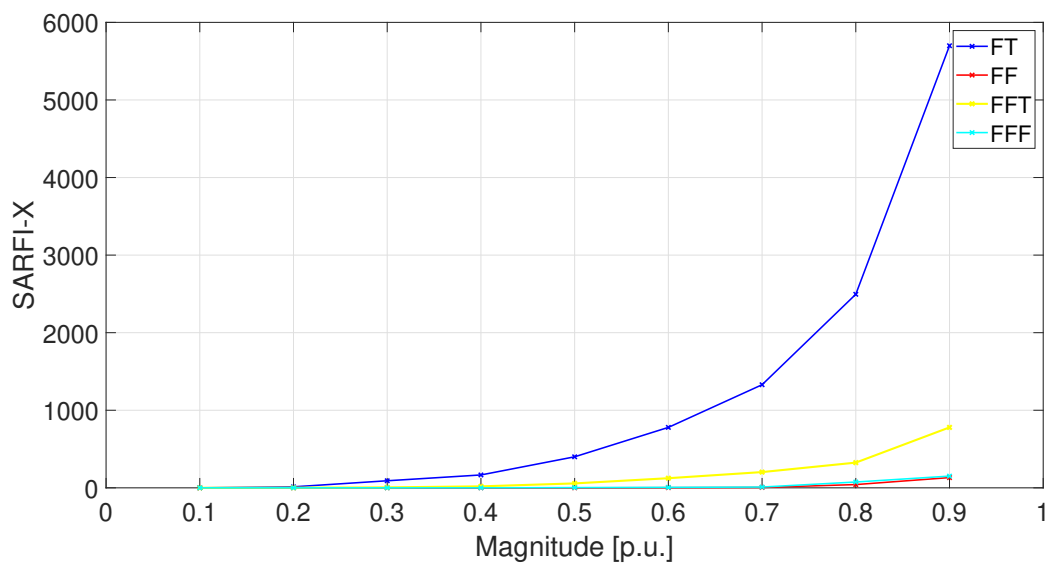
O gráfico da Figura 20 exhibe o número de barramentos da **RB** da Bahia nos quais foi observada a ocorrência de afundamentos de tensão para cada uma das faltas. Nota-se que a média de barras sujeitas ao distúrbio é de 56 para curto **FT**, 44 para **FFF**, 37 para **FFT** e 32 para **FF**. As faltas de natureza monofásica-terra apresentaram a maior influência na ocorrência de afundamentos no **SEP**. Observa-se ainda que curtos **FT** e **FFF** na **LT** do caso 133 (Camaçari IV- Camaçari II 500 kV) apresentam o maior índice de danos às barras do sistema, afetando 184 barras para faltas **FT** e 108 para **FFF**. Para os demais curtos a **LT** do caso 127 (Morro do Chapéu II - Sapeaçu 500 kV) foi a mais crítica, registrando o defeito em 97 e 105 barramentos para falta **FF** e **FFT**, respectivamente.

Figura 20 – Número de barramentos afetados por falta em LT - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



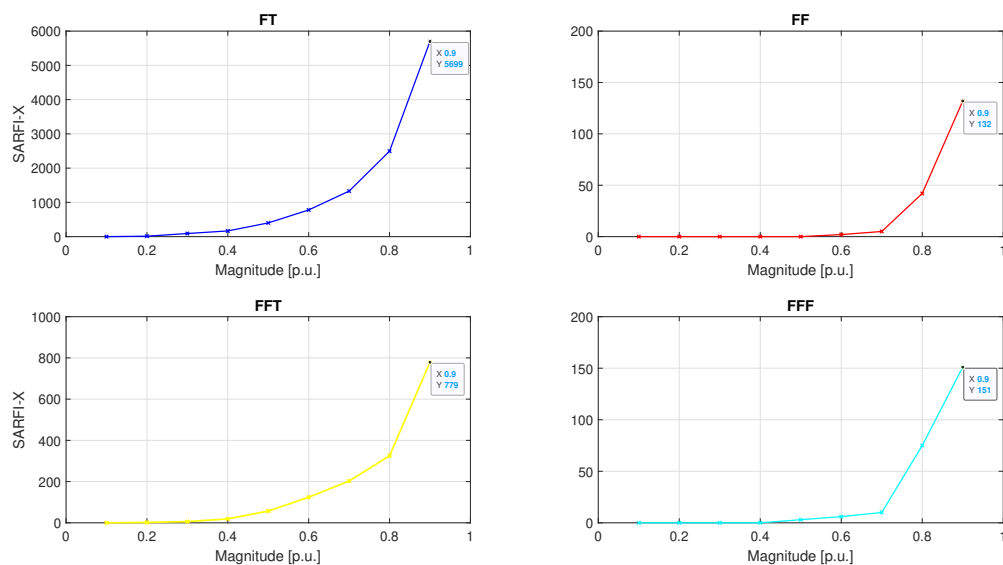
Analogamente ao que foi feito na seção anterior, procede-se à obtenção do gráfico da Figura 21 que apresenta o registro da distribuição acumulada considerando outros índices SARFI-x. Mais uma vez o sistema apresentou registros de afundamentos para faltas de natureza FT maiores em comparação às demais faltas para todos os índices SARFI-X observados.

Figura 21 – Frequência Acumulada do Número de Ocorrências por Nível de Afundamentos de Tensão - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



Uma visão separada em particular para cada tipo de falta pode ser observada na Figura 23 sendo observados, no total, 5699 ocorrências para FT, 779 para FFT, 151 para FFF e 132 para FF. Diferente do caso anterior, o sistema apresentou um número relativamente maior de ocorrências originadas a partir de faltas trifásicas em comparação às bifásicas.

Figura 22 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



5.2 Descrição dos Cenários Analisados Considerado Método das Simulações de Monte Carlo, relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

5.2.1 Análise do Impacto de Faltas Sólidas Aleatórias na Ocorrência de Afundamentos de Tensão na Rede Considerando-se o Horizonte de 1 Ano

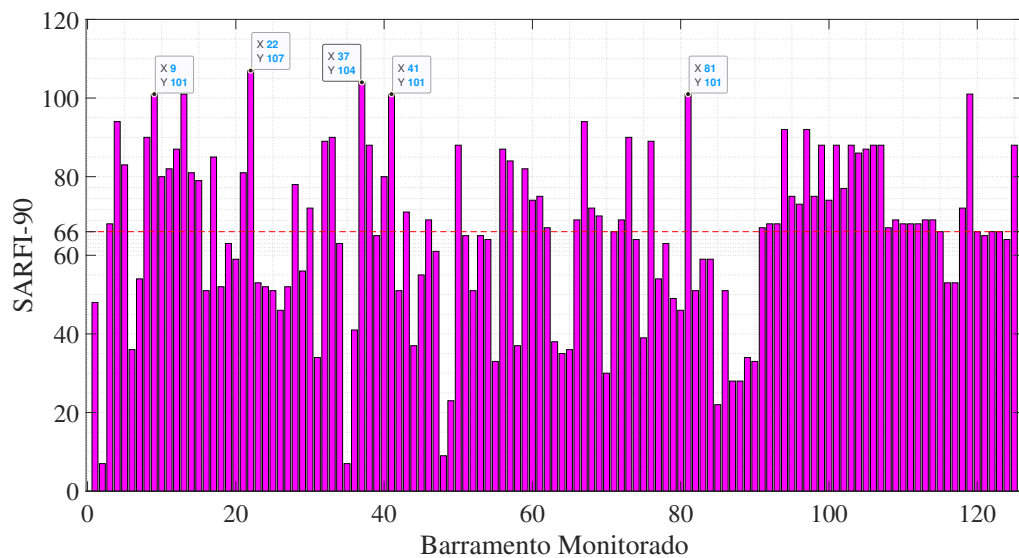
O quantitativo de afundamentos índice SARFI-90 registrado para cada barra do sistema, considerando-se o cenário da primeira SMC (correspondente a um ano), pode ser observado na Figura 23. Foi utilizada a mesma base de dados da configuração de curto-circuito-máximo do PDE-2031, para o ano de 2025, disponibilizada pela EPE, sendo registrada uma média de 66 afundamentos de tensão para as 294 faltas sorteadas aleatoriamente.

Nota-se uma convergência das barras de vulnerabilidade com as identificadas pelo método das posições de falta, sendo registrado um índice máximo do defeito na Barra

276 (posição 22 no gráfico) correspondente à Usina Funil-BA 230 kV, desta vez com 107 ocorrências, estando relativamente próximo às 99 identificadas para faltas acumuladas dos 172 casos do simulados no método de posição da falta. Um número maior de afundamentos foi observado também no barramento 345 (posição 37) da SE Itabuna-BA 230 kV com 104 eventos seguido das barras 213 (posição 9, SE Itagibá-BA 230 kV), 376 (posição 41, SE Brumado-II-BA 230 kV) e 21045 (posição 81, SE Mineração Mirabela -BA 230 kV) ambas com 101 registros.

O mapeamento das barras afetadas pelas duas propostas estocásticas deste trabalho sugere uma forte zona de vulnerabilidade localizada nas mesorregiões Sul e Centro-Sul Baiano cujas análises estatísticas e preditivas serão aprofundadas na seção 5.2.2 para cenários de 100 e 1000 anos de SMC. Além disso, as barras de menor vulnerabilidade foram as que representam as SEs Paulo Afonso-III-A 230 kV (Barra 200), Paulo Afonso-III-B 230 kV (Barra 300) e Paulo Afonso IV-BA 500 kV, respectivamente com 7, 7 e 9 afundamentos, o que reitera a baixa susceptibilidade a afundamentos do Complexo Paulo Afonso, já indicada nas simulações da seção 5.1.

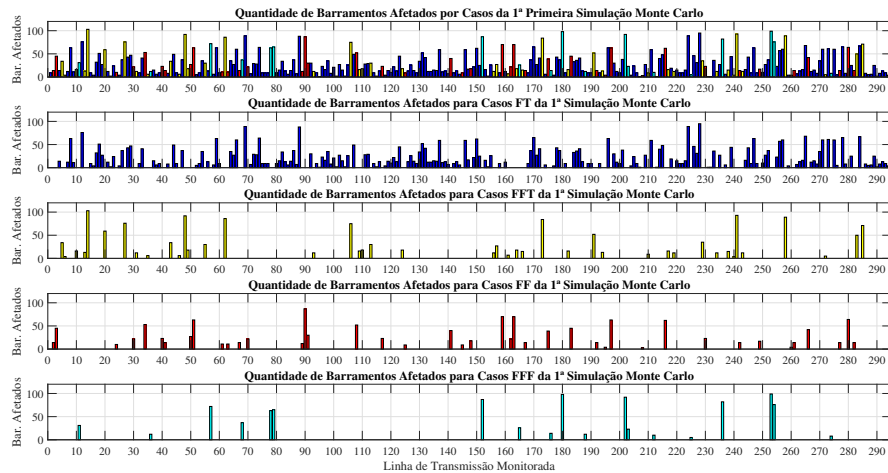
Figura 23 – Frequência Absoluta de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).



A Figura 24 ilustra de maneira resumida a quantidade de barramentos afetados para cada tipo de falta. No total foram observados 8210 registros do defeito na primeira SMC. Nota-se que dos 294 casos sorteados para o ano 1, 190 foram de natureza FT correspondendo a 56,66% dos eventos, 43 FFT responsáveis por 17,36 % dos defeitos, 42 FF gerando 14,87% dos casos e, por fim, 19 de natureza FFF representando 11,11 % dos afundamentos. Nota-se que embora sejam menos frequentes, as faltas trifásicas representam

as maiores severidades ao SEP afetando em média 48 barras, seguida dos curtos FFT, FF e FT que apresentam médias de 33, 29 e 24 afundamentos, respectivamente.

Figura 24 – Número de barramentos afetados para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Curto-Circuito Máximo (2025).



A Figura 25 apresenta a curva de frequência acumulada para avaliação de desempenho do SEP frente às faltas da primeira simulação considerando-se outros índices SARFI. Nota-se, pelos incrementais mais acentuados com o aumento do SARFI, característicos das faltas FT, a predominância de casos sorteados para este tipo de curto assimétrico, o que sugere uma maioria de registros de afundamentos "rasos", com maiores magnitudes das tensões remanescentes nas barras, de uma maneira geral. Foi registrado um total de 8210 ocorrências, para índice SARFI-90.

Figura 25 – Frequência Acumulada de Ocorrências para os Diferentes Tipos de Falta para os Diferentes Tipos de Falta Considerando o Cenário de 1 SMC (1 Ano) - Configuração Curto-Circuito Máximo (2025).

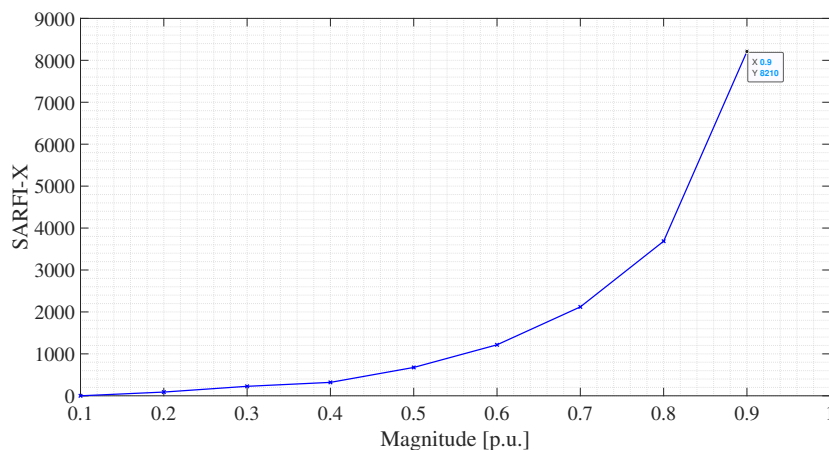


Figura 27 – Barramentos 230 kV da zona de vulnerabilidade identificada (Sul e Centro-Sul Baiano) Base de dados 2022.

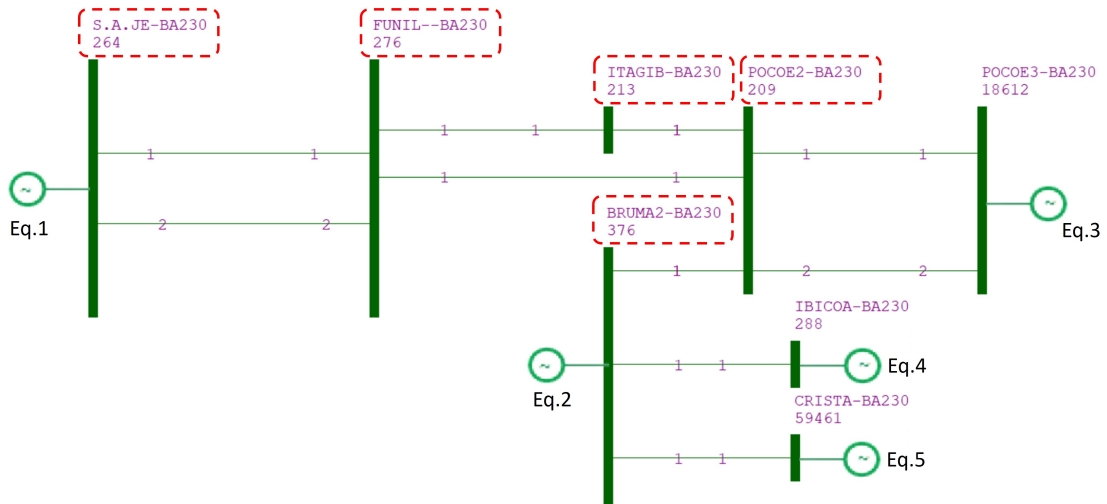
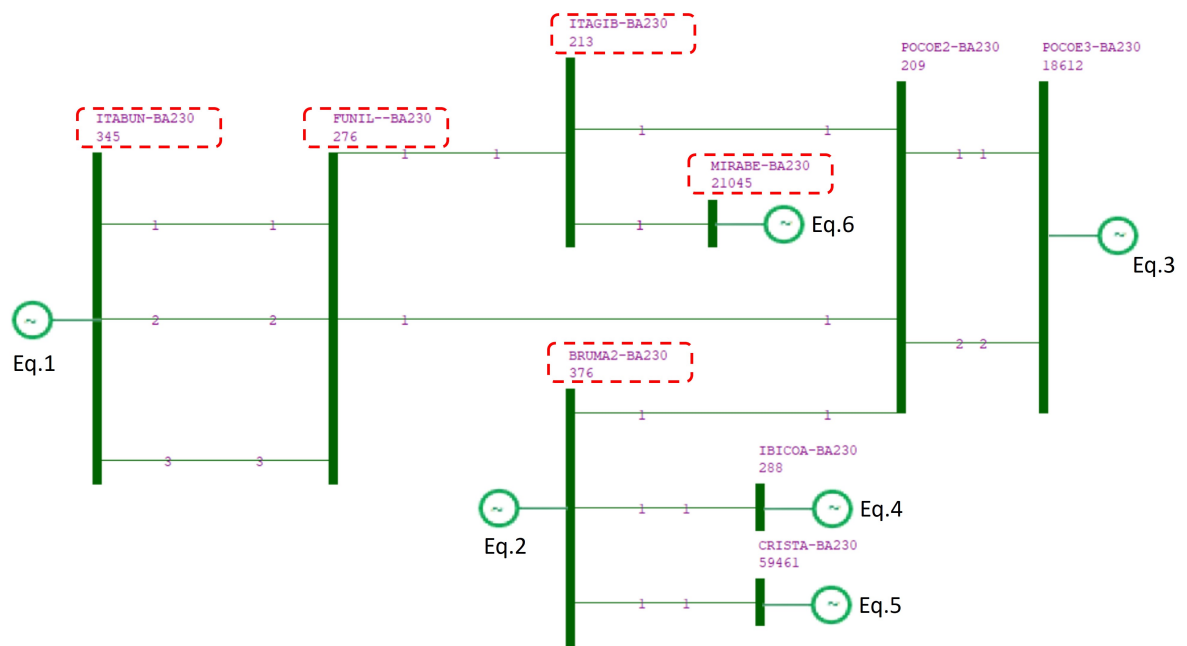


Figura 28 – Barramentos 230 kV da zona de vulnerabilidade identificada (Sul e Centro-Sul Baiano) Base de dados 2025.



As barras críticas, objeto de estudo deste trabalho são listadas a seguir:

Para as duas bases de dados de curto-circuito máximo (PDE-2025, anos 2022 e PDE-2031, ano 2025) , foram observadas:

- Barra 213 (SE Itagibá 230 kV) - Mesorregião Centro-Sul;
- Barra 276 (Usina Funil 230 kV) - Mesorregião Sul e
- Barra 376 (SE Brumado II 230 kV) - Mesorregião Centro-Sul.

Para base de dados de curto-circuito máximo relativa ao PDE-2025, ano 2022:

- Barra 209 (SE Poções II 230 kV) - Mesorregião Sudoeste e
- Barra 264 (SE Santo Antônio de Jesus 230 kV) - Mesorregião Recôncavo Baiano.

Para base de dados de curto-circuito máximo relativa ao PDE-2031, ano 2025:

- Barra 345 (SE Itabuna 230 kV) - Mesorregião Sul e
- Barra 21045 (SE Mineração Mirabela 230 kV) - Mesorregião Centro-Sul.

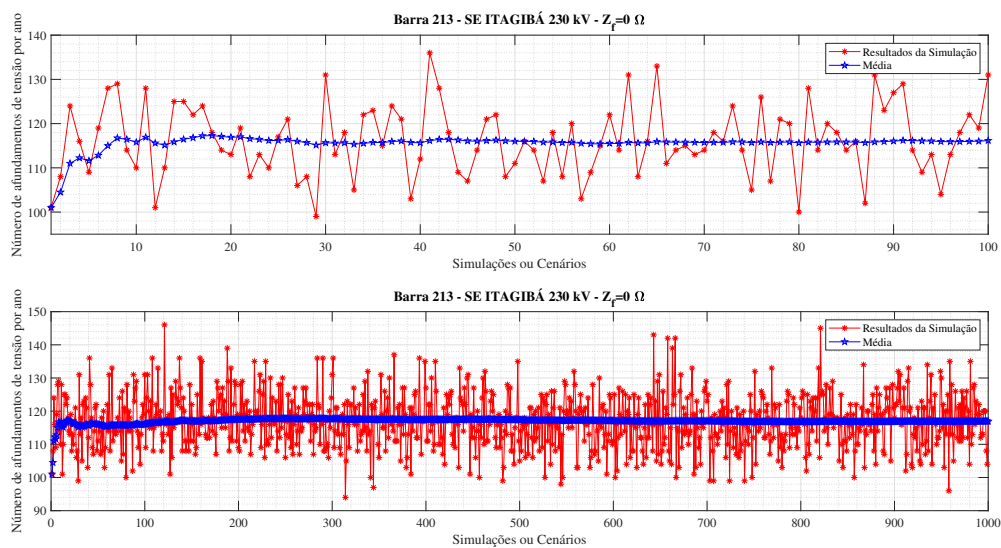
Nas próximas seções, serão apresentadas as simulações de cada barramento sensível identificado, considerando-se faltas sólidas, ou seja, com impedância de falta igual a 0Ω (curtos francos) e curtos não-sólidos, para impedância de falta considerada como variável aleatória e fixada dentro de uma faixa de valores. Visando-se a convergência de resultados e maior confiabilidade aos dados apresentados, o estudo estatístico sobre o número médio de afundamentos de tensão foi feito para períodos de 100 e 1000 anos de SMC. Convém mencionar que o objetivo central será o de apresentar o efeito da impedância de falta na ocorrência do defeito, fazendo-se uma abordagem expositiva dos resultados. De maneira geral, as barras com maior severidade de ocorrência de afundamentos comum às duas bases de dados serão analisadas sob a ótica da base pertencente ao PDE mais recente, ou seja, curto-circuito máximo ano 2025 no horizonte do ano 2031.

5.2.2.1 Resultados na Barra 213 (SE Itagibá 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

5.2.2.1.1 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 0Ω

As Figuras 29 e 30 mostram a média de afundamentos de tensão por ano que a SE Itagibá (Barra 213) pode estar submetida.

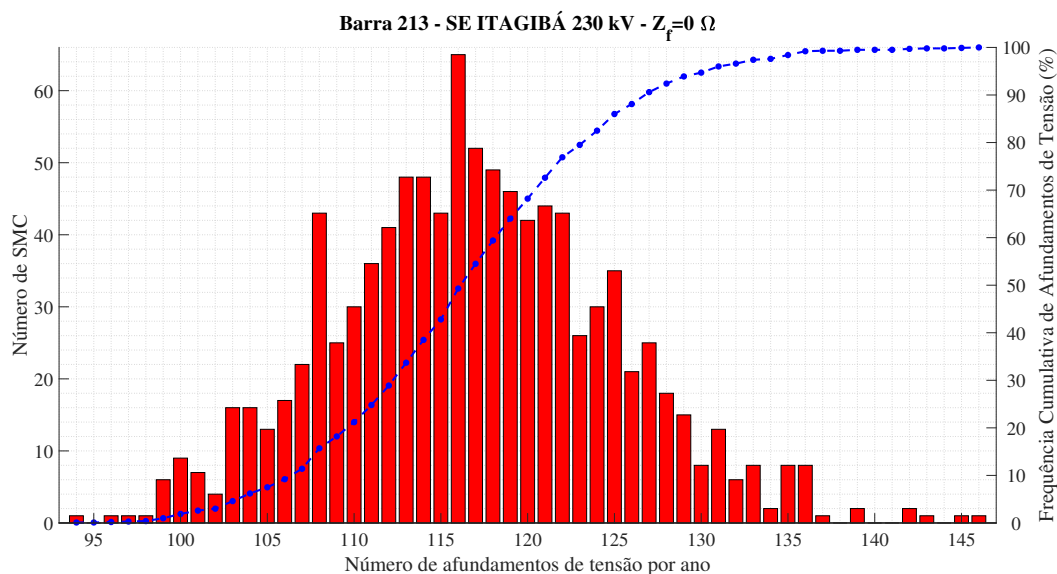
Figura 29 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213(SE Itagibá 230 kV) para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



Os gráficos da Figura 29 apresentam as performances da simulação por ano em conjunto com a média de afundamentos ao longo do tempo para horizontes de 100 e 1000 anos. O comportamento da média de afundamentos, dado pela curva em azul, foi calculado de acordo com a Equação 4.6.

A performance de simulação revela claramente o comportamento aleatório dos afundamentos de tensão com mudança do número médio a cada ano, no entanto, com o aumento do número de SMCs (conforme observado claramente para o cenário de 1000 simulações) essa média tende a convergir para um único valor, que, no caso, é de aproximadamente 117 registros do defeito.

Figura 30 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

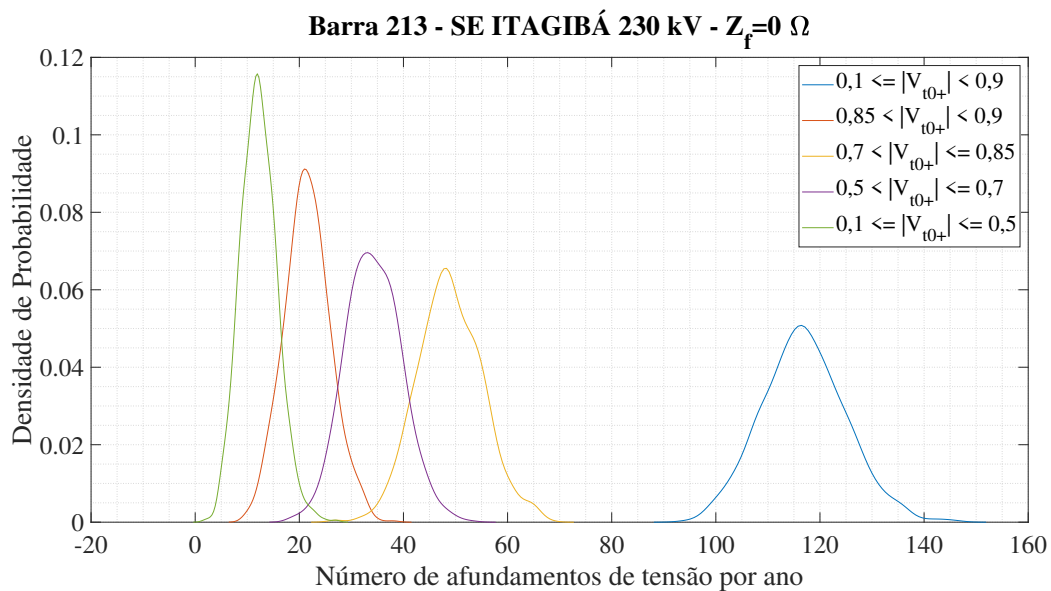


A Figura 30 exibe a quantidade de SMC que resultaram nos registros quantitativos de afundamentos observados para a Barra 213. O gráfico de barras mostra que, dentre as 1000 SMCs, embora a média de afundamentos tenha convergido para 117, a moda observada, ou seja, o quantitativo que mais se repetiu ao longo dos anos, foi de aproximadamente 116 afundamentos, tendo se repetido 65 vezes. No entanto, o maior número de eventos exibido no gráfico de barras nem sempre irá coincidir com o valor exibido nos gráficos de tendência da Figuras 29 e isso ocorre pela maior sensibilidade desses gráficos à quantidade de simulações. Logo, o número médio de afundamentos esperados anualmente, na barra da SE será o exibido nos gráficos de tendência que, de acordo com os gráficos da Figura 29 e 30 foi de aproximadamente 117, que se repetiu 52 vezes. Além disso, tem-se a curva de frequência acumulada de defeitos, cuja evolução pode ser acompanhada pelo eixo de ordenadas à direita. As informações dos gráficos da Figura 30 são uteis no que se refere ao dimensionamento de equipamentos que mitigue problemas relacionados à QEE. Por exemplo, essa figura mostra que embora a SE Itagibá esteja submetida a uma média de 117 afundamentos de tensão por ano, há uma probabilidade de 30 % desse número exceder 120 registros do defeito. Considerando-se por exemplo que a SE em questão tenha sido projetada para operar durante 40 anos, neste período o número médio de afundamentos poderia exceder 120 durante 12 anos. Essa informação é de grande relevância nos estudos de dimensionamento de equipamentos de mitigação e previsão de ônus anual dos problemas de afundamentos de tensão para a barra em estudo (RAMOS, 2009).

A Figura 31 fornece uma extensão das análises estatísticas vistas anteriormente, para outras classes de afundamentos de tensão, de acordo com a classificação adotada no Módulo

8 do [PRODIST](#) do [ONS](#), em termos de amplitude de afundamentos, apresentadas pelas curvas das funções de densidade de probabilidade de probabilidade aproximadas pela função *ksdensity* do Matlab®. Observa-se que a curva em azul apresenta resultados convergentes aos encontrados nos gráficos da Figuras 29 e 30 com valor médio de afundamentos em torno de 117. Além disso, nota-se que, para curtos francos, os afundamentos com maior probabilidade de ocorrência são aqueles cuja amplitude das tensões de pós-falta estão entre 0,1 e 0,5 p.u. seguidos dos afundamentos com amplitudes entre 0,85 e 0,9 p.u. A classe de afundamentos com amplitudes entre 0,5 e 0,7 p.u. aparece na sequência seguida do intervalo entre 0,7 e 0,85 p.u.; afundamentos cujas amplitudes são inferiores a 0,7 p.u. merecem uma atenção especial uma vez que podem trazer sérios problemas sobretudo para consumidores industriais([OLGUIN, 2005](#)).

Figura 31 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

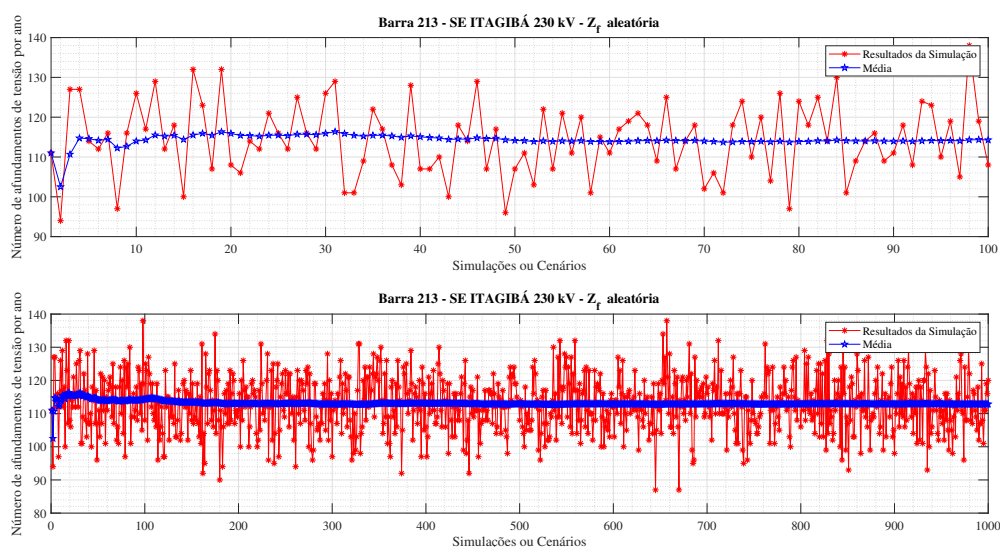


As mesmas análises feitas para curtos francos serão estendidas para o barramento 213 ([SE Itagibá 230 kV](#)) foi feita para curtos não francos em dois cenários: considerando-se a impedância de falta como uma variável aleatória e por último, a impedância de falta igual a 15Ω , respectivamente. Nas seções a seguir serão apresentados os resultados analisados para estes dois casos. Convém mencionar que os resultados exibidos nas próximas seções foram decorrentes à realização de novos sorteios de [SMC](#), adotando-se as mesmas considerações de probabilidade para as demais variáveis ([LT](#) sorteada, tipo de falta e posição da falta).

5.2.2.1.2 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória

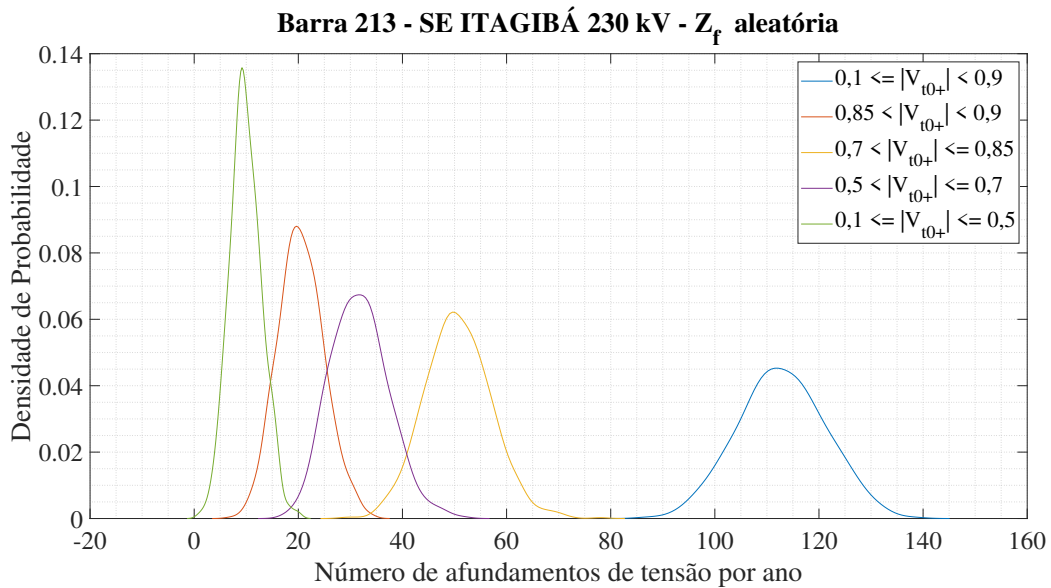
Para os casos em que se considera a impedância de falta como variável aleatória nas simulações, a previsão de afundamentos de tensão anual caiu para 113, conforme resultados exibidos nos gráficos de performance e tendência da Figura 32.

Figura 32 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



Comparando-se os gráficos de densidade de probabilidades das classes de afundamentos mostrada na Figura 33 com a apresentada na Figura 31, observa-se embora seja registrado um aumento considerável do número afundamentos com magnitude entre 0,1 e 0,5 p.u, o número de afundamentos das demais classes diminui, quando é considerada a aleatoriedade da impedância de falta. As faltas sólidas causam maiores quantitativos de afundamentos no geral para as classes com magnitude entre 0,85 e 0,9 p.u , 0,7 e 0,85 p.u , 0,5 e 0,7 p.u e 0,1 e 0,9 p.u no entanto para a classe entre 0,1 e 0,5 p.u isso não ocorre e uma das razões que pode causar esse efeito são as alterações das tensões de sequência no barramento devido ao aumento da impedância de falta (RAMOS, 2009).

Figura 33 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.

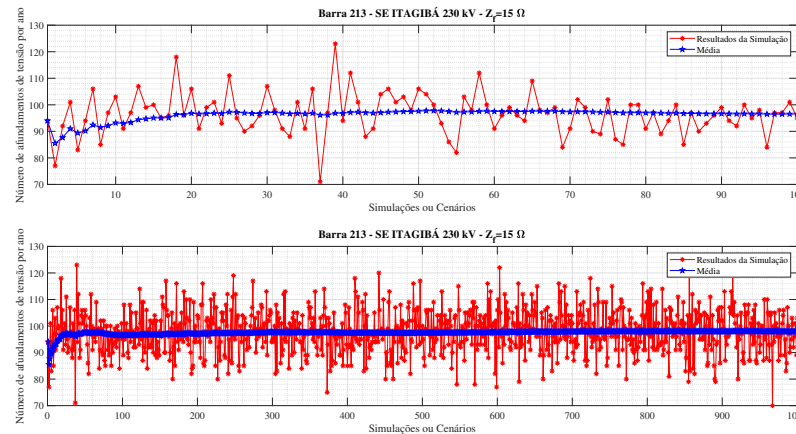


Na sequência, será feito um estudo considerando impacto de uma impedância de falta fixa relativamente alta (*i.e* de 15Ω) que será comparada aos outros casos. Estudos individualizados para outros valores de impedâncias de falta serão brevemente considerados no que se refere às curvas de densidade de probabilidade das classes, ao final da seção 5.2.2.1.4.

5.2.2.1.3 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω

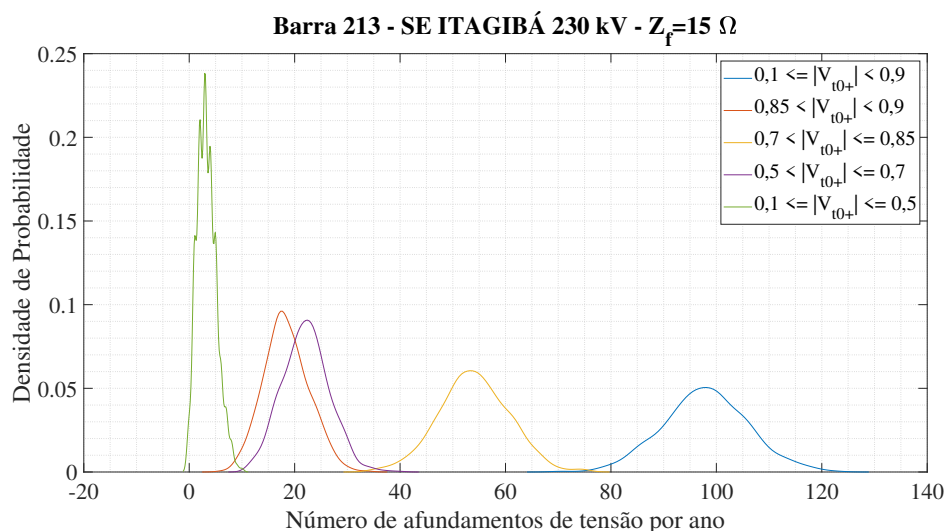
Os gráficos da Figura 34 mostram que, para o cenário de impedância de falta fixa em 15Ω , a quantidade média de afundamentos de tensão diminui consideravelmente. Neste caso, o valor anual esperado por ano na Barra 213 (SE Itagibá 230 kV) será de 98 ocorrências do defeito.

Figura 34 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 213 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω .



A análise das classes de tensão, mostradas na Figura 35 mostra um aumento expressivo de afundamentos com amplitude entre 0,5 e 0,7 p.u. Os afundamentos desta classe tendem a igualar-se aos afundamentos com amplitude entre 0,85 e 0,9 p.u. Comparando-se a Figura 35 com as curvas das classes de tensão exibidas nas Figuras 31 e 33 observa-se que considerando-se a impedância de falta com um alto valor (15Ω) houve diminuição apenas na classe de afundamentos com magnitude entre 0,7 e 0,85 p.u sendo registrado valores maiores nas demais classes, sobretudo na classe de magnitude entre 0,1 e 0,5 p.u que mais que dobrou em registros de ocorrências; convém ressaltar que os valores negativos da curva verde surgem devido às aproximações do Matlab® por um vetor de zeros em uma gaussiana (RAMOS, 2009).

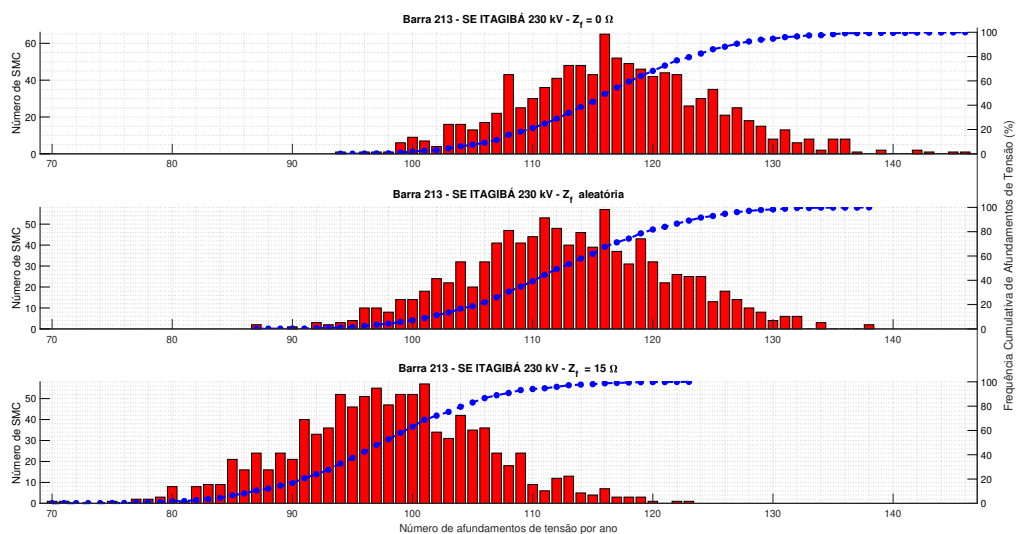
Figura 35 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15Ω .



5.2.2.1.4 Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo

De um maneira geral, o gráfico de barras das ocorrências registradas no cenário de 1000 anos, em conjunto com as frequências acumuladas para os três casos considerados de SMC na barra 213 podem ser visualizados na Figura 36. Observa-se que na abordagem dos curtos francos, a média estimada de defeitos foi a maior, com 117 registros, já o cenário onde a impedância de falta é considerada suficientemente alta (15Ω) apresenta a menor média de eventos. Estendendo-se as análises para além da abordagem Monte Carlo, observa-se que a média de afundamentos da abordagem de impedância fixa igual a 15Ω converge com o valor do gráfico de índice SARFI absoluto acumulado da Figura 19, do método de Posição de Falta, estando em 98 registros do defeito. Além disso, nota-se um maior distanciamento do quantitativo de afundamentos que mais se repete da média registrada nos cenários de impedância aleatória e fixa em 15Ω sendo as médias e modas para os dois casos 113 e 116 e 98 e 101 registros, respectivamente.

Figura 36 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω



Uma visão macro do impacto da impedância de falta é dada pelas curvas de frequência cumulativa da Figura 37 e de densidade de probabilidade na Figura 38 que apresentam um comparativo dos três estudos anteriores. Nota-se que, considerando-se a impedância de falta como variável aleatória, o número médio de afundamentos fica entre um valor máximo (dado para curtos francos) e mínimo (causado pela impedância de falta de 15Ω). Isso mostra que considerar a impedância de falta como variável aleatória, é razoável uma vez que a média de afundamentos não ficará subestimada (15Ω) nem sobrestimada (0Ω).

Figura 37 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

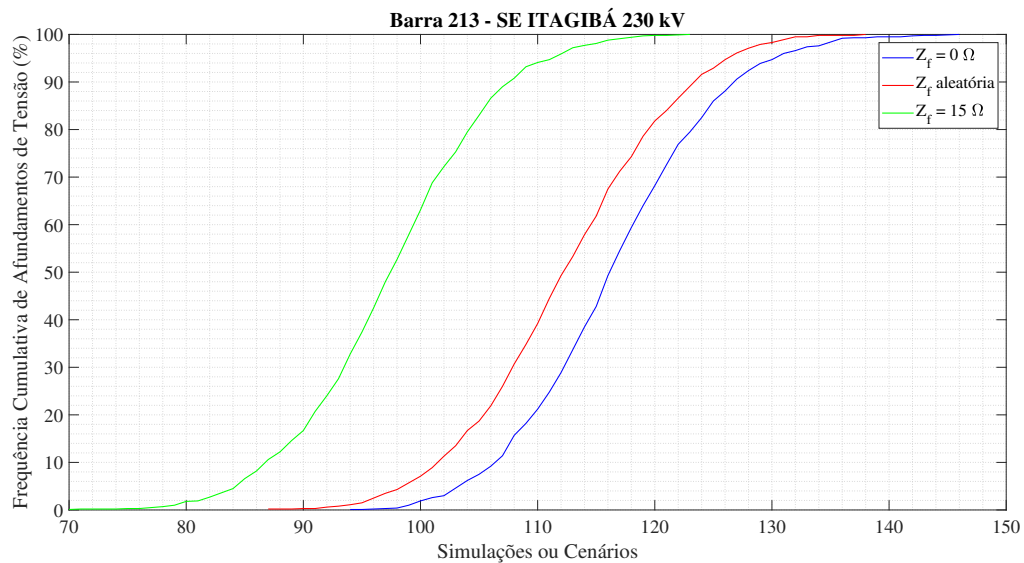
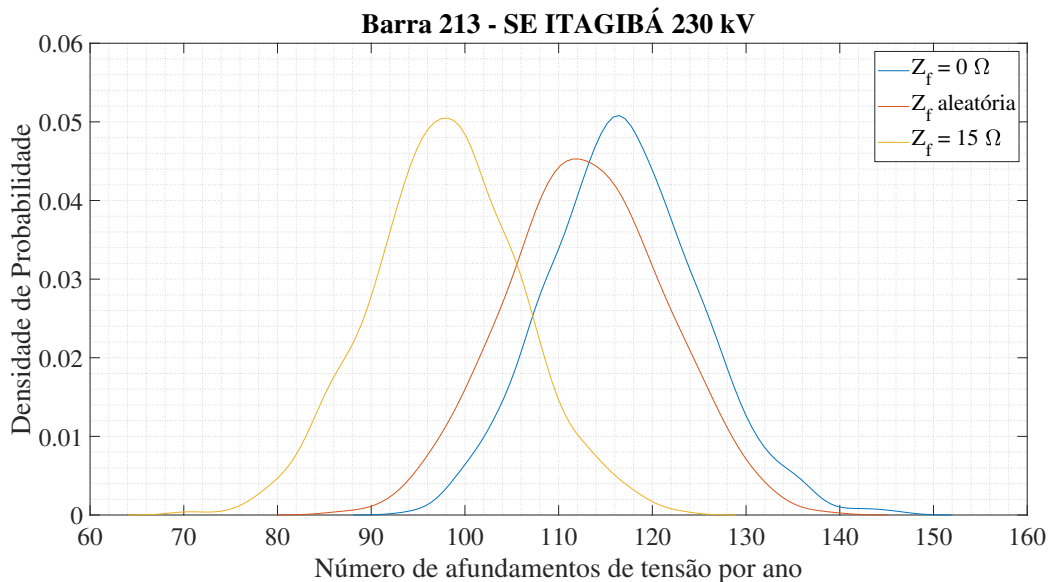
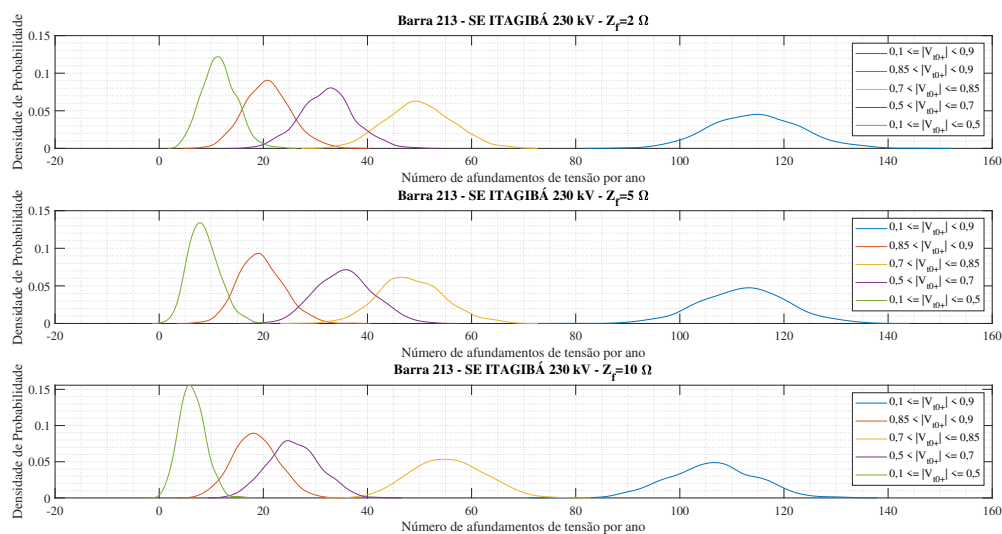


Figura 38 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω



Uma análise estendida para outros valores de impedância de falta fixados entre 0 e 15Ω pode ser feita e será notado que tanto as curvas de frequência cumulativa como as de densidade de probabilidade estão localizadas entre estes valores extremos, da mesma forma que a impedância de falta aleatória mostrada nos gráficos das Figuras 37 e 38, logo, para os valores de impedância entre 2 e 10Ω apenas os impactos dessas impedâncias nas classes de afundamentos de tensão serão analisadas, conforme apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 213 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω



Nota-se pelas Figuras 33 e 39 que para cada impedância de falta utilizada nos curtos não francos uma característica particular é observada e isso ocorre devido à modificação das tensões de sequência no ponto de monitoração do defeito, causada pela impedância de falta. Para a impedância de falta igual a 2Ω , há um maior quantitativo de afundamentos nas classes entre 0,7 e 0,85 p.u seguida da classe de magnitudes entre 0,5 e 0,7 p.u em comparação aos outros dois casos (5Ω e 10Ω). Para o caso de impedância fixa igual a 5Ω , nota-se que a classe de tensão de maior ocorrência de afundamentos em comparação às demais é a de magnitudes entre 0,85 e 0,9 p.u. Quando é considerada impedância de falta igual a 10Ω , as maiores ocorrências em comparação às demais foram registradas nas classes entre 0,1 e 0,9 p.u. Por fim, nota-se que em todos os casos foi observado maior quantitativo de afundamentos na classe compreendida entre 0,1 e 0,5 p.u, assim como identificado nos casos anteriores (curtos francos, impedância aleatória e fixa em 15Ω).

Nas próximas seções, serão feitas as mesmas análises para estudos de afundamentos de tensão para as demais barras da zona de vulnerabilidade, cujos resultados serão apresentados brevemente a seguir.

5.2.2.2 Resultados na Barra 276 (Usina Funil 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

A barra 276, correspondente à Usina de Funil (230 kV), localizada no município de Ubaitaba(BA), foi a que apresentou a maior média de afundamentos anual, conforme gráficos das Figuras 40 e 41, que mostram que essa média ficou em torno de aproximadamente 119 ocorrências, para curtos-circuitos sólidos.

Figura 40 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

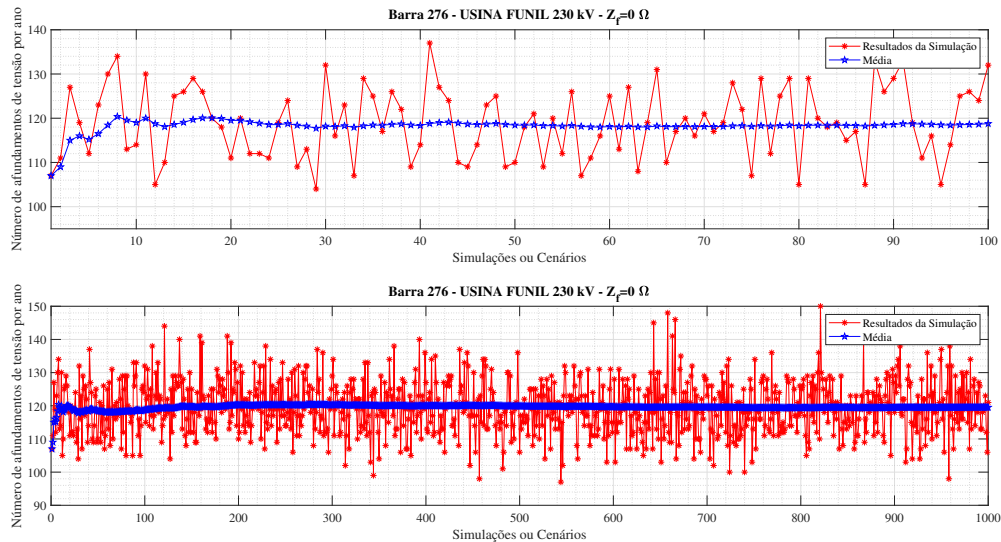
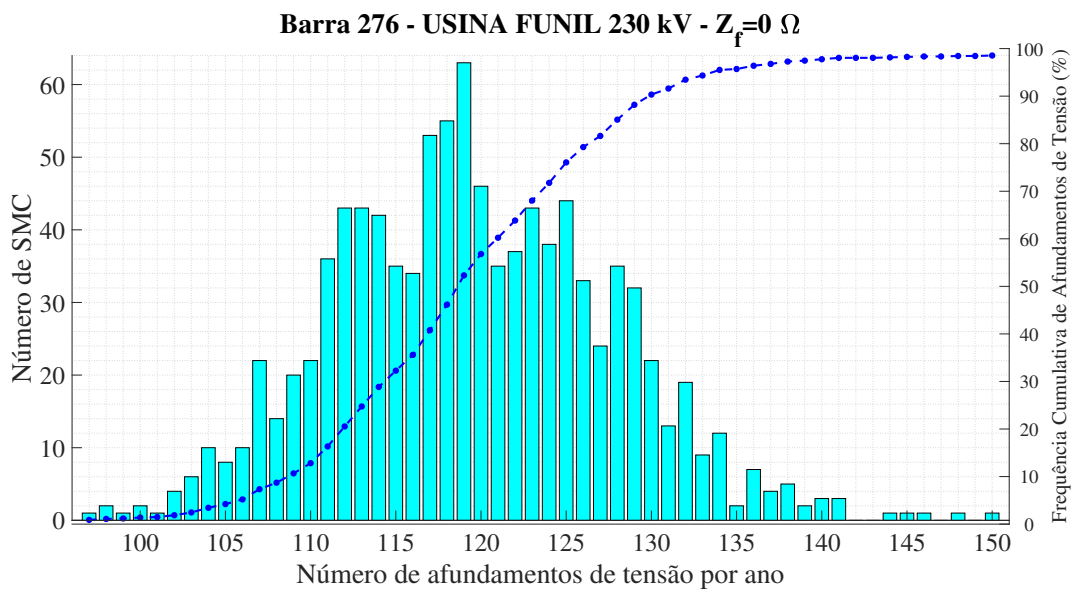


Figura 41 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

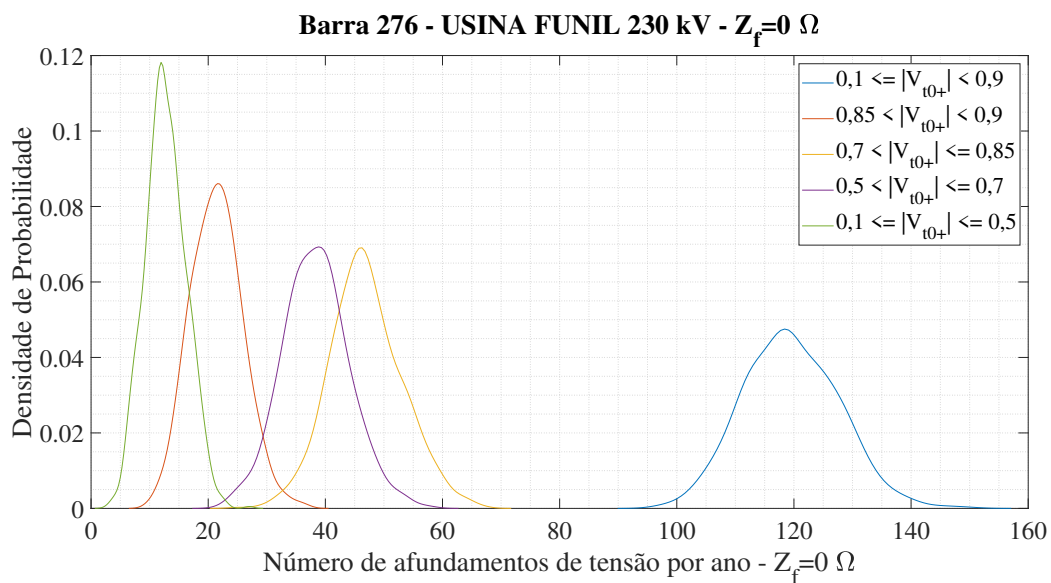


Os gráficos da Figura 40 revelam o comportamento aleatório dos afundamentos de tensão devido às faltas sólidas na rede. Desta vez, o número de afundamentos que mais se repete converge com a média de eventos, sendo 119 ocorrências, registradas 63 vezes, conforme visualizado no gráfico de barras da Figura 41. A curva de frequência acumulada sugere que 40% dos afundamentos previstos por ano irão exceder 120. Considerando que a

usina tenha sido projetada para operar durante 30 anos, neste período essa será exposta a um quantitativo de afundamentos maior que 120 durante 12 anos, revelando a alta criticidade da usina.

As curvas de densidade de probabilidade para as diferentes classificações de afundamentos adotadas pelo PRODIST são exibidas na Figura 42 e revelam mais uma vez uma predominância de afundamentos de tensão com magnitude entre 0,1 e 0,5 p.u.; as classes de afundamentos cujas magnitudes de tensões pós-falta entre 0,7 e 0,85 p.u. e 0,5 e 0,7 p.u. apresentam densidades de probabilidade muito próxima sendo a segunda ligeiramente menor. Sobre as outras duas classes, pode-se esperar uma média de aproximadamente 22 registros com amplitude entre 0,85 e 0,9 p.u. sendo a segunda classe que mais se repete e 119 para a classe entre 0,1 e 0,9 p.u. dada pela curva azul, o que revela convergência com a média indicada pelos gráficos da Figura 40.

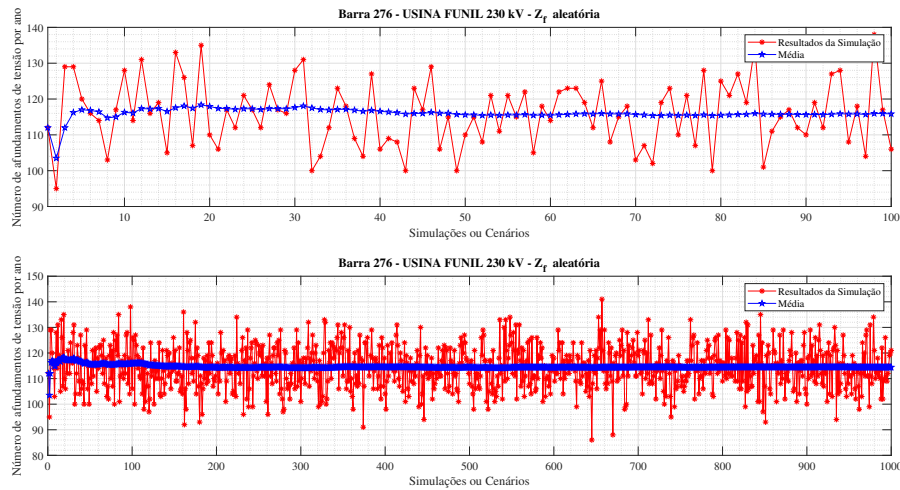
Figura 42 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



5.2.2.2.1 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória

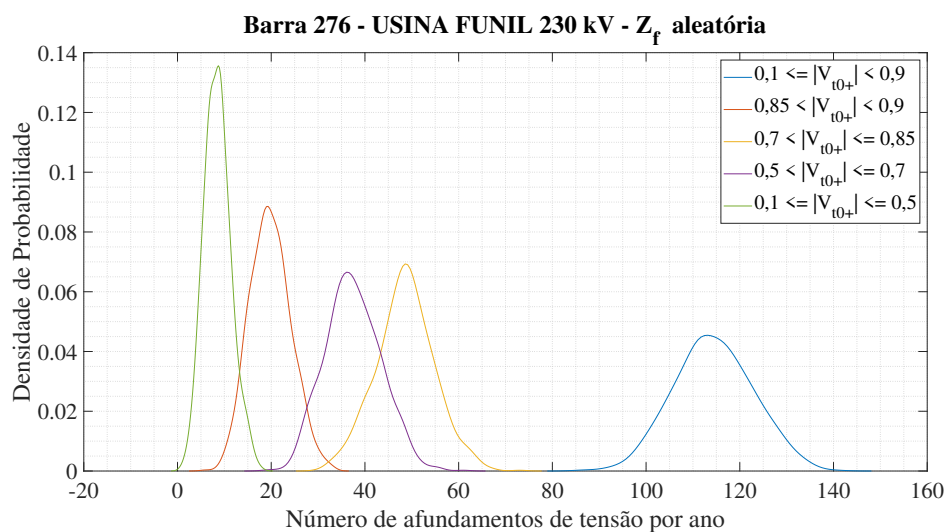
Novamente, pode-se adotar uma abordagem de SMC considerando-se a impedância de falta como variável aleatória de acordo com a distribuição de probabilidade adotada na Tabela 9. O mapeamento do quantitativo de afundamentos resultou nos gráficos de performance e tendência da Figura 43 que mostra que a média de afundamentos diminuiu para aproximadamente 114 ocorrências.

Figura 43 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



As curvas de densidade de probabilidade da Figura 44 mostram que, em geral, a classe de tensão que sofreu maior redução no quantitativo de afundamentos em comparação ao caso anterior dos curtos francos (exibido na Figura 42) foi as de amplitude entre 0,5 e 0,7 p.u. Para as demais classes, nota-se um aumento razoável, no entanto, em geral foram observados menos registros do distúrbio, o que fica claramente evidenciado pela menor densidade de probabilidade na classe de afundamentos entre 0,1 e 0,9 p.u.

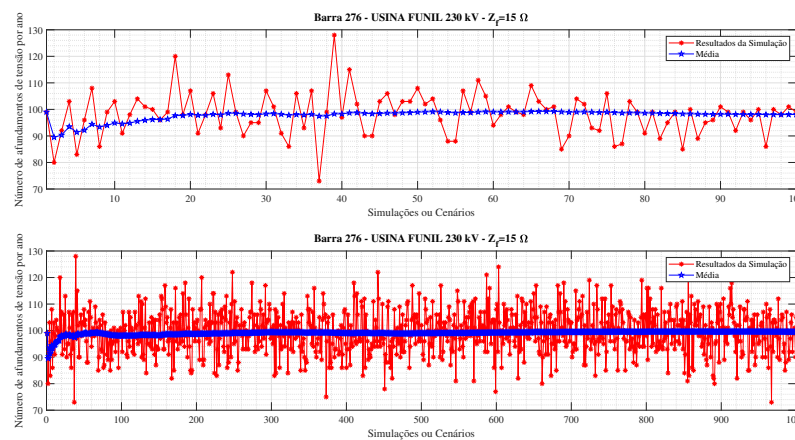
Figura 44 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



5.2.2.2.2 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω

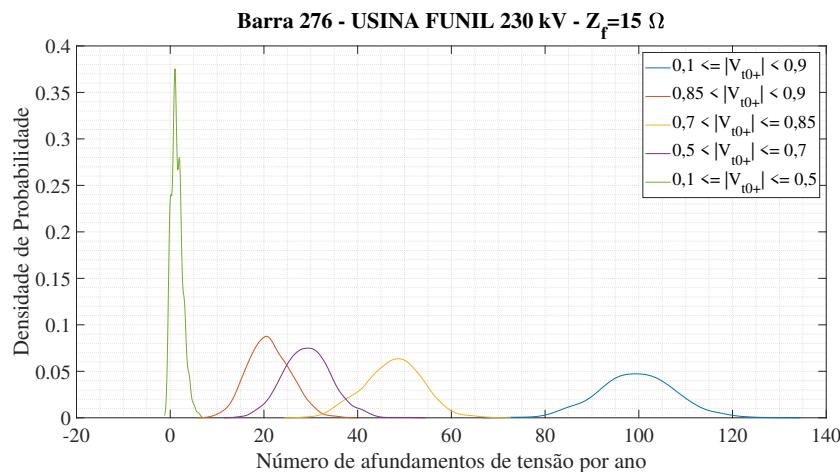
Ao considerar o valor extremo possível para a impedância de falta, ou seja, 15Ω , a média de afundamentos de tensão estimada será de aproximadamente 99, conforme mostrado nos gráficos da Figura 45. Curiosamente, o número esperado do defeito foi o mesmo observado na Simulação do Método das Posições de Falta, conforme visto na Figura 19 da seção 5.1.

Figura 45 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 276 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω .



As curvas de densidade de probabilidade das classes exibidas na Figura 46 revelam que embora o número de ocorrências tenha diminuído de uma maneira geral, houve aumento expressivo das classes mais críticas com amplitudes situadas entre 0,1 e 0,5 p.u e 0,5 e 0,7 e p.u.

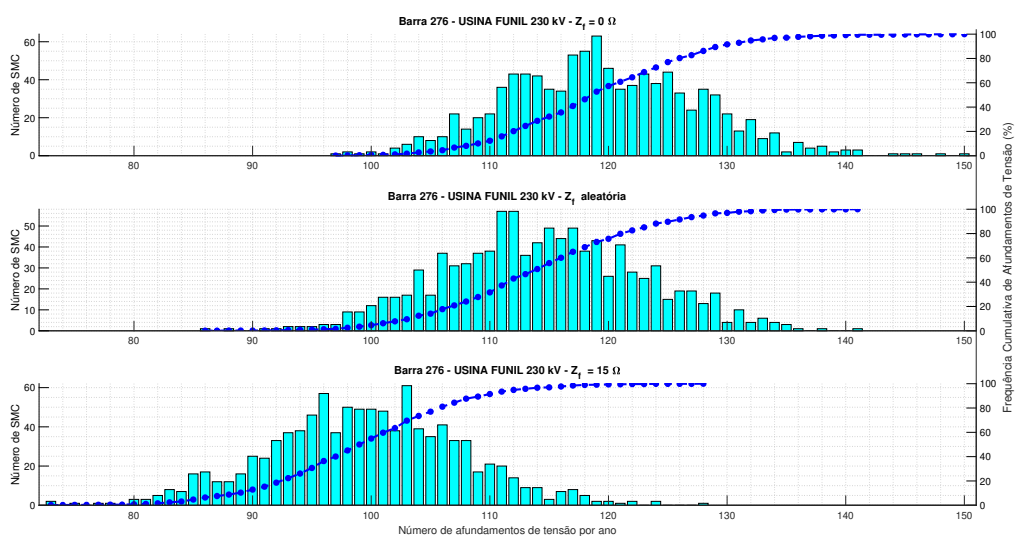
Figura 46 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15Ω .



5.2.2.2.3 Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo

Observa-se, a partir da comparação dos gráficos de barra e frequências cumulativas da Figura 47 que ao considerar a impedância de falta como uma variável aleatória, a média de afundamentos de tensão que é de 114 não coincide com o valor que mais se repetiu dentre as amostras que foi de 112 registros, além disso, apenas 20 % das ocorrências estimadas por ano irão exceder 120 neste cenário o que revela um superdimensionamento de ocorrências críticas para curtos francos. Não obstante, em se tratando de um alto valor de impedância de falta, nota-se que embora a média tenha sido convergente com a abordagem de posição de falta, este não se revela um bom estimador de ocorrências mais críticas de quantitativos de afundamentos, uma vez que registros de amostras maiores foi bem menos frequente.

Figura 47 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω



Nas Figuras 48 e Figura 49 é fornecida uma visão macro do impacto da impedância de falta observa nas análises anteriores para os três cenários de impedâncias de falta: igual a 0Ω , aleatória e equivalente a 15Ω . Assim como visto no barramento anterior, as curvas de frequência cumulativa e densidade de probabilidade revelam considerar a impedância de falta como variável aleatória na SMC é bastante razoável, uma vez que esta não ficará subestimada (15Ω) ou superestimada (curtos sólidos).

Figura 48 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

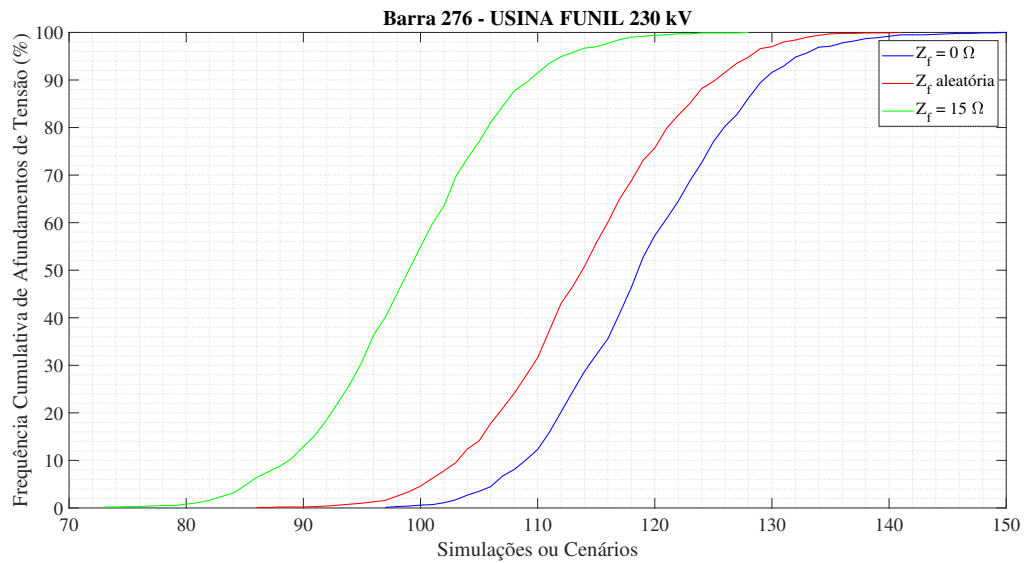
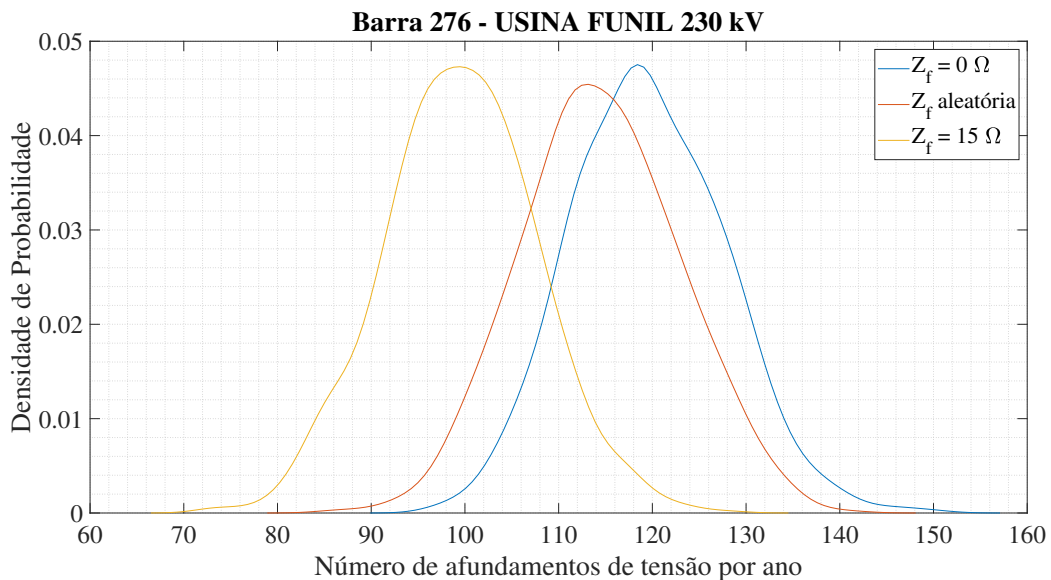
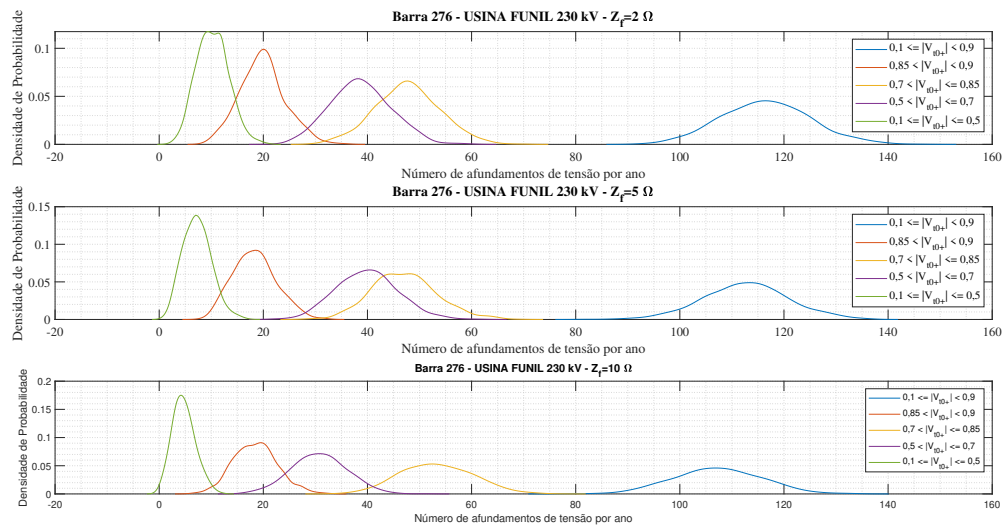


Figura 49 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω



Análises das classes de afundamentos para outros valores de impedância de falta são exibidas na Figura 50 que revelam, conforme já esperado, que a diminuição do quantitativo de afundamentos de um maneira geral, com o aumento da impedância é "compensado" pela maior probabilidade de ocorrências de afundamentos com magnitudes de tensão mais críticas (abaixo de 0,5 p.u.).

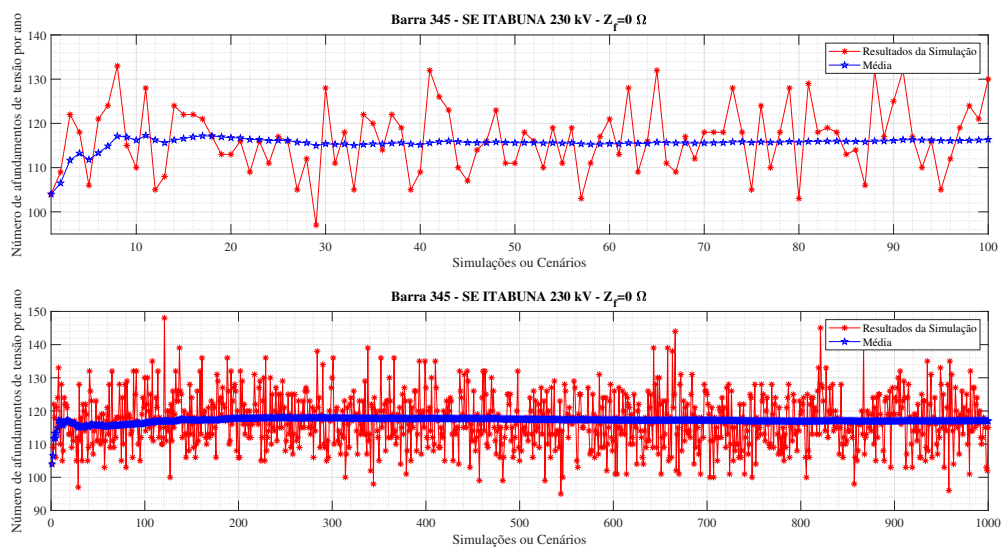
Figura 50 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 276 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω



5.2.2.3 Resultados na Barra 345 (SE Itabuna 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

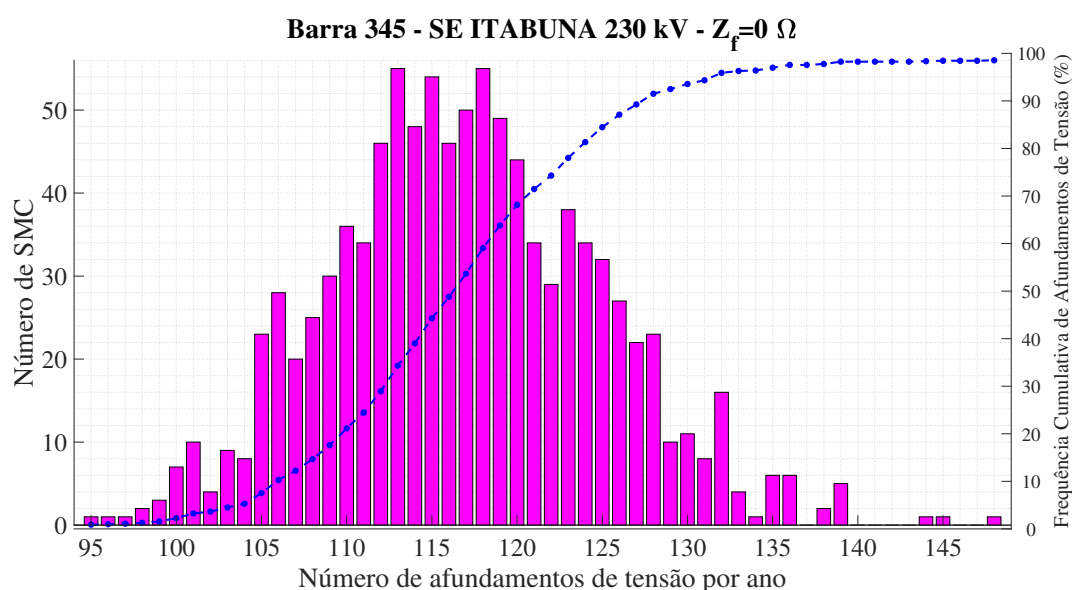
As performances da SMC para mapeamento de afundamentos de tensão, índice SARFI-90 na Barra 345 (SE Itabuna 230 kV) são exibidas nas Figuras 51 e 52 para horizontes de 100 e 1000 anos.

Figura 51 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



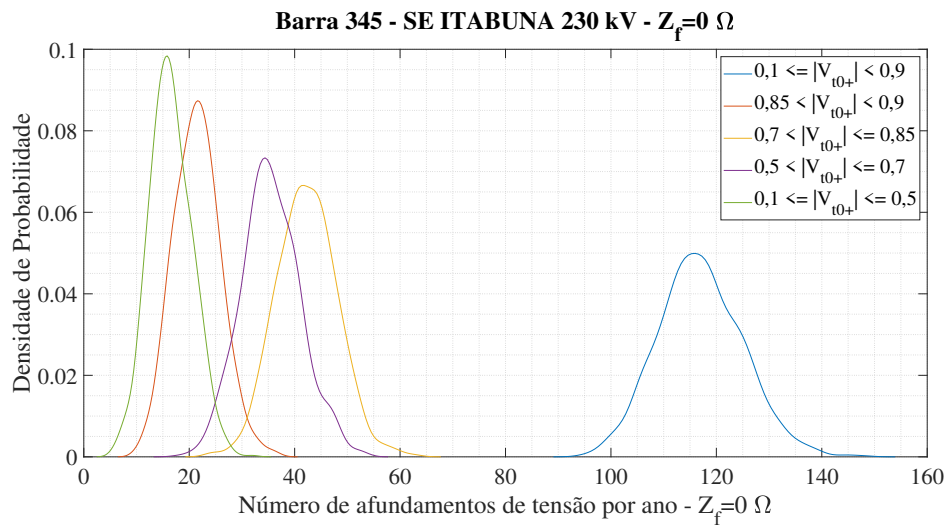
Nota-se, pela curva de tendência da Figura 51 que a média de afundamentos de tensão converge para aproximadamente 117 ocorrências, no entanto, conforme Figura 52, a moda das amostras está em torno de 118, o que se deve, como já sabido, à maior sensibilidade das curvas de desempenho aos resultados das simulações. Observa-se pelo gráfico de frequência cumulativa uma previsão de 30% de ocorrências superiores a 120. Considerando que a SE tenha sido projetada para operar durante 30 anos, neste período essa será exposta a um quantitativo de afundamentos maior que 120 durante 9 anos.

Figura 52 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



Os gráficos de densidade de probabilidade exibidos na Figura 53 revelam que a maior parte das ocorrências registradas estão nas classes de afundamentos cujas magnitudes estão entre 0,1 e 0,5 p.u. seguida da classe de valores entre 0,85 e 0,9 p.u., um pouco menor. A curva em azul é convergente aos resultados exibidos nas Figuras 51 e 52 com uma média de 116 ocorrências mapeadas. Sobre as outras classes, observa-se um quantitativo médio de aproximadamente 34 para classe de afundamentos entre 0,5 e 0,7 p.u. e 42 para a classe entre 0,7 e 0,85 p.u.

Figura 53 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



5.2.2.3.1 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória

Os gráficos da Figura 54 mostram que a média de afundamentos de tensão para a barra 345 cairá para aproximadamente 112, no caso em que se considera a impedância de falta como sendo aleatória. A Figura 55 mostra que aumentou a quantidade de afundamentos com amplitude entre 0,85 e 0,9 p.u e entre 0,1 e 0,5 p.u sendo notada, entretanto, uma diminuição de afundamentos nas demais classes, sobretudo aqueles com magnitude de tensão entre 0,7 e 0,85 p.u.

Figura 54 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.

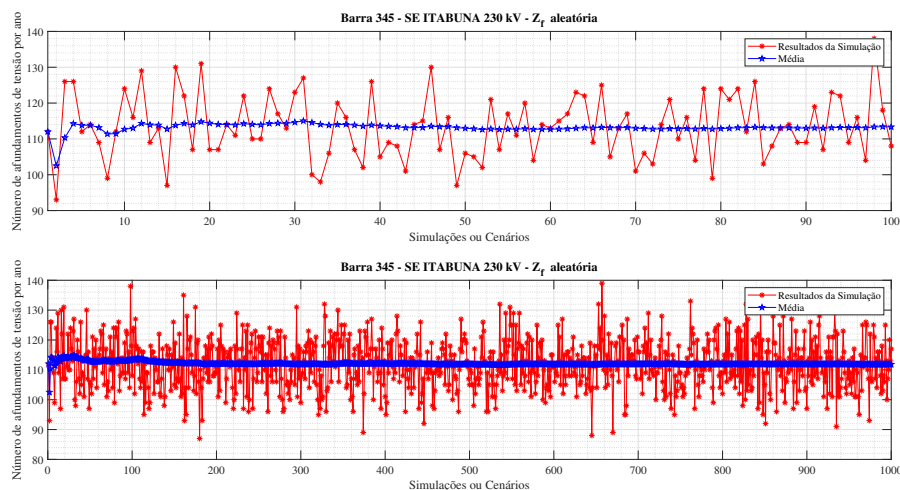
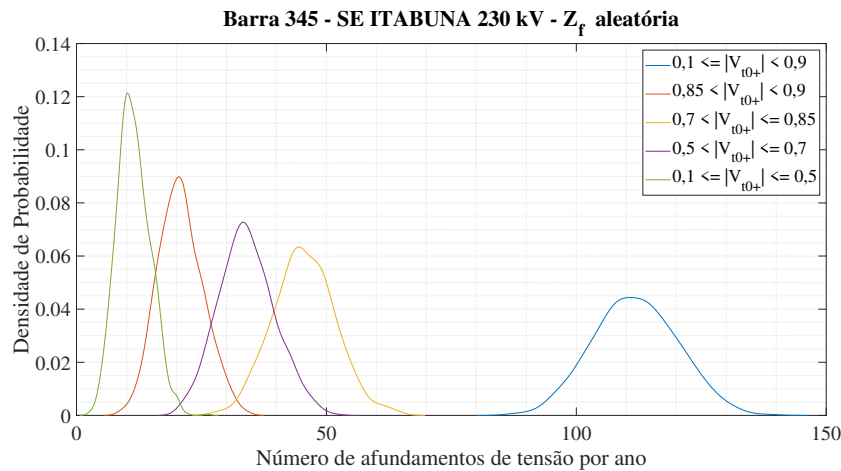


Figura 55 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



5.2.2.3.2 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω

Ao considerar o maior valor possível para a impedância de falta, nota-se que o número esperado de afundamentos de tensão, mostrado nos gráficos de tendência da Figura 56, será de aproximadamente 97, que está próximo das 98 ocorrências estimadas na abordagem das Simulações das Posições de Falta, da seção 5.1. Embora apresente a menor taxa de ocorrências, uma observação do comportamento das curvas de densidade das classes de tensão dada pelos gráficos da Figura 57, mostra que a única classe que diminuiu foi a dos afundamentos cuja amplitude está entre 0,7 e 0,85 p.u sendo observado um aumento considerável em todas as demais classes.

Figura 56 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 345 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω .

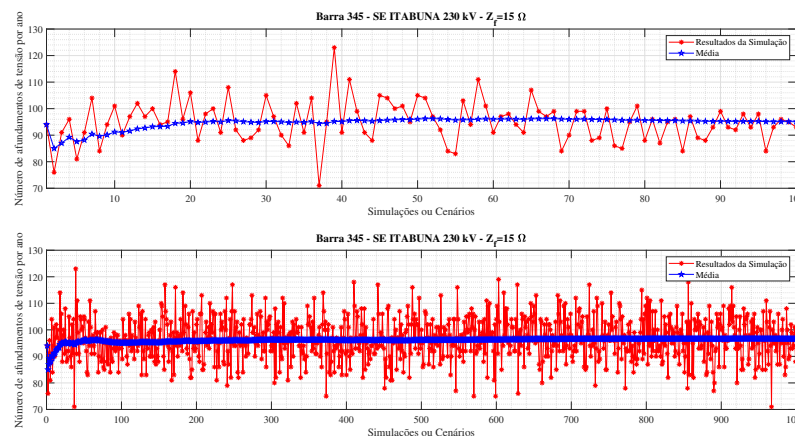
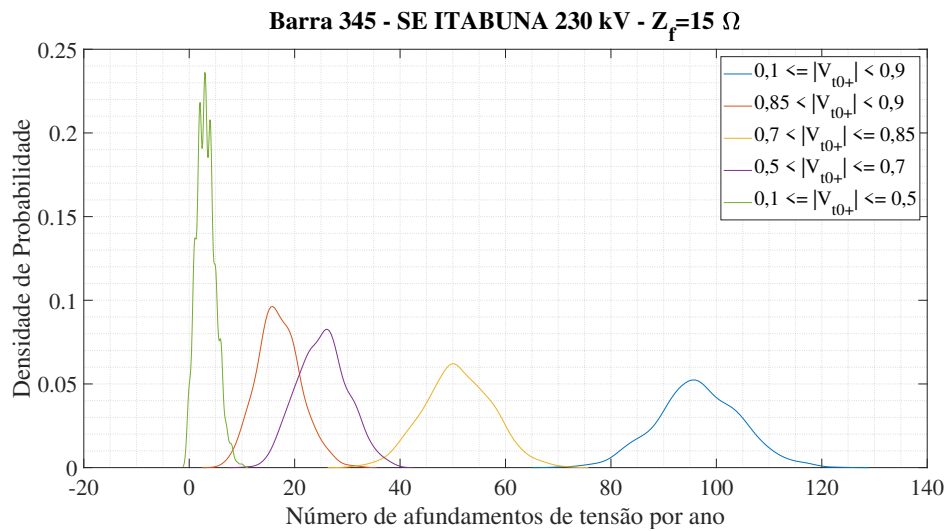


Figura 57 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15 Ω.



5.2.2.3.3 Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo

Uma comparação quantitativa dos cenários de simulações na barra 345 apresentados anteriormente pode ser ilustrada nos gráficos de distribuição de frequência e frequência cumulativa da Figura 58 que conforme melhor detalhado nos gráficos das Figuras 59 e 60 revelam que os valores de afundamentos registrados quando a variável aleatória estarão situados entre as duas faixas extremas para a impedância de falta.

Figura 58 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0 Ω, variável aleatória e igual a 15 Ω

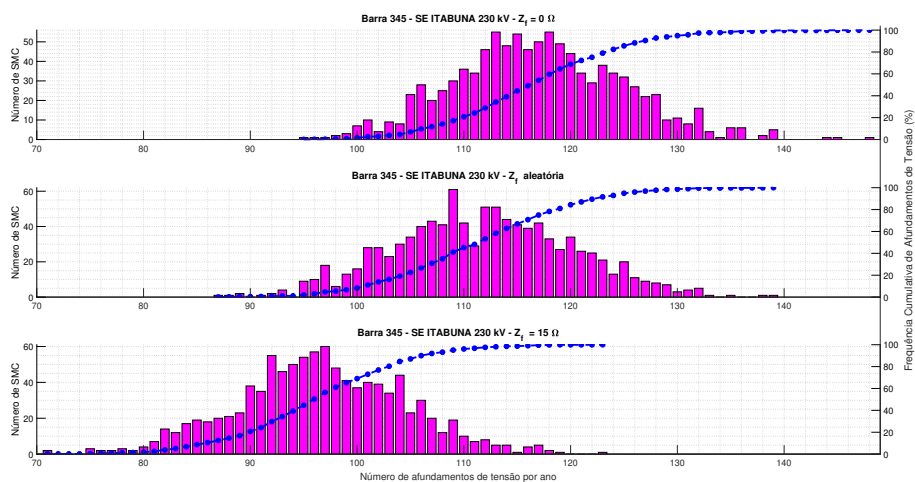


Figura 59 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

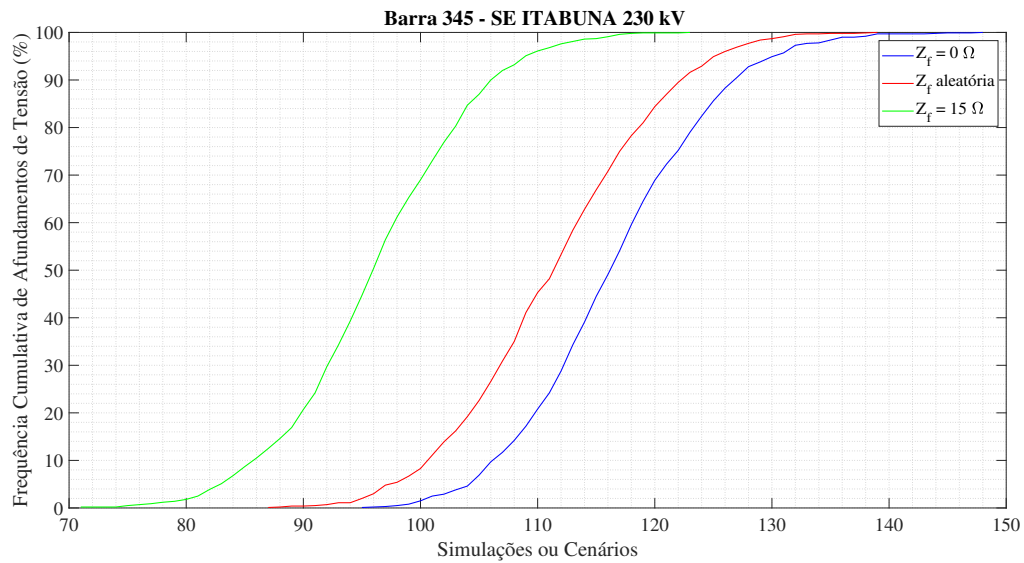
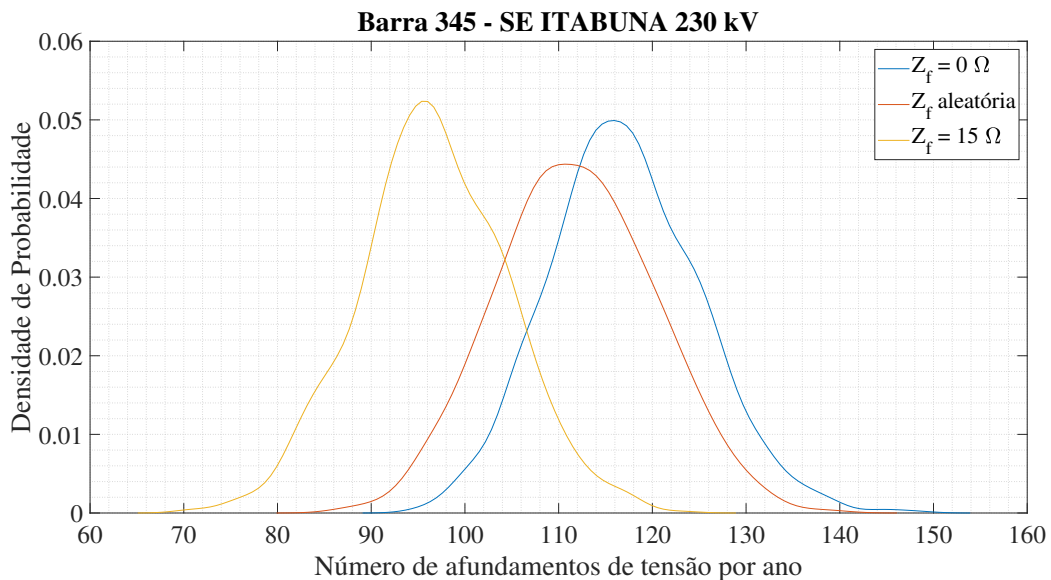


Figura 60 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

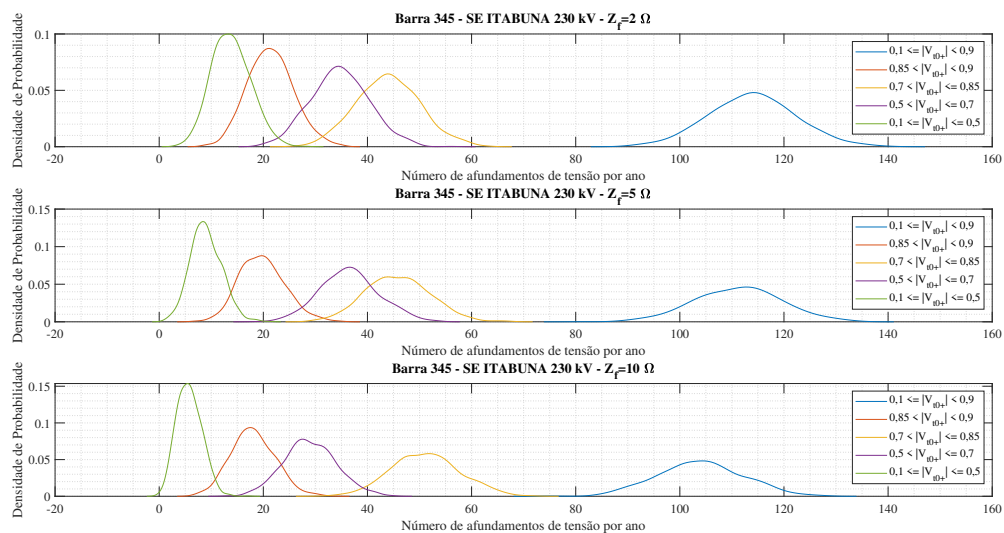


Uma vez que os gráficos de frequência acumulada de tensão tenderão a se deslocar mais para a esquerda à medida que o valor da impedância de falta cresce, valores mais altos para a quantidade de afundamentos de tensão, praticamente não serão registrados quando a impedância de falta for igual a 15Ω . Nota-se, por exemplo, que uma média de 20% de afundamentos registrados em um ano acima de 123 ocorrências para curtos

francos, reduzida para 10 % para faltar aleatórias e praticamente inexistente para o valor extremo da impedância de falta.

Conforme discutido nas seções anteriores, as análises para os demais valores de impedância de falta estarão entre os extremos notados para a impedância de falta (entre 0 e 15 Ω) sendo para efeitos práticos, dispensável, no entanto as curvas de densidade de frequência irão variar de acordo com a impedância. Logo, as curvas das densidades de frequência para cada classe possível dentre as demais impedâncias são mostradas na Figura 61. Nota-se a partir da comparação dos três gráficos que à medida que a impedância de falta aumenta, diminui-se o número de afundamentos médio na barra 345, no entanto aumenta-se a frequência dos afundamentos de maior severidade, cujas magnitudes estão abaixo de 0,5 p.u.

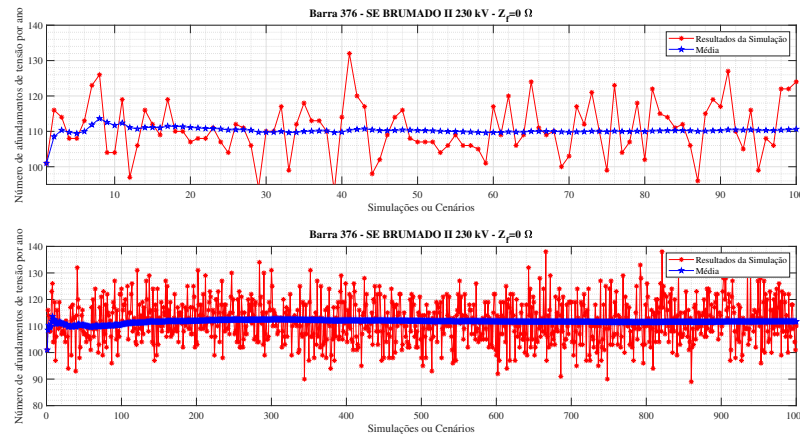
Figura 61 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 345 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2 Ω , 5 Ω e 10 Ω



5.2.2.4 Resultados na Barra 376 (SE Brumado II 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

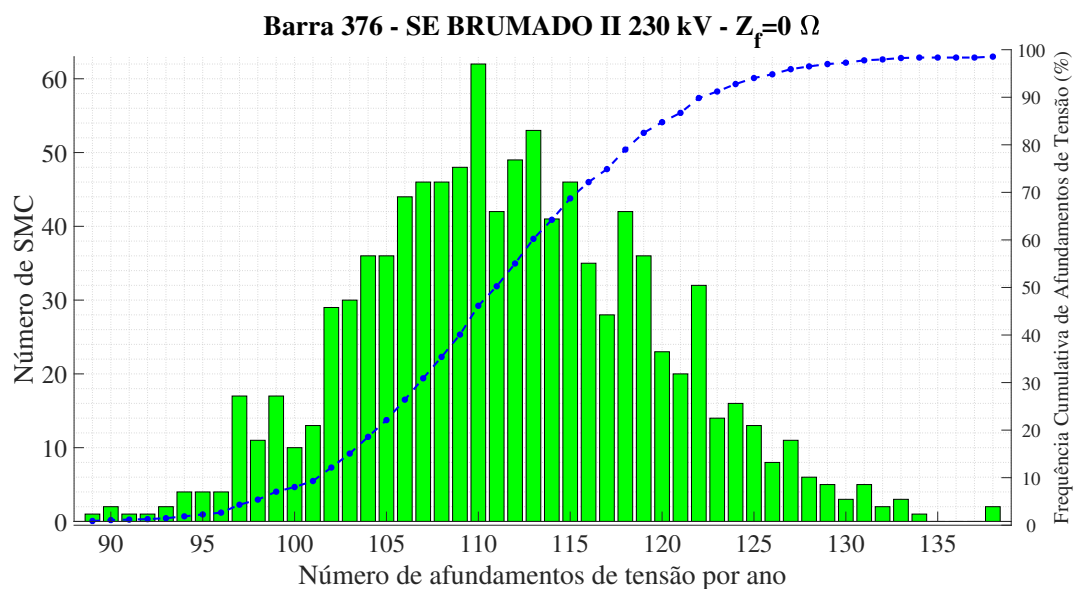
Observa-se uma média de 111 ocorrências do defeito na Barra 376 correspondente à SE Brumado-II 230 kV, conforme resultados exibidos na Figuras 62. O caráter aleatório dos registros de afundamentos de tensão é claramente exibido nos gráficos; além disso, nota-se que a Barra 376 foi a que apresentou o menor registro de eventos em toda a zona de vulnerabilidade mapeada.

Figura 62 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



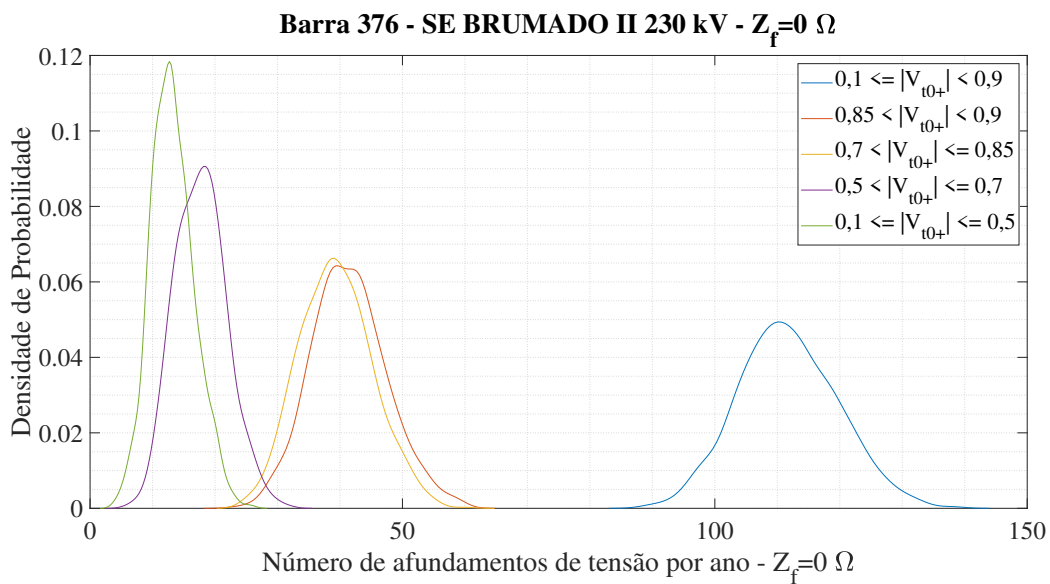
O gráfico de barras da Figura 63 informa que o maior quantitativo observado dentre as 1000 SMCs foi de 110 afundamentos de tensão e que apenas 10% das ocorrências registradas por ano irão exceder 10 afundamentos de tensão, o que revela que esse barramento é o "mais robusto" dentre os mapeados da zona de vulnerabilidade.

Figura 63 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



As curvas de densidade de probabilidade exibidas na Figura 64 revelam que, embora seja a menos suscetível a afundamentos de tensão, esta apresenta resultados com magnitudes mais críticas sendo as classes de tensões entre 0,1 e 0,5 p.u e 0,5 e 0,7 p.u. as de maior ocorrência. Os afundamentos das classes de tensão entre 0,85 e 0,9 p.u e 0,7 e 0,85 p.u apresentam distribuição de probabilidade ligeiramente próximas sendo os segundos mais frequentes.

Figura 64 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



5.2.2.4.1 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória

Para o caso em que se considera a impedância de falta como aleatória, o número previsto de afundamentos na barra 376 cai para aproximadamente 104, conforme mostrado nos gráficos da Figura 65. A Figura 66 mostra que houve uma diminuição na quantidade de afundamentos cujas amplitudes estão entre 0,5 e 0,7 p.u. Entretanto, a quantidade de afundamentos em todas as outras classes aumentou sendo os mais frequentes os menor amplitude, ou seja, os de maior severidade.

Figura 65 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.

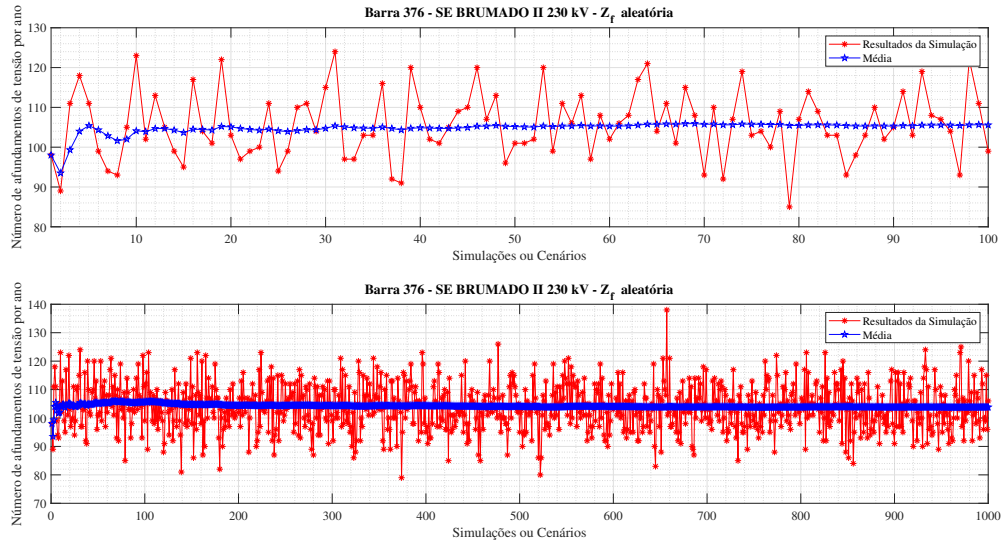
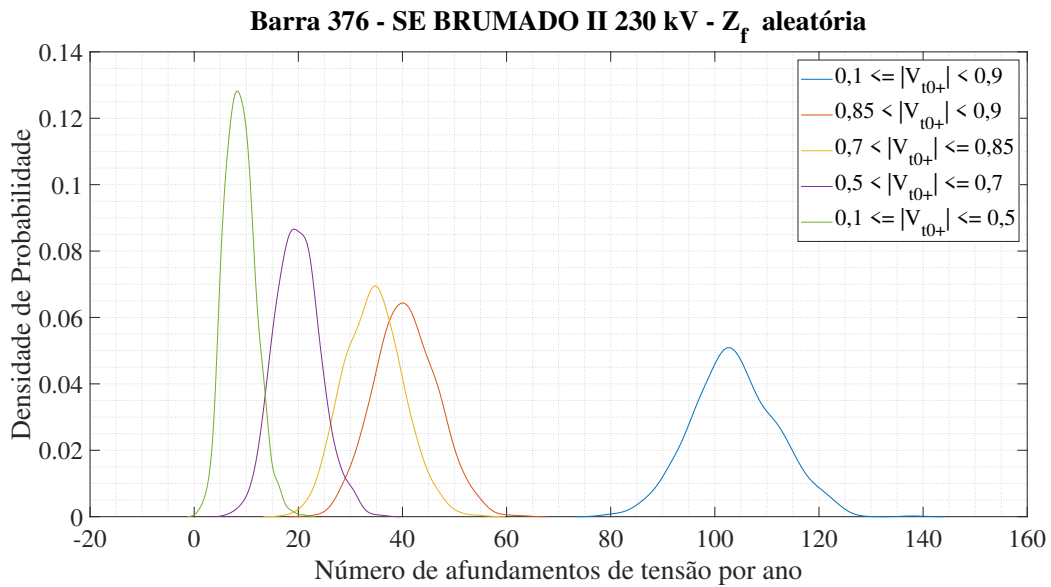


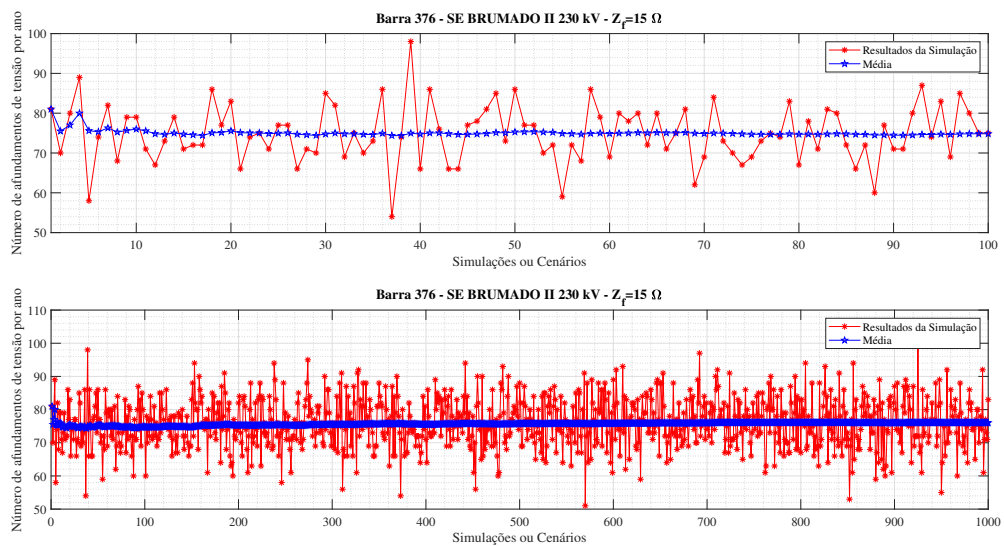
Figura 66 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



5.2.2.4.2 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15Ω

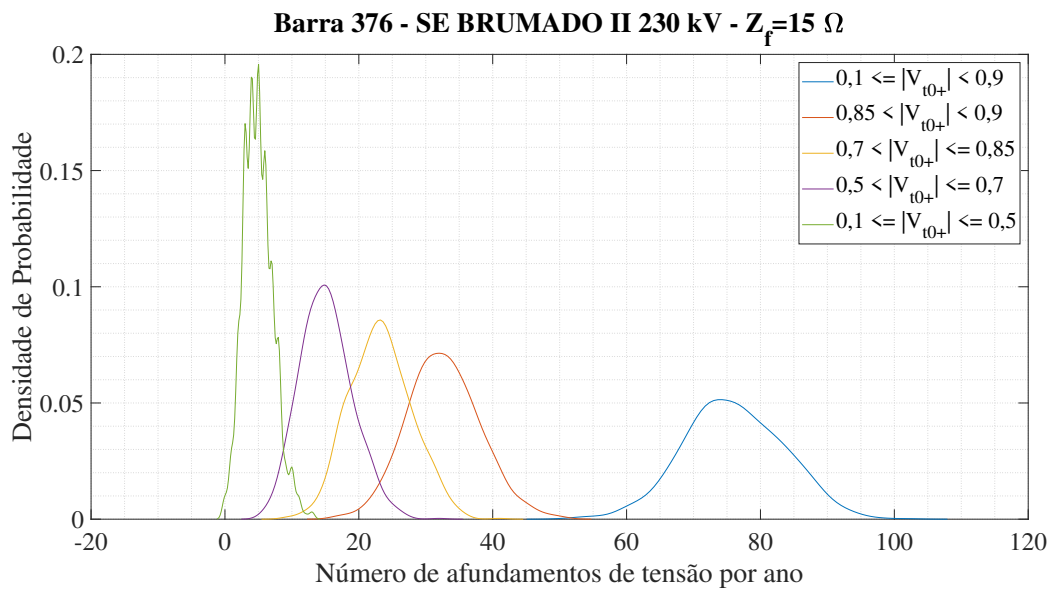
Ao considerar a impedância de 15Ω , o número esperado de afundamentos de tensão, mostrado na Figura 67, tende a convergir para uma média de 76 afundamentos que foi o menor valor relativo comparado com os verificados nas demais barras da zona de vulnerabilidade em análise.

Figura 67 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 376 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15Ω .



As curvas de densidade das classes de afundamentos de tensão de ocorrência anual na barra 376 revelam que embora haja uma grande redução na média de afundamentos, considerando o valor extremo superior para a impedância de falta, ou seja, de 15Ω , há um aumento de densidade de probabilidade para todas as classes em comparação aos cenários anteriores, todavia, esse aumento de densidade não necessariamente resultará num aumento das frequências absolutas do defeito, o que é revelado claramente pelo deslocamento das curvas para a esquerda, em comparação aos dois cenários anteriores.

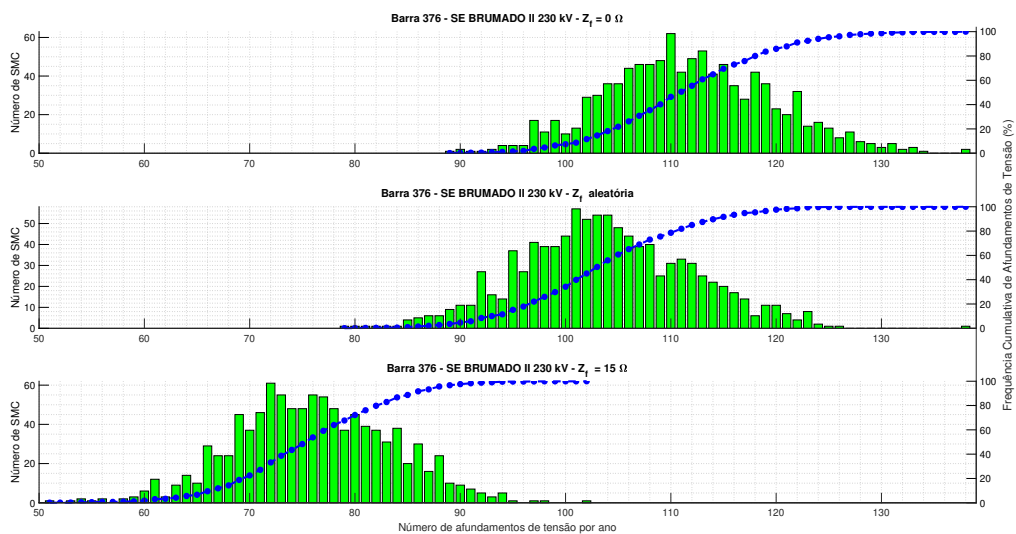
Figura 68 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15 Ω.



5.2.2.4.3 Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo

As curvas de distribuição de frequência absoluta dos gráficos de barras da Figura 69 mostram claramente que a barra 376 foi a que apresentou maior *range* de estimativas médias do defeito, em comparação às demais barras.

Figura 69 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0 Ω, variável aleatória e igual a 15 Ω



Nota-se que quando a impedância de falta é fixada em seu valor extremo superior (15Ω), os quantitativos de afundamentos são consideravelmente menores, o que é claramente exibido pelo afastamento significativo dos gráficos de frequência cumulativa e densidade de probabilidade da impedância superior em relação às curvas dos casos anteriores (curtos francos e não-sólidos com impedâncias aleatórias), mostrados nas Figuras 70 e 71, respectivamente.

Figura 70 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

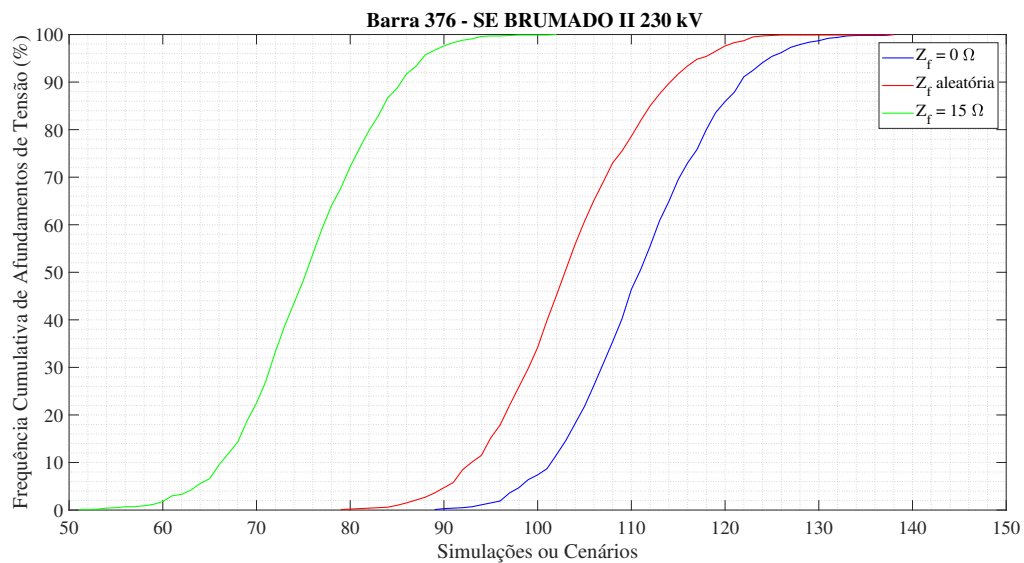
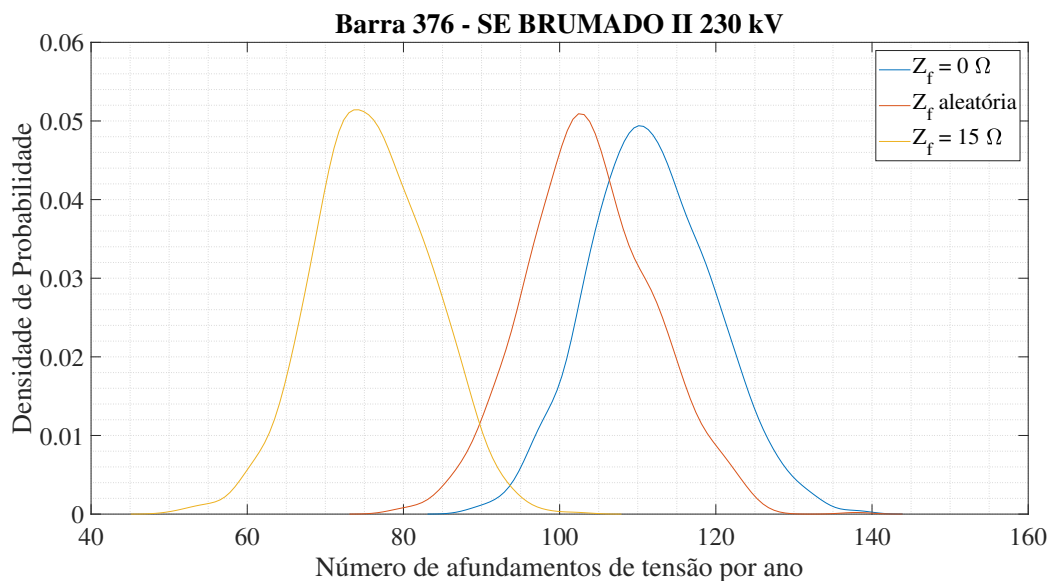
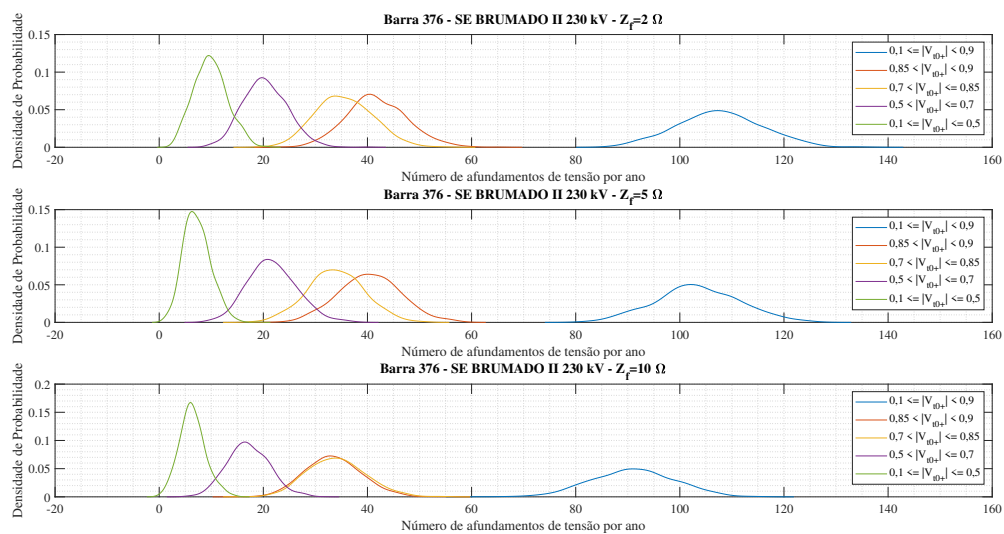


Figura 71 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω



As curvas das densidades de probabilidade para as impedâncias de falta fixadas em 2, 5 e 10 Ω são exibidas na Figura 72 e revelam a tendência de redução significativa das ocorrências de afundamentos com o aumento da impedância de falta, o que é evidenciado pelo deslocamento das curvas para a esquerda do eixo das abscissas. Curiosamente, é observado que para o caso em que a impedância de falta é considerada igual a 10 Ω a classe de tensão com amplitude entre 0,85 e 0,90 p.u. tende a igualar-se aos afundamentos com amplitude entre 0,7 e 0,85 p.u.

Figura 72 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 376 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2 Ω , 5 Ω e 10 Ω



5.2.2.5 Resultados na Barra 21045 (SE Mineração Mirabela 230 kV) relativos à base de dados de curto-circuito máximo 2025, PDE-2031

De uma maneira geral, os resultados para a Barra 21045 (SE Mineração Mirabela - Barra 21045) apresenta aspectos similares aos analisados na Barra 213 (SE Itagibá 230 kV) e podem ser visualizados nas Figuras 73 e 74. Neste sentido, será dado um enfoque apenas às análises comparativas quantitativas.

Figura 73 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

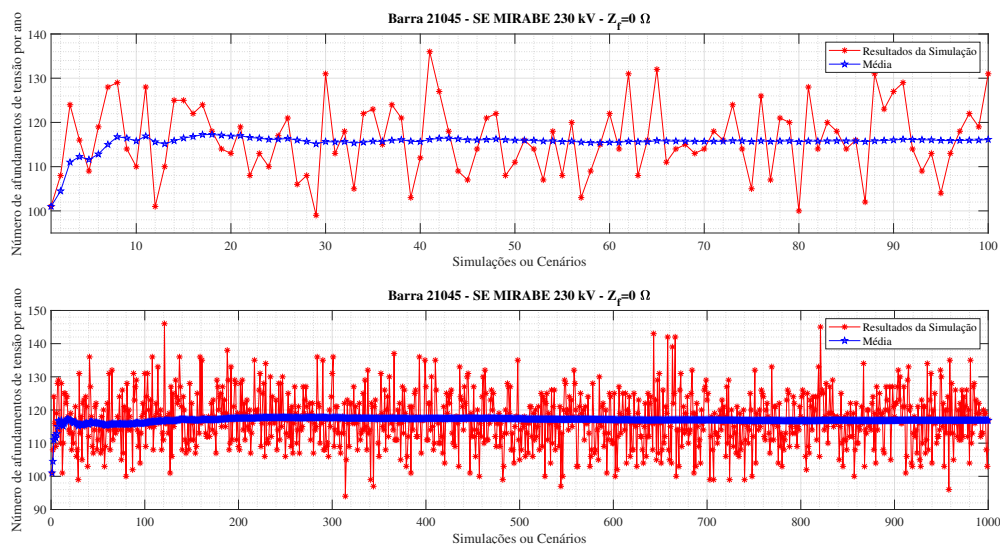
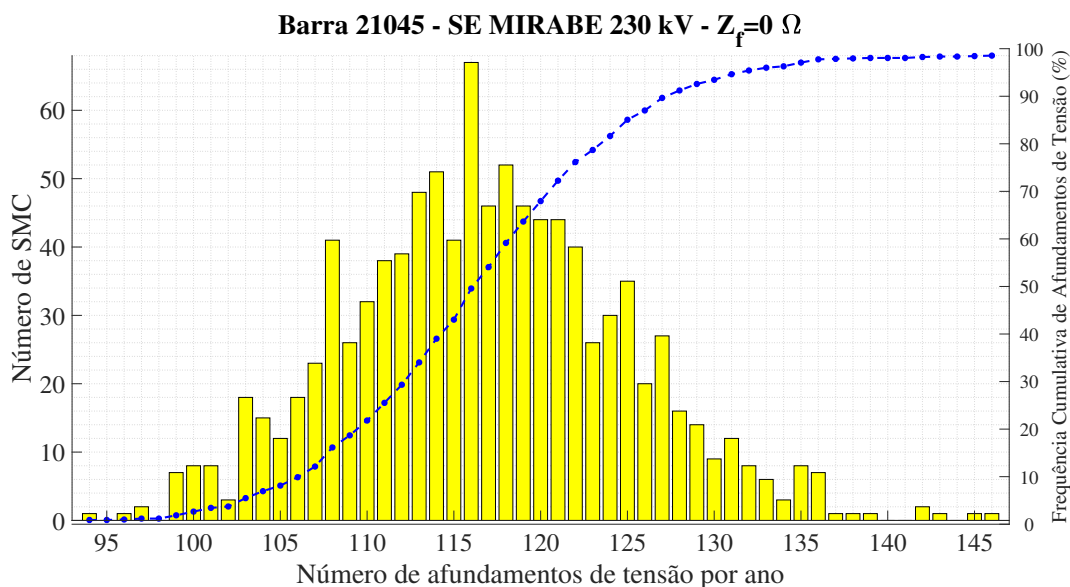


Figura 74 – Distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .

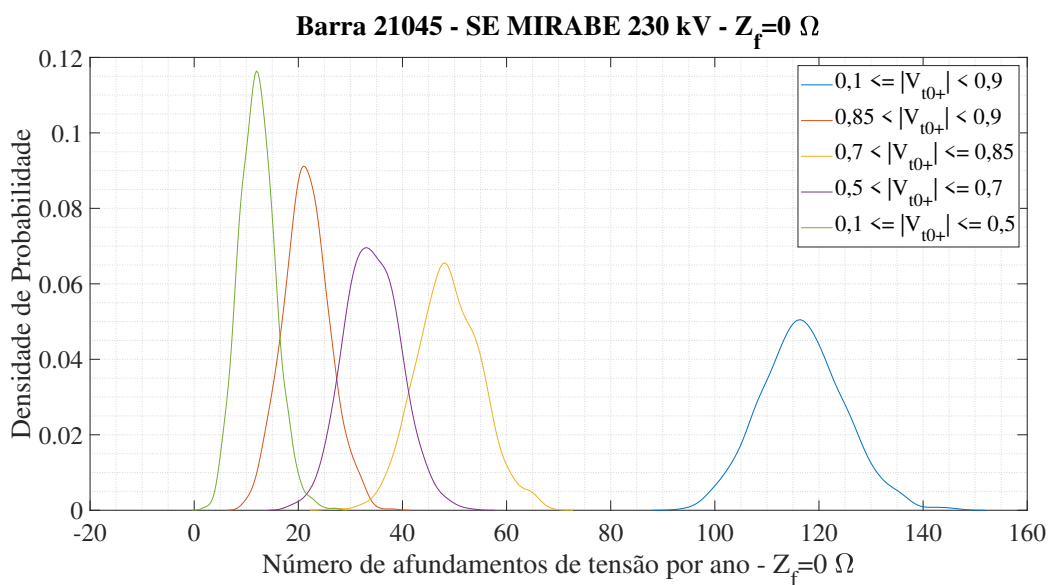


Os gráficos de desempenho de simulação da Figura 73 revelam que as médias do quantitativo de afundamentos nas barras 21045 e 213 são similares, estando em torno de aproximadamente 117 registros anuais. Além disso, ambas apresentam modas das amostras diferente da média, sendo 116 afundamentos anuais, pelas razões de maior aproximação das curvas de desempenho dos resultados instantâneos, conforme discutido anteriormente.

O gráfico de barras dos registros do número de SMCs por quantitativo de afundamentos exibido na Figura 74 sugere maior variedade do quantitativo de amostras diferentes da média em relação ao gráfico da Barra 213 (Figura 30) o que significa que o desvio padrão das amostras da Barra 21045 é ligeiramente maior.

Por fim, as curvas de densidade de probabilidade exibidas na Figura 30 mostra as distribuições aproximadas considerando-se outras classes de tensão, sendo a curva em azul convergente aos resultados observados na Figura 73.

Figura 75 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 0Ω .



5.2.2.5.1 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória

A Figura 76 apresenta a performance de simulação da barra 21045 (SE Mineração Mirabela 230 kV) quando da consideração de curtos não-francos com impedâncias de falta sorteadas aleatoriamente. Nota-se que a média de ocorrências do defeito, calculada a partir da Equação 4.6 e ilustrada pela curva em azul, reduziu para 113 ocorrências. As curvas de densidade de frequência das classes ilustrada na Figura 77 apresenta, de maneira geral, muitas similaridades com as curvas da barra 213, observada na Figura 33.

Figura 76 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.

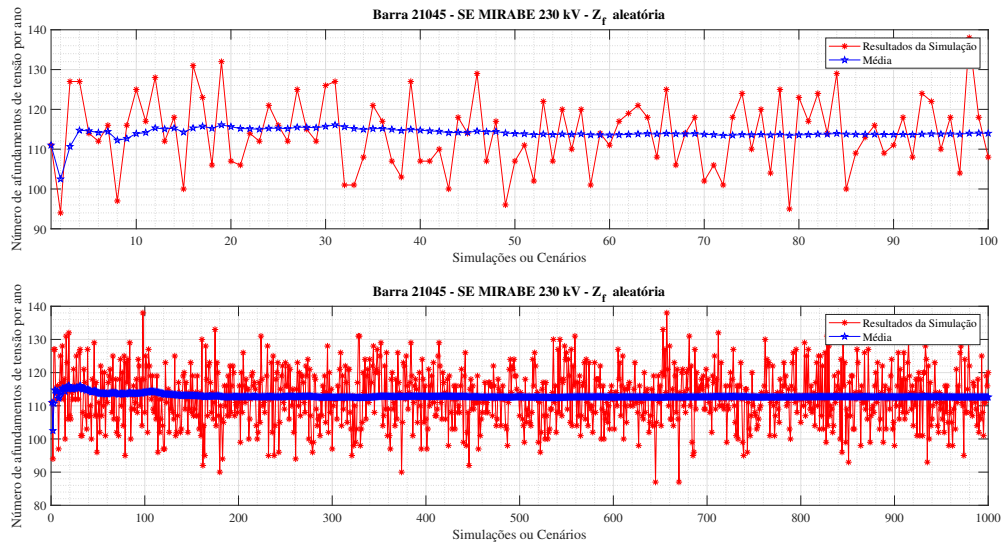
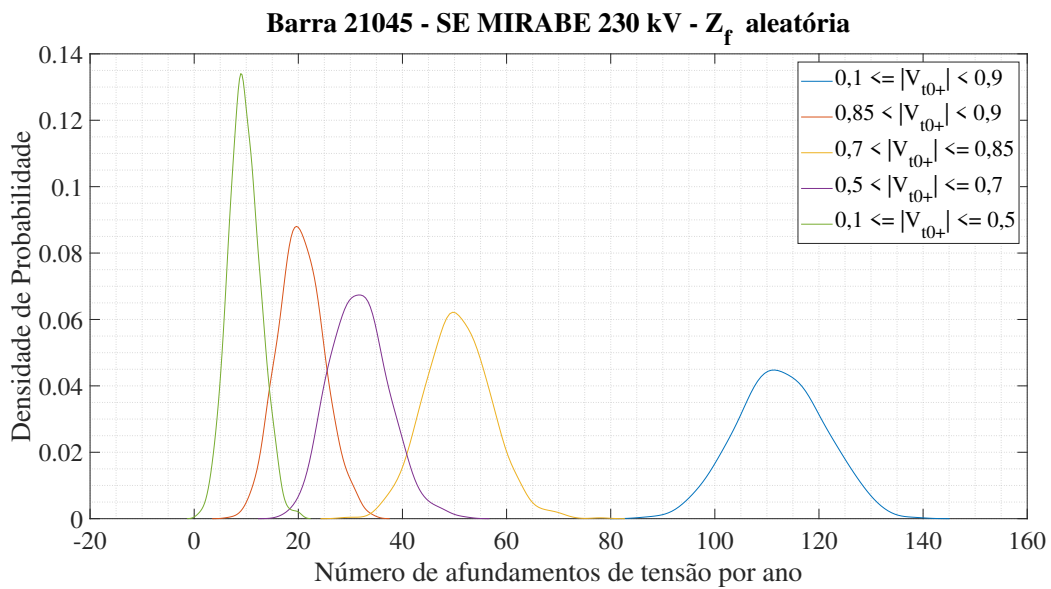


Figura 77 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta como uma variável aleatória.



5.2.2.5.2 Número médio de afundamentos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω

Figura 78 – Performance da simulação e quantidade média de afundamentos de tensão na barra 21045 para 100 anos e 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 15 Ω.

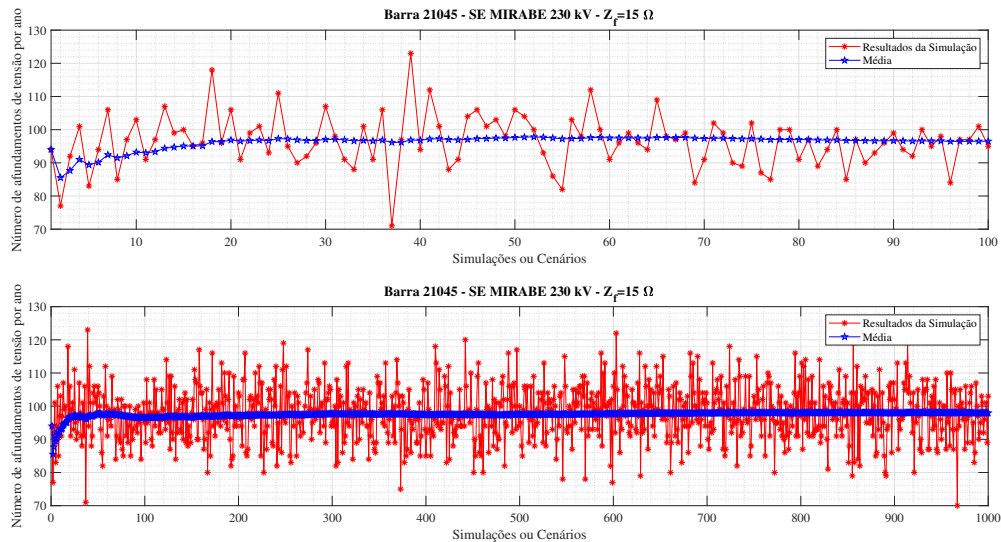
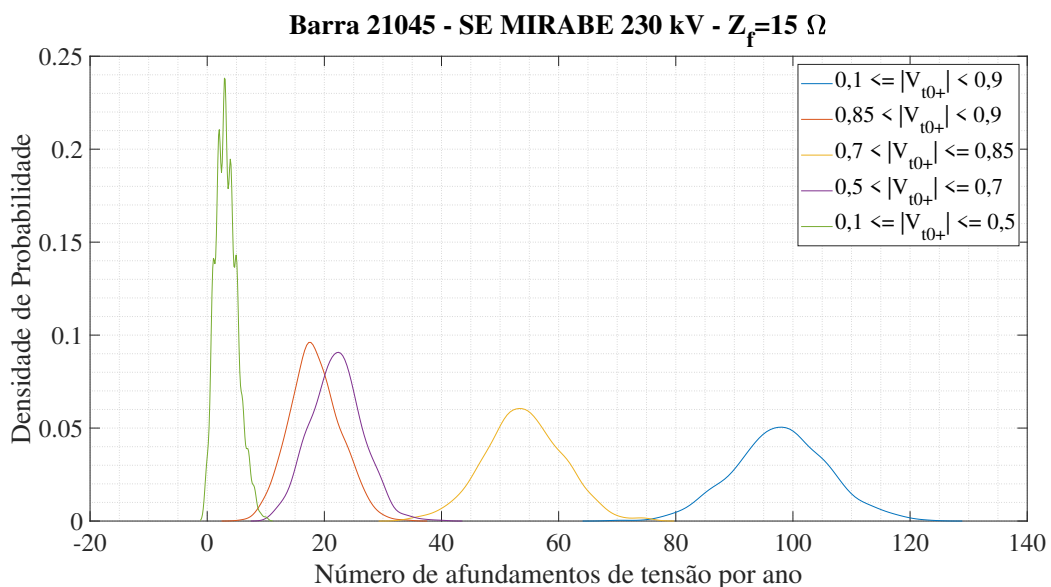


Figura 79 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos e considerando a impedância de falta igual a 15 Ω.



5.2.2.5.3 Comparação entre cenários de Simulação Monte Carlo

Nota-se que quando a impedância de falta é considerada como variável aleatória, os valores possíveis para o quantitativo de afundamentos estarão na faixa de valores entre

os extremos possíveis de impedância, conforme ilustrado nos gráficos de densidade de probabilidade e frequência acumulada das Figuras 80 a 82. Na Figura 81 é observado que as curvas de frequência acumulada para impedância de falta aleatória apresentam uma maior aproximação da curva dos curtos francos uma vez que as médias de valores dessa faixa foi de 113 eventos anuais, mais próximo aos 117 observados quando a impedância de falta é considerada nula. A média de afundamentos de 98 eventos para a máxima impedância, no entanto, se aproxima dos valores encontrados na abordagem de MPF (seção 5.1).

Figura 80 – Comparativo de distribuição de frequência e frequência cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 para 1000 anos considerando a impedância de falta igual a 0Ω , variável aleatória e igual a 15Ω

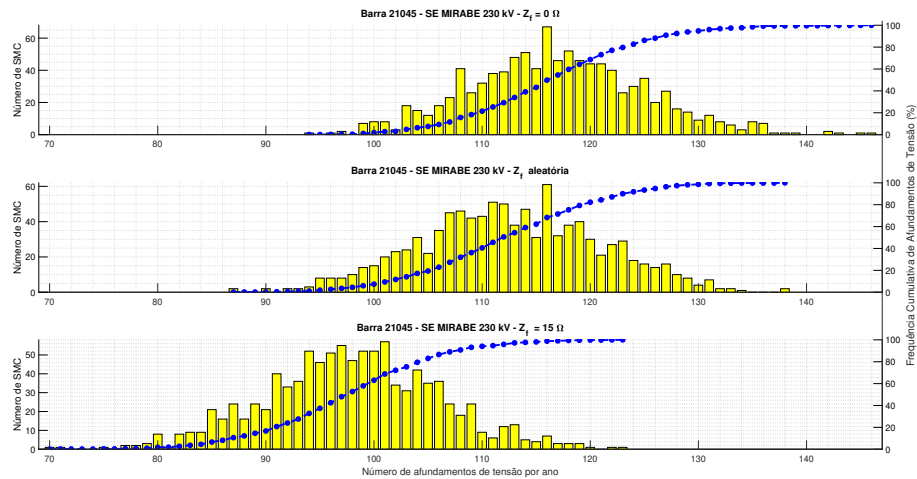


Figura 81 – Distribuição cumulativa de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω

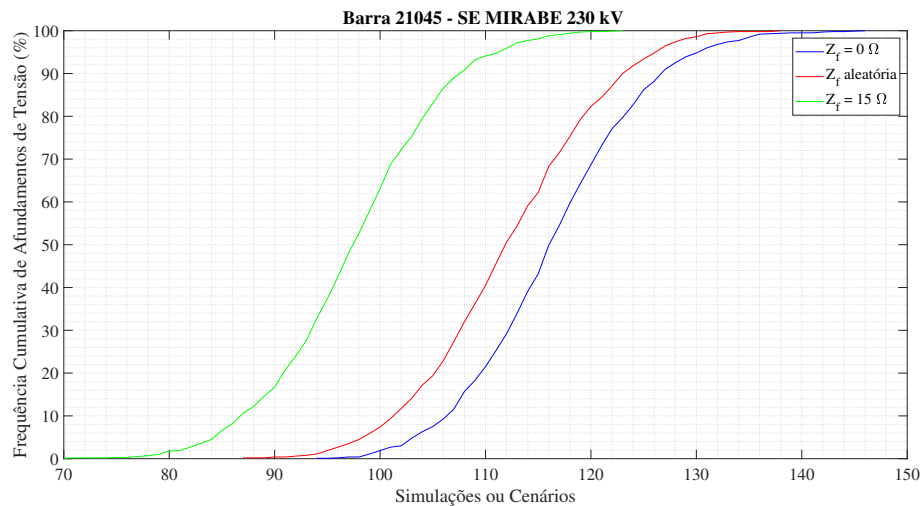
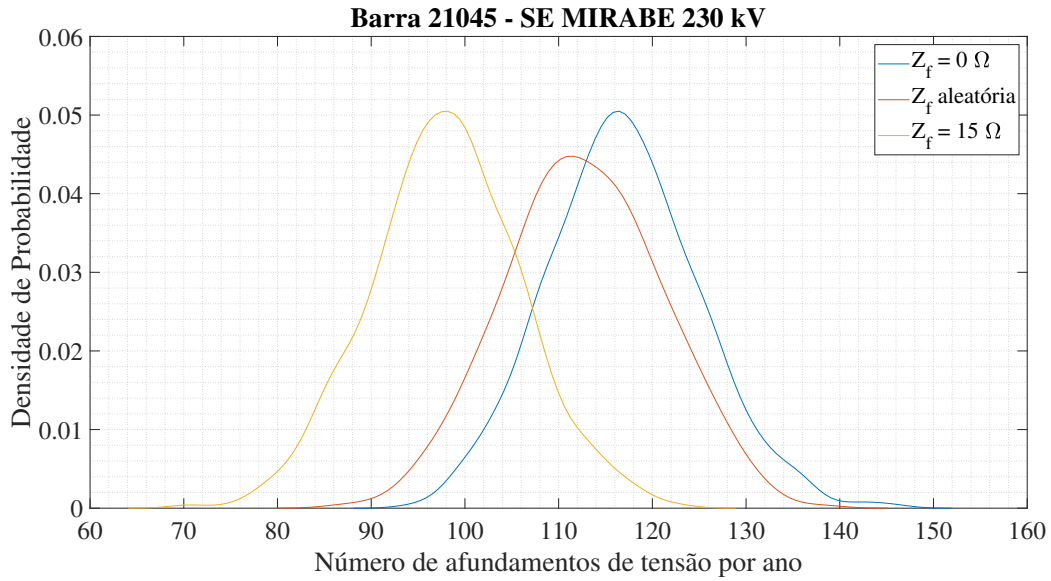
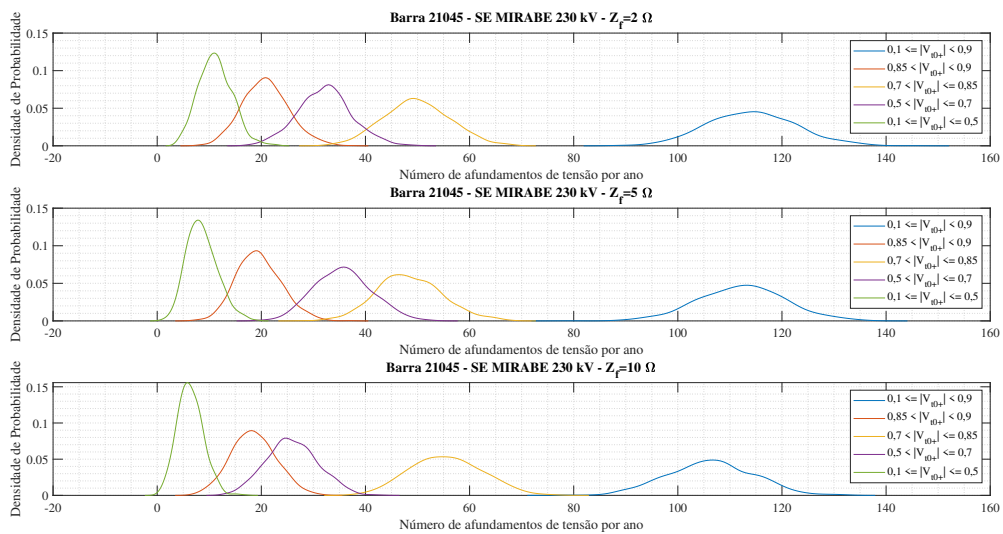


Figura 82 – Densidade de probabilidade de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 0Ω , aleatória e 15Ω



A Figura 83 exibe o comportamento das classes de afundamentos de tensão para valores de impedâncias de falta fixados em $2,5$ e 10Ω que, de uma maneira geral apresenta as mesmas características que o observado para as classes da barra 213, ilustrados na Figura 39.

Figura 83 – Densidade de probabilidade das classes de afundamentos de tensão na barra 21045 considerando-se as seguintes impedâncias de falta: 2Ω , 5Ω e 10Ω



6 Conclusão

O presente trabalho apresentou duas abordagens matemáticas baseadas em métodos estocásticos e de predição empregadas em estudos quantitativos de afundamentos de tensão: Método das Posições de Falta e Simulação Monte Carlo. Com base no banco de dados da [EPE](#), fez-se um levantamento da área de estudo de interesse formada pelos barramentos, linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras integrantes da [RB](#) no estado da Bahia,

O primeiro método é bastante direto na estimação de ocorrências do defeito, necessitando de simulações de faltas em diferentes pontos do sistema; no entanto, a variabilidade de casos ocorre apenas na mudança da linha de transmissão, sendo os pontos de falta fixados em metade de cada [LT](#) do sistema. Neste sentido, simulou-se um curto-circuito de cada falta ([FT](#), [FF](#), [FFT](#) e [FFF](#)) em cada linha de transmissão em banda base do [SEP](#) da Bahia e monitoraram-se os níveis de tensão remanescentes em todos os barramentos simulados. Com poucas simulações (688) foi possível mapear zonas de vulnerabilidade do sistema, bem como estimar com uma aproximação razoável o quantitativo de afundamentos de tensão, para um cenário de um ano. Conforme esperado, observou-se que os afundamentos devido a curtos monofásicos ocorrem em maior quantidade que os causados pelos demais tipos de falta. Além disso, a ocorrência desse tipo de falta tende a causar afundamentos menos severos.

A técnica de Simulação Monte Carlo possibilitou aprofundar os resultados observados na etapa anterior, ao adicionar aleatoriedade às variáveis de influência na ocorrência do defeito (linha de transmissão, posição de falta, tipo de falta e impedância de falta), sendo estas sorteadas a partir de distribuições de probabilidade conhecidas. A análise dos resultados da [SMC](#) num cenário de um ano possibilitou validar a zona de vulnerabilidade identificada pelo Método das Posições de Falta, uma vez que os barramentos mais sensíveis foram convergentes nas duas técnicas.

Além disso, em razão do caráter aleatório adotado nas [SMCs](#), foi possível realizar um estudo mais aprofundado do impacto de influência da impedância de falta na ocorrência de afundamentos de tensão. Assim, constata-se que a depender do valor considerado para a impedância de falta, ocorre uma variação na quantidade estimada de afundamentos na barra em análise. Caso esse valor seja muito baixo, (*i.e.*, curtos francos) o número e amplitude de afundamentos da barra de interesse será superestimado, ao passo que, se o valor for de uma impedância muito grande (*i.e.*, 15Ω), irá ocorrer uma subestimação do número esperado de afundamentos na barra em análise. Os resultados do estudo mostram que quando a impedância de falta é considerada aleatória, o número de afundamentos

na barra de interesse fica entre um valor máximo e um valor mínimo. Logo, sabendo-se que a impedância de falta não poderá ser considerada totalmente desprezível (0Ω) ou elevada (15Ω), pode-se dizer que o fato de considerar a impedância de falta como variável aleatória torna o estudo mais real e preciso.

As análises estatísticas foram feitas utilizando as curvas de densidade de probabilidade e frequência acumulada de tensão, mostrando que considerando-se a impedância de falta de forma aleatória as frequências cumulativas ficaram entre as duas curvas que representam os valores extremos mínimo (0Ω) e máximo (15Ω) do número de afundamentos de tensão esperados anualmente. Além disso, a extensão da análise das densidades de probabilidade às classes de tensão mostrou que, a depender do valor da impedância de falta as curvas das classes tendem a se deslocar para a direita (aumento do número de afundamentos) ou esquerda (diminuição do quantitativo de defeitos) sendo observado, de uma forma geral, redução nos afundamentos com o aumento da impedância de falta. No entanto, o estudo revela que a redução de afundamentos não necessariamente irá implicar em menos severidades de afundamentos do SEP uma vez que tendem a aumentar a densidade de probabilidade nas classes abaixo de 0,5 p.u.

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se adicionalmente as seguintes propostas, que agregariam valor ao estudo já realizado:

- A utilização de uma versão do ANAFAS sem as limitações impostas pela versão educacional do *software* utilizado neste trabalho, entendendo-se a análise para as demais barras do SEP cujas análises se restringiram às barras de 230 e 500 kV, o que possibilitaria estender a análise para as redes elétricas de municípios e consumidores cativos;
- Uma vez que este trabalho se restringiu a análise de afundamentos tendo por parâmetros de estudo apenas a magnitude e frequência de ocorrência do distúrbio, a inclusão da análise de duração dos afundamentos de tensão traria uma avaliação mais completa do desempenho do defeito;
- O presente estudo mostrou o impacto da impedância de falta em estudos de afundamentos de tensão que tiveram como tensão de pré-falta a condição *flat* (*i.e.* igual a 1 p.u), sugere-se adicionalmente analisar o impacto que a tensão de pré-falta causa na quantidade de afundamentos de tensão, bem como do nível de geração distribuída próximo às barras de análise. A inclusão de outras variáveis de influência poderia fornecer uma boa previsão da variável de maior impacto na ocorrência de afundamentos de tensão na rede;

-
- Sugere-se ainda, como proposta futura, um estudo de estratégias de mitigação de ocorrências relacionadas aos afundamentos e demais VTCDs, como a inserção de dispositivos e equipamentos a partir de estudos de comissionamento e proteção, sobretudo na etapa de planejamento da rede;
 - Uma análise econômica referente à simulação de penalidades e/ou multas relacionadas ao descumprimento e ou violação dos indicadores definidos para as faixas de tensões que originam as VTCDs, definidas pelo PRODIST, principalmente em se tratando das redes que atendem ao Grupo A.

Referências

- AMASIFEN, J. C. C. *Metodologias para Avaliação de Riscos e dos Custos de Interrupções em Processos Causados por Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, SP: Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 41.
- ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica*. Brasília: ANEEL, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 23, 30, 31 e 32.
- ANEEL. *AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Banco de Informações de Geração (BIG): Capacidade de Geração no Estado - BA*. Brasília: ANEEL, 2022. Citado na página 45.
- ARGENTA, T. L. B. *Afundamentos de Tensão Provenientes de Faltas no Sistema Elétrico de Potência: Um estudo de caso*. Porto Alegre, RS: Projeto de Diplomação (graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2013. Citado 5 vezes nas páginas 25, 28, 31, 48 e 49.
- BOLLEN, M.; SPEYCHAL, M.; LINDEN, K. Estimation of dip frequency from fault statistics - including three-phase characteristics. In: *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado na página 23.
- BOLLEN, M. H. J. *The Influence of Motor Reacceleration on Voltage sags*. [S.l.]: IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.30. No.3, 1994. 805-821 p. Citado na página 34.
- BOLLEN, M. H. J. *Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems*. [S.l.]: IEEE Transactions on Industry Applications, 1996. 1414–1423 p. Citado na página 27.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*. New York, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000. 543 p. Citado 5 vezes nas páginas 23, 32, 39, 40 e 49.
- BRASIL. *Resolução Normativa número 66 de 16/04/1999*. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 1999. Citado na página 42.
- BRASIL. *Resolução Normativa número 67 de 08/06/2004*. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2004. Citado na página 42.
- BROOKS, D. L. et al. *Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance*. [S.l.]: IEEE Trans. on Power Delivery .vol 13, 1998. 254-259 p. Citado na página 33.
- BROWN, R. *Electric Power Distribution Reliability*. New York, USA: Marcel Dekker Inc, Power Engineering Series, 2002. Citado na página 34.

CABRAL, R. J. *Análise Numérica de Curto Circuito Utilizando Componentes Simétricas e Componentes de Fases para Obter Índices de Afundamentos de Tensão*. Porto Alegre, RS: Dissertação de Mestrado (mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2010. Citado na página 49.

CARVALHO FILHO, J. M. *Uma Contribuição á Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores*. Itajubá, MG: Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000. Citado 5 vezes nas páginas 25, 27, 34, 35 e 39.

CARVALHO FILHO, J. M. et al. *Comparative Analysis between Measurements and Simulations of Voltage Sags*. Rio de Janeiro: IEEE 10th International Conference on Harmonics Quality of Power, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.

CEPEL. *ANAFAS-Análise de Falhas Simultâneas- versão 7.3 Manual de Processamento Batch*. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.cepel.br/>>. Acesso em: 11 de novembro de 2022. Citado 4 vezes nas páginas 29, 39, 56 e 59.

CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. *Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-Clearing Voltage Dips*. [S.l.]: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, No.1, 1991. 167-172 p. Citado 3 vezes nas páginas 27, 34 e 49.

DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality. Second Edition*. EUA: McGraw-Hill, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 49.

EPE. *Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão: Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Relatório R1. Estudo de Atendimento às cargas da SE Tomba*. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. ISBN EPE-DEE-RE-003/2017-rev0. Citado 3 vezes nas páginas 42, 64 e 65.

EPE. *Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão: Análise Técnico-Econômica de Alternativas: Relatório R1. Estudo para Controle de Tensão e Suprimento ao Extremo Sul da Bahia*. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. ISBN EPE-DEE-RE-025/2020-rev0. Citado na página 67.

EPE. *Empresa de Pesquisa Energética*. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes-de-transmissao/bases-de-dados>>. Acesso em: 1 de Junho de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 155.

FARIED, S. O.; ABORESHAID, A. *Stochastic Evaluation of Voltage Sags in Series Capacitor Compensated Radial Distribution Systems*. [S.l.]: IEEE Trans on Power Delivery, 2003. 744-750 p. Citado na página 28.

FISHMAN, G. *Monte Carlo Concepts Algorithms and Applications*. Corrected. [S.l.]: Springer, 2003. ISBN 9780387945279; 038794527X. Citado na página 53.

FORTESCUE, C. L. *METHOD OF SYMMETRICAL CO-ORDINATES APPLIED TO THE SOLUTION OF POLYPHASE NETWORKS*. [S.l.]: American Institute of Electrical Engineers., 1918. 114 p. Citado na página 148.

GHOSH, A. *Module 4 - Short Circuit analysis” - National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL)*. [S.l.]: National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL). Institutes of Technology and Indian Institute of Science, 2011. Citado 10 vezes nas páginas 142, 143, 144, 145, 148, 149, 150, 151, 152 e 153.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power system analysis*. [S.l.]: American Institute of Electrical Engineers, 1994. 787 p. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 148.

HIRT, W. E. D. *Análise de Curto-Circuito e Afundamentos de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência: UM estudo Aplicado à Expansão da Geração no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS: Projeto de Diplomação (graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2015. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 25, 28 e 48.

HONORATO, K. da S. *Simulações Estocásticas de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas de Distribuição*. Itajubá, MG: Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Itajubá., 2014. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 41.

IEEE. *IEEE 446 - Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado na página 37.

IEEE. *Std. 493-2007 - IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. New York: [s.n.], 2007. Citado na página 49.

IEEE-STD.1564. *Recommended practice for the establishment of voltage sags indices. IEEE Standards 1564-2004*. [S.l.]: IEEE, 2004. Citado na página 33.

INPE. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Grupo de Eletricidade Atmosférica INPE/ELAT*. 2022. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/ocorrencia.na.terra.php>>. Acesso em: 23 de maio de 2022. Citado na página 34.

KINDERMANN, G. *Curto-Circuito. 2ª edição. Modificada e Ampliada*. Porto Alegre, RS: Sagra Luzzato, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 54, 141, 142 e 150.

LEBORGNE, R. C. *Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão*. Itajubá, MG: Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Itajubá, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 37.

LEBORGNE, R. C. *Voltage Sags Characterization and Estimation*. Gothenburg, Suécia: Tese (Licenciatura em Engenharia Elétrica)- Chalmers University of Technology, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 25, 34 e 40.

LEBORGNE, R. C. *Voltage sags: single event characterization, system performance and location*. Gothenburg, Suécia: Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica), Chalmers University of Technology, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 33, 39 e 49.

MARTINEZ, J. A.; ARNEDO, J. M. *Voltage Sags Stochastic Prediction Using an Eletromagnetic Transients Program*. [S.l.]: IEEE Trans on Power Delivery, 2004. 1975-1982 p. Citado na página 28.

MATHWORKS. *MATLAB Function Reference*. Natick, Massachuset- Estados Unidos, 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/>. Acesso em: 11 de novembro de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 59.

MCGRANAGHAN, M.; MUELLER, D. *Effects of Voltage Sags in Process Industry Applications*. [S.l.]: Elektrotek Concepts, Inc, 1998. Citado na página 29.

MCGRANAGHAN, M.; MUELLER, D.; SAMOTYJ, M. *Voltage Sags in Industrial Systems. Technical Conference on Industrial and Commercial Power Systems*. [S.l.]: IEEE Trans on Power Delivery, 1991. 18-24 p. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 37.

MME. *MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão da Energia 2030*. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>>. Acesso em: 12 de maio de 2022. Citado na página 44.

NBR-5460. *NBR 5460: Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1992. Citado na página 141.

NEGREIROS, A. V. de. *Análise do Risco Probabilístico do Sistema Elétrico da Região Nordeste do Brasil*. Recife, PE: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 42, 43, 44 e 53.

OLGUIN, G. *Voltage dip (sag) estimation in power systems based on stochastic assessment and optimal monitoring*. Gothenburg, Suécia: Tese de PhD (Engenharia Elétrica), Chalmers University of Technology, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 23, 32, 33, 34, 35 e 77.

OLGUIN, G.; KARLSSON, D.; LEBORGNE, R. C. *Stochastic Assessment of Voltage Dips (Sags): The Method of Fault Position versus a Monte Carlo Simulation Approach*. Bologna: Power Tech Conference Proceeding, 2003. Citado na página 28.

OLIVEIRA, F. D. de. *Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão*. Belo Horizonte, MG: Dissertação de Mestrado (mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Minas Gerais., 2015. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

OLIVEIRA, T. C. de. *Afundamentos de Tensão: Avaliação Estatística de Resultados de Medição com Base em Simulações*. Itajubá, MG: Tese de Doutorado (Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, 2008. Citado na página 33.

ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). SG Acesso - Sistema de Gestão dos Processos de Acesso*. Brasília, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/acesso>>. Acesso em: 22 de novembro de 2022. Citado 3 vezes nas páginas 24, 42 e 72.

ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Portal SINtegre*. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br>>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado na página 46.

ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Base de Dados de Operação para Estudos de Curto-Circuito*. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/8/32/85/paginas/servicos/produtos.aspx>>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado na página 46.

ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Casos de Referência de Planejamento para Estudos de Curto-Circuito, PAR/PEL 2022, ciclo 2023-2027*. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/8/32/85/Paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx>>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado 4 vezes nas páginas 43, 44, 47 e 48.

- ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico. Dados Técnicos do Sistema Interligado Nacional (SINDAT)*. Brasília, 2022. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>>. Acesso em: 14 de maio de 2022. Citado na página 46.
- ORTMEYER, T. H.; HIYAMA, T.; SALEHFAR, H. *Power Quality Effects of Distribution System Faults*. [S.l.]: Electrical Power Energy Systems. Vol.18. No.5., 1996. 323-329 p. Citado na página 34.
- QADER, M. R.; BOLLEN, M. H. J.; ALLAN, R. N. *Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System*. [S.l.]: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, No.1, 1991. 167-172 p. Citado na página 27.
- QADER, M. R.; BOLLEN, M. H. J.; ALLAN, R. N. *Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System*. [S.l.]: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.35, No.1, 1999. 155-162 p. Citado na página 38.
- RAMOS, A. C. L. *Avaliação dos Impactos da Impedância de Falta e da Geração Distribuída em Estudos de Afundamentos de Tensão*. Goiânia, GO: Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica e de Computação)-Universidade Federal de Goiás., 2009. Citado 11 vezes nas páginas 6, 28, 35, 37, 52, 53, 54, 55, 76, 78 e 80.
- SAADAT, H. *Power System Analysis. 2. ed.* Boston, USA: McGraw-Hill Companies, 2002. 712 p. Citado na página 143.
- SANTOS, R. F. S. dos; SILVA, S. R. *Sensibilidade do Controlador Lógico Programável frente a afundamentos de tensão*. Aracaju, SE: V Seminário brasileiro sobre qualidade de energia, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 67.
- SILVA, J. A. M. *Análise comparativa de resultados de simulação de afundamentos de tensão utilizando programas de curto-circuito e de transitórios eletromagnéticos*. Itajubá, MG: Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Itajubá., 2004. Citado 7 vezes nas páginas 25, 28, 39, 47, 48, 49 e 55.
- SILVA, T. A. *Avaliação Probabilística do Impacto da Geração Distribuída Eólica nos Afundamentos de Tensão de Curta Duração*. São Luís, MA: Dissertação de Mestrado (Engenharia de Eletricidade)-Universidade Federal do Maranhão., 2012. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.
- SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO. *STB - SISTEMAS-TESTE BRASILEIROS PARA USO DIDÁTICO E ANÁLISE COMPUTACIONAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA*. Disponível em: <<http://www.sistemas-teste.com.br/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022, address="Brasília", year = 2021. Citado na página 157.
- STD.1159. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. [S.l.]: IEEE, 2019. Citado na página 32.
- STD.61000-4-30. *(EMC), part 4: testing and stradoasurement techniques. Section 30: power quality measurement methods*. Switzerland: IEC, 2015. Citado na página 32.
- ZAPPE, L. C. *Estudo do Efeito de Diferentes Tipos de Falta em Afundamentos de Tensão: Uma Análise do Desempenho do Sistema Elétrico do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS: Projeto de Diplomação (graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2016. Citado 8 vezes nas páginas 25, 28, 32, 33, 48, 49, 50 e 52.

APÊNDICE A – Dados Utilizados do SEP da Bahia Relativos ao PDE 2025 (Ano 2022) para a Configuração de Curto-Máximo

Tabela 12 – Dados dos barramentos para a configuração curto-máximo do SIN: Ano 2022.

| Barramento Monitorado | Número Atribuído | Nome do Barramento | Tensão [kV] | Capacidade de Interrupção do Disjuntor [kA] |
|-----------------------|------------------|--------------------|-------------|---|
| 1 | 200 | PAF3-A-BA230 | 230 | 40 |
| 2 | 202 | JUAZE2-BA230 | 230 | 40 |
| 3 | 203 | S.BONF-BA230 | 230 | 40 |
| 4 | 205 | BROTAS-BA230 | 230 | - |
| 5 | 206 | SOBRAD-BA230 | 230 | 40 |
| 6 | 207 | JAGUAR-BA230 | 230 | - |
| 7 | 209 | POCOE2-BA230 | 230 | - |
| 8 | 213 | ITAGIB-BA230 | 230 | - |
| 9 | 214 | EMBASA-A-BA230 | 230 | - |
| 10 | 262 | T.FREI-BA230 | 230 | - |
| 11 | 263 | ITAPEB-BA230 | 230 | 40 |
| 12 | 264 | S.A.JE-BA230 | 230 | 50 |
| 13 | 266 | TOMBA-BA230 | 230 | 31,25 |
| 14 | 267 | VERACE-BA230 | 230 | 40 |
| 15 | 268 | NARAND-BA230 | 230 | 50 |
| 16 | 269 | EUNAPO-BA230 | 230 | 40 |
| 17 | 270 | C.DANT-BA230 | 230 | 26,3 |
| 18 | 272 | CATU—BA230 | 230 | 26,3 |
| 19 | 274 | CMACB1-BA230 | 230 | 40 |
| 20 | 275 | G.MANG-BA230 | 230 | 26,3 |
| 21 | 276 | FUNIL-BA230 | 230 | 40 |
| 22 | 277 | MATATU-BA230 | 230 | 26,3 |
| 23 | 278 | PITUAC-BA230 | 230 | 50 |
| 24 | 279 | COTEGI-BA230 | 230 | 26,3 |
| 25 | 280 | JACARA-BA230 | 230 | 40 |
| 26 | 281 | D.PITU-BA230 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|----|-------|----------------|-----|------|
| 27 | 283 | IRECE-BA230 | 230 | 26,3 |
| 28 | 284 | CAMAC4-BA230 | 230 | - |
| 29 | 285 | BJLAPA-BA230 | 230 | 31,5 |
| 30 | 286 | BARREI-BA230 | 230 | 40 |
| 31 | 288 | IBICOA-BA230 | 230 | - |
| 32 | 289 | SAPEAC-BA230 | 230 | 40 |
| 33 | 294 | CMACB2-BA230 | 230 | - |
| 34 | 300 | PAF3-B-BA230 | 230 | 40 |
| 35 | 335 | UTEBAH-BA230 | 230 | 40 * |
| 36 | 337 | FAFEN-BA230 | 230 | - * |
| 37 | 355 | MCHAP2-BA230 | 230 | - |
| 38 | 372 | SCHINC-BA230 | 230 | - |
| 39 | 374 | EMBASA-B-BA230 | 230 | - |
| 40 | 375 | PCAVAL-BA230 | 230 | 31,5 |
| 41 | 376 | BRUMA2-BA230 | 230 | 40 |
| 42 | 381 | POLO-BA230 | 230 | - |
| 43 | 385 | BJLAP2-BA230 | 230 | - |
| 44 | 388 | PIRAJA-BA230 | 230 | 26.3 |
| 45 | 394 | IGAPO2-BA230 | 230 | 40 |
| 46 | 419 | CAMAC2-BA230 | 230 | 40 |
| 47 | 472 | OLINDI-BA230 | 230 | 40 |
| 48 | 500 | PAF4-BA500 | 500 | 40 |
| 49 | 506 | SOBRAD-BA500 | 500 | 40 |
| 50 | 555 | MCHAP2-BA500 | 500 | - |
| 51 | 574 | CAMACA-BA500 | 500 | 40 |
| 52 | 582 | OLINDI-BA500 | 500 | 50 |
| 53 | 584 | CAMAC4-BA500 | 500 | - |
| 54 | 585 | BJLAPA-BA500 | 500 | 40 |
| 55 | 587 | R.EGUA-BA500 | 500 | 40 |
| 56 | 588 | IBICOA-BA500 | 500 | 40 |
| 57 | 589 | SAPEAC-BA500 | 500 | 40 |
| 58 | 846 | BARRER-BA500 | 500 | - |
| 59 | 11260 | GOURO2-BA230 | 230 | - |
| 60 | 11261 | OUROL2-BA230 | 230 | - |
| 61 | 11282 | JUAZE3-BA230 | 230 | - |
| 62 | 11286 | BARRE2-BA230 | 230 | - |
| 63 | 11287 | RGRAND-BA230 | 230 | - |
| 64 | 11394 | IGAPO3-BA230 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|-----|-------|---------------|-----|-----|
| 65 | 11461 | C.FORM-BA230 | 230 | - |
| 66 | 11560 | GOURO2-BA500 | 500 | - |
| 67 | 11561 | OUIROL2-BA500 | 500 | - |
| 68 | 11582 | JUAZE3-BA500 | 500 | - |
| 69 | 11594 | IGAPO3-BA500 | 500 | - |
| 70 | 11595 | PINDA2-BA230 | 230 | - |
| 71 | 11612 | POCOE3-BA500 | 500 | - |
| 72 | 12091 | CAMPGR-BA230 | 230 | - * |
| 73 | 12093 | CANDEI-BA230 | 230 | - |
| 74 | 12318 | BURITI-BA500 | 500 | - |
| 75 | 18505 | CAMA-2-BA230 | 230 | - * |
| 76 | 18612 | POCOE3-BA230 | 230 | - |
| 77 | 21025 | RDM—BA230 | 230 | - * |
| 78 | 21100 | BKNUNB-BA230 | 230 | - |
| 79 | 21101 | BKNUSC-BA230 | 230 | - |
| 80 | 21102 | CMETAL-BA230 | 230 | - * |
| 81 | 56298 | APODI—BA230 | 230 | - * |
| 82 | 58604 | PBRANC-BA230 | 230 | - |
| 83 | 58609 | CASNO2-BA230 | 230 | - |
| 84 | 58625 | DELFIN-BA230 | 230 | - |
| 85 | 58632 | J.SOLA-BA230 | 230 | - |
| 86 | 58640 | ENERGI-BA230 | 230 | - * |
| 87 | 58825 | UMBURA-BA230 | 230 | - |
| 88 | 58833 | C.LARG-BA230 | 230 | - |
| 89 | 58836 | SE03—BA230 | 230 | - |
| 90 | 58842 | SE04—BA230 | 230 | - |
| 91 | 58843 | SE02—BA230 | 230 | - |
| 92 | 58844 | SE01—BA230 | 230 | - |
| 93 | 59015 | S.AZUL-BA230 | 230 | - |
| 94 | 59042 | ASSUR2-BA230 | 230 | - |
| 95 | 59058 | MCHAPS-BA230 | 230 | - |
| 96 | 59060 | ASSURU-BA230 | 230 | -* |
| 97 | 59067 | VBAHI2-BA230 | 230 | - |
| 98 | 59077 | SBABIL-BA230 | 230 | - |
| 99 | 59084 | BABIL3-BA230 | 230 | - |
| 100 | 59161 | ITAGBA-BA230 | 230 | - |
| 101 | 59304 | CAE123-BA230 | 230 | - |
| 102 | 59309 | CAEABC-BA2300 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|-----|-------|--------------|-----|----|
| 103 | 59317 | A13.1–BA230 | 230 | _* |
| 104 | 59324 | A13.2–BA230 | 230 | _* |
| 105 | 59353 | LER13–BA230 | 230 | _* |
| 106 | 59359 | A16.1–BA230 | 230 | _* |
| 107 | 59363 | A5.3—BA230 | 230 | _* |
| 108 | 59390 | SEQUOI-BA230 | 230 | _* |
| 109 | 59408 | I3.2—BA230 | 230 | _* |
| 110 | 59412 | A12.1–BA230 | 230 | _* |
| 111 | 59421 | TABOCA-BA230 | 230 | - |
| 112 | 59426 | S.CAET-BA230 | 230 | _* |
| 113 | 59432 | CAETIT-BA230 | 230 | _* |
| 114 | 59441 | HORIZO-BA230 | 230 | - |
| 115 | 59445 | LAPA—BA230 | 230 | _* |
| 116 | 59449 | SPEDRO-BA230 | 230 | _* |
| 117 | 59452 | BJL—BA230 | 230 | _* |
| 118 | 59461 | CRISTA-BA230 | 230 | - |
| 119 | 59499 | RENIGA-BA500 | 500 | _* |

Tabela 13 – Dados das linhas de transmissão para configuração curto-máximo do SIN: Ano 2022.

| Caso | Barra Início | Barra Fim | Circuito | Tensão [kV] | R_1 [%] | X_1 [%] | R_0 [%] | X_0 [%] | d [km] |
|------|--------------|-----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 1 | 200 | 270 | 1 | 230 | 2,45 | 13,06 | 12,12 | 33,17 | 134 |
| 2 | 202 | 203 | 1 | 230 | 2,7 | 13,9 | 11,58 | 47,22 | 149 |
| 3 | 202 | 207 | 1 | 230 | 1,442 | 7,05 | 6,82 | 27,67 | 87 |
| 4 | 202 | 11282 | 1 | 230 | 0,07 | 0,065 | 0,2936 | 0,2146 | 1 |
| 5 | 206 | 202 | 1 | 230 | 0,78 | 4 | 2,87 | 11,49 | 39 |
| 6 | 206 | 202 | 2 | 230 | 0,78 | 4 | 2,86 | 11,66 | 39 |
| 7 | 58625 | 202 | 1 | 230 | 1,7714 | 8,4661 | 8,1782 | 28,071 | 78,13 |
| 8 | 58632 | 202 | 1 | 230 | 0,1134 | 0,5422 | 0,5268 | 1,8026 | 6 |
| 9 | 207 | 203 | 1 | 230 | 1,3 | 6,67 | 6,31 | 25,6 | 80,5 |
| 10 | 11461 | 203 | 1 | 230 | 1,251 | 5,987 | 5,7938 | 19,878 | 64 |
| 11 | 205 | 283 | 1 | 230 | 2,4 | 13,05 | 8,98 | 25,87 | 135 |
| 12 | 205 | 11260 | 1 | 230 | 2,583 | 12,405 | 11,84 | 41,003 | 115 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|----|-------|-----|---|-----|--------|--------|--------|--------|------|
| 13 | 285 | 205 | 1 | 230 | 3,72 | 20,20 | 12,95 | 38,64 | 205 |
| 14 | 58604 | 206 | 1 | 230 | 0,5773 | 3,8039 | 3,4974 | 13,769 | 55 |
| 15 | 58609 | 206 | 1 | 230 | 1,3734 | 6,5636 | 6,3562 | 21,786 | 67,1 |
| 16 | 58640 | 206 | 1 | 230 | 0,199 | 0,9512 | 0,9243 | 3,1624 | 60 |
| 17 | 209 | 376 | 1 | 230 | 2,68 | 13,6 | 11,101 | 48,043 | 143 |
| 18 | 213 | 209 | 1 | 230 | 1,65 | 8,35 | 7,486 | 24,299 | 88 |
| 19 | 276 | 209 | 1 | 230 | 2,217 | 10,97 | 10,854 | 35,398 | 620 |
| 20 | 18612 | 209 | 1 | 230 | 0,0135 | 0,1268 | 0,0864 | 0,4278 | 3 |
| 21 | 18612 | 209 | 2 | 230 | 0,0135 | 0,1268 | 0,0864 | 0,4278 | 3 |
| 22 | 276 | 213 | 1 | 230 | 0,55 | 2,81 | 1,7478 | 7,0352 | 29,4 |
| 23 | 266 | 214 | 1 | 230 | 0,56 | 2,74 | 2,14 | 8,06 | 29,4 |
| 24 | 275 | 214 | 1 | 230 | 0,21 | 1,05 | 0,82 | 3,09 | 66 |
| 25 | 269 | 262 | 1 | 230 | 2,806 | 14,322 | 12,54 | 47,84 | 152 |
| 26 | 269 | 262 | 2 | 230 | 2,81 | 14,322 | 12,54 | 47,84 | 152 |
| 27 | 263 | 267 | 1 | 230 | 0,11 | 0,61 | 1,259 | 6,105 | 48 |
| 28 | 263 | 269 | 1 | 230 | 0,87 | 4,42 | 2,43 | 11,63 | 47 |
| 29 | 263 | 269 | 2 | 230 | 0,87 | 4,41 | 2,42 | 11,49 | 47 |
| 30 | 276 | 263 | 1 | 230 | 3,57 | 18,41 | 10,23 | 49,62 | 79 |
| 31 | 276 | 263 | 2 | 230 | 3,57 | 18,39 | 10,19 | 48,86 | 79 |
| 32 | 276 | 263 | 3 | 230 | 3,59 | 18,40 | 18,274 | 60,113 | 79 |
| 33 | 264 | 276 | 1 | 230 | 2,94 | 15,14 | 10,67 | 36,25 | 163 |
| 34 | 264 | 276 | 2 | 230 | 2,89 | 14,72 | 10,45 | 36,45 | 163 |
| 35 | 264 | 289 | 1 | 230 | 0,45 | 2,41 | 2,07 | 7,16 | 31,8 |
| 36 | 264 | 289 | 2 | 230 | 0,45 | 2,24 | 2,11 | 7,12 | 31,8 |
| 37 | 264 | 289 | 3 | 230 | 0,45 | 2,24 | 2,11 | 7,12 | 31,8 |
| 38 | 266 | 214 | 1 | 230 | 0,56 | 2,74 | 2,14 | 8,06 | 29,4 |
| 39 | 275 | 266 | 1 | 230 | 0,70 | 3,58 | 2,96 | 11,15 | 40,5 |
| 40 | 278 | 268 | 1 | 230 | 0,039 | 0,27 | 0,144 | 0,753 | 3,6 |
| 41 | 278 | 268 | 2 | 230 | 0,039 | 0,27 | 0,144 | 0,753 | 3,6 |
| 42 | 270 | 372 | 1 | 230 | 3,15 | 16,84 | 16,117 | 60,063 | 150 |
| 43 | 270 | 472 | 1 | 230 | 1,44 | 7,65 | 6,54 | 19,69 | 80 |
| 44 | 300 | 270 | 1 | 230 | 2,45 | 13,11 | 11,98 | 34,37 | 134 |
| 45 | 272 | 284 | 1 | 230 | 0,46 | 2,45 | 1,507 | 5,51 | 25 |
| 46 | 272 | 284 | 2 | 230 | 0,46 | 2,5 | 1,294 | 4,786 | 25 |
| 47 | 272 | 372 | 1 | 230 | 0,50 | 2,65 | 2,75 | 7,43 | 27 |
| 48 | 272 | 472 | 1 | 230 | 2,23 | 11,94 | 10,22 | 30,80 | 119 |
| 49 | 275 | 272 | 1 | 230 | 1,42 | 7,57 | 7,12 | 22,58 | 77,2 |
| 50 | 274 | 278 | 1 | 230 | 0,29 | 2,7 | 1,59 | 7,62 | 39 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 51 | 274 | 21100 | 1 | 230 | 0,11 | 0,57 | 0,47 | 1,87 | 6 |
| 52 | 274 | 21100 | 2 | 230 | 0,11 | 0,57 | 0,47 | 1,87 | 6 |
| 53 | 274 | 21101 | 1 | 230 | 0,13 | 0,68 | 0,38 | 1,36 | 6 |
| 54 | 275 | 289 | 1 | 230 | 0,45 | 2,41 | 1,64 | 5,79 | 22,6 |
| 55 | 275 | 289 | 2 | 230 | 0,45 | 2,24 | 1,47 | 5,09 | 23 |
| 56 | 275 | 289 | 3 | 230 | 0,45 | 2,24 | 1,49 | 5,04 | 23,5 |
| 57 | 294 | 275 | 1 | 230 | 1,54 | 7,33 | 7,76 | 24,41 | 75 |
| 58 | 294 | 275 | 2 | 230 | 1,54 | 7,84 | 7,76 | 24,41 | 75 |
| 59 | 375 | 275 | 1 | 230 | 0,08 | 0,45 | 0,4 | 1,38 | 6 |
| 60 | 289 | 276 | 1 | 230 | 3,5 | 18,84 | 13,23 | 47,71 | 196 |
| 61 | 281 | 277 | 1 | 230 | 0,07 | 0,6 | 0,95 | 2,76 | 8 |
| 62 | 294 | 277 | 1 | 230 | 0,87 | 4,71 | 3,5 | 12,02 | 30 |
| 63 | 388 | 278 | 1 | 230 | 0,046 | 0,339 | 0,204 | 0,969 | 12 |
| 64 | 279 | 280 | 1 | 230 | 0,28 | 1,49 | 1,27 | 4,52 | 77,2 |
| 65 | 279 | 281 | 1 | 230 | 0,2 | 1,64 | 1,65 | 4,78 | 22 |
| 66 | 279 | 21025 | 1 | 230 | - | 0,10 | 0,17 | 0,62 | 22 |
| 67 | 284 | 279 | 1 | 230 | 0,42 | 2,25 | 2,13 | 5,77 | 22,5 |
| 68 | 294 | 279 | 1 | 230 | 0,21 | 1,64 | 1,93 | 5,01 | 22 |
| 69 | 12093 | 280 | 1 | 230 | 0,1572 | 0,7514 | 0,7302 | 2,4982 | 296 |
| 70 | 284 | 280 | 1 | 230 | 0,35 | 1,81 | 1,66 | 5,62 | 19,2 |
| 71 | 284 | 280 | 2 | 230 | 0,35 | 1,81 | 1,66 | 5,60 | 19,2 |
| 72 | 335 | 280 | 1 | 230 | 0,01 | 0,833 | 0,9093 | 3,6786 | 10 |
| 73 | 335 | 280 | 2 | 230 | 0,01 | 0,833 | 0,9093 | 3,6786 | 10 |
| 74 | 355 | 283 | 1 | 230 | 1,25 | 6,33 | 4,137 | 16,017 | 63,9 |
| 75 | 355 | 283 | 2 | 230 | 0,438 | 4,116 | 2,7974 | 13,875 | 63,9 |
| 76 | 355 | 283 | 3 | 230 | 0,438 | 4,116 | 2,7974 | 13,875 | 63,9 |
| 77 | 11261 | 283 | 1 | 230 | 2,077 | 9,959 | 9,5677 | 32,989 | 84 |
| 78 | 59060 | 283 | 1 | 230 | 0,8818 | 7,3008 | 5,6135 | 24,577 | 96 |
| 79 | 59060 | 283 | 2 | 230 | 0,8818 | 7,3008 | 5,6135 | 24,577 | 96 |
| 80 | 284 | 381 | 1 | 230 | 0,23 | 1,12 | 0,662 | 2,706 | 11,7 |
| 81 | 284 | 381 | 2 | 230 | 0,23 | 1,12 | 0,558 | 2,774 | 11,7 |
| 82 | 284 | 388 | 1 | 230 | 0,409 | 2,995 | 1,598 | 7,591 | 37 |
| 83 | 337 | 284 | 1 | 230 | 0,001 | 7 | 0,0064 | 0,2361 | 22,5 |
| 84 | 419 | 284 | 1 | 230 | 5 | 5 | 0,2097 | 0,1651 | 19,20 |
| 85 | 285 | 385 | 1 | 230 | 0,001 | 0,07 | 0,20 | 0,66 | 0,7 |
| 86 | 285 | 385 | 2 | 230 | 0,001 | 0,07 | 0,20 | 0,66 | 0,7 |
| 87 | 59421 | 285 | 1 | 230 | 2,5775 | 12,319 | 11,817 | 40,722 | 124 |
| 88 | 59445 | 285 | 1 | 230 | 0,0112 | 0,0655 | 0,062 | 0,2204 | 0,7 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|---------|------|
| 89 | 59449 | 285 | 1 | 230 | 0,1393 | 0,6659 | 0,6471 | 2,2139 | 1 |
| 90 | 59452 | 285 | 1 | 230 | 0,0457 | 0,2187 | 0,2123 | 0,7271 | 1 |
| 91 | 286 | 11286 | 1 | 230 | 0,305 | 1,522 | 1,4158 | 5,0488 | 20,6 |
| 92 | 286 | 11287 | 2 | 230 | 2,878 | 12,266 | 11,924 | 40,281 | 99 |
| 93 | 376 | 288 | 1 | 230 | 1,4 | 9,19 | 7,61 | 28,65 | 95 |
| 94 | 294 | 21102 | 1 | 230 | - | 1 | 20 | 63 | 19,2 |
| 95 | 59015 | 355 | 1 | 230 | 0,3996 | 2,3379 | 2,2123 | 7,8645 | 20 |
| 96 | 59058 | 355 | 1 | 230 | 0,2017 | 1,3975 | 1,29 | 4,7141 | 1 |
| 97 | 59067 | 355 | 1 | 230 | 0,6548 | 3,1296 | 3,0392 | 10,401 | 34 |
| 98 | 59077 | 355 | 1 | 230 | 0,0506 | 0,4965 | 0,3237 | 1,6749 | 69 |
| 99 | 59084 | 355 | 1 | 230 | 1,3941 | 8,1996 | 7,6761 | 27,516 | 86 |
| 100 | 375 | 374 | 1 | 230 | - | 0,001 | - | 0,001 | 44 |
| 101 | 59461 | 376 | 1 | 230 | 0,514 | 2,454 | 2,3865 | 8,1571 | 1 |
| 102 | 394 | 385 | 1 | 230 | 0,95 | 0,678 | 6,0519 | 22,831 | 115 |
| 103 | 11394 | 394 | 1 | 230 | 0,013 | 0,132 | 0,0832 | 0,4453 | 5,4 |
| 104 | 11394 | 394 | 2 | 230 | 0,013 | 0,132 | 0,0832 | 0,4453 | 5,4 |
| 105 | 59304 | 394 | 1 | 230 | 0,4578 | 2,1879 | 2,1257 | 7,2728 | 23,5 |
| 106 | 59309 | 394 | 1 | 230 | 0,4497 | 1,6519 | 1,7989 | 5,84677 | 23,5 |
| 107 | 59317 | 394 | 1 | 230 | 0,1439 | 0,8417 | 0,797 | 2,832 | 8,8 |
| 108 | 59324 | 394 | 1 | 230 | 0,1439 | 0,8417 | 0,797 | 2,832 | 15,2 |
| 109 | 59408 | 394 | 1 | 230 | 0,2334 | 1,3654 | 1,2926 | 4,5938 | 15,2 |
| 110 | 18505 | 419 | 1 | 230 | - | 0,001 | - | 0,001 | 22 |
| 111 | 500 | 582 | 1 | 230 | 0,21 | 2,69 | 2,71 | 8,59 | 251 |
| 112 | 506 | 11582 | 1 | 500 | 0,04 | 0,55 | 0,3492 | 1,8182 | 37 |
| 113 | 506 | 11582 | 2 | 500 | 0,04 | 0,55 | 0,3492 | 1,8182 | 37 |
| 114 | 555 | 589 | 1 | 500 | 0,1820 | 2,942 | 3,5316 | 12,256 | 272 |
| 115 | 11561 | 555 | 1 | 500 | 0,0802 | 1,1454 | 1,6462 | 6,2055 | 103 |
| 116 | 574 | 589 | 1 | 500 | 0,107 | 1,33 | 1,612 | 5,7299 | 106 |
| 117 | 582 | 574 | 1 | 500 | 0,2 | 1,88 | 1,95 | 5,59 | 150 |
| 118 | 582 | 574 | 2 | 500 | 0,15 | 1,9 | 1,76 | 5,82 | 150 |
| 119 | 584 | 574 | 1 | 500 | 0,002 | 0,026 | 0,0298 | 0,1093 | 0,26 |
| 120 | 582 | 589 | 1 | 500 | 0,134 | 2,135 | 2,856 | 11,411 | 178 |
| 121 | 589 | 584 | 1 | 500 | 0,103 | 1,31 | 1,612 | 5,7299 | 93 |
| 122 | 585 | 11560 | 1 | 500 | 0,139 | 1,96 | 2,7209 | 10,607 | 225 |
| 123 | 11594 | 585 | 1 | 500 | 0,094 | 1,495 | 2,0371 | 8,0484 | 111 |
| 124 | 11594 | 585 | 2 | 500 | 0,094 | 1,495 | 2,0371 | 8,0484 | 111 |
| 125 | 587 | 585 | 1 | 500 | 0,2406 | 3,488 | 0,560 | 1,992 | 322 |
| 126 | 846 | 585 | 1 | 500 | 12 | 1,929 | 3,121 | 11,326 | 264 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 127 | 588 | 589 | 1 | 500 | 0,193 | 2,802 | 4,5 | 15,90 | 257 |
| 128 | 588 | 589 | 2 | 500 | 0,193 | 2,802 | 2,417 | 9,363 | 257 |
| 129 | 588 | 11612 | 1 | 500 | 0,0902 | 1,2574 | 0,7828 | 4,1454 | 164 |
| 130 | 11594 | 588 | 1 | 500 | 0,118 | 1,885 | 2,3634 | 7,9581 | 149 |
| 131 | 11594 | 588 | 2 | 500 | 0,118 | 1,885 | 2,3634 | 7,9581 | 149 |
| 132 | 589 | 11612 | 1 | 500 | 0,132 | 1,8574 | 2,5912 | 10,064 | 245 |
| 133 | 846 | 12318 | 1 | 500 | 0,113 | 1,578 | 0,9764 | 5,1921 | 210 |
| 134 | 59042 | 11260 | 1 | 230 | 0,1202 | 0,9955 | 0,7688 | 3,3582 | 8,53 |
| 135 | 59042 | 11260 | 2 | 230 | 0,1202 | 0,9955 | 0,7688 | 3,3582 | 8,53 |
| 136 | 59161 | 11260 | 1 | 230 | 0,5755 | 3,3666 | 3,1844 | 11,322 | 453 |
| 137 | 11461 | 11261 | 1 | 230 | 2,525 | 12,123 | 11,583 | 40,084 | 105 |
| 138 | 58825 | 11261 | 1 | 230 | 0,6394 | 3,7407 | 3,5371 | 12,579 | 35,7 |
| 139 | 58833 | 11261 | 1 | 230 | 0,9952 | 4,7562 | 4,6139 | 15,799 | 51,4 |
| 140 | 58833 | 11261 | 2 | 230 | 0,9952 | 4,7562 | 4,6139 | 15,799 | 51,4 |
| 141 | 58844 | 11261 | 1 | 230 | 0,8349 | 5,7858 | 5,3243 | 19,492 | 51,4 |
| 142 | 58844 | 11261 | 2 | 230 | 0,8349 | 5,7858 | 5,3243 | 19,492 | 51,4 |
| 143 | 11286 | 11287 | 1 | 230 | 3,166 | 13,493 | 13,082 | 44,259 | 576 |
| 144 | 59421 | 11286 | 1 | 230 | 2,07 | 9,893 | 9,5355 | 32,77 | 23,14 |
| 145 | 11595 | 11394 | 1 | 230 | 0,031 | 0,3045 | 0,1983 | 1,0272 | 49,5 |
| 146 | 11595 | 11394 | 2 | 230 | 0,031 | 0,3045 | 0,1983 | 1,0272 | 50 |
| 147 | 11595 | 11394 | 3 | 230 | 0,031 | 0,3045 | 0,1983 | 1,0272 | 50 |
| 148 | 59353 | 11394 | 1 | 230 | 0,3197 | 1,8704 | 1,7702 | 6,2924 | 115 |
| 149 | 59353 | 11394 | 2 | 230 | 0,3197 | 1,8704 | 1,7702 | 6,2924 | 115 |
| 150 | 59412 | 11394 | 1 | 230 | 0,0799 | 0,4676 | 0,4426 | 1,5733 | 115 |
| 151 | 59412 | 11394 | 2 | 230 | 0,0799 | 0,4676 | 0,4426 | 1,5733 | 115 |
| 152 | 59426 | 11394 | 1 | 230 | 0,7935 | 2,915 | 3,1726 | 10,314 | 46 |
| 153 | 59432 | 11394 | 1 | 230 | 0,0498 | 0,2378 | 0,2313 | 0,7906 | 46 |
| 154 | 11560 | 11561 | 1 | 500 | 0,1206 | 1,7313 | 2,5997 | 8,3612 | 152 |
| 155 | 11560 | 12318 | 1 | 500 | 0,085 | 1,362 | 1,7197 | 5,7749 | 175 |
| 156 | 11582 | 11561 | 1 | 500 | 0,124 | 1,979 | 2,4786 | 8,3478 | 186 |
| 157 | 59499 | 11594 | 1 | 500 | 0,0073 | 0,1044 | 0,1512 | 0,5678 | 6 |
| 158 | 59363 | 11595 | 1 | 230 | 0,2398 | 1,4028 | 1,328 | 4,7196 | 1 |
| 159 | 59390 | 11595 | 1 | 230 | 0,0617 | 0,2949 | 0,2866 | 0,9805 | 3,4 |
| 160 | 12091 | 59421 | 1 | 230 | 1,3933 | 6,6587 | 6,4476 | 22,101 | 344 |
| 161 | 58836 | 58843 | 1 | 230 | 0,0657 | 0,3139 | 0,3052 | 1,0436 | 1 |
| 162 | 58842 | 58843 | 1 | 230 | 0,1115 | 0,5327 | 0,5179 | 1,7711 | 1 |
| 163 | 58843 | 58844 | 1 | 230 | 0,207 | 0,9893 | 0,9615 | 3,289 | 1 |
| 164 | 58843 | 58844 | 2 | 230 | 0,207 | 0,9893 | 0,9615 | 3,289 | 1 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|----|
| 165 | 59359 | 59412 | 1 | 230 | 0,8472 | 4,9564 | 4,6822 | 0,1666 | 8 |
| 166 | 59363 | 11595 | 1 | 230 | 0,2398 | 1,4028 | 1,328 | 4,7196 | 15 |
| 167 | 59441 | 59421 | 1 | 230 | 0,0559 | 0,3273 | 0,3096 | 1,1013 | 1 |

Tabela 14 – Dados dos transformadores para a configuração do SIN em 2022.

| Barra Início | Barra Fim | Tipo de Conexão | R_1 [%] | X_1 [%] | R_0 [%] | X_0 [%] | Número Circuito |
|--------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| 200 | 500 | YN - YN | - | 1,414 | - | 1,414 | 1 |
| 206 | 506 | YN - YN | - | 3,56 | - | 3,56 | 1 |
| 206 | 506 | YN - YN | - | 3,56 | - | 3,56 | 2 * |
| 274 | 574 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 1 |
| 274 | 574 | YN - YN | - | 1,15 | - | 1,15 | 2 |
| 584 | 284 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 1 |
| 584 | 284 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 2 |
| 588 | 288 | YN - YN | - | 4,92 | - | 4,92 | 1 |
| 588 | 288 | YN - YN | - | 4,92 | - | 4,92 | 2 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 1 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 2 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 3 |
| 294 | 574 | YN - YN | - | 1,13 | - | 1,13 | 1 |
| 294 | 574 | YN - YN | - | 1,01 | - | 1,01 | 2 |
| 300 | 500 | YN - YN | - | 1,414 | - | 1,414 | 1 |
| 355 | 555 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 1 |
| 355 | 555 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 2 |
| 385 | 585 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |
| 385 | 585 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 2 |
| 846 | 11286 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |
| 11560 | 11260 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 1 |
| 11560 | 11260 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 2 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 1 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 2 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 3 |
| 11582 | 11282 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |
| 11582 | 11282 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 2 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,33 | - | 1,33 | 1 |

Continua

| | | | | | | | |
|-------|-------|---------|---|------|---|------|---|
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,33 | - | 1,33 | 2 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,33 | - | 1,33 | 3 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,33 | - | 1,33 | 4 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,33 | - | 1,33 | 5 |
| 11612 | 18612 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 1 |

Tabela 15 – Dados das unidades geradoras atuais simulados na configuração curto-máximo do SIN: Ano 2022.

| Nome | Tipo | Barra Circunv. | Nome Barra | Tensão [kV] | X_0 [%] | R_1 [%] | R_0 [%] |
|--------------|------|-------------------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| PAF2A3UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 31.92 | - | - |
| PAF2B2UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2B3UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2B1UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2A1UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2A2UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| ITAPE1UHE013 | UHE | 263 | ITAPEB-BA230 | 13.8 | 4.4667 | - | - |
| VERACEUTE013 | UTE | 267 | VERACE-BA230 | 13.8 | 13 | 0.06 | 0.06 |
| COLIN2PCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 102.27 | - | - |
| COLIN1PCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 147.54 | - | - |
| CDLIXAPCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 109.75 | - | - |
| FUNIL1UHE013 | UHE | 276 | FUNIL-BA230 | 13.8 | 56 | - | - |
| PEDRA-PCH013 | PCH | 276 | FUNIL-BA230 | 13.8 | 81.008 | - | - |
| GLOB1-UTE013 | UTE | 280 | JACARA-BA230 | 13.8 | 12.096 | - | - |
| GLOB2-UTE013 | UTE | 280 | JACARA-BA230 | 13.8 | 12.096 | - | - |
| BURITIPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 1607.1 | - | - |
| PIABANPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 1384.6 | - | - |
| AFEMEAPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 180 | - | - |
| SITGRAPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 65.217 | - | - |
| PAF1-1UHE013 | UHE | 300 | PAF3-B-BA230 | 13.8 | 10.125 | - | - |
| PAF3-2UHE013 | UHE | 300 | PAF3-B-BA230 | 13.8 | 4.39 | - | - |
| PCAVA1UHE013 | UHE | 375 | PCAVAl-BA230 | 13.8 | 12.78 | - | - |
| CAMAPAUTE007 | UTE | 381 | POLO-BA230 | 7 | 20 | - | - |
| CAMAP1UTE007 | UTE | 381 | POLO-BA230 | 7 | 22.857 | - | - |
| MURICYUTE013 | UTE | 381 | POLO-BA230 | 13.8 | 8.97 | - | - |

Continua

| | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|--------------|------|--------|---|---|
| PAF4-1UHE013 | UHE | 500 | PAF4—BA500 | 13.8 | 0.8583 | - | - |
| SOBRA1UHE013 | UHE | 506 | SOBRAD-BA500 | 13.8 | 3.94 | - | - |
| SOBRA2UHE013 | UHE | 506 | SOBRAD-BA500 | 13.8 | 3.94 | - | - |

Nota: considerou-se $X_0 = X'_d = X''_d$

APÊNDICE B – Dados Utilizados do SEP da Bahia Relativos ao PDE 2031 (Ano 2025) para a Configuração de Curto-Máximo

Tabela 16 – Dados dos barramentos para a configuração curto-máximo do SIN: Ano 2025.

| Barramento Monitorado | Número Atribuído | Nome do Barramento | Tensão [kV] | Capacidade de Interrupção do Disjuntor [kA] |
|-----------------------|------------------|--------------------|-------------|---|
| 1 | 110 | PROSPE-BA230 | 230 | 40 |
| 2 | 200 | PAF3-A-BA230 | 230 | 40 |
| 3 | 202 | JUAZE2-BA230 | 230 | - |
| 4 | 203 | S.BONF-BA230 | 230 | 40 |
| 5 | 205 | BROTAS-BA230 | 230 | 50 |
| 6 | 206 | SOBRAD-BA230 | 230 | - |
| 7 | 207 | JAGUAR-BA230 | 230 | 40 |
| 8 | 209 | POCOE2-BA230 | 230 | 40 |
| 9 | 213 | ITAGIB-BA230 | 230 | 40 |
| 10 | 214 | EMBASA-BA230 | 230 | 40 |
| 11 | 262 | T.FREI-BA230 | 230 | - |
| 12 | 263 | ITAPEB-BA230 | 230 | - |
| 13 | 264 | S.A.JE-BA230 | 230 | - |
| 14 | 266 | TOMBA-BA230 | 230 | - |
| 15 | 267 | VERACE-BA230 | 230 | - |
| 16 | 268 | NARAND-BA230 | 230 | - |
| 17 | 269 | EUNAPO-BA230 | 230 | - |
| 18 | 270 | C.DANT-BA230 | 230 | - |
| 19 | 272 | CATU-BA230 | 230 | - |
| 20 | 274 | CMACB1-BA230 | 230 | - |
| 21 | 275 | G.MANG-BA230 | 230 | - |
| 22 | 276 | FUNIL-BA230 | 230 | - |
| 23 | 277 | MATATU-BA230 | 230 | - |
| 24 | 278 | PITUAC-BA230 | 230 | - |
| 25 | 279 | COTEGI-BA230 | 230 | - |
| 26 | 280 | JACARA-BA230 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|----|-------|--------------|-----|------|
| 27 | 281 | D.PITU-BA230 | 230 | 40 |
| 28 | 283 | IRECE-BA230 | 230 | 40 |
| 29 | 284 | CAMAC4-BA230 | 230 | 40 |
| 30 | 285 | BJLAPA-BA230 | 230 | - |
| 31 | 286 | BARREI-BA230 | 230 | 40 |
| 32 | 288 | IBICOA-BA230 | 230 | - |
| 33 | 289 | SAPEAC-BA230 | 230 | - |
| 34 | 294 | CMACB2-BA230 | 230 | - |
| 35 | 300 | PAF3-B-BA230 | 230 | - |
| 36 | 335 | CFURTA-BA230 | 230 | - |
| 37 | 345 | ITABUN-BA230 | 230 | 40 |
| 38 | 355 | MCHAP2-BA230 | 230 | 50 |
| 39 | 372 | SCHINC-BA230 | 230 | 31.5 |
| 40 | 375 | PCAVAL-BA230 | 230 | 50 |
| 41 | 376 | BRUMA2-BA230 | 230 | 40 |
| 42 | 381 | POLO-BA230 | 230 | 26.3 |
| 43 | 385 | BJLAP2-BA230 | 230 | 26.3 |
| 44 | 387 | REGUA-BA230 | 230 | 40 |
| 45 | 388 | PIRAJA-BA230 | 230 | 26.3 |
| 46 | 394 | IGAPO2-BA230 | 230 | 40 |
| 47 | 472 | OLINDI-BA230 | 230 | 26.3 |
| 48 | 500 | PAF4-BA500 | 500 | 50 |
| 49 | 506 | SOBRAD-BA500 | 500 | 26.3 |
| 50 | 555 | MCHAP2-BA500 | 500 | 40 |
| 51 | 574 | CAMAC2-BA500 | 500 | - |
| 52 | 582 | OLINDI-BA500 | 500 | 26.3 |
| 53 | 584 | CAMAC4-BA500 | 500 | - |
| 54 | 585 | BJLAP2-BA500 | 500 | 31.5 |
| 55 | 587 | R.EGUA-BA500 | 500 | 40 |
| 56 | 588 | IBICOA-BA500 | 500 | - |
| 57 | 589 | SAPEAC-BA500 | 500 | 40 |
| 58 | 846 | BARRER-BA500 | 500 | - |
| 59 | 11110 | FSANT3-BA230 | 230 | 40 |
| 60 | 11260 | GOURO2-BA230 | 230 | 40 |
| 61 | 11261 | OUROL2-BA230 | 230 | - |
| 62 | 11282 | JUAZE3-BA230 | 230 | - |
| 63 | 11286 | BARRE2-BA230 | 230 | - |
| 64 | 11287 | RGRAND-BA230 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|-----|-------|---------------|-----|----|
| 65 | 11388 | RFORM2-BA230 | 230 | 40 |
| 66 | 11394 | IGAPO3-BA230 | 230 | - |
| 67 | 11461 | C.FORM-BA230 | 230 | - |
| 68 | 11560 | GOURO2-BA500 | 500 | - |
| 69 | 11561 | OUIROL2-BA500 | 500 | - |
| 70 | 11582 | JUAZE3-BA500 | 500 | - |
| 71 | 11594 | IGAPO3-BA500 | 500 | 40 |
| 72 | 11595 | PINDA2-BA230 | 230 | - |
| 73 | 11612 | POCOE3-BA500 | 500 | - |
| 74 | 11760 | ALAGO2-BA230 | 230 | - |
| 75 | 12318 | BURITI-BA500 | 500 | - |
| 76 | 18612 | POCOE3-BA230 | 230 | - |
| 77 | 21036 | CARAIB-BA230 | 230 | - |
| 78 | 21042 | FERBAS-BA230 | 230 | - |
| 79 | 21043 | GERDAU-BA230 | 230 | - |
| 80 | 21044 | DOWQUI-BA230 | 230 | - |
| 81 | 21045 | MIRABE-BA230 | 230 | - |
| 82 | 21049 | FORD—BA230 | 230 | - |
| 83 | 21100 | BKNUNB-BA230 | 230 | - |
| 84 | 21101 | BKNUSC-BA230 | 230 | - |
| 85 | 56751 | ARIZON-BA500 | 500 | - |
| 86 | 58049 | TUCANO-BA500 | 500 | - |
| 87 | 58121 | CANUD1-BA500 | 500 | - |
| 88 | 58122 | CANUD2-BA500 | 500 | - |
| 89 | 58604 | PBRANC-BA230 | 230 | - |
| 90 | 58609 | CASNO2-BA230 | 230 | - |
| 91 | 58625 | DELFIN-BA230 | 230 | - |
| 92 | 58632 | J.SOLA-BA230 | 230 | - |
| 93 | 58647 | ZEUS—BA230 | 230 | - |
| 94 | 58653 | FLARGA-BA230 | 230 | - |
| 95 | 58825 | UMBURA-BA230 | 230 | - |
| 96 | 58833 | C.LARG-BA230 | 230 | - |
| 97 | 58846 | FLARGS-BA230 | 230 | - |
| 98 | 58853 | BABILS-BA230 | 230 | - |
| 99 | 59015 | S.AZUL-BA230 | 230 | - |
| 100 | 59042 | LARANJ-BA230 | 230 | - |
| 101 | 59058 | MCHAPS-BA230 | 230 | - |
| 102 | 59060 | GOURO1-BA230 | 230 | - |

Continua

| | | | | |
|-----|-------|--------------|-----|---|
| 103 | 59067 | VBAHI2-BA230 | 230 | - |
| 104 | 59077 | SBABIL-BA230 | 230 | - |
| 105 | 59084 | BABILO-BA230 | 230 | - |
| 106 | 59088 | VSESPE-BA230 | 230 | - |
| 107 | 59097 | VBAHI3-BA230 | 230 | - |
| 108 | 59161 | ITAGBA-BA230 | 230 | - |
| 109 | 59304 | CAE123-BA230 | 230 | - |
| 110 | 59309 | CAETIT-BA230 | 230 | - |
| 111 | 59317 | ARACAS-BA230 | 230 | - |
| 112 | 59324 | MORRAO-BA230 | 230 | - |
| 113 | 59359 | ABIL I-BA230 | 230 | - |
| 114 | 59363 | FOLSER-BA230 | 230 | - |
| 115 | 59412 | UMBUZE-BA230 | 230 | - |
| 116 | 59421 | TABOCA-BA230 | 230 | - |
| 117 | 59441 | HORIZO-BA230 | 230 | - |
| 118 | 59445 | LAPA—BA230 | 230 | - |
| 119 | 59461 | CRISTA-BA230 | 230 | - |
| 120 | 59499 | UMBUZE-BA500 | 500 | - |
| 121 | 59501 | ABILII-BA230 | 230 | - |
| 122 | 59503 | TAMBOI-BA230 | 230 | - |
| 123 | 59505 | ALCACU-BA230 | 230 | - |
| 124 | 59507 | BOTUQU-BA230 | 230 | - |
| 125 | 59513 | MCHAS2-BA500 | 500 | - |

Tabela 17 – Dados das linhas de transmissão para configuração curto-máximo do SIN: Ano 2025.

| Caso | Barra Início | Barra Fim | Circuito | Tensão [kV] | R_1 [%] | X_1 [%] | R_0 [%] | X_0 [%] | d [km] |
|------|--------------|-----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 1 | 110 | 284 | 1 | 230 | 0,3704 | 2,1825 | 2,0508 | 7,342 | 23 |
| 2 | 200 | 270 | 1 | 230 | 2,45 | 13,1 | 12,12 | 33,17 | 134 |
| 3 | 202 | 203 | 1 | 230 | 2,7 | 13,9 | 11,58 | 47,22 | 149 |
| 4 | 202 | 207 | 1 | 230 | 1,442 | 7,05 | 6,82 | 27,67 | 87 |
| 5 | 202 | 11282 | 1 | 230 | 0,07 | 0,065 | 0,222 | 0,786 | 1 |
| 6 | 206 | 202 | 1 | 230 | 0,78 | 4 | 2,87 | 11,49 | 39 |
| 7 | 206 | 202 | 2 | 230 | 0,78 | 4 | 2,86 | 11,66 | 39 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 8 | 58625 | 202 | 1 | 230 | 1,7714 | 8,4661 | 3,9471 | 30,918 | 78,13 |
| 9 | 58632 | 202 | 1 | 230 | 0,1293 | 0,6183 | 0,6006 | 2,0557 | 6 |
| 10 | 58647 | 202 | 1 | 230 | 1,642 | 7,8477 | 7,5878 | 26,031 | 7 |
| 11 | 207 | 203 | 1 | 230 | 1,3 | 6,67 | 6,31 | 25,6 | 80,5 |
| 12 | 11461 | 203 | 1 | 230 | 1,251 | 5,987 | 4,3 | 14,41 | 64 |
| 13 | 58653 | 203 | 1 | 230 | 0,1951 | 2,199 | 1,2474 | 7,417 | 1 |
| 14 | 205 | 283 | 1 | 230 | 2,4 | 13,05 | 8,98 | 25,87 | 135 |
| 15 | 205 | 11260 | 1 | 230 | 2,583 | 12,405 | 11,124 | 34,199 | 115 |
| 16 | 285 | 205 | 1 | 230 | 3,84 | 19,73 | 12,95 | 38,64 | 205 |
| 17 | 58604 | 206 | 1 | 230 | 0,5773 | 3,8039 | 4,732 | 18,199 | 55 |
| 18 | 58609 | 206 | 1 | 230 | 1,3335 | 6,3733 | 6,1728 | 21,156 | 67,1 |
| 19 | 207 | 21036 | 1 | 230 | 0,02 | 0,095 | 0,0929 | 0,3158 | 675 |
| 20 | 207 | 21036 | 2 | 230 | 0,02 | 0,095 | 0,0929 | 0,3158 | 675 |
| 21 | 209 | 376 | 1 | 230 | 2,68 | 13,6 | 12,247 | 44,805 | 143 |
| 22 | 213 | 209 | 1 | 230 | 1,65 | 8,35 | 7,6161 | 27,629 | 88 |
| 23 | 276 | 209 | 1 | 230 | 2,217 | 10,97 | 10,188 | 36,229 | 620 |
| 24 | 18612 | 209 | 1 | 230 | 0,0135 | 0,1268 | 0,0864 | 0,4278 | 3 |
| 25 | 18612 | 209 | 2 | 230 | 0,0135 | 0,1268 | 0,0864 | 0,4278 | 3 |
| 26 | 213 | 21045 | 1 | 230 | 0,02 | 0,095 | 0,57 | 2,15 | 78 |
| 27 | 276 | 213 | 1 | 230 | 0,55 | 2,81 | 2,826 | 9,139 | 29,4 |
| 28 | 266 | 214 | 1 | 230 | 0,56 | 2,74 | 2,14 | 8,06 | 29,4 |
| 29 | 275 | 214 | 1 | 230 | 0,21 | 1,05 | 0,82 | 3,09 | 66 |
| 30 | 269 | 262 | 1 | 230 | 2,806 | 14,322 | 11,92 | 45,4 | 152 |
| 31 | 269 | 262 | 2 | 230 | 2,81 | 14,32 | 13,13 | 43,06 | 152 |
| 32 | 263 | 267 | 1 | 230 | 0,11 | 0,61 | 1,259 | 6,105 | 48 |
| 33 | 263 | 269 | 1 | 230 | 0,87 | 4,42 | 2,43 | 11,63 | 47 |
| 34 | 263 | 269 | 2 | 230 | 0,87 | 4,41 | 2,42 | 11,49 | 47 |
| 35 | 263 | 18612 | 1 | 230 | 0,0409 | 0,3415 | 0,2616 | 1,1521 | 183 |
| 36 | 345 | 263 | 1 | 230 | 2,728 | 13,88 | 12,458 | 45,714 | 146 |
| 37 | 345 | 263 | 2 | 230 | 3,006 | 14,464 | 13,715 | 47,712 | 146 |
| 38 | 345 | 263 | 3 | 230 | 3,006 | 14,464 | 13,715 | 47,712 | 146 |
| 39 | 264 | 276 | 1 | 230 | 2,94 | 15,14 | 10,67 | 36,25 | 163 |
| 40 | 264 | 276 | 2 | 230 | 2,89 | 14,72 | 10,45 | 36,45 | 163 |
| 41 | 264 | 289 | 1 | 230 | 0,45 | 2,41 | 2,11 | 7,12 | 31,8 |
| 42 | 264 | 289 | 2 | 230 | 0,45 | 2,24 | 2,07 | 7,16 | 31,8 |
| 43 | 264 | 289 | 3 | 230 | 0,45 | 2,24 | 2,0885 | 7,4299 | 31,8 |
| 44 | 275 | 266 | 1 | 230 | 0,77 | 3,79 | 2,96 | 11,15 | 40,5 |
| 45 | 267 | 18604 | 1 | 230 | 0 | 0,01 | 0 | 0,01 | 133 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|------|
| 46 | 278 | 268 | 1 | 230 | 0,039 | 0,27 | 0,144 | 0,753 | 3,6 |
| 47 | 278 | 268 | 2 | 230 | 0,039 | 0,27 | 0,144 | 0,753 | 3,6 |
| 48 | 270 | 472 | 1 | 230 | 1,5414 | 7,3794 | 4,96 | 18,4 | 80 |
| 49 | 270 | 472 | 2 | 230 | 1,5085 | 7,2946 | 6,9734 | 24,153 | 80 |
| 50 | 300 | 270 | 1 | 230 | 2,46 | 13,15 | 11,98 | 34,37 | 134 |
| 51 | 272 | 284 | 1 | 230 | 0,46 | 2,45 | 1,64 | 5,99 | 25 |
| 52 | 272 | 284 | 2 | 230 | 0,46 | 2,5 | 1,39 | 5,14 | 25 |
| 53 | 272 | 372 | 1 | 230 | 0,5153 | 2,4633 | 2,75 | 7,43 | 27 |
| 54 | 272 | 472 | 1 | 230 | 2,3977 | 11,594 | 8,19 | 29,31 | 119 |
| 55 | 272 | 21042 | 1 | 230 | 0,02 | 0,095 | 0,0929 | 0,3158 | 2,32 |
| 56 | 275 | 272 | 1 | 230 | 1,42 | 7,57 | 7,12 | 22,58 | 77,2 |
| 57 | 274 | 278 | 1 | 230 | 0,29 | 2,7 | 2,05 | 7,53 | 39 |
| 58 | 274 | 21100 | 1 | 230 | 0,11 | 0,57 | 0,47 | 1,87 | 6 |
| 59 | 274 | 21100 | 2 | 230 | 0,11 | 0,57 | 0,47 | 1,87 | 6 |
| 60 | 274 | 21101 | 1 | 230 | 0,13 | 0,68 | 0,38 | 1,36 | 6 |
| 61 | 275 | 289 | 1 | 230 | 0,45 | 2,41 | 1,64 | 5,79 | 22,6 |
| 62 | 275 | 289 | 2 | 230 | 0,45 | 2,24 | 1,49 | 5,04 | 23 |
| 63 | 275 | 289 | 3 | 230 | 0,45 | 2,24 | 1,47 | 5,09 | 23,5 |
| 64 | 294 | 275 | 1 | 230 | 1,54 | 7,84 | 7,113 | 25,949 | 75 |
| 65 | 375 | 275 | 1 | 230 | 0,07 | 0,39 | 0,4 | 1,38 | 6 |
| 66 | 11110 | 275 | 1 | 230 | 1,8 | 9,158 | 8,298 | 30,286 | 53 |
| 67 | 276 | 345 | 1 | 230 | 1,836 | 9,282 | 8,4627 | 30,694 | 99 |
| 68 | 276 | 345 | 2 | 230 | 2,0381 | 9,7704 | 9,39 | 32,366 | 99 |
| 69 | 276 | 345 | 3 | 230 | 2,0381 | 9,7704 | 9,39 | 32,366 | 99 |
| 70 | 289 | 276 | 1 | 230 | 3,5 | 18,84 | 13,23 | 47,71 | 196 |
| 71 | 281 | 277 | 1 | 230 | 0,07 | 0,6 | 0,44 | 1,55 | 8 |
| 72 | 294 | 277 | 1 | 230 | 0,87 | 4,71 | 4,5685 | 16,995 | 30 |
| 73 | 281 | 278 | 1 | 230 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,13 | 1 |
| 74 | 284 | 278 | 1 | 230 | 0,44 | 2,7 | 2,15 | 7,74 | 39 |
| 75 | 279 | 280 | 1 | 230 | 0,28 | 1,49 | 1,27 | 4,52 | 77,2 |
| 76 | 279 | 281 | 1 | 230 | 0,2 | 1,64 | 1,83 | 5,61 | 22 |
| 77 | 279 | 21043 | 1 | 230 | 0,02 | 0,095 | 0,17 | 0,62 | 22 |
| 78 | 284 | 279 | 1 | 230 | 0,42 | 2,25 | 1,86 | 5,24 | 22,5 |
| 79 | 294 | 279 | 1 | 230 | 0,21 | 1,64 | 1,343 | 5,532 | 22 |
| 80 | 280 | 21044 | 1 | 230 | 0,1462 | 0,0776 | 0,85 | 2,1 | 7,8 |
| 81 | 280 | 21044 | 2 | 230 | 0,1462 | 0,0776 | 0,85 | 2,1 | 7,8 |
| 82 | 284 | 280 | 1 | 230 | 0,35 | 1,81 | 1,68 | 5,64 | 19,2 |
| 83 | 284 | 280 | 2 | 230 | 0,35 | 1,81 | 1,67 | 5,6 | 19,2 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|------|
| 84 | 335 | 280 | 1 | 230 | 0,01 | 0,833 | 0,9093 | 3,6786 | 10 |
| 85 | 335 | 280 | 2 | 230 | 0,01 | 0,833 | 0,9093 | 3,6786 | 10 |
| 86 | 283 | 355 | 1 | 230 | 1,25 | 6,33 | 3,93 | 15,42 | 63,9 |
| 87 | 283 | 355 | 2 | 230 | 0,438 | 4,116 | 4,8377 | 19,298 | 63,9 |
| 88 | 283 | 355 | 3 | 230 | 0,438 | 4,116 | 3,93 | 15,42 | 63,9 |
| 89 | 11261 | 283 | 1 | 230 | 2,077 | 9,959 | 6,496 | 20,028 | 84 |
| 90 | 59060 | 283 | 1 | 230 | 1,049 | 7,323 | 6,6779 | 24,651 | 96 |
| 91 | 284 | 381 | 1 | 230 | 0,23 | 1,12 | 0,53 | 2,14 | 11,7 |
| 92 | 284 | 381 | 2 | 230 | 0,23 | 1,12 | 0,53 | 2,14 | 11,7 |
| 93 | 284 | 388 | 1 | 230 | 0,1941 | 1,7969 | 1,2412 | 6,0611 | 37 |
| 94 | 284 | 388 | 2 | 230 | 0,1941 | 1,7969 | 1,2412 | 6,0611 | 37 |
| 95 | 285 | 385 | 1 | 230 | 0,001 | 0,07 | 0,201 | 0,662 | 0,7 |
| 96 | 285 | 385 | 2 | 230 | 0,001 | 0,07 | 0,201 | 0,662 | 0,7 |
| 97 | 59421 | 285 | 1 | 230 | 2,5775 | 12,319 | 11,817 | 40,722 | 124 |
| 98 | 59445 | 285 | 1 | 230 | 0,0199 | 0,0951 | 0,0924 | 0,3162 | 0,7 |
| 99 | 286 | 11286 | 1 | 230 | 0,3912 | 1,9367 | 1,8158 | 6,4242 | 20,6 |
| 100 | 286 | 11286 | 3 | 230 | 0,1321 | 1,1179 | 0,8449 | 3,7711 | 20,6 |
| 101 | 286 | 11287 | 1 | 230 | 2,1914 | 10,323 | 9,5967 | 36,565 | 99 |
| 102 | 286 | 11287 | 2 | 230 | 2,1914 | 10,323 | 9,5967 | 36,565 | 99 |
| 103 | 376 | 288 | 1 | 230 | 1,4 | 9,19 | 7,61 | 28,65 | 95 |
| 104 | 11110 | 294 | 1 | 230 | 1,8 | 9,158 | 8,298 | 30,286 | 85 |
| 105 | 59015 | 355 | 1 | 230 | 0,3996 | 2,3379 | 1,8646 | 5,1682 | 20 |
| 106 | 59058 | 355 | 1 | 230 | 0,2081 | 2,2371 | 1,3305 | 7,5454 | 1 |
| 107 | 59067 | 355 | 1 | 230 | 0,2338 | 1,9621 | 1,495 | 6,6181 | 34 |
| 108 | 59077 | 355 | 1 | 230 | 0,4728 | 4,812 | 3,0181 | 16,218 | 69 |
| 109 | 59084 | 355 | 1 | 230 | 1,5222 | 8,9535 | 8,3719 | 30,031 | 86 |
| 110 | 59088 | 355 | 1 | 230 | 0,2413 | 1,5904 | 1,4635 | 5,7599 | 1 |
| 111 | 11760 | 372 | 1 | 230 | 0,2408 | 1,151 | 1,1184 | 3,8266 | 3 |
| 112 | 59461 | 376 | 1 | 230 | 0,514 | 2,454 | 2,3865 | 8,1571 | 1 |
| 113 | 381 | 21049 | 1 | 230 | 0,019 | 0,092 | 0,027 | 0,11 | 1,55 |
| 114 | 381 | 21049 | 2 | 230 | 0,019 | 0,092 | 0,027 | 0,11 | 1,55 |
| 115 | 394 | 385 | 1 | 230 | 0,776 | 7,613 | 6,03 | 25,76 | 115 |
| 116 | 11394 | 394 | 1 | 230 | 0,013 | 0,132 | 0,17 | 0,89 | 5,4 |
| 117 | 11394 | 394 | 2 | 230 | 0,013 | 0,132 | 0,17 | 0,89 | 5,4 |
| 118 | 59304 | 394 | 1 | 230 | 0,4578 | 2,1879 | 2,186 | 7,09 | 23,5 |
| 119 | 59309 | 394 | 1 | 230 | 0,355 | 1,885 | 2,0622 | 6,7837 | 23,5 |
| 120 | 59317 | 394 | 1 | 230 | 0,1521 | 0,8078 | 0,8004 | 2,9176 | 8,8 |
| 121 | 59324 | 394 | 1 | 230 | 0,2786 | 1,3317 | 1,294 | 4,4273 | 15,2 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 122 | 472 | 11760 | 1 | 230 | 1,6949 | 8,1175 | 7,8292 | 26,921 | 51 |
| 123 | 58121 | 500 | 1 | 500 | 0,0954 | 1,2227 | 1,4082 | 5,1183 | 125 |
| 124 | 506 | 11582 | 1 | 500 | 0,04 | 0,55 | 0,47 | 1,6 | 37 |
| 125 | 506 | 11582 | 2 | 500 | 0,04 | 0,55 | 0,4274 | 1,9 | 37 |
| 126 | 56751 | 506 | 1 | 500 | 0,0352 | 0,5188 | 0,5885 | 2,0627 | 41 |
| 127 | 555 | 589 | 1 | 500 | 0,2091 | 3,0563 | 3,852 | 13,05 | 272 |
| 128 | 11561 | 555 | 1 | 500 | 0,0802 | 1,1454 | 1,446 | 4,735 | 103 |
| 129 | 59513 | 555 | 1 | 500 | 0,0241 | 0,347 | 0,5328 | 1,6935 | 1 |
| 130 | 574 | 589 | 1 | 500 | 0,107 | 1,33 | 1,612 | 5,7299 | 106 |
| 131 | 582 | 574 | 1 | 500 | 0,2 | 1,88 | 1,95 | 5,59 | 150 |
| 132 | 582 | 574 | 2 | 500 | 0,15 | 1,9 | 1,76 | 5,82 | 150 |
| 133 | 584 | 574 | 1 | 500 | 0,002 | 0,026 | 0,0298 | 0,1093 | 0,26 |
| 134 | 582 | 589 | 1 | 500 | 0,1367 | 2,1587 | 1,73 | 7,425 | 178 |
| 135 | 58049 | 582 | 1 | 500 | 0,0332 | 0,5787 | 0,7095 | 2,4889 | 67 |
| 136 | 58121 | 582 | 1 | 500 | 0,1145 | 1,4672 | 1,6834 | 6,1314 | 255 |
| 137 | 589 | 584 | 1 | 500 | 0,103 | 1,31 | 1,612 | 5,7299 | 93 |
| 138 | 587 | 585 | 1 | 500 | 0,2406 | 3,488 | 3,797 | 12,96 | 322 |
| 139 | 11594 | 585 | 1 | 500 | 0,094 | 1,495 | 1,448 | 4,9512 | 111 |
| 140 | 588 | 589 | 1 | 500 | 0,193 | 2,802 | 3,032 | 10,348 | 257 |
| 141 | 588 | 11612 | 1 | 500 | 0,0902 | 1,2574 | 2,3253 | 7,6318 | 164 |
| 142 | 11594 | 588 | 1 | 500 | 0,118 | 1,885 | 1,986 | 6,831 | 149 |
| 143 | 589 | 11612 | 1 | 500 | 0,132 | 1,8574 | 3,232 | 10,741 | 245 |
| 144 | 846 | 12318 | 1 | 500 | 0,113 | 1,578 | 0,9764 | 5,1921 | 210 |
| 145 | 59042 | 11260 | 1 | 230 | 0,2876 | 1,8953 | 1,7441 | 6,8637 | 8,53 |
| 146 | 59161 | 11260 | 1 | 230 | 0,5755 | 3,3666 | 3,1844 | 11,322 | 453 |
| 147 | 11461 | 11261 | 1 | 230 | 2,525 | 12,123 | 8,12 | 25,037 | 105 |
| 148 | 58825 | 11261 | 1 | 230 | 0,1833 | 2,3255 | 1,172 | 7,8435 | 35,7 |
| 149 | 58833 | 11261 | 1 | 230 | 0,5129 | 3,3797 | 3,1082 | 12,235 | 51,4 |
| 150 | 58833 | 11261 | 2 | 230 | 0,5129 | 3,3797 | 3,1082 | 12,235 | 51,4 |
| 151 | 58853 | 11261 | 1 | 230 | 0,2114 | 1,9897 | 1,3518 | 6,7112 | 20 |
| 152 | 59421 | 11286 | 1 | 230 | 2,07 | 9,893 | 9,5355 | 32,77 | 23,14 |
| 153 | 387 | 11287 | 1 | 230 | 2,1441 | 12,881 | 11,7 | 43,056 | 135 |
| 154 | 387 | 11388 | 1 | 230 | 0,8416 | 6,7068 | 5,3614 | 22,584 | 95 |
| 155 | 387 | 11388 | 2 | 230 | 0,8416 | 6,7068 | 5,3614 | 22,584 | 95 |
| 156 | 11595 | 11394 | 1 | 230 | 0,31 | 3,045 | 2,57 | 10,61 | 49,5 |
| 157 | 11595 | 11394 | 2 | 230 | 0,31 | 3,045 | 2,652 | 10,28 | 50 |
| 158 | 11595 | 11394 | 3 | 230 | 0,31 | 3,045 | 2,652 | 10,28 | 50 |
| 159 | 11560 | 11561 | 1 | 500 | 0,1206 | 1,7313 | 2,34 | 7,665 | 152 |

Continua

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|---|-----|--------|--------|--------|--------|-----|
| 160 | 11560 | 12318 | 1 | 500 | 0,085 | 1,362 | 1,7197 | 5,7749 | 175 |
| 161 | 11582 | 11561 | 1 | 500 | 0,124 | 1,979 | 2,593 | 8,324 | 186 |
| 162 | 59499 | 11594 | 1 | 500 | 0,0061 | 0,0911 | 0,1344 | 0,4955 | 6 |
| 163 | 59359 | 11595 | 1 | 230 | 0,199 | 1,008 | 0,9239 | 3,3439 | 8 |
| 164 | 59363 | 11595 | 1 | 230 | 0,2958 | 1,5708 | 1,5562 | 5,6729 | 15 |
| 165 | 58122 | 58121 | 1 | 500 | 0,0344 | 0,491 | 0,7113 | 2,6687 | 3 |
| 166 | 58846 | 58653 | 1 | 230 | 0,2366 | 1,6397 | 1,5131 | 5,531 | 3 |
| 167 | 59097 | 59067 | 1 | 230 | 0,1785 | 0,7909 | 0,7488 | 2,6115 | 14 |
| 168 | 59501 | 59412 | 1 | 230 | 0,734 | 3,896 | 3,8569 | 14,062 | 40 |
| 169 | 59503 | 59412 | 1 | 230 | 0,092 | 0,907 | 0,5885 | 3,0597 | 15 |
| 170 | 59441 | 59421 | 1 | 230 | 0,0559 | 0,3273 | 0,3096 | 1,1013 | 1 |
| 171 | 59505 | 59503 | 1 | 230 | 0,071 | 0,584 | 0,4542 | 1,9701 | 8 |
| 172 | 59507 | 59505 | 1 | 230 | 0,627 | 3,33 | 3,2959 | 12,021 | 36 |

Tabela 18 – Dados dos transformadores para a configuração do SIN em 2025.

| Barra Início | Barra Fim | Tipo de Conexão | R_1 [%] | X_1 [%] | R_0 [%] | X_0 [%] | Número Circuito |
|--------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| 200 | 500 | YN - YN | - | 1,414 | - | 1,414 | 1 |
| 206 | 506 | YN - YN | - | 3,56 | - | 3,56 | 1 |
| 206 | 506 | YN - YN | - | 3,56 | - | 3,56 | 2 |
| 274 | 574 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 1 |
| 274 | 574 | YN - YN | - | 1,15 | - | 1,15 | 2 |
| 584 | 284 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 1 |
| 584 | 284 | YN - YN | - | 1,17 | - | 1,17 | 2 |
| 588 | 288 | YN - YN | - | 4,92 | - | 4,92 | 1 |
| 588 | 288 | YN - YN | - | 4,92 | - | 4,92 | 2 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 1 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 2 |
| 289 | 589 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 3 |
| 294 | 574 | YN - YN | - | 1,13 | - | 1,13 | 1 |
| 294 | 574 | YN - YN | - | 1,01 | - | 1,01 | 2 |
| 300 | 500 | YN - YN | - | 1,414 | - | 1,414 | 1 |
| 355 | 555 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 1 |
| 355 | 555 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 2 |
| 385 | 585 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |

Continua

| | | | | | | | |
|-------|-------|---------|---|-------|---|-------|---|
| 385 | 585 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 2 |
| 846 | 11286 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |
| 846 | 11286 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 2 |
| 11560 | 11260 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 1 |
| 11560 | 11260 | YN - YN | - | 1,556 | - | 1,556 | 2 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 1 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 2 |
| 11561 | 11261 | YN - YN | - | 1,556 | 0 | 1,556 | 3 |
| 11582 | 11282 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 1 |
| 11582 | 11282 | YN - YN | - | 2,85 | - | 2,85 | 2 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 1 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 2 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 3 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 4 |
| 11594 | 11394 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 5 |
| 11612 | 18612 | YN - YN | - | 1,4 | - | 1,4 | 1 |
| 59412 | 59499 | YN - YN | - | 1,866 | - | 1,866 | 1 |
| 587 | 387 | YN - YN | - | 4 | - | 4 | 1 |
| 587 | 387 | YN - YN | - | 4 | - | 4 | 2 |

Tabela 19 – Dados das unidades geradoras futuras simulados na configuração curto-máximo do SIN: Ano 2025.

| Nome | Tipo | Barra Circunv. | Nome Barra | Tensão [kV] | X_0 [%] | R_1 [%] | R_0 [%] |
|--------------|------|----------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| PROSP2UTE013 | UTE | 110 | PROSPE-BA230 | 13.8 | 48.174 | - | - |
| PROSP1UTE013 | UTE | 110 | PROSPE-BA230 | 13.8 | 64.233 | - | - |
| PROSP3UTE013 | UTE | 110 | PROSPE-BA230 | 13.8 | 36 | - | - |
| PAF2A3UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 31.92 | - | - |
| PAF2B2UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2B3UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2B1UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2A1UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| PAF2A2UHE013 | UHE | 200 | PAF3-A-BA230 | 13.8 | 24.01 | - | - |
| AGROV1UTE013 | UTE | 202 | JUAZE2-BA230 | 13.8 | 360 | - | - |
| AGROV2UTE013 | UTE | 202 | JUAZE2-BA230 | 13.8 | 288 | - | - |

Continua

| | | | | | | | |
|--------------|-----|-------|--------------|------|--------|--------|--------|
| ITAPE1UHE013 | UHE | 263 | ITAPEB-BA230 | 13.8 | 4.4667 | - | - |
| CANDENPCH013 | PCH | 264 | S.A.JE-BA230 | 13.8 | 147.54 | - | - |
| JUL12VPCH013 | PCH | 264 | S.A.JE-BA230 | 13.8 | 1674.4 | - | - |
| VERACEUTE013 | UTE | 267 | VERACE-BA230 | 13.8 | 13 | 0.06 | 0.06 |
| COLIN2PCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 102.27 | - | - |
| COLIN1PCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 147.54 | - | - |
| CDLIXAPCH013 | PCH | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 109.75 | - | - |
| SUZMUCUTE138 | UTE | 269 | EUNAPO-BA230 | 13.8 | 15.652 | - | - |
| CANARIUTE013 | UTE | 272 | CATU—BA230 | 13.8 | 2769.2 | - | - |
| FUNIL1UHE013 | UHE | 276 | FUNIL—BA230 | 13.8 | 56 | - | - |
| PEDRA-PCH013 | PCH | 276 | FUNIL—BA230 | 13.8 | 81.008 | - | - |
| FUNIL-PCH013 | PCH | 276 | FUNIL—BA230 | 13.8 | 54.005 | - | - |
| GLOB1-UTE013 | UTE | 280 | JACARA-BA230 | 13.8 | 12.096 | - | - |
| GLOB2-UTE013 | UTE | 280 | JACARA-BA230 | 13.8 | 12.096 | - | - |
| PREGULPCH013 | PCH | 285 | BJLAPA-BA230 | 13.8 | 144 | - | - |
| BURITIPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 1607.1 | - | - |
| PIABANPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 1384.6 | - | - |
| SIRIVEPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 900 | - | - |
| SUCURIPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 537.31 | - | - |
| TAPUIAPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 900 | - | - |
| GALVANUTE013 | UTE | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 288 | - | - |
| DOIDO-PCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 276.92 | - | - |
| AFEMEAPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 180 | - | - |
| SITGRAPCH013 | PCH | 286 | BARREI-BA230 | 13.8 | 65.217 | - | - |
| PAF1-1UHE013 | UHE | 300 | PAF3-B-BA230 | 13.8 | 10.125 | - | - |
| PAF3-2UHE013 | UHE | 300 | PAF3-B-BA230 | 13.8 | 4.39 | - | - |
| CFURTA-BA230 | UTE | 335 | CFURTA-BA230 | 230 | 25.24 | 0.7374 | 0.7374 |
| CFURTAUTE013 | UTE | 335 | CFURTA-BA230 | 13.8 | 5.67 | 0.0258 | 0.0258 |
| PCAVA1UHE013 | UHE | 375 | PCAVAL-BA230 | 13.8 | 12.78 | - | - |
| CAMAPAUTE007 | UTE | 381 | POLO—BA230 | 7 | 20 | - | - |
| CAMAP1UTE007 | UTE | 381 | POLO—BA230 | 7 | 22.857 | - | - |
| MURICYUTE013 | UTE | 381 | POLO—BA230 | 13.8 | 8.97 | - | - |
| PAF4-1UHE013 | UHE | 500 | PAF4—BA500 | 13.8 | 0.8583 | - | - |
| SOBRA1UHE013 | UHE | 506 | SOBRAD-BA500 | 13.8 | 3.94 | - | - |
| SOBRA2UHE013 | UHE | 506 | SOBRAD-BA500 | 13.8 | 3.94 | - | - |
| PECEM2UTE013 | UTE | 55808 | ELEVAD-BA230 | 13.8 | 12.587 | - | - |
| CAMUR2UTE013 | UTE | 55808 | ELEVAD-BA230 | 13.8 | 12.5 | - | - |

Nota: considerou-se $X_0 = X'_d = X''_d$

APÊNDICE C – Considerações a Respeito dos Estudos de Curto-Circuito

Neste apêndice, será apresentada uma breve revisão bibliográfica dos conceitos necessários para a caracterização de curtos-circuitos na rede. Inicialmente, pretende-se analisar os principais fatores responsáveis pela ocorrência de faltas no **SEP**, a seguir, apresenta-se uma descrição a respeito do cálculo das correntes de curto nas faltas equilibradas trifásicas (simétricas) e assimétricas (desequilibradas) desconsiderando-se a impedância de falta, ou seja, de natureza sólida (ou franca) e considerando a impedância de falta (não-sólida ou não-franca). Por fim, será apresentado o ferramental matemático utilizado no cálculo das tensões remanescentes nas barras, após a ocorrência do defeito (pós-falta). Estas considerações são necessárias, uma vez que o enfoque deste trabalho concentra-se predominantemente na caracterização dos afundamentos de tensão cuja origem é a ocorrência de curtos-circuitos.

C.1 Curtos-Circuitos

Define-se curto-circuito como o fenômeno ou conjunto de fenômenos que ocorrem quando dois ou mais pontos de um circuito, que estão sob diferentes níveis de potencial, são ligados através de uma impedância desprezível, seja de maneira intencional ou acidental (**NBR-5460, 1992**). É um dos piores tipos de contingências que atingem o **SEP**, podendo ser metálico, quando ocorre um curto franco, ou por arco elétrico, que representa a situação mais comum. Há ainda possibilidades intermediárias caracterizadas, por exemplo, quando galhos de árvores ou outros objetos caem sobre as linhas.

Um curto-circuito é dito permanente quando irreversível, necessitando desligamento do sistema elétrico (intervenção humana) para cessar a falta e reestabelecer o sistema, já os curtos-circuitos temporários (ou transitórios) representam menos problemas sendo geralmente ocasionados por fatores ambientais reversíveis espontaneamente, ou seja, o sistema atua na intervenção do curto e se reestabelece automaticamente, por meio de religadores. Conforme **Kindermann (1997)** os curtos temporários representam 96% das ocorrências, ao passo que os permanentes apenas 4% das faltas registradas.

Um curto-circuito ocorre quando há uma falha na isolação do sistema resultando em um caminho de baixa impedância entre fases ou entre fases e a terra. Tal efeito causa altíssimas correntes (na ordem de dez vezes a nominal) em um curto instante de tempo, requerendo uma rápida atuação do sistema de proteção para prevenir danos aos

equipamentos (GHOSH, 2011).

As principais causas relacionadas ao surgimento de faltas estão relacionadas a (KINDERMANN, 1997):

- Problemas de isolamento, devido a isoladores de má qualidade, envelhecidos ou contaminados com sujeira ou mesmo à escolha inadequada da isolamento dos equipamentos;
- Problemas mecânicos: oriundos da natureza e que provocam ação mecânica no sistema elétrico, por exemplo, ação do vento, tempestade, neve e árvores;
- Problemas elétricos: intrínsecos da natureza ou devidos à operação do sistema: descargas atmosféricas, sobretensão (ruptura dos isoladores), transientes de chaveamento, sobrecorrentes, etc.

No ponto de ocorrência do defeito, sempre é possível obter o circuito equivalente de Thévenin para cada modelo de sequência (positiva, negativa e zero). O conhecimento da corrente de curto-circuito atende a diversos aspectos importantes, dentre os quais destaca-se (KINDERMANN, 1997):

- Conhecer a dimensão do seu valor;
- Dimensionamento da linha de transmissão em relação ao seu limite suportável de elevação da temperatura devido ao curto-circuito;
- Dimensionamento do sistema de proteção quanto à seção dos contatos do disjuntor e capacidade disruptiva da câmara de extinção do arco-elétrico do disjuntor, antes do curto;
- Dimensionamento do Transformador de Corrente (TC) quanto ao nível de saturação de sua curva de magnetização definido pela sua classe de exatidão;
- Auxiliar nos estudos de coordenação de relés (ou religadores);
- Análise das sobretensões na frequência (e conseqüentemente na tensão) industrial devido ao curto-circuito;
- Conhecimento do tempo de atuação do relé e, conseqüentemente, do tempo de eliminação do defeito para auxiliar nas análises das perturbações devido às harmônicas e da estabilidade dinâmica do sistema elétrico;
- Outros.

Nas próximas seções, serão apresentadas as principais equações necessárias para obtenção das correntes e tensões de sequência e fase dos diferentes tipos de falta.

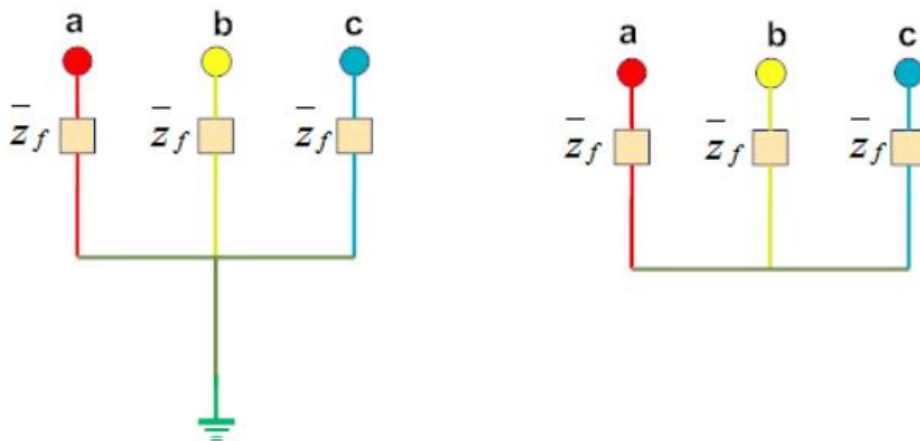
C.2 Faltas Simétricas Trifásicas

As faltas simétricas (ou balanceadas) são aquelas nas quais o sistema permanece equilibrado (ou simétrico) após a ocorrência da falta, ou seja, as tensões e correntes das linhas continuam deslocadas por ângulo de 120° .

Uma vez que as três fases são igualmente afetadas apenas as faltas trifásicas são simétricas; estas são caracterizadas pela aplicação simultânea de três impedâncias de falta Z_f às três fases e podem ser de dois tipos: trifásicas e trifásicas para terra, conforme exibido na Figura 84 (GHOSH, 2011). O comportamento da falta FFF e FFF à terra é equivalente devido a natureza equilibrada.

Apesar de ser o tipo de falta que ocorre com menos frequência (aproximadamente 5% das ocorrências), é responsável pelos maiores danos ao sistema. Uma vez que a rede é equilibrada, analisa-se apenas uma das fases, sendo que as outras terão correntes idênticas em módulo, mudando apenas pelo ângulo de 120° (SAADAT, 2002).

Figura 84 – Curto-Circuito Trifásico (a) e Curto-Circuito Trifásico-Terra (b).

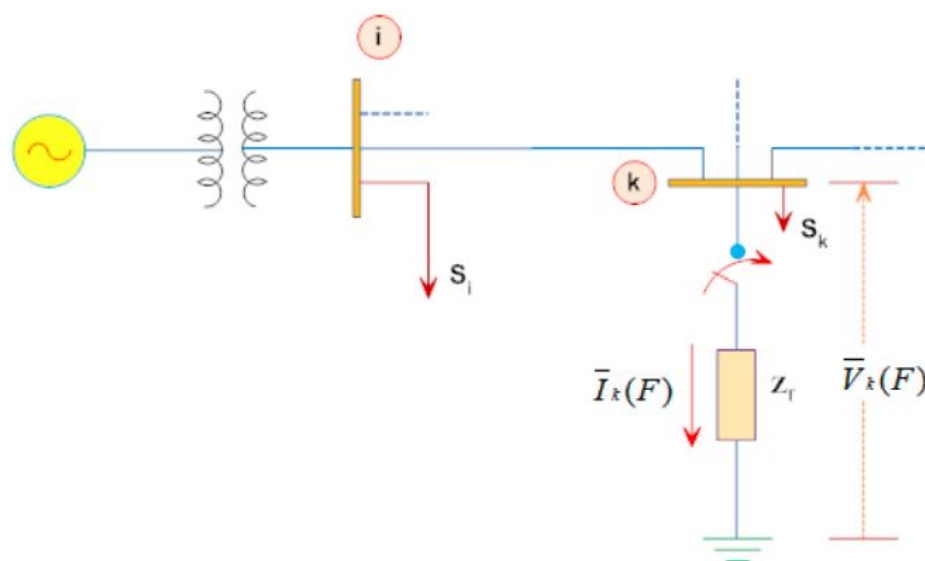


Fonte: (GHOSH, 2011)

C.2.1 Cálculo da Corrente de Falta e das Tensões Pós-Falta

Tomando-se por exemplo uma falta trifásica na barra k^{th} do circuito da Figura 85, cuja impedância de falta é dada por \bar{Z}_f , através de algoritmos de simulação do fluxo de potência é possível obter as condições das tensões de pré-falta nas barras. Considerando-se $[\bar{V}_{bar}^0] = [\bar{V}_1^0 \dots \bar{V}_k^0 \dots \bar{V}_n^0]^T$ p.u o vetor formado pelas tensões de pré-falta das n barras do sistema, após a ocorrência da falta as magnitudes das tensões de todas as barras irão sofrer uma variação devido ao fluxo de corrente pós-falta nas linhas de transmissão, dada por $[\Delta \bar{V}_{bar}]$.

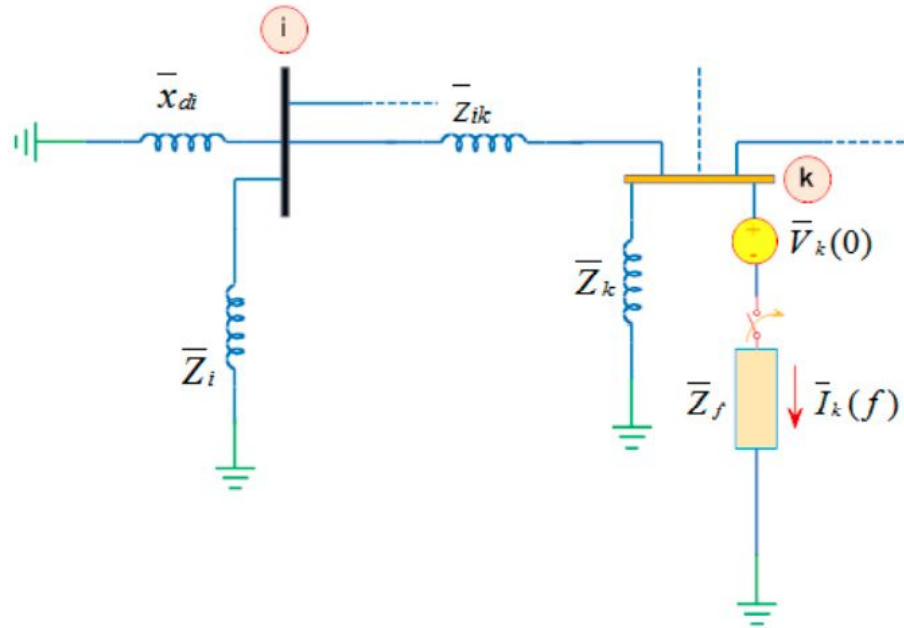
Figura 85 – Representação de um sistema de potência formado n-barras para uma falta na barra k.



Fonte: (GHOSH, 2011)

Essa mudança pode ser calculada pela aplicação da tensão de pré-falta na barra k e curto-circuitando-se todas as outras barras conforme mostrado na Figura 86, onde:

- \vec{Z}_i e \vec{Z}_k são as impedâncias equivalentes das barras i e k respectivamente;
- \vec{Z}_{ik} a impedância de linha formada entre as barras i e k;
- x_{di} é a reatância própria do gerador;
- \vec{Z}_f é a impedância de falta;
- $\vec{I}_k(F)$ a corrente de falta e
- $\vec{V}_k(0)$ a tensão de pré-falta da barra k.

Figura 86 – Representação de rede para cálculo de $[\Delta\vec{V}_{bar}]$.


Fonte: (GHOSH, 2011)

Pelo Teorema da Superposição, as magnitudes das tensões remanescentes (pós-falta) nas barras $[\vec{V}_{bar}(F)]$ é dada pela Equação C.1:

$$[\vec{V}_{bar}(F)] = [\vec{V}_{bar}(0)] + [\Delta\vec{V}_{bar}] \quad (C.1)$$

Onde:

- $[\vec{V}_{bar}(F)] = [\vec{V}_1(F) \dots \vec{V}_i(F) \dots \vec{V}_n(F)]^T$ é o vetor das tensões de pós-falta;
- $[\vec{V}_{bar}(0)] = [\vec{V}_1(0) \dots \vec{V}_k(0) \dots \vec{V}_n(0)]^T$ é o vetor formado pelas tensões de pré-falta;
- $[\Delta\vec{V}_{bar}] = [\Delta\vec{V}_1 \dots \Delta\vec{V}_k \dots \Delta\vec{V}_n]^T$

A partir da matriz admitância de barra $[\vec{Y}_{bar}]$, é possível calcular a corrente injetada nas barras $[\vec{I}_{bar}]$, conforme expresso na Equação C.2, onde $[\vec{V}_{bar}]$ é o vetor das tensões das barras.

$$[\vec{I}_{bar}] = [\vec{Y}_{bar}] \cdot [\vec{V}_{bar}] \quad (C.2)$$

Fazendo-se todas as correntes das barras, exceto a da barra k, iguais a zero, a equação nodal para a rede da Figura 86 é dada pela Equação C.3, onde o sinal negativo indica o sentido da corrente $\vec{I}_k(F)$ ("saindo da barra"):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\vec{I}_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Y}_{11} & \dots & \vec{Y}_{1k} & \dots & \vec{Y}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{Y}_{k1} & \dots & \vec{Y}_{kk} & \dots & \vec{Y}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{Y}_{n1} & \dots & \vec{Y}_{nk} & \dots & \vec{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vec{V} \\ \vdots \\ \Delta \vec{V}_k \\ \vdots \\ \Delta \vec{V}_n \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

Reescrevendo-se a Equação C.3 tem-se (C.4):

$$[\vec{I}_{bar}(F)] = [\vec{Y}_{bar}][\Delta \vec{V}_{bar}] \quad (\text{C.4})$$

Consequentemente $[\Delta \vec{V}_{bar}]$ pode ser dado pela Equação C.5:

$$[\Delta \vec{V}_{bar}] = [\vec{Y}_{bar}]^{-1}[\vec{I}_{bar}(F)] = [\vec{Z}_{bar}][\vec{I}_{bar}(F)] \quad (\text{C.5})$$

Onde a matriz $[\vec{Z}_{bar}]$ é obtida fazendo-se a inversa da matriz admitância de barra ($[\vec{Y}_{bar}]^{-1}$).

Substituindo-se a Equação C.5 na Equação C.1, tem-se (Equação C.6):

$$[\vec{V}_{bar}(F)] = [\vec{V}_{bar}(0)] + [\vec{Z}_{bar}][\vec{I}_{bar}(F)] \quad (\text{C.6})$$

Que na forma expandida é dada pela Equação C.7:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_1(F) \\ \vdots \\ \vec{V}_k(F) \\ \vdots \\ \vec{V}_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_1(0) \\ \vdots \\ \vec{V}_k(0) \\ \vdots \\ \vec{V}_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{Z}_{11} & \dots & \vec{Z}_{1k} & \dots & \vec{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{Z}_{k1} & \dots & \vec{Z}_{kk} & \dots & \vec{Z}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vec{Z}_{n1} & \dots & \vec{Z}_{nk} & \dots & \vec{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\vec{I}_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

Desenvolvendo-se a equação C.7 percebe-se facilmente que a tensão de uma barra k, pode ser calculada facilmente, conhecendo-se os elementos da diagonal principal da matriz impedância de barras, através da Equação C.8:

$$\vec{V}_k(F) = \vec{V}_k(0) - \vec{Z}_{kk}\vec{I}_k(F) \quad (\text{C.8})$$

Da Figura 85 nota-se que:

$$\vec{V}_k(F) = \vec{Z}_f\vec{I}_k(F) \quad (\text{C.9})$$

Finalmente, igualando-se as Equações C.8 e C.9 é possível obter a corrente de falta para uma falta trifásica, em uma barra k, com impedância de falta \vec{Z}_f diferente de zero, pela Equação C.10 e para uma falta sólida (franca) pela Equação C.11

$$\vec{I}_{kf} = \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk} + \vec{Z}_f} \quad (\text{C.10})$$

$$\vec{I}_{kf} = \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk}} \quad (\text{C.11})$$

Onde \vec{Z}_{kk} é a impedância de Thévenin ou impedância de circuito aberto vista pela barra da falta k e \vec{V}_k^0 é a tensão de pré-falta na barra k.

Da Equação C.7 a tensão pós-falta para as demais barras (i) do sistema (diferentes da barra k) dependem dos elementos adjacentes da matriz \vec{Z}_{bar} , conforme pode ser visto pela Equação C.12:

$$\vec{V}_i(F) = \vec{V}_i(0) - \vec{Z}_{ik} \vec{I}_k(F); \forall i = 1, 2, \dots, n, i \neq k \quad (\text{C.12})$$

Substituindo a Equação C.10 na Equação C.12, $\vec{V}_i(F)$ pode ser expressa por (C.13):

$$\vec{V}_i(F) = \vec{V}_i(0) - \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk} + \vec{Z}_f} \vec{Z}_{ik} \vec{V}_k(0) \quad (\text{C.13})$$

Conseqüentemente, a corrente de contribuição de falta fluindo de uma barra i para uma barra j é dada pela Equação C.14:

$$\vec{I}_{ij}(F) = \frac{\vec{V}_i(F) - \vec{V}_j(F)}{\vec{z}_{ij}} \quad (\text{C.14})$$

Onde \vec{z}_{ij} é a impedância da linha de transmissão que conecta as barras i e j.

C.3 Faltas Assimétricas

O curto-circuito assimétrico é aquele onde as tensões e correntes de pós-falta se encontram desequilibradas; envolve pelo menos uma ou duas fases, podendo ser FT, FF ou FFT. Diferente da falta simétrica onde apenas o circuito equivalente de sequência positiva é considerado, no curto assimétrico utiliza-se dos três diagramas de redes de sequência, onde a sequência positiva irá representar a influência da força eletromotriz das máquinas, a sequência negativa os desequilíbrios da rede e por fim a sequência zero indicará a influência do aterramento.

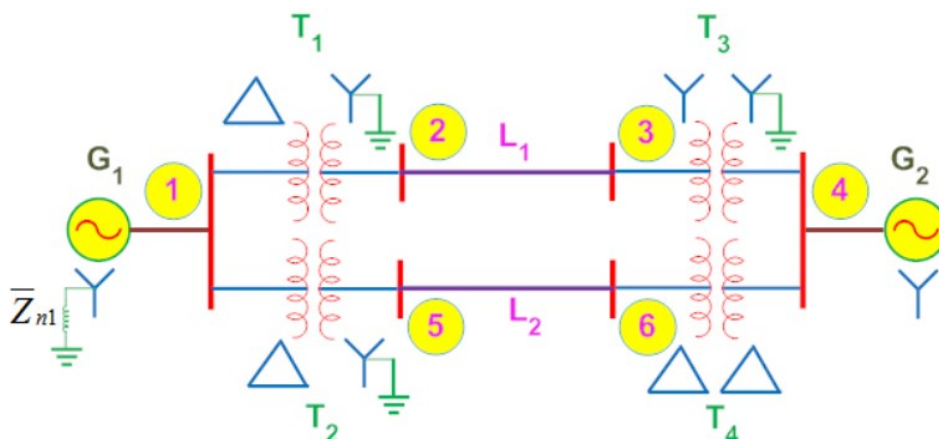
As faltas assimétricas correspondem à maior parte das ocorrências em SEP e, assim como no curto trifásico, o caminho da corrente de falta de linha a linha ou linha a terra poderá ou não conter impedância. Além disso, essas faltas podem ocorrer não somente através de impedâncias mas por condutores abertos, um ou dois condutores abertos resultarão em faltas assimétricas seja por um rompimento de um ou dos dois condutores ou pela ação de fusíveis ou outros dispositivos que podem não abrir as três fases concomitantemente (GRAINGER; STEVENSON, 1994).

As análises das condições de pós-falta em uma falta assimétrica é feita utilizando-se do Método das Componentes Simétricas e das condições de contorno do Problema, dadas pelo Teorema de Fortescue (FORTESCUE, 1918). Resumidamente, calcula-se as três redes de sequência no ponto de ocorrência do defeito, uma vez que estas redes são independentes as matrizes $[\vec{Z}_{bar}]$ de cada uma destas redes de sequência, representadas por $[\vec{Z}_{bar}^0]$, $[\vec{Z}_{bar}^1]$ e $[\vec{Z}_{bar}^2]$, respectivamente para as sequências zero, positiva e negativa, podem ser encontradas separadamente.

Os elementos da diagonal principal das três matrizes Z_{bar} de sequência representam, portanto, as impedâncias equivalentes de Thévenin das redes de sequência vistas por cada um dos barramentos do sistema, ou seja, para uma falta na barra k, tem-se que os elementos Z_{kk}^0 , Z_{kk}^1 e Z_{kk}^2 das matrizes de sequência correspondem respectivamente às impedâncias equivalentes de Thévenin, vistas no ponto de falta, para cada um dos diagramas de sequência.

De maneira ilustrativa, apresenta-se o diagrama do equivalente monofásico de um SEP na Figura 87.

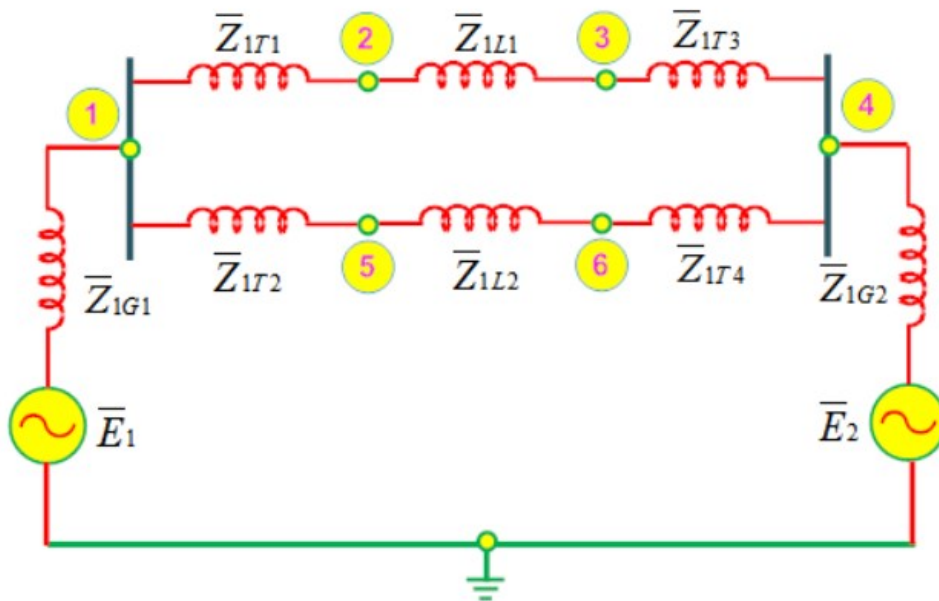
Figura 87 – Exemplo Ilustrativo de um Equivalente Monofásico de um SEP.



Fonte: (GHOSH, 2011)

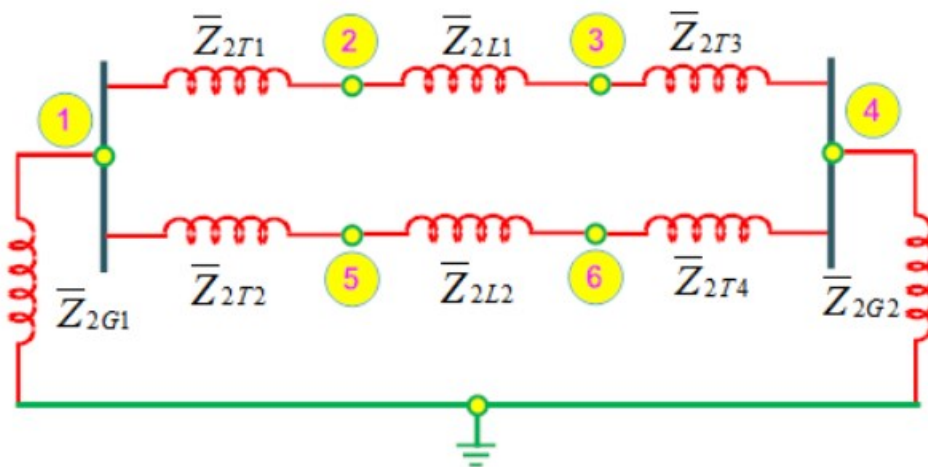
Neste caso, os equivalentes de rede das sequências positiva, negativa e zero podem ser encontrados a partir das representações apresentadas nas Figuras 88, 89 e 90, respectivamente. Os elementos do sistema devem ser representados por sua impedância equivalente de sequência respectiva em cada um dos diagramas.

Figura 88 – Equivalente de Rede de Sequência Positiva.



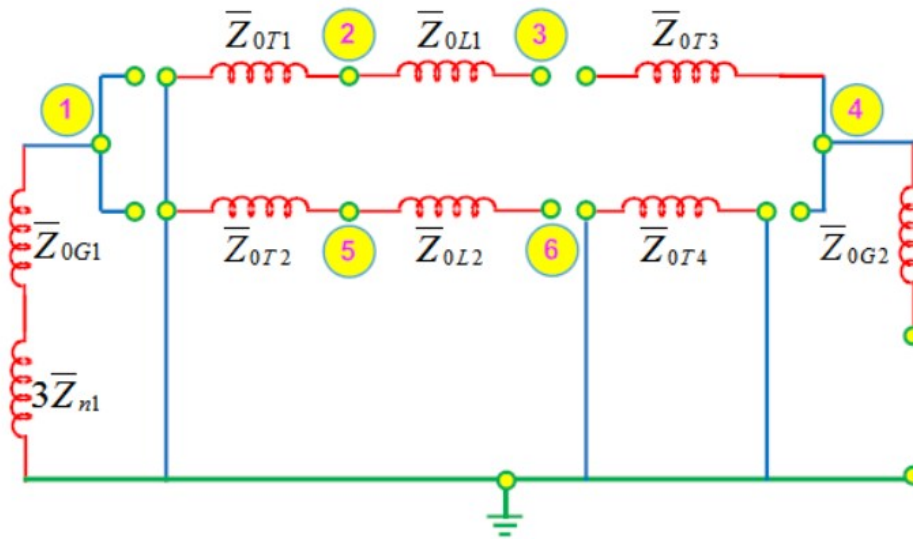
Fonte: (GHOSH, 2011)

Figura 89 – Equivalente de Rede de Sequência Negativa.



Fonte: (GHOSH, 2011)

Figura 90 – Equivalente de Rede de Sequência Zero.



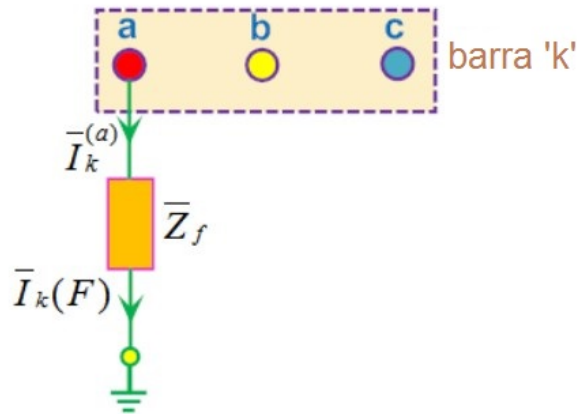
Fonte: (GHOSH, 2011)

Observa-se das Figuras 88 e 89 uma similaridade dos diagramas de sequência positiva e negativa, exceto pelo fato de o primeiro apresentar a influência das força eletromotrizes. Para a rede equivalente de sequência zero, as conexões do neutro do gerador e as conexões dos enrolamentos do transformador devem ser consideradas conforme exibido na Figura 90. A partir destas representações, é possível obter, em seguida, uma representação para cada uma das matrizes $[\vec{Z}_{bar}]$ de sequência ($[\vec{Z}_{bar}^0]$, $[\vec{Z}_{bar}^1]$ e $[\vec{Z}_{bar}^2]$) que serão utilizadas nas análises simplificadas para cada um dos tipos de faltas assimétricas das próximas seções.

C.3.1 Falta Fase-Terra - Cálculo da Corrente de Falta

Na Figura 91 é apresentada uma falta FT em uma fase 'a' da barra 'k', com impedância de falta Z_f . O curto-circuito FT corresponde às maiores incidências em sistemas elétricos, o que compensa a utilização de religador monopolar na fase em curto-circuito de um SEP de grande porte, tornando o sistema momentaneamente desequilibrado, durante o tempo morto do religador, ou religador trifásico para sistemas de pequeno porte (KINDERMANN, 1997).

Figura 91 – Curto-Circuito Fase-Terra.



Fonte: Adaptado de (GHOSH, 2011)

Das análises das Componentes Simétricas, é possível concluir que esta falta pode ser representada pelas três redes de sequência conectadas em série. Desta forma, os cálculos das componentes de sequência da corrente de falta pode ser obtido a partir da equação:

$$\vec{I}_k^0(F) = \vec{I}_k^1(F) = \vec{I}_k^2(F) = \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk}^1 + \vec{Z}_{kk}^2 + \vec{Z}_{kk}^0 + 3\vec{Z}_f} \quad (\text{C.15})$$

Onde:

- \vec{Z}_{kk}^0 , \vec{Z}_{kk}^1 e \vec{Z}_{kk}^2 são os elementos da diagonal principal das matrizes $[\vec{Z}_{bar}^0]$, $[\vec{Z}_{bar}^1]$ e $[\vec{Z}_{bar}^2]$, respectivamente;
- Z_f é a impedância de falta;
- $\vec{V}_k(0)$ é a tensão de pré-falta na barra k.

Por fim, da análise em termos das Componentes Simétricas, pode-se obter as correntes de falta das fases, a partir das componentes de sequência, utilizando-se a transformação dada na Equação C.16:

$$[\vec{I}_k^{abc}(F)] = [\vec{A}][\vec{I}^{(012)}(F)] \quad (\text{C.16})$$

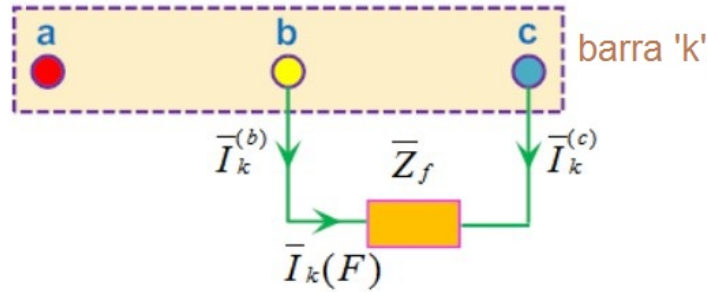
Onde $[\vec{A}]$ é a matriz de transformação das componentes simétricas, dada pela Equação C.17, com $a = 1/\sqrt{3}$.

$$[\vec{A}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.17})$$

C.3.2 Falta Fase-Fase - Cálculo da Corrente de Falta

Uma falta **FF** entre as fases 'b' e 'c' de uma barra 'k' pode ser modelada conforme a Figura 92.

Figura 92 – Curto-Circuito Fase-Fase.



Fonte: Adaptado de (GHOSH, 2011)

Da análise das Componentes Simétricas e condições de contorno do problema, é observado que nesta falta os diagramas das componentes de sequência positiva e negativa são conectados em paralelo, entre si. Logo, as expressões para o cálculo das componentes de sequência da corrente falta são dadas pelas Equações C.18 e C.19.

$$\vec{I}_k^{(0)}(F) = 0 \quad (\text{C.18})$$

$$\vec{I}_k^{(1)}(F) = \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk}^{(1)} + \vec{Z}_{kk}^{(2)} + \vec{Z}_f} = -\vec{I}_k^{(2)}(F) \quad (\text{C.19})$$

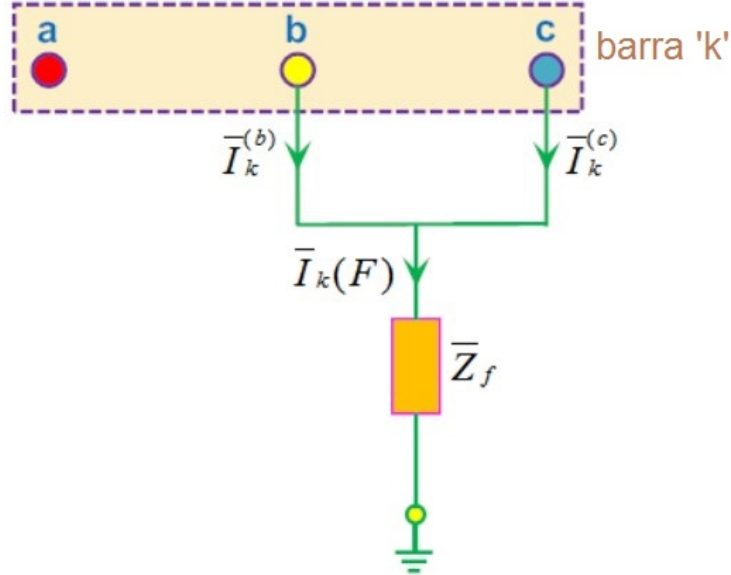
De maneira similar ao caso anterior, as correntes de falta das fases, a partir das componentes de sequência é dada a partir da matriz de transformação das componentes simétricas, pela Equação C.16, que resumidamente pode ser reescrita na Equação C.20:

$$\vec{I}_k(F) = \vec{I}_k^{(b)}(F) = -\vec{I}_k^{(c)}(F) \quad (\text{C.20})$$

C.3.3 Falta Fase-Fase-Terra - Cálculo da Corrente de Falta

Desta vez, considera-se a falta entre duas fases ('b' e 'c') da barra 'k' e à terra, que pode ser representada conforme a Figura 93.

Figura 93 – Curto-Circuito Fase-Fase-Terra.



Fonte: Adaptado (GHOSH, 2011)

Considerando-se as mesmas análises por Componentes Simétricas e condições de contorno, dos casos anteriores, desta vez além dos diagramas de seqüência positiva e negativa, o de seqüência zero também será interconectado em paralelo, um vez que tem-se a influência do terra nesta falta. Logo, as componentes de seqüência da corrente de falta podem ser calculadas conforme as Equações C.21 a C.23.

$$\vec{I}_k^{(1)}(F) = \frac{\vec{V}_k(0)}{\vec{Z}_{kk}^{(1)} + \frac{\vec{Z}_{kk}^{(2)}(\vec{Z}_{kk}^{(0)} + 3\vec{Z}_f)}{\vec{Z}_{kk}^{(2)} + \vec{Z}_{kk}^{(0)} + 3\vec{Z}_f}} \quad (C.21)$$

$$\vec{I}_k^{(2)}(F) = -\frac{\vec{V}_k(0) - \vec{Z}_{kk}^{(1)}\vec{I}_k^{(1)}(F)}{\vec{Z}_{kk}^{(2)}} \quad (C.22)$$

$$\vec{I}_k^{(0)}(F) = -\frac{\vec{V}_k(0) - \vec{Z}_{kk}^{(1)}\vec{I}_k^{(1)}(F)}{\vec{Z}_{kk}^{(0)} + 3\vec{Z}_f} \quad (C.23)$$

As componentes de fase da corrente de falta podem ser obtidas da Equação C.16, o que resulta na Equação C.24:

$$\vec{I}_k(F) = \vec{I}_k^{(b)}(F) + \vec{I}_k^{(c)}(F) \quad (\text{C.24})$$

C.3.4 Cálculo das Tensões Pós-Falta e Correntes nas Linhas Durante a Falta

Por fim, as componentes de sequência das tensões remanescentes em qualquer barra 'i', para um curto na barra 'k' podem ser calculadas a partir das correntes de falta e elementos das matrizes $[\vec{Z}_{bar}]$ conforme resultados das Equações C.25 a C.27:

$$\vec{V}_i^{(0)}(F) = -\vec{Z}_{ik}^{(0)} \vec{I}_k^{(0)}(F) \quad (\text{C.25})$$

$$\vec{V}_i^{(1)}(F) = \vec{V}_i^{(1)}(0) - \vec{Z}_{ik}^{(0)} \vec{I}_k^{(0)}(F) \quad (\text{C.26})$$

$$\vec{V}_i^{(2)}(F) = -\vec{Z}_{ik}^{(2)} \vec{I}_k^{(2)}(F) \quad (\text{C.27})$$

A partir das componentes de sequência, pode-se facilmente calcular as componentes de fase por meio da Equação C.28 do Teorema de Fortescue. Cujas matrizes $[\vec{A}]$ já foi apresentada na Equação C.17:

$$\vec{V}^{(abc)}(F) = [\vec{A}][\vec{V}_i^{(012)}(F)] \quad (\text{C.28})$$

Pode-se ainda calcular as componentes simétricas das correntes de contribuição em uma linha de transmissão que liga uma barra 'i' à uma barra 'j', conforme apresentado nas Equações C.29 a C.31:

$$\vec{I}_{ij}^{(0)}(F) = \frac{\vec{V}_i^{(0)}(F) - \vec{V}_j^{(0)}(F)}{\vec{z}_{ij}^{(0)}} \quad (\text{C.29})$$

$$\vec{I}_{ij}^{(1)}(F) = \frac{\vec{V}_i^{(1)}(F) - \vec{V}_j^{(1)}(F)}{\vec{z}_{ij}^{(1)}} \quad (\text{C.30})$$

$$\vec{I}_{ij}^{(2)}(F) = \frac{\vec{V}_i^{(2)}(F) - \vec{V}_j^{(2)}(F)}{\vec{z}_{ij}^{(2)}} \quad (\text{C.31})$$

Onde $\vec{z}_{ij}^{(0)}$, $\vec{z}_{ij}^{(1)}$ e $\vec{z}_{ij}^{(2)}$ são as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, da linha entre as barras 'i' e 'j'. Da mesma forma, as correntes de fase, podem ser facilmente obtidas pela Equação C.32:

$$\vec{I}_{ij}^{(abc)}(F) = [\vec{A}][\vec{I}_{ij}^{(012)}(F)] \quad (\text{C.32})$$

APÊNDICE D – Nota Informativa -Casos de Curto-Circuito

Neste apêndice será disponibilizada uma nota explicativa a respeito das simulações de curto disponibilizadas na [BDCC](#) da [EPE](#) ([EPE, 2022](#)).

D.1 Descrição

A [BDCC](#) da [EPE](#) é formulada a partir dos resultados de estudos de expansão da transmissão, realizados na Superintendência de Transmissão de Energia (STE), fazendo uso complementar de informações de topologia e equipamentos constantes na base de dados do [ONS](#).

D.2 Organização da Base de Dados

A [BDCC](#) é constituída de 24 arquivos no formato *.ANA* do programa [ANAFAS](#), desenvolvido pelo [CEPEL](#), sendo 12 referentes às análises de curto-circuito máximo e 12 às de curto-circuito mínimo.

D.2.1 Casos de curto-circuito máximo

- Os elementos em derivação presentes nos casos (capacitores e reatores), são aqueles com estado ‘em operação’ nos casos bases de Fluxo de Potência do PDE, no Cenário de Carga Pesada - Norte Úmido dos anos correspondentes;
- As máquinas síncronas presentes em cada caso são aquelas indicadas na Planilha de Despacho da EPE (ferramenta utilizada na definição do despacho de geração dos casos do PDE). Nesses casos, todas as máquinas com geração máxima não nula são consideradas operando em sua plena capacidade. Essas máquinas são representadas por fontes de tensão atrás de suas respectivas impedâncias subtransitórias ($R_a + jX''_d$).
- As usinas eólicas que fazem uso de geradores de indução duplamente alimentados são representadas de maneira semelhante às demais máquinas síncronas, já as que utilizam a tecnologia *full-converter* e as usinas fotovoltaicas são representados na rede como fontes de corrente, com limites de corrente máxima e tensão de operação obtidos pelas especificações do conversor utilizado.

D.2.2 Casos de curto-circuito mínimo

- A topologia do sistema elétrico é idêntica àquela dos casos de curto-circuito máximo, no que se refere a barramentos, linhas de transmissão e transformadores;
- Os elementos em derivação presentes nos casos (capacitores e reatores), são aqueles com estado ‘em operação’ nos casos bases de Fluxo de Potência do PDE, no Cenário de Carga Leve - Norte Úmido dos anos correspondentes;
- A representação da geração é semelhante à do caso de curto-circuito máximo, contudo estão presentes, em cada caso, apenas as usinas que apresentam um limite mínimo de geração não nulo. Considera-se, ainda, o número de máquinas sincronizadas relativo ao seu respectivo despacho mínimo. Os geradores eólicos e fotovoltaicos são desconsiderados nessa análise.

É importante observar que é extremamente improvável a operação de um sistema elétrico com despacho máximo simultâneo de todas as usinas. Também é extremamente improvável a operação do sistema com todas as usinas em despacho mínimo. No entanto, nas análises de curto-circuito, considera-se que se garantida a operação segura do sistema para as condições de despacho máximo e mínimo, garante-se, também, a adequada operação do sistema em pontos de operação intermediários.

A **BDCC** é compatível com os casos de fluxo de potência do PDE, no que tange à topologia, números e nomes de barras e parâmetros da rede. Muito embora sejam utilizadas informações da base de dados de curto-circuito do ONS para compor a **BDCC** da **EPE**, as bases são diferentes em virtude do horizonte de tempo com que trabalham. Essas diferenças são atribuídas aos fatores abaixo relacionados e comentados.

1. I Diferenças de topologia causadas por fatores diversos como nível de detalhamento na representação de rede e entrada em operação de obras planejadas.
2. II Nos casos da **BDCC** as impedâncias mútuas são representadas apenas parcialmente. Para faltas e eventos desequilibrados algumas diferenças podem ser encontradas nos resultados.

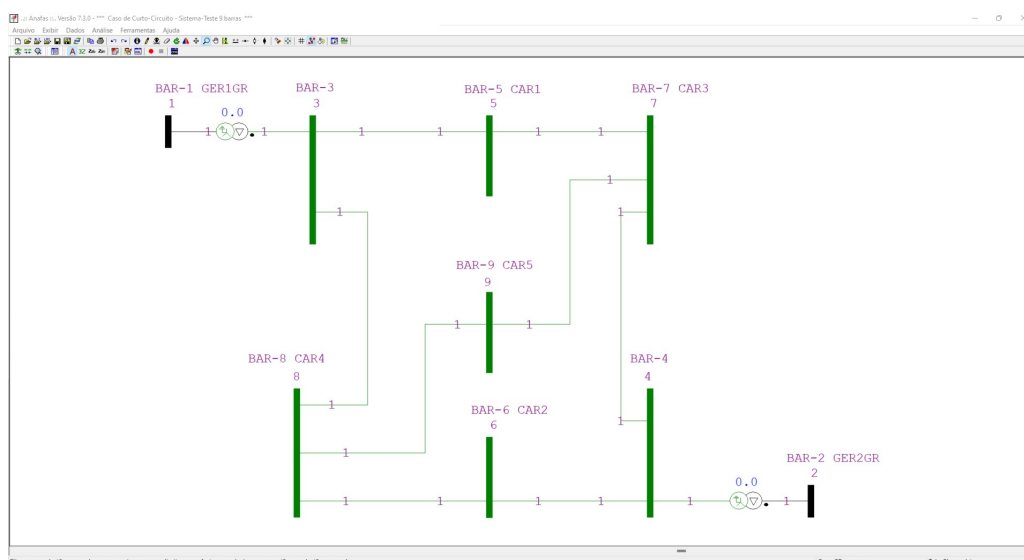
D.3 Forma de utilização

A pasta “Curto-circuito máximo” e “Curto-circuito mínimo” contêm, respectivamente, os arquivos com os dados para o cálculo dos níveis de curto-circuito. Estes arquivos, com extensão *.ANA*, podem ser prontamente carregados no programa ANAFAS para realização das simulações e análises de interesse.

APÊNDICE E – Tutorial - Processamento BATCH no Programa de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS)

O objetivo deste apêndice é o de fazer uma breve introdução teórica ao modo de execução "batch" do programa [ANAFAS](#). O *software* apresenta a possibilidade de execução através de sua interface gráfica interativa (por meio dos menus), ou via "batch". A execução em modo "batch" permite que sejam efetuadas simulações repetitivas de forma rápida e com menor incidência de erros. No modo "batch", o usuário deve fornecer diversos dados através de arquivos com dados que serão processados logo após a sua abertura, sendo este processamento executado sem a intervenção do usuário. A fim de melhor contextualizar a utilidade da execução "batch" serão ilustrados comandos em "batch" aplicados à rede elétrica do sistema-teste com 9 Barras ([SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO](#),) (Disponível em <http://www.sistemas-teste.com.br/>), ilustrado na interface gráfica do [ANAFAS](#), na Figura 94.

Figura 94 – Curto-Circuito Fase-Fase-Terra.



Fonte: Adaptado ([SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO](#),)

A seguir serão discutidos, resumidamente, os principais comandos utilizados nas simulações deste trabalho sendo indispensável a leitura do manual do [ANAFAS](#) para uma análise mais completa.

E.1 Arquivo com sequência de comandos

Este arquivo tem como no nome padrão "ANAFAS.INP" e é formado pelos comandos necessários para que o programa execute as tarefas que o usuário desejar, apresentando ao ANAFAS cada operação que será realizada na sequência e quantidade de vezes que o usuário desejar. A ordem dos códigos de execução não é fixa, no entanto, sugere-se uma ordem a qual será apresentada a seguir, para cada um dos diversos tipos de estudos possíveis, caso o usuário adote uma ordem inválida, será emitida uma mensagem de erro e o processamento será interrompido.

E.2 Estudo individual orientado a ponto de falta

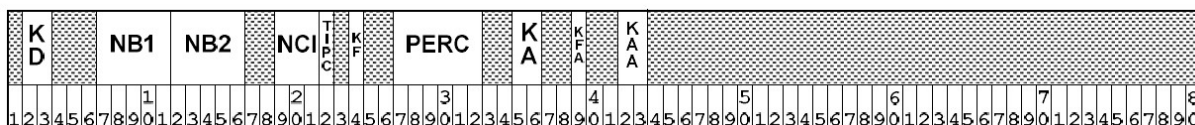
Na Tabela 20 é apresentada uma sugestão de ordem dos códigos de execução para o estudo individual orientado a ponto de falta.

Tabela 20 – Códigos de Execução e significados para o estudo individual orientado a ponto de falta

| Código de Execução | Significado |
|--------------------|--|
| ARQV DADO | Ler dados do sistema. |
| ARQV SAID | Definir o arquivo de saída. |
| DCTE | Especificar as constantes. |
| DDEF | Especificar os defeitos. |
| EIPF | Executar estudo individual orientado a ponto de falta. |
| FIM | Finalizar o programa ou a execução do Modo Batch. |

É extremamente importante observar o formato de leitura dos dados do defeito utilizado para os códigos de execução e suas opções que segue rigorosamente a estrutura de colunas ilustrada na Figura 95.

Figura 95 – Formato dos dados do defeito.



Logo, a variável "NB1" por exemplo que representa a barra "DE" nos casos de curtos-circuitos, deverá ocupar rigorosamente as colunas 7-11, devendo terminar, portanto, na coluna 11. Assim como a variável "PERC", que representa o percentual de localização do defeito intermediário, fornecido em % deverá terminar na barra 32. Os campos de preenchimento dos dados devem sempre estar alinhados à direita. Uma breve descrição do significado de cada uma das variáveis pode ser visualizada na Tabela 21

Tabela 21 – Códigos de Execução e significados para o estudo individual orientado a ponto de falta

| Variável | Colunas | Descrição |
|----------|---------|---|
| KD | 2-3 | Identificação do tipo de defeito principal: Se KD = 1 abertura simples monofásica; Se KD = 2 abertura monofásica com aterramento; Se KD = 3 abertura simples bifásica; Se KD = 4 abertura bifásica com aterramento; Se KD = 5 abertura simples trifásica; Se KD = 6 abertura trifásica com aterramento; Se KD = 7 remoção; Se KD = 9 criação de ponto intermediário em uma linha; Se KD = 10 curto-circuito shunt através de impedâncias; Se KD = 11 curto-circuito shunt fase-terra na fase A; Se KD = 12 curto-circuito shunt fase-terra na fase B; Se KD = 13 curto-circuito shunt fase-terra na fase C; Se KD = 21 curto-circuito shunt bifásico-terra nas fases B e C; Se KD = 22 curto-circuito shunt bifásico-terra nas fases C e A; Se KD = 23 curto-circuito shunt bifásico-terra nas fases A e B; Se KD = 24 curto-circuito shunt bifásico nas fases B e C; Se KD = 25 curto-circuito shunt bifásico nas fases C e A; Se KD = 26 curto-circuito shunt bifásico nas fases A e B; Se KD = 30 curto-circuito shunt trifásico; Se KD = 31 curto-circuito shunt trifásico-terra; Se KD = 40 curto-circuito série através de impedâncias; Se KD = 41 curto-circuito série monofásico (fases A e A); Se KD = 42 curto-circuito série monofásico (fases B e B); Se KD = 43 curto-circuito série monofásico (fases C e C); Se KD = 44 curto-circuito série bifásico (fases B e B, C e C); Se KD = 45 curto-circuito série bifásico (fases C e C, A e A); Se KD = 46 curto-circuito série bifásico (fases A e A, B e B); Se KD = 47 curto-circuito série trifásico (fases A e A, B e B, C e C). |

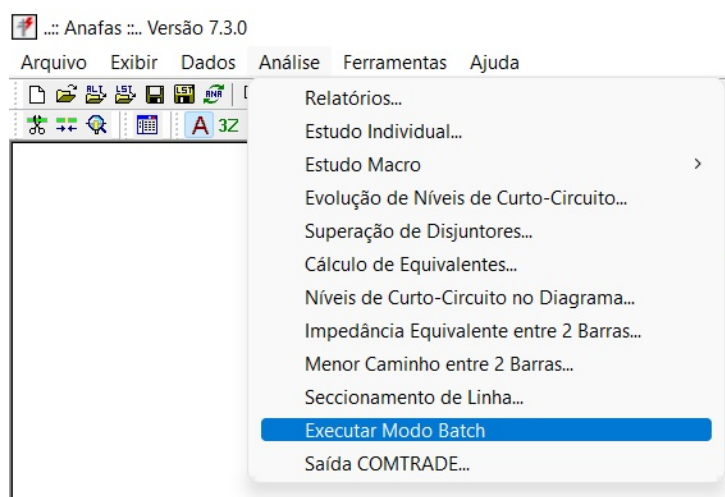
Tabela 22 – Principais parâmetros de controle e descrição utilizados no modo batch.

| Parâmetro | Descrição | Valores possíveis | Default |
|-----------|---|---|---------|
| ANGU | Especificação do formato dos ângulos das grandezas | ‘NORM’ - Os ângulos serão impressos de forma normal; ‘INDU’ - Os ângulos serão impressos de forma indutiva (apenas para as correntes); ‘NANG’ - Os ângulos não serão impressos. | NORM |
| IMPF | Indica se serão ou não impressos blocos referentes a barras fictícias nas saídas em arquivo de estudos individuais e macro orientados a ponto de falta. | ‘SIM’ - Imprime barras fictícias; ‘NAO’ - Não imprime barras fictícias; | SIM |
| NCOL | Número de colunas dos relatórios de saída. | 80 ou 132 | 80 |
| NLIN | Número de linhas por página nos relatórios de saída | Qualquer número entre para 50 e 200 para relatórios com paginação. SPAG sem repetição de cabeçalhos | SPAG |
| TSAI | Especifica o tipo de saída dos resultados. | ‘RELA’ - Resultados serão salvos em formato de relatórios; ‘TABE’ - Resultados serão salvos em formato de tabelas | RELA |
| UCOR | Especifica a unidade das correntes. | ‘P.U.’ - As correntes serão impressas em p.u.; ‘AMPE’ - As correntes serão impressas em Amperes; ‘MVA.’ - As correntes serão impressas em MVA. | MVA. |
| UTEN | Especifica a unidade das tensões. | ‘P.U.’ - As tensões serão impressas em pu; ‘K.V.’ - As tensões serão impressas em kV. | P.U. |

E.2.1 Execução "Batch" dentro do ANAFAS

Há duas formas de executar os comandos em "Batch": a primeira através do próprio menu do programa (Análise -> Executar Modo Batch), que pode ser acessado conforme exibido na Figura 97.

Figura 97 – Acesso à Execução do Batch no ANAFAS.



Neste caso, será aberta uma caixa de texto igual à da Figura 98, onde poderá ser escrito (ou colado) o código com os comandos de execução. Se tudo estiver certo, após a execução será exibida a mensagem de finalização conforme mostrado na Figura 99, sendo os relatórios acessados pela pasta de saída definida no código.

Figura 98 – Janela Execução Batch.

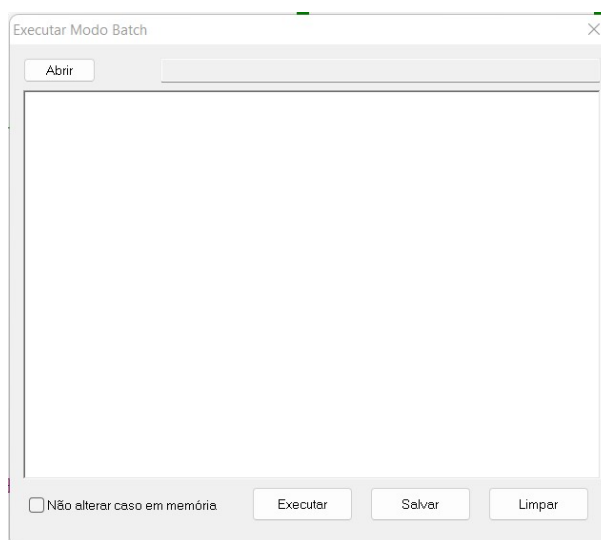
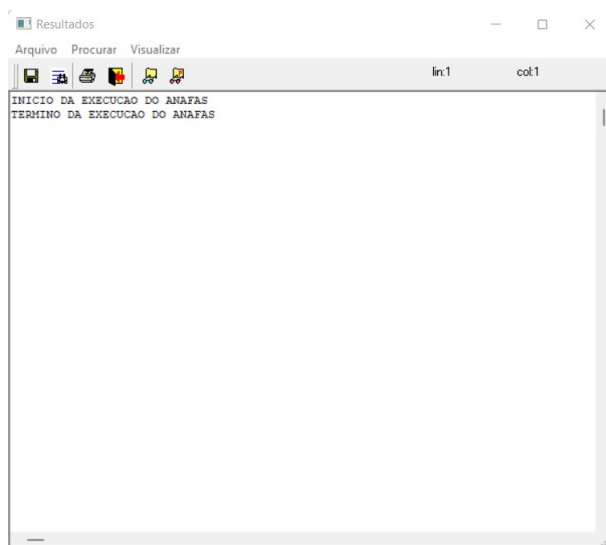


Figura 99 – Janela Resultados.



E.2.2 Execução por meio de arquivo .bat

A segunda maneira de executar o "batch" é "por fora" do software, através de um arquivo de formato ".bat" que pode ser escrito em bloco de notas (.txt). Até a versão 4.3 do [ANAFAS](#), o arquivo de comandos precisava ter o nome "ANAFAS.INP" e estar na pasta onde o programa estivesse instalado ("C:\CEPEL\Anafas\ 4.3", por exemplo), a partir da versão 4.4 do *software* passa a ser possível utilizar o arquivo de comandos em qualquer pasta e com qualquer nome bastando pra isso fornecer o caminho do arquivo na chamada do programa, em um arquivo com a terminação (extensão) ".bat". Um exemplo de arquivo com extensão ".bat" que executa o ANAFAS pelo prompt de comando do *Windows* (cmd) contém a estrutura com o seguinte conteúdo:

```
1 cd "C:\Cepel\Anafas\7.3.0"
2 ANAFAS_DOS.EXE -WIN "C:\BATCH\9barras.INP"
```

Após clicar duas vezes no arquivo ".bat" com conteúdo acima, este irá executar o ANAFAS e carregar o conteúdo presente no arquivo "9barras.INP" que apresenta um conjunto de instruções que pode ter uma ou várias simulações a serem executadas no programa, bastando para isso apenas uma execução. Convém mencionar que é fundamental o arquivo ".INP" estar no mesmo diretório que o [ANAFAS](#) estiver instalado.

Nas próximas seções serão apresentados exemplos práticos ilustrativos aplicados ao Sistema Teste-9 barras da Figura 94. Estes podem ser testados pelas duas formas anteriormente apresentadas.

E.2.3 Simulação de curtos shunt francos

A partir do que foi apresentado até este ponto, serão desenvolvidos alguns exemplos ilustrativos de curtos-circuitos cujos valores de impedância de falta são equivalentes a 0Ω (francos). Convém mencionar, que por ser o enfoque deste trabalho, apenas faltas shunt serão consideradas. No entanto faltas séries podem ser implementadas facilmente a partir da substituição dos valores das variáveis dos parâmetros de interesse. A seguir um exemplo prático com comentários para as faltas shunt francas:

Exemplo 1: Curto-Circuito Shunt Fase-Terra na Fase A no circuito 1 da linha de transmissão 3-5, a 30% da barra 3

O exemplo 1 pode ser implementado no modo batch através do código abaixo:

```

1 arqv dado
2 C:\CEPEL\Anafas\7.3.0\9Barras.ana
3 ddef
4 9      3      5      1      30      11
5 99
6 dcte
7 tsai rela
8 nbac 1
9 ncol 80
10 9999
11 dcte
12 UTEN P.U.
13 UCOR AMPE
14 ANGU INDU
15 IMPF NAO
16 9999
17 arqv said
18 C:\BATCH\RELATORIOS\1.txt
19 EIPF
20 FIM
    
```

Observa-se que o valor de NBAC (1) adotado apenas com intuito de gerar relatórios para as barras circunvizinhas ao ponto do defeito. Após executar dentro do [ANAFAS](#) ou via prompt de comando pela extensão ".bat" o resultado será o relatório abaixo:

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica ANAFAS - Programa de Análise de Falhas Simultâneas Pag. 1

*** Caso de Curto-Circuito - Sistema-Teste 9 barras *** =====

DESCRICA0 DA FALTA COMPOSTA DE 1 DEFEITO

1) Criação de barra fictícia -1 (FIC.INTER.01) a 30% da barra 3 (BAR-3) ligada à barra 5 (BAR-5 CAR1) (circ. 1) , com Curto monofase com p/ terra na fase A da barra fictícia -1 (FIC.INTER.01) .

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra -1 (FIC.INTER.01) TENSAO(pu) CORRENTE(A) mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.000 0.0 Z 0.232 176.2 A 1493 -86.8 Z 498 -86.8 B 0.912 -112.4 P 0.616 -0.7 B 0 0.0 P 498 -86.8 C 0.955 111.4 N 0.384 -178.9 C 0 0.0 N 498 -86.8

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 3 (BAR-3) TEN.(pu) mod. ang. mod. ang. A 0.235 -7.6 Z 0.086 -177.3 B 0.891 -106.0 P 0.659 -1.2 C 0.909 105.6 N 0.341 -177.7

Bar. -1 (FIC.INTER.01) TEN.(pu) Cir. 1L(%30) CORR.(A) p/ 3 Impedância de 3 para -1 (ohms) mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.000 0.0 Z 0.232 176.2 A -1220 -87.2 Z -440 -87.0 AB 108.18 147.27 AN 14.85 79.53 B 0.912 -112.4 P 0.616 -0.7 B -50 -84.8 P -390 -87.3 BC 9999.99 0.00 BN 127.18 -19.03 C 0.955 111.4 N 0.384 -178.9 C -50 -84.8 N -390 -87.3 CA 116.27 25.11 CN 129.82-167.46

Bar. 8 (BAR-8 CAR4) TEN.(pu) Cir. 1L() CORR.(A) p/ 3 Impedância de 3 para 8 (ohms) mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.328 -6.0 Z 0.065 -177.3 A 236 -85.9 Z 20 -80.8 AB 390.82 -33.73 AN 113.19-102.50 B 0.893 -107.0 P 0.696 -1.3 B -88 -87.6 P 108 -86.3 BC 9999.99 0.00 BN 2420.40 -12.83 C 0.916 106.6 N 0.304 -177.1 C -88 -87.6 N 108 -86.3 CA 420.06-155.90 CN 2470.62-161.25

Bar. 1 (BAR-1 GER1GR) TEN.(pu) Cir. 1T() CORR.(A) p/ 3 mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.439 -2.9 Z 0.000 0.0 A 985 -87.6 Z 420 -87.3 B 0.882 -104.4 P 0.719 -0.9 B 138 -86.6 P 282 -87.7 C 0.904 104.0 N 0.281 -177.7 C 138 -86.6 N 282 -87.7

Bar. 5 (BAR-5 CAR1) TEN.(pu) mod. ang. mod. ang. A 0.101 -5.4 Z 0.187 176.6 B 0.907 -111.4 P 0.644 -0.9 C 0.947 110.5 N 0.356 -178.3

Bar. -1 (FIC.INTER.01) TEN.(pu) Cir. 1L(%30) CORR.(A) p/ 5 Impedância de 5 para -1 (ohms) mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.000 0.0 Z 0.232 176.2 A -273 -84.9 Z -58 -85.0 AB 386.71 147.56 AN 34.64 79.53 B 0.912 -112.4 P 0.616 -0.7 B 50 -84.8 P -108 -84.9 BC 9999.99 0.00 BN 1842.44 -26.23 C 0.955 111.4 N 0.384 -178.9 C 50 -84.8 N -108 -84.9 CA 409.42 20.61 CN 1923.26-164.37

Bar. 7 (BAR-7 CAR3) TEN.(pu) Cir. 1L() CORR.(A) p/ 5 Impedância de 5 para 7 (ohms) mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. mod. ang. A 0.355 -6.0 Z 0.075 -179.0 A 273 -84.9 Z 58 -85.0 AB 386.71 -32.44 AN 34.64-100.47 B 0.897 -108.8 P 0.714 -1.4 B -50 -84.8 P 108 -84.9 BC 9999.99 0.00 BN 1842.44 153.77 C 0.929 108.1 N 0.287 -176.4 C -50 -84.8 N 108 -84.9 CA 409.42-159.39 CN 1923.26 15.63

E.2.4 Simulação de curtos shunt através de impedâncias (não-francos)

Para a simulação de faltas com impedâncias (curtos não-francos), será necessário atentar para a especificação de impedâncias de falta adotada pelo ANAFAS, cuja ligação está ilustrada no esquemático dado na Figura 100. É possível entrar com valores tanto em ohms como p.u. para a impedância de falta. Se for desejável analisar um curto monofásico em uma linha cuja impedância de falta seja de 2Ω , por exemplo o valor de R_{an} deverá ser igual a 2Ω e $R_{nt} = 0\Omega$. As outras impedâncias não precisam ser preenchidas uma vez que o programa interpreta espaços vazios como circuito aberto, por *default*.

Figura 100 – Especificação de Impedância de Falta



Para o modo batch, além do parâmetro $KD = 10$, deve-se atentar para o formato de dados das impedâncias de falta para curtos-shunt dado pela tabela da Figura 101. Neste caso, os parâmetros costumam ser passados na segunda linha em sequência à de definição do ponto de criação intermediário do defeito e especificações de circuito. O exemplo a seguir irá ajudar a segmentar melhor esses conceitos.

Figura 101 – Formato dos Dados das Impedâncias de Falta para Curtos-Circuitos Shunt

| R_AN | X_AN | R_BN | X_BN | R_CN | X_CN | R_BC | X_BC | R_AC | X_AC | R_AB | X_AB | R_NG | X_NG | | U | N | D |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

Exemplo 2: Deseja-se simular os seguintes curtos simultaneamente:

- Shunt Bifásico-terra nas fases B e C na linha 6-8, circuito 1 a 57% da barra 6, com resistência R_{bc} igual a 5Ω
- Shunt Bifásico nas fases A e B na linha 8-9, circuito 1 a 63% da barra 8, com resistência de falta igual a 2Ω
- Shunt Trifásico na linha 4-7, circuito 1 a 22% da barra 4, com resistência de falta igual a 0,507 p.u. nas três fases ($R_{an} = R_{bn} = R_{cn}$)

O código abaixo ilustra a implementação do que é requisitado acima, considerando-se grau de vizinhança máximo (NBAC = 9999), ou seja, o relatório de dados irá exibir tensões e correntes de pós-falta de todas as barras do SEP. Serão gerados simultaneamente os relatórios 1.txt, 2.txt e 3.txt com apenas uma execução do ANAFAS, salvos na pasta de destino definida pelo arqv SAID. Convém mencionar que o valor 0 na coluna 75 define os valores das impedâncias em p.u.

```

1
2 arqv dado
3 C:\CEPEL\Anafas\7.3.0\9Barras.ana
4 ddef
5   9      6      8      1      57      10
6 99999   99999   99999   5      99999   99999   00
7
8      1
9 99
10 dcte
11 tsai rela
12 nbac 9999
13 ncol 80
14 9999
15 dcte
16 UTEN P.U.
17 UCOR AMPE
18 ANGU INDU
19 IMPF NAO
20 9999
21 arqv said
22 C:\BATCH\RELATORIOS\2.txt
23 EIPF
24 ddef
25   9      8      9      1      63      10
26 99999   99999   99999   99999   99999   2      99999
27
28      1
29 99

```

```
26 dcte
27 tsai rela
28 nbac 9999
29 ncol 80
30 9999
31 dcte
32 UTEN P.U.
33 UCOR AMPE
34 ANGU INDU
35 IMPF NAO
36 9999
37 arqv said
38 C:\BATCH\RELATORIOS\3.txt
39 EIPF
40 ddef
41 9 4 7 1 22 10
42 0.507 0.507 0.507 99999 99999 99999 99999
43 0
44 99
45 dcte
46 tsai rela
47 nbac 9999
48 ncol 80
49 9999
50 dcte
51 UTEN P.U.
52 UCOR AMPE
53 ANGU INDU
54 IMPF NAO
55 9999
56 arqv said
57 C:\BATCH\RELATORIOS\4.txt
58 EIPF
59 FIM
```