

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

*TALES LUIZ BUSANELLO ARGENTA*

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PROVENIENTES DE FALTAS NO SISTEMA  
ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO.**

Porto Alegre

2013

*TALES LUIZ BUSANELLO ARGENTA*

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PROVENIENTES DE FALTAS NO SISTEMA  
ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO.**

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre

2013

*TALES LUIZ BUSANELLO ARGENTA*

**AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PROVENIENTES DE FALTAS NO SISTEMA  
ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO.**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gothenburg - Suécia

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gothenburg, Suécia.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Flávio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

\_\_\_\_\_  
Eng. Mateus Wille Kutter, CMPC Celulose Riograndense LTDA

Engenheiro pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

\_\_\_\_\_  
Eng. Roni Paul Aurich, CMPC Celulose Riograndense LTDA

Engenheiro pela ULBRA – Canoas, Brasil.

Dedico este trabalho à minha família,  
em especial aos meus pais, pelo apoio  
incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne pela atenção a mim dedicada neste período acadêmico, inclusive na orientação deste projeto.

Agradeço aos colegas de graduação pelos momentos de descontração e estudos.

Agradeço à UFRGS de um modo geral pela estrutura e oportunidades oferecidas.

Agradeço à CMPC Celulose Riograndense LTDA por ter me acolhido durante o período de estágio, proporcionado totais condições para que este projeto pudesse ser realizado.

Agradeço aos membros da banca avaliadora por aceitarem o convite.

## RESUMO

O interesse pelo tema “qualidade de energia elétrica” por parte, não apenas das empresas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, mas também por parte dos consumidores, em especial, os clientes industriais, tem apresentado significativa ascensão. Dentre os distúrbios dos quais a energia elétrica é susceptível, destacam-se os afundamentos de tensão. Dentro deste contexto, este projeto apresenta os principais conceitos e definições acerca dos afundamentos de tensão e, sabendo que as faltas são as principais causas desse fenômeno, do estudo de curto circuito. Fundamentando-se nesses conceitos, um estudo de caso é desenvolvido no qual se propõe a predição do número de afundamentos de tensão no ponto de conexão da empresa CMPC Celulose Riograndense com a concessionária de energia elétrica em dois panoramas distintos, atual e futuro (2015), afundamentos estes, oriundos de faltas no sistema elétrico de potência do Rio Grande do Sul. Para a realização da predição proposta, toma-se como metodologia a simulação de faltas via programa computacional. Finalmente, são realizadas as análises pertinentes para a verificação e comparação do desempenho de ambos os sistemas implementados tomando-se como base os resultados quantitativos e qualitativos obtidos.

Palavras chave: Afundamento de tensão. Curto circuito. Sistema elétrico de potência.

## **ABSTRACT**

The interest about power quality has shown a meaningful increase not only for the utilities but also for end users such as industrial customers. Among the power quality disturbances, this diploma work focus is voltage sags. In this context, the main concepts and definitions about voltage sags are presented. It is well known that faults are the main cause of this phenomenon. Based on these concepts, a case-study is developed. The study aims to predict the number of voltage sags at the connection bus of the company CMPC Celulose Riograndense considering two scenarios, current connection (69 kV) and future connection (230 kV). Finally, a quantitative and qualitative comparison of the performance of the two scenarios is performed. The simulations show that the connection at 230 kV will improve the performance and consequently reduce the problems associated to voltage sags to the industrial facility.

**Keywords:** Voltage sags. Short circuit. Electrical power system.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Distúrbios inerentes à QEE.....  | 17 |
| Figura 2 - Classificação das variações de tensão de curta duração de forma gráfica.....                               | 20 |
| Figura 3 - Afundamento de tensão proveniente de uma falta monofásica. ....  | 21 |
| Figura 4 - Diagramas fasoriais de tensão para diferentes tipos de faltas.....   | 22 |
| Figura 5 - Diagrama unifilar de um sistema elétrico típico.....   | 23 |
| Figura 6 - Circuitos de sequência zero para diferentes tipos de conexão de transformadores de núcleo envolvente. .... | 25 |
| Figura 7 - Distribuição acumulada de afundamento de tensão.....   | 26 |
| Figura 8 - Tipos de afundamento de tensão.....  | 27 |
| Figura 9 - Custos associados a afundamentos de tensão em diferentes setores da indústria....                          | 29 |
| Figura 10 - Fonte de alimentação típica e tensões de entrada e saída durante um afundamento de tensão. ....           | 30 |
| Figura 11 - Curvas de sensibilidade CBEMA e ITIC.....   | 30 |
| Figura 12 - Acionadores de velocidade variável. ....  | 31 |
| Figura 13 - Curva de sensibilidade de AVV's. ....   | 31 |
| Figura 14 - Escorregamento de motores de indução em função de afundamentos de tensão. .                               | 32 |
| Figura 15 - Variação do ângulo de potência em detrimento ao afundamento de tensão. ....                               | 33 |
| Figura 16 - Curva de sensibilidade de um contator. ....   | 34 |
| Figura 17 - Modelo de gerador para o cálculo de curto circuito. ....  | 35 |
| Figura 18 - Corrente de curto circuito assimétrica. ....  | 36 |
| Figura 19 - Modelo de um gerador em redes de sequência. ....  | 36 |
| Figura 20 - Modelo $\pi$ para linhas de transmissão.....  | 37 |
| Figura 21 - Modelos de uma linha de transmissão em redes de sequência. ....   | 38 |
| Figura 22 - Modelos de carga. ....  | 38 |
| Figura 23 - Faltas simétricas, FFF e FFFT. ....   | 41 |
| Figura 24 - Circuito equivalente à uma falta FFF ou FFFT. ....  | 42 |
| Figura 25 - Falta fase-terra. ....  | 44 |
| Figura 26 - Circuito equivalente à uma falta FT. ....   | 45 |
| Figura 27 - Falta fase-fase. ....   | 47 |
| Figura 28 - Circuito equivalente à uma falta FF.....  | 49 |
| Figura 29 - Falta fase-fase-terra.....  | 50 |
| Figura 30 - Circuito equivalente à uma falta FFT. ....  | 51 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 31 - Níveis de afundamento de tensão em detrimento à ocorrência de uma falta.....              | 54 |
| Figura 32 - Área de vulnerabilidade de uma determinada barra. ....                                    | 54 |
| Figura 33 - Simulação do fluxo de potência para a determinação das tensões pré-falta.....             | 55 |
| Figura 34 - Diagrama unifilar simplificado do ponto de conexão atual da CMPC com ao SEP.<br>.....     | 56 |
| Figura 35 - Diagrama unifilar simplificado do ponto de conexão futuro da CMPC com ao<br>SEP.....      | 57 |
| Figura 36 - Fluxograma de trabalho para a previsão de afundamentos de tensão.....                     | 58 |
| Figura 37 - Interface gráfica do ONS (SINDAT).....  | 60 |
| Figura 38 - Relatório básico de subestação. ....  | 60 |
| Figura 39 - Relatório básico de linha de transmissão.....   | 61 |
| Figura 40 - Dados da unidade geradora de energia da CMPC expostos pela ANEEL.....                     | 61 |
| Figura 41 - Configuração de parâmetros de barramento para as simulações. ....                         | 62 |
| Figura 42 - Configuração de parâmetros de linha para as simulações. ....                              | 63 |
| Figura 43 - Configuração de parâmetros da geração para as simulações.....                             | 64 |
| Figura 44 - Configuração de parâmetros de carga e compensador de reativo para as<br>simulações. ....  | 65 |
| Figura 45 - Configuração de parâmetros de transformador para as simulações.....                       | 66 |
| Figura 46 - Sistema equivalente atual implementado no <i>Power World</i> ®. ....                      | 68 |
| Figura 47 - Sistema equivalente futuro implementado no <i>Power World</i> ®. ....                     | 69 |
| Figura 48 - Simulação de falta FT no sistema equivalente atual.....                                   | 70 |
| Figura 49 - Simulação de falta FF no sistema equivalente futuro. ....                                 | 71 |
| Figura 50 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FT. ....               | 72 |
| Figura 51 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FF.....                | 73 |
| Figura 52 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FFT. ....              | 74 |
| Figura 53 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FFF. ....              | 75 |
| Figura 54 - Previsão do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos<br>mesmos. .... | 77 |
| Figura 55 - Previsão do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta.....             | 77 |
| Figura 56 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FT. ....                | 79 |
| Figura 57 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FF.....                 | 80 |
| Figura 58 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FFT. ....               | 81 |
| Figura 59 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FFF. ....               | 82 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 60 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos<br>mesmos. ....                           | 83 |
| Figura 61 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta.....                                       | 83 |
| Figura 62 - Comparativo do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos<br>mesmos entre ambos os cenários..... | 85 |
| Figura 63 - Comparativo do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta<br>entre ambos os cenários.....         | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação das variações de tensão de curta duração.....  | 19 |
| Tabela 2 - Índices de faltas no sistema elétrico de transmissão brasileiro.....                                   | 23 |
| Tabela 3 - Tipos de conexão de transformadores e os respectivos efeitos frente aos<br>afundamentos de tensão..... | 25 |
| Tabela 4 - Propagação de afundamentos de tensão através de transformadores $\Delta - Y$ .....                     | 28 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                       |   |
|-----------------------|---|
| ANEEL                 | Agência Nacional de Energia Elétrica                                    |
| AVV                   | Acionador de Velocidade Variável  |
| CBEMA                 | Computer and Business Equipment Manufacturers' Association              |
| CLP                   | Controlador Lógico Programável  |
| CMPC                  | Compañía Manufacturra de Papeles y Cartones                             |
| FF                    | Falta Fase-Fase   |
| FFF                   | Falta Trifásica   |
| FFFT                  | Falta Trifásica à Terra   |
| FFT                   | Falta Fase-Fase-Terra   |
| FT                    | Falta Fase-Terra  |
| IEC                   | International Electrotechnical Commission                               |
| IEEE                  | Institute of Electric and Electronics Engineers                         |
| ITIC                  | Information Technology Industry Council                                 |
| ONS                   | Operador Nacional do Sistema  |
| PRODIST               | Procedimentos de Dist. de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| P.U.                  | Por Unidade   |
| QEE                   | Qualidade de Energia Elétrica   |
| SIN                   | Sistema Interligado Nacional  |
| UFRGS                 | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                               |
| ULBRA                 | Universidade Luterana do Brasil   |
| $\Delta$              | Conexão Delta   |
| Y                     | Conexão Estrela   |
| $Y_{\text{aterrado}}$ | Conexão Estrela Aterrada  |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                     | <b>15</b> |
| 1.1          | MOTIVAÇÃO.....   | 15        |
| 1.2          | OBJETIVOS.....   | 15        |
| 1.3          | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                 | 16        |
| <b>2</b>     | <b>CARACTERIZAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO .....</b>     | <b>17</b> |
| 2.1          | QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE).....                   | 17        |
| 2.2          | DEFINIÇÃO.....   | 18        |
| 2.3          | ORIGEM.....  | 20        |
| 2.4          | VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA.....                               | 21        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Tipo de Falta .....</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>2.4.2</b> | <b>Localização da Falta .....</b>                          | <b>23</b> |
| <b>2.4.3</b> | <b>Tensão Pré-Falta.....</b>                               | <b>24</b> |
| <b>2.4.4</b> | <b>Conexão dos Transformadores.....</b>                    | <b>24</b> |
| <b>2.4.5</b> | <b>Taxa de Ocorrência .....</b>                            | <b>25</b> |
| 2.5          | CLASSIFICAÇÃO.....   | 26        |
| 2.6          | SENSIBILIDADE DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS.....             | 28        |
| <b>2.6.1</b> | <b>Processos Industriais .....</b>                         | <b>28</b> |
| <b>2.6.2</b> | <b>Computadores e Demais Equipamentos Eletrônicos.....</b> | <b>29</b> |
| <b>2.6.3</b> | <b>Acionadores de Velocidade Variável (AVV's) .....</b>    | <b>31</b> |
| <b>2.6.4</b> | <b>Motor de Indução .....</b>                              | <b>32</b> |
| <b>2.6.5</b> | <b>Motor Síncrono .....</b>                                | <b>33</b> |
| <b>2.6.6</b> | <b>Contatores .....</b>                                    | <b>33</b> |
| <b>2.6.7</b> | <b>Lâmpadas .....</b>                                      | <b>34</b> |
| <b>3</b>     | <b>CÁLCULO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO .....</b>              | <b>35</b> |
| 3.1          | MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA.....                  | 35        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Gerador.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Linha de Transmissão .....</b>                          | <b>37</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Carga.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.1.4</b> | <b>Transformador.....</b>                                  | <b>39</b> |
| 3.2          | CÁLCULO DA MAGNITUDE.....                                  | 39        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.2.1 Falta Trifásica</b> .....                                | <b>40</b> |
| 3.2.1.1 Método Analítico .....                                    | 42        |
| 3.2.1.2 Método Matricial .....                                    | 42        |
| <b>3.2.2 Falta Fase-terra</b> .....                               | <b>44</b> |
| 3.2.2.1 Método Analítico .....                                    | 45        |
| 3.2.2.2 Método Matricial .....                                    | 46        |
| <b>3.2.3 Falta Fase-fase</b> .....                                | <b>47</b> |
| 3.2.3.1 Método Analítico .....                                    | 48        |
| 3.2.3.2 Método Matricial .....                                    | 49        |
| <b>3.2.4 Falta Fase-fase-terra</b> .....                          | <b>50</b> |
| 3.2.4.1 Método Analítico .....                                    | 51        |
| 3.2.4.2 Método Matricial .....                                    | 51        |
| 3.3 CÁLCULO DO NÚMERO DE OCORRÊNCIAS.....                         | 52        |
| 3.4 DESEMPENHO DO SISTEMA .....                                   | 53        |
| 3.5 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO .....                                | 55        |
| <b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....                                     | <b>56</b> |
| 4.1 METODOLOGIA.....  | 57        |
| 4.2 CONSIDERAÇÕES .....   | 58        |
| 4.3 ELABORAÇÃO DOS SISTEMAS EQUIVALENTES .....                    | 59        |
| <b>4.3.1 Coleta de Dados</b> .....                                | <b>59</b> |
| <b>4.3.2 Implementação no Software</b> .....                      | <b>61</b> |
| 4.3.2.1 Barramentos .....   | 62        |
| 4.3.2.2 Linhas .....  | 63        |
| 4.3.2.3 Unidades Geradoras.....                                   | 64        |
| 4.3.2.4 Cargas e Compensadores de Reativo .....                   | 65        |
| 4.3.2.5 Transformadores.....                                      | 66        |
| 4.4 SIMULAÇÃO DE FALTAS E REGISTRO DOS AFUNDAMENTOS .....         | 70        |
| 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....                                   | 71        |
| <b>4.5.1 Desempenho da Configuração Atual</b> .....               | <b>71</b> |
| 4.5.1.1 Área de Vulnerabilidade da Barra “GUAÍBA 1 (29124)” ..... | 71        |
| 4.5.1.2 Predição do Número de Ocorrências .....                   | 76        |
| <b>4.5.2 Desempenho da Configuração Futura (2015)</b> .....       | <b>78</b> |
| 4.5.2.1 Área de Vulnerabilidade da Barra “GUAÍBA 2 (5806)” .....  | 78        |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>4.5.2.2 Predição do Número de Ocorrências</i> ..... | 83        |
| <b>4.5.3 Comparativo Entre os Cenários</b> .....       | <b>84</b> |
| <b>5 CONCLUSÕES</b> .....                              | <b>87</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                               | <b>89</b> |
| <b>APÊNDICE A</b> .....                                | <b>91</b> |
| <b>APÊNDICE B</b> .....                                | <b>99</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com o passar dos anos, o tema “qualidade de energia elétrica” (QEE) tem ganhado cada vez mais a atenção dos profissionais da área de engenharia elétrica. Isto se deve em função, principalmente, do aumento da sensibilidade dos equipamentos e processos industriais em relação à QEE e da geração distribuída. São diversos os problemas aos quais a energia elétrica é exposta, e conseqüentemente, afetam a QEE. Um dos principais distúrbios dos quais a energia elétrica é susceptível são os afundamentos de tensão, os quais são os maiores causadores de danos e prejuízos para os consumidores (MCGRANAGHAN, et al., 1993).

No âmbito industrial, não são raros os problemas causados por afundamentos de tensão. Tal fenômeno pode ser responsável por interrupções de processos visto que diversos equipamentos eletroeletrônicos podem parar de funcionar ou atuar de maneira errônea. Em uma planta industrial são diversos os equipamentos com esta característica. Pode-se citar inversores de frequência, controladores lógico programáveis (CLP's), acionadores de velocidade variável (AVV's), robôs, contadores de motores, microcontroladores, dentre outros.

Ao se observar as ocorrências acerca das variações da tensão no ponto de conexão da empresa fabricante de papel e celulose CMPC Celulose Riograndense LTDA com o Sistema Interligado Nacional (SIN), verificaram-se quarenta relatos de atuação do sistema de proteção em um período de dezoito meses. Considerando a importância dos afundamentos de tensão neste contexto e sabendo que as faltas são as principais causas desse fenômeno (BOLLEN, et al., 2006), propôs-se a obtenção de índices de afundamentos de tensão nesse ponto de interesse causados por faltas no sistema elétrico de potência.

## 1.2 OBJETIVOS

O afundamento de tensão é um distúrbio que pode ser abordado tanto por métodos de verificação quanto por métodos de predição. Os métodos de verificação consistem basicamente no monitoramento da tensão via equipamentos continuamente conectados ao ponto de interesse. Já os métodos de predição têm como base a utilização de programas computacionais que simulam o sistema elétrico em questão, calculando as tensões e correntes pós-falta, que em conjunto com dados estatísticos, possibilitam a obtenção dos índices de ocorrência.



Com base no exposto, essa monografia tem como escopo principal a predição dos níveis de afundamentos de tensão no ponto de conexão da empresa CMPC com o SIN em detrimento à ocorrência de curtos circuitos no sistema elétrico de transmissão e de distribuição. Para tanto, se faz necessária a implementação de um equivalente ao sistema elétrico de potência do Rio Grande do Sul em programa computacional. Interpretando os dados obtidos, tem-se como objetivo desenvolver uma série de análises a fim de se obter o desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão. Para a fundamentação do estudo de caso em questão, o desenvolvimento dos conceitos e definições acerca deste distúrbio da QEE se faz imprescindível.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido de forma que, em um primeiro momento, desenvolvendo-se a fundamentação teórica, o tema seja consolidado. Em seguida, é apresentado um estudo de caso no qual se aplicam os conhecimentos expostos. Assim, tem-se a seguinte estrutura:

Na seção 2 os afundamentos de tensão são caracterizados. Primeiramente, é exposto o panorama geral que tange a QEE. São desenvolvidos os conceitos e definições desse distúrbio. Finalmente, são apresentadas as variáveis que influenciam a caracterização dos afundamentos de tensão bem como os equipamentos sensíveis a estes eventos.

A seção 3 tem como tema a abordagem matemática que envolve o cálculo da magnitude e do número de ocorrência dos afundamentos de tensão. Para tanto, é abordado o cálculo analítico da corrente de curto circuito para os diversos tipos de falta. É exposta também, a utilização de programas computacionais para a predição desse fenômeno.

Na seção 4 é apresentado um estudo de caso em que, por meio de técnicas de predição, se verificam os afundamentos de tensão no ponto de conexão de uma empresa produtora de papel e celulose com o SIN. Por fim, são apresentados os resultados obtidos bem como as análises pertinentes.

A seção 5 é responsável por expor as conclusões das quais se chegam com este trabalho. Para isso, são abordados de forma crítica os resultados obtidos. Por fim, propõem-se estudos que possam vir a ser realizados com base nas contribuições desta monografia.

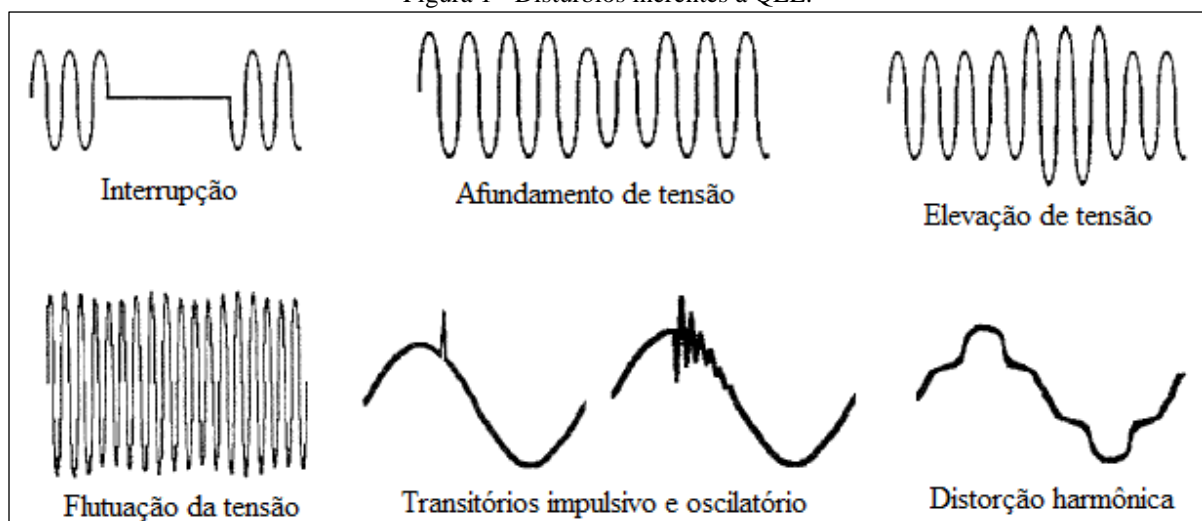
## 2 CARACTERIZAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

### 2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Hoje, o tema “qualidade de energia elétrica” (QEE) é abordado não apenas pelas empresas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, mas também pelos consumidores, em especial, os clientes industriais. O progressivo interesse pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos, hoje amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividade, seja industrial, comercial ou residencial (LEBORGNE, 2003). Tais equipamentos caracterizam-se pela sensibilidade aos distúrbios que afetam a QEE, comprometendo o correto funcionamento, sobretudo, a continuidade de processos industriais.

Por definição, QEE, ou mais especificamente, os distúrbios que afetam a QEE, são quaisquer alterações na tensão, corrente ou frequência que interfiram na operação normal dos equipamentos elétricos (DOUGHERTY, STEBBINS, 1997). São diversos os distúrbios dos quais a energia elétrica é susceptível. Podem-se citar interrupções, afundamentos e elevações de tensão, transitórios impulsivos e oscilatórios, distorção harmônica, flutuação da tensão, ruído, desequilíbrio de tensão, variações na frequência, dentre outros. A Figura 1 apresenta de forma gráfica alguns dos distúrbios supracitados.

Figura 1 - Distúrbios inerentes à QEE.



Fonte: Adaptado de (DOUGHERTY, STEBBINS, 1997).

Visto a complexidade do sistema elétrico, constituído por unidades geradoras de variadas topologias, linhas aéreas de transmissão e de distribuição susceptíveis às intempéries,

unidades transformadoras e cargas de características distintas, a presença desses distúrbios é inerente à sua operação. Tem-se então, como objeto de estudos e pesquisas, a mitigação de tais distúrbios.

Dois são os principais motivadores para estudos acerca dos distúrbios que afetam a QEE: o aumento de cargas sensíveis e a incipiente geração distribuída. O aumento de cargas sensíveis justifica-se pela constante busca por melhor desempenho de processos industriais, fundamentada na modernização de equipamentos, que por sua vez, caracteriza-se pela utilização massiva de equipamentos eletroeletrônicos. A geração distribuída é fator importante visto que tende a modificar a atual característica radial do sistema elétrico incluindo pequenas unidades geradoras onde hoje predominam as cargas. Essas pequenas unidades geradoras devem fornecer energia elétrica de forma a manter a qualidade e a confiabilidade do sistema elétrico, inclusive, os padrões mínimos referentes à QEE.

Conforme o panorama que se apresenta, observa-se a ascendência do tema QEE no âmbito da engenharia elétrica. Dentro desse contexto, o entendimento e a verificação dos fenômenos dos quais a energia elétrica é susceptível se faz imprescindível e os aprofundamentos de tensão são um deles.

## 2.2 DEFINIÇÃO

Define-se como afundamento de tensão, a variação momentânea ou temporária da amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência. Na literatura, não há consenso a respeito dos limites de tensão e de tempo desta variação que a defina como um afundamento de tensão. Segundo o *Institute of Electric and Electronics Engineers* (IEEE), através da Norma IEEE 1159 (1995), por exemplo, define afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,10 e 0,90 p.u.. Em relação à duração do evento, a norma divide os afundamentos de tensão em três classes: instantâneos (entre 0,5 ciclo e 30 ciclos); momentâneos (entre 30 ciclos e 3 segundos); e temporários (entre 3 segundos e 1 minuto). Por outro lado, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), através da norma (IEC Std. 61000-4-30, 2003), considera afundamento de tensão, a redução do valor eficaz da tensão para valores entre 0,01 e 0,90 p.u., durante um período de tempo compreendido entre meio ciclo e 60 segundos.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é quem regulamenta e define os padrões de qualidade do produto (energia elétrica) e da prestação de serviços. Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

(PRODIST), especificamente o Módulo 8 (2012), a agência aborda a QEE, e consequentemente, os afundamentos de tensão. Os procedimentos de QEE definidos neste módulo do PRODIST devem ser observados por consumidores, produtores, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores e transmissoras de energia elétrica bem como pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

O oitavo módulo do PRODIST, aborda, dentre outros aspectos acerca da QEE, a chamada variação de tensão de curta duração. Segundo o texto, variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Tais variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 1.

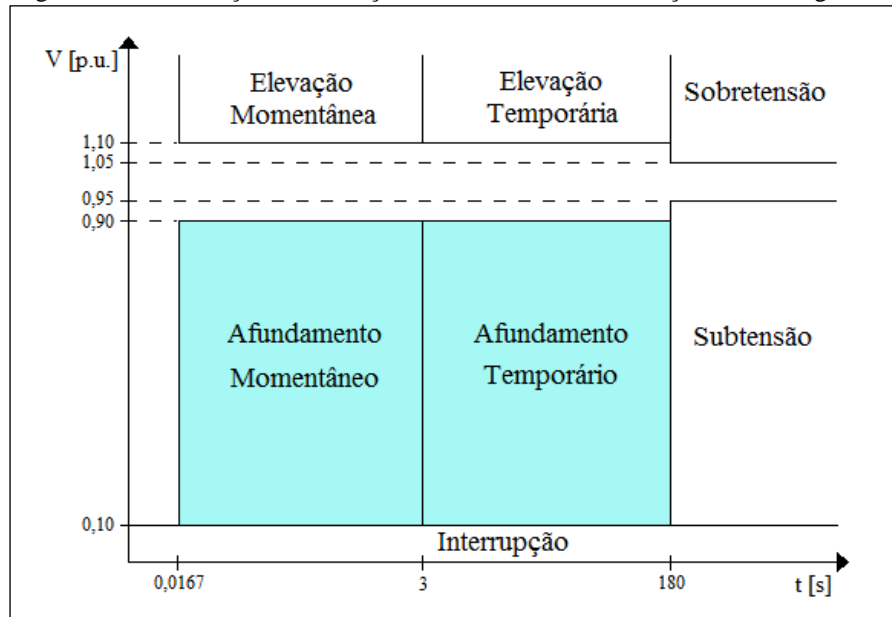
Tabela 1 - Classificação das variações de tensão de curta duração.

| Classificação                       | Denominação                      | Duração da Variação<br>[s] | Amplitude da Tensão<br>(Valor Eficaz) [p.u.] |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--|
| <b>Varição Momentânea de Tensão</b> | Interrupção Momentânea de Tensão | $t \leq 3$                 | $V < 0,10$                                   |
|                                     | Afundamento Momentâneo de Tensão | $0,0167 \leq t \leq 3$     | $0,10 \leq V < 0,90$                         |
|                                     | Elevação Momentânea de Tensão    | $0,0167 \leq t \leq 3$     | $V > 1,10$                                   |
| <b>Varição Temporária de Tensão</b> | Interrupção Temporária de Tensão | $3 \leq t \leq 180$        | $V < 0,10$                                   |
|                                     | Afundamento Temporário de Tensão | $3 \leq t \leq 180$        | $0,10 \leq V < 0,90$                         |
|                                     | Elevação Temporária de Tensão    | $3 \leq t \leq 180$        | $V > 1,10$                                   |

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2012).

Ao se observar a Tabela 1, verifica-se que os afundamentos de tensão estão imersos dentro deste contexto e ainda são classificados de acordo com o tempo de duração da ocorrência. Os afundamentos de tensão podem ser definidos como momentâneos ou temporários e caracterizam-se por tensões entre 0,10 e 0,90 p.u.. É com base nestes limites que os agentes que compõem o sistema elétrico devem operar, estando sujeitos a penalizações por parte da ANEEL. A Figura 2 apresenta no plano cartesiano os limites que definem os afundamentos de tensão.

Figura 2 - Classificação das variações de tensão de curta duração de forma gráfica.



### 2.3 ORIGEM

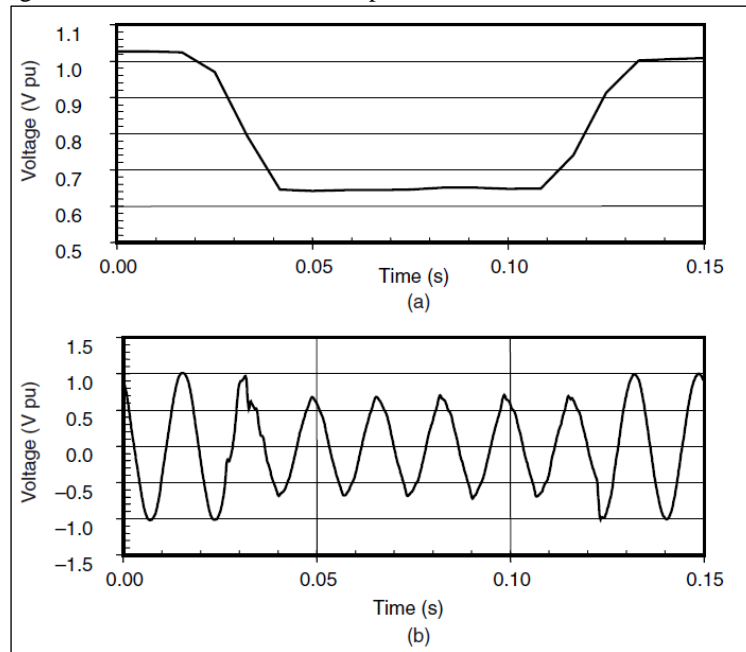
Os afundamentos de tensão no sistema elétrico podem ser oriundos da partida de grandes motores, da energização de transformadores e da ocorrência de curtos circuitos na rede. Dentre estes, as faltas são as principais causas de afundamentos de tensão, e por esse motivo, os afundamentos de tensão são estudados a partir dos resultados dos métodos de cálculo de faltas (BOLLEN, et al., 2006).

Com característica predominantemente aérea, o sistema de transmissão e de distribuição de energia elétrica está exposto aos fenômenos naturais diversos, como vendavais, temporais e descargas atmosféricas. Esta última, as maiores causas de ocorrência de curtos circuitos em sistemas aéreos de transmissão e distribuição, seja por incidência direta ou indireta (MCGRANAGHAN, et al., 1993). Configura-se como descarga atmosférica de incidência direta, a que atinge diretamente um condutor de fase. Em contrapartida, descargas atmosféricas ditas com incidência indireta, são as que não atingem diretamente um condutor de fase, mas sim, ou o sistema de aterramento ou obstáculos próximos. As descargas atmosféricas de incidência direta, quando comparadas às de incidência indireta, provocam correntes mais elevadas, e conseqüentemente, afundamentos de tensão mais severos, por outro lado, são significativamente menos frequentes. Podem-se citar ainda outras causas de ocorrência de faltas, como por exemplo, as queimadas em plantações, contatos por animais, contaminação de isoladores, ação do homem e falhas operacionais.

Os afundamentos de tensão podem ser provenientes de faltas temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas que não danificam de forma permanente o sistema de isolamento, podendo ser extintas pela ação de religadores automáticos. Por outro lado, as faltas ditas permanentes são aquelas que danificam fisicamente algum elemento da isolamento, necessitando-se a intervenção humana para restabelecer a condição normal de operação.

Quando da ocorrência do curto circuito, o afundamento de tensão transcorre durante o tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do defeito até a atuação do sistema de proteção ou a completa eliminação do defeito (LEBORGNE, 2003). Como exemplo, a Figura 3 ilustra um afundamento de tensão causado por uma falta monofásica (FT) no sistema de distribuição.

Figura 3 - Afundamento de tensão proveniente de uma falta monofásica.



Fonte: (DUGAN, 2004).

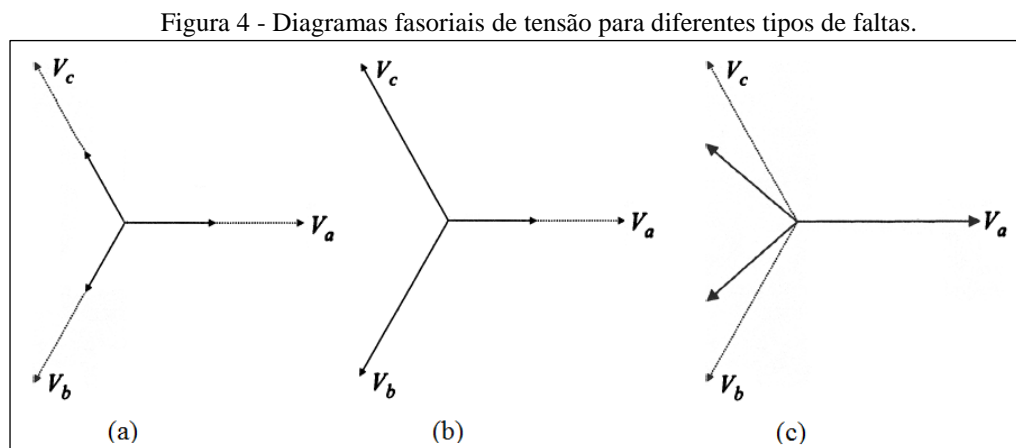
## 2.4 VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA

Como explicitado na seção anterior, as faltas são as principais causadoras de afundamentos de tensão, e por isso, os fatores que caracterizam os afundamentos de tensão norteiam este fenômeno. Nesta seção são abordados os principais.

### 2.4.1 Tipo de Falta

O tipo de falta é um dos fatores básicos a se considerar para se analisar os afundamentos de tensão. Sendo o sistema elétrico trifásico e equilibrado, as faltas podem configurar-se como trifásicas (FFF), trifásicas à terra (FFFT), bifásicas (FF), bifásicas à terra (FFT) ou monofásicas (FT).

As faltas trifásicas, sendo à terra ou não, são ditas simétricas e geram afundamentos de tensão também simétricos. Esse tipo de falta acarreta afundamentos de tensão mais severos, no entanto, ocorrem com menor frequência. Já as faltas bifásicas (à terra ou não) e monofásicas, são classificadas como assimétricas. Essas faltas ocorrem de forma mais frequente e geram afundamentos de tensão desequilibrados. A Figura 4 ilustra exemplos de diagramas fasoriais de tensões de fase correspondentes a diferentes tipos de falta.



Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

Na Figura 4, o diagrama (a) corresponde a um afundamento de tensão resultante de uma falta trifásica, logo, as três fases apresentam afundamento de tensão igual. O diagrama (b) por sua vez, representa um afundamento de tensão resultante de uma falta monofásica à terra envolvendo a fase  $a$ . Por fim, o diagrama (c) ilustra um afundamento de tensão envolvendo as fases  $b$  e  $c$ .

Como mencionado anteriormente, os curtos circuitos assimétricos são reconhecidos mais frequentes quando comparado aos simétricos. Isso é evidenciado pela Tabela 2 que apresenta índices de faltas em linhas de transmissão em diferentes níveis de tensão.

Tabela 2 - Índices de faltas no sistema elétrico de transmissão brasileiro.

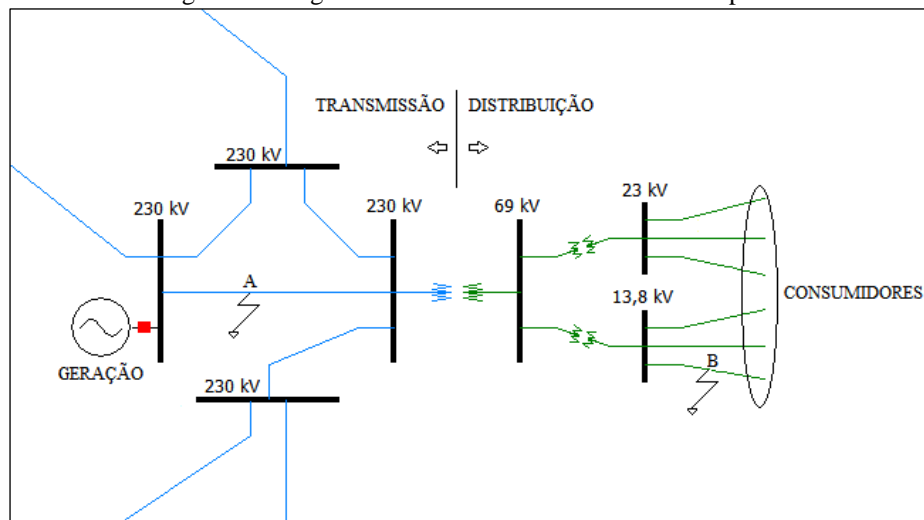
| Nível de Tensão [kV] | Nº de Faltas/ 100 km.ano | FFF [%] | FFT [%] | FF [%] | FT [%] |
|----------------------|--------------------------|---------|---------|--------|--------|
| 500                  | 2,09                     | 1       | 4       | 1      | 94     |
| 440                  | 1,1                      | 1       | 5       | 2      | 92     |
| 345                  | 1,1                      | 1       | 5       | 2      | 92     |
| 230                  | 1,9                      | 2       | 15      | 3      | 80     |
| 138                  | 2,98                     | 4       | 17      | 6      | 73     |
| 69                   | 6,15                     | 6       | 22      | 7      | 65     |

Fonte: Adaptado de (LEBORGNE, 2003, 2007).

## 2.4.2 Localização da Falta

A localização da falta é outro fator importante a ser considerado. Um curto circuito no sistema de transmissão afeta um número maior de consumidores quando comparado a um curto circuito no sistema de distribuição. A Figura 5 ilustra um sistema elétrico de potência típico, em que há linhas de transmissão interligando a geração ao sistema de distribuição, que por sua vez é onde está localizada a grande maioria dos consumidores.

Figura 5 - Diagrama unifilar de um sistema elétrico típico.



Ao se observar a Figura 5 percebe-se a característica malhada do sistema de transmissão, logo, na ocorrência de um curto circuito no ponto A, todos os barramentos ilustrados podem apresentar afundamento de tensão. Por outro lado, quando se observa o sistema de distribuição, nota-se sua característica radial, ou seja, ao ocorrer uma falta no ponto B, apenas o sistema de distribuição tende a apresentar afundamentos de tensão.



### 2.4.3 Tensão Pré-Falta

A ANEEL, por meio do PRODIST, leva em consideração também os requisitos de QEE em regime permanente, incluindo os níveis de tensão. Segundo a agência, as concessionárias devem fornecer aos seus consumidores energia cujo nível de tensão esteja entre 0,95 e 1,05 p.u..

Considerando estes limites, tem-se como prática comum na análise de faltas, definir as tensões no sistema elétrico como sendo iguais a 1,00 p.u.. Um sistema elétrico cujas tensões são iguais a 1,00 p.u. é denominado de sistema *flat*, ou seja, sem carga. Esse método simplifica significativamente os cálculos, e apesar de apresentar erro, para muitos casos é considerado satisfatório.

Uma forma de se chegar a resultados mais fiéis, é obter as tensões pré-falta de um sistema elétrico calculando-se o fluxo de potência. Esse tipo de análise é comumente implementada em programas computacionais que simulam o fluxo de potência por iterações matemáticas. Esse método, de maneira análoga ao anterior, está sujeito a erro uma vez que o fluxo de potência, e conseqüentemente os níveis de tensão, varia constantemente de acordo com a carga.

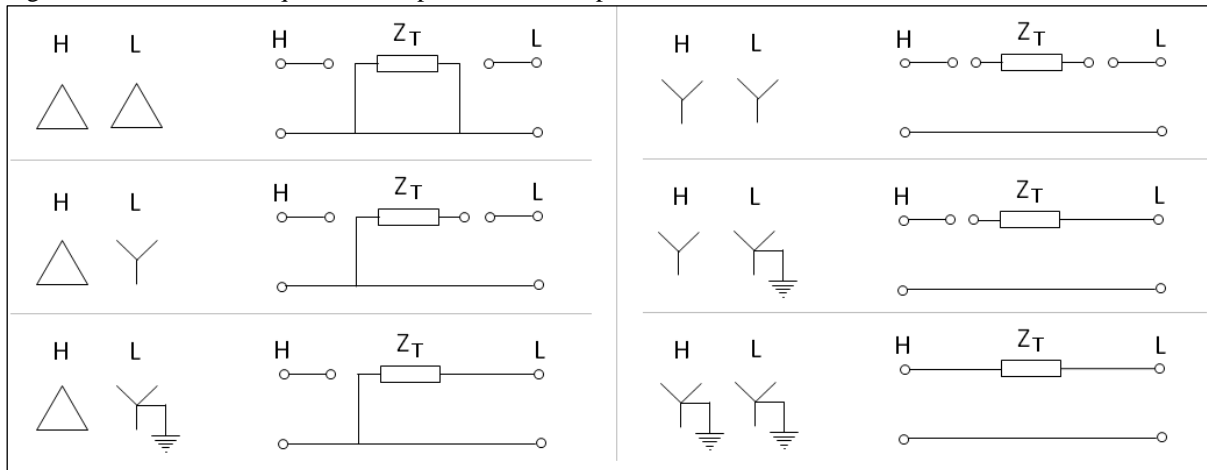
Conforme o exposto, deve-se conhecer a tensão no instante antecessor à condição faltosa para se obter o afundamento de tensão proveniente dessa falta uma vez que o afundamento de tensão em uma determinada barra é igual a soma entre as tensões pré-falta e puramente faltosa dessa barra.

### 2.4.4 Conexão dos Transformadores

Para se analisar os afundamentos de tensão sentidos por determinada carga, deve-se considerar a configuração do sistema elétrico que a envolve. A forma como os transformadores estão conectados influencia sensivelmente na caracterização dos afundamentos de tensão, uma vez que, é dependente dela, a propagação da componente de sequência zero da tensão e a defasagem angular entre as tensões.

No sistema elétrico de potência trifásico, as bobinas de um enrolamento podem estar ligadas em delta ou estrela e estarem ligadas à terra ou não. A Figura 6 relaciona os tipos de ligação possíveis de um transformador e os respectivos circuitos equivalentes de sequência zero.

Figura 6 - Circuitos de seqüência zero para diferentes tipos de conexão de transformadores de núcleo envolvente.



Fonte: Adaptado de (TLEIS, 2008).

Conforme se observa na Figura 6, exceto na configuração  $Y_{\text{aterrado}} - Y_{\text{aterrado}}$ , não há “caminho” para propagação de componentes de seqüência zero. Nesses casos, os afundamentos de tensão sentidos por uma carga à jusante do transformador são menos severos.

Conforme mencionado anteriormente, outro aspecto relevante a cerca da conexão de transformadores é a possibilidade de defasagem entre as tensões primária e secundária. Isso ocorre quando as tensões nas bobinas de um dos enrolamentos são dependentes da tensão composta por duas tensões aplicadas às bobinas do outro enrolamento. A Tabela 3 apresenta um resumo acerca dos afundamentos de tensão e os tipos de conexão de transformadores.

Tabela 3 - Tipos de conexão de transformadores e os respectivos efeitos frente aos afundamentos de tensão.

| Tipo de Conexão                             | Defasagem Angular | Bloqueio da componente de seqüência zero |
|---|-------------------|--|
| $Y_{\text{aterrado}} - Y_{\text{aterrado}}$ | Não               | Não                                      |
| $Y_{\text{aterrado}} - Y$                   | Não               | Sim                                      |
| $Y - Y$                                     | Não               | Sim                                      |
| $\Delta - \Delta$                           | Não               | Sim                                      |
| $Y - \Delta$                                | Sim               | Sim                                      |
| $Y_{\text{aterrado}} - \Delta$              | Sim               | Sim                                      |

#### 2.4.5 Taxa de Ocorrência

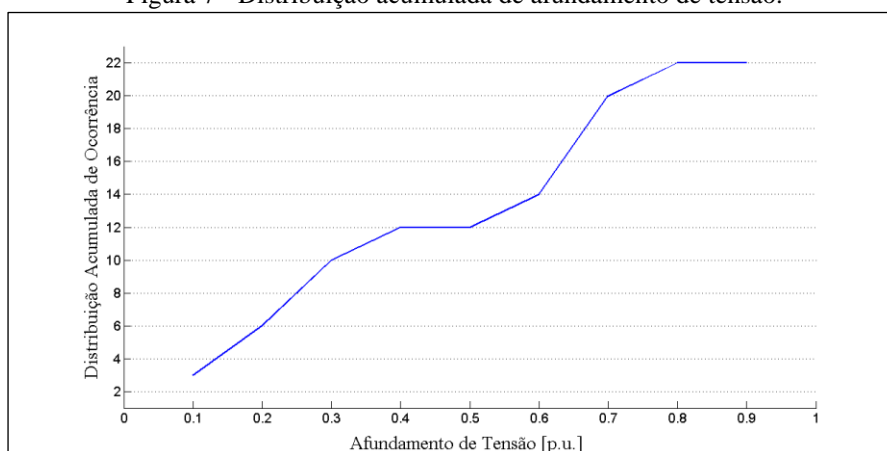
De forma a complementar a análise qualitativa acerca dos afundamentos de tensão, tem-se a análise quantitativa. Esta última consiste na verificação ou na predição do número de vezes em que ocorrem os afundamentos de tensão em determinado período.

Considerando as faltas como sendo a principal causa dos afundamentos de tensão, as taxas de ocorrência dos afundamentos de tensão estão intimamente ligadas à frequência em

que elas ocorrem. Por isso, um dos métodos de análise de afundamentos de tensão é a predição por meio de estudos de curto circuito.

As duas abordagens (qualitativa e quantitativa) se complementam e são indispensáveis quando se analisa os afundamentos de tensão. Com base nelas, tem-se como análise típica, relacionar os níveis de afundamento de tensão com a distribuição acumulada de ocorrência ou com a função probabilidade de ocorrência. De forma a ilustrar, a Figura 7 apresenta um exemplo dessa prática.

Figura 7 - Distribuição acumulada de afundamento de tensão.

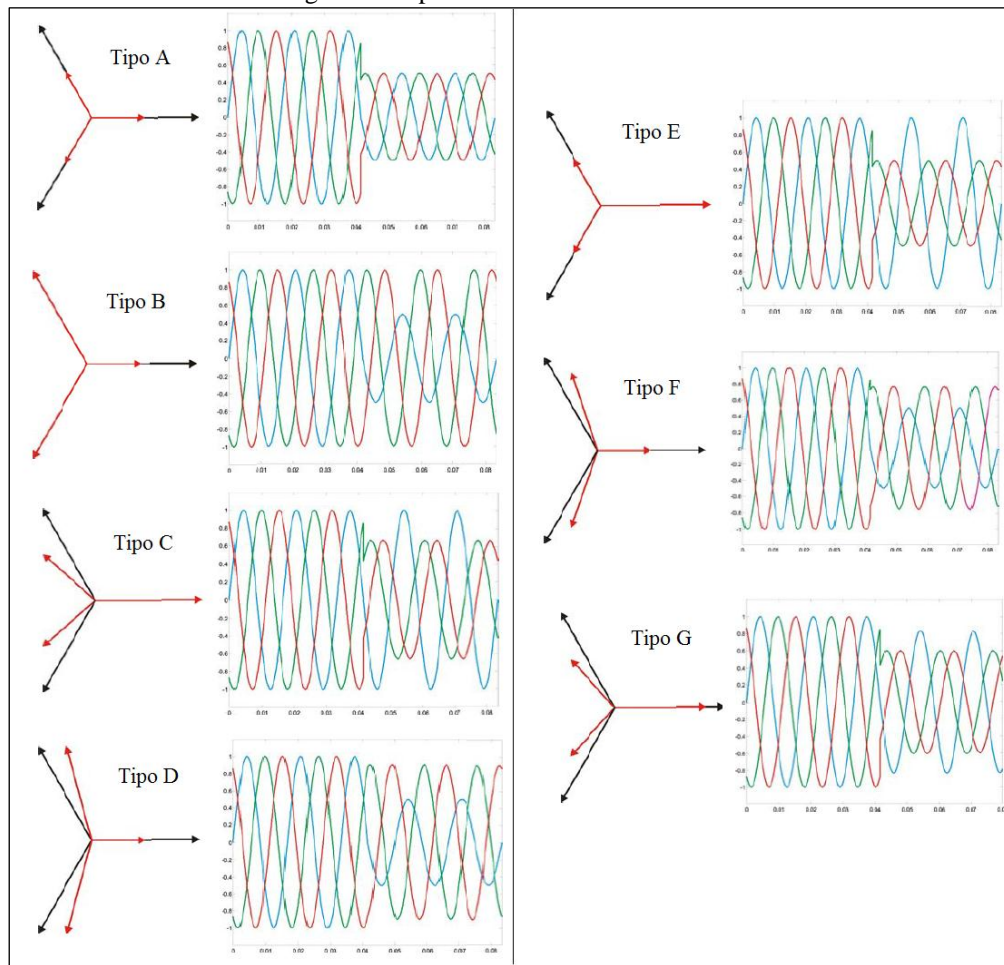


## 2.5 CLASSIFICAÇÃO

Uma das formas de se classificar os afundamentos de tensão é através da análise fasorial das tensões. Nesse método, proposto por (BOLLEN, 2000), consideram-se os afundamentos de tensão trifásicos como um evento combinado, único. Assim, o nível de tensão mais baixo e a maior duração podem ser escolhidos para caracterizar o afundamento de tensão trifásico. Para a classificação dos afundamentos de tensão, o método considera os tipos de falta, abordados na seção 2.4.1, as possíveis conexões dos transformadores, abordadas na seção 2.4.4, e o tipo de conexão dos equipamentos elétricos, estrela ou delta. A Figura 8 apresenta as possíveis classificações propostas por tal método.

Nos diagramas fasoriais da Figura 8, os fasores na cor preta representam as tensões pré-falta ao passo que os fasores em vermelho representam os afundamentos de tensão. As formas de onda das tensões no plano cartesiano auxiliam o entendimento.

Figura 8 - Tipos de afundamento de tensão.



Fonte: Adaptado de (CABRAL, 2010).

Os afundamentos de “Tipo A” são aqueles provenientes de faltas FFF ou FFFT, logo, são equilibrados e não sofrem influência do tipo de conexão do transformador e nem da carga.

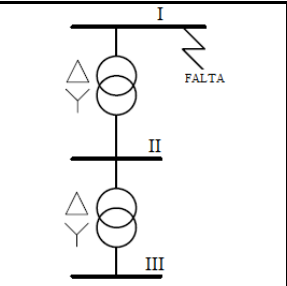
Os de “Tipo B” são provenientes de faltas FT cuja carga é conectada em Y.

Os de “Tipo C” por sua vez, também podem ser provenientes de faltas FT, no entanto, quando a carga está conectada em  $\Delta$ , ou ainda, quando há transformador do tipo  $\Delta - Y$  à montante de carga conectada em Y (no secundário). Este tipo de afundamento também é verificado em faltas FF quando a carga está conectada em Y ou quando está conectada em  $\Delta$  (à jusante de um transformador  $\Delta - Y$ ).

Os afundamentos de “Tipo D” podem ser provenientes de faltas FT quando a carga está conectada em  $\Delta$  e está à jusante de um transformador  $\Delta - Y$ , ou ainda, quando o afundamento se propaga por dois transformadores  $\Delta - Y$ . Esse tipo de afundamento também pode ser resultado de faltas FF quando a carga está conectada em  $\Delta$  ou quando o afundamento se propaga por um transformador  $\Delta - Y$  e a carga (conectada no secundário) está ligada em Y.

Os afundamentos “Tipo E”, “Tipo F” e “Tipo G” são, respectivamente, os equivalentes aos afundamentos de tipo “Tipo B”, “Tipo C” e “Tipo D” para faltas FFT. Para um melhor entendimento, a Tabela 4 ilustra exemplos de propagação de afundamentos de tensão por transformadores  $\Delta - Y$  conforme o tipo de falta.

Tabela 4 - Propagação de afundamentos de tensão através de transformadores  $\Delta - Y$ .

|  | Tipo de Afundamento de Tensão |         |          |           |
|---|-------------------------------|---------|----------|-----------|
|   | Tipo de Falta                 | Barra I | Barra II | Barra III |
| FFF ou FFFT   | A                             | A       | A        |           |
| FT  | B                             | C       | D        |           |
| FF  | C                             | D       | C        |           |
| FFT   | E                             | F       | G        |           |

Fonte: Adaptado de (LEBORGNE, 2007).

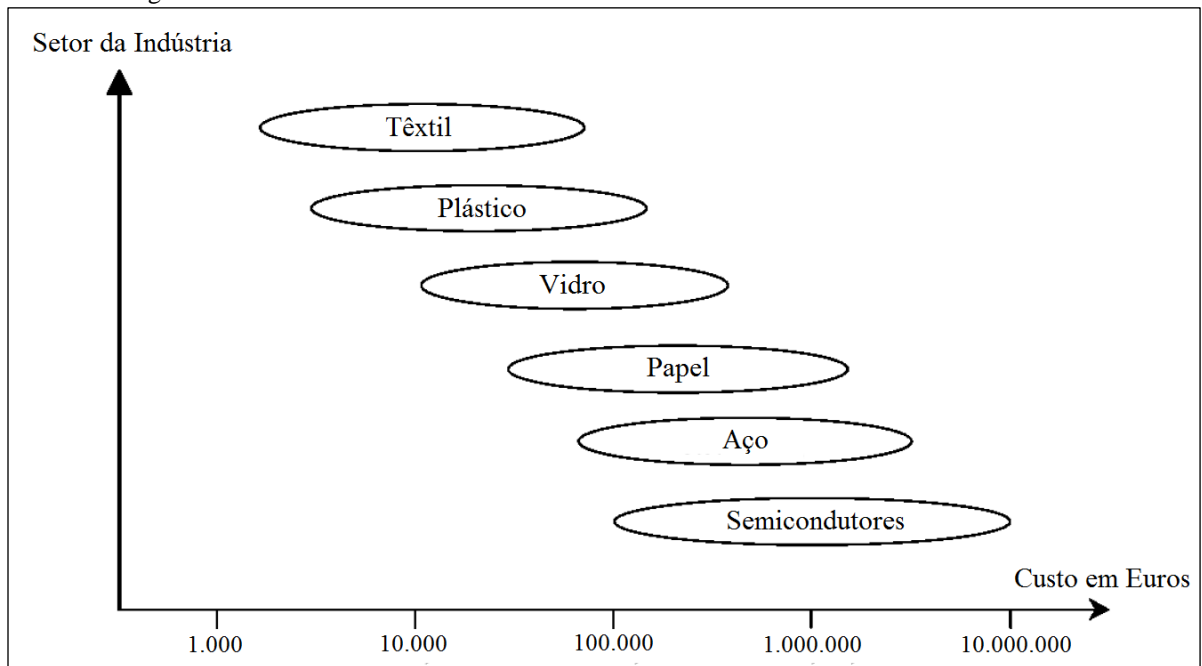
## 2.6 SENSIBILIDADE DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS

### 2.6.1 Processos Industriais

Os afundamentos de tensão podem afetar os processos industriais de maneiras diferentes em função da particularidade dos equipamentos que os compõem. No âmbito industrial, associados aos afundamentos de tensão estão: paradas de produção, perdas de produtividade, perdas de matérias-primas, reparo e reposição de equipamentos danificados, etc.. Como consequência a estes problemas, têm-se os custos associados. A Figura 9 ilustra os custos aproximados gerados por afundamentos de tensão em diferentes setores da indústria.

A Figura 9 ilustra, como mencionado anteriormente, a singularidade de cada setor da indústria. Muitos equipamentos sensíveis aos afundamentos de tensão são comuns a todos os setores apresentados. Alguns destes equipamentos são abordados nas seções que seguem.

Figura 9 - Custos associados a afundamentos de tensão em diferentes setores da indústria.



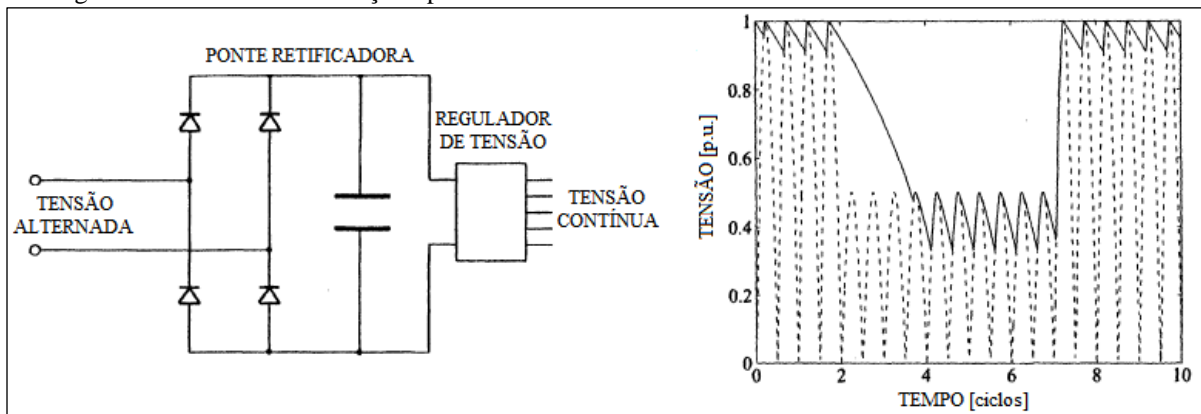
Fonte: Adaptado de (OLGUIN, 2005).

### 2.6.2 Computadores e Demais Equipamentos Eletrônicos

A fonte de alimentação dos equipamentos eletrônicos de baixa potência consiste basicamente na retificação e na regulação de tensão. Afundamentos na tensão de alimentação geram queda na tensão contínua que efetivamente alimenta o equipamento eletrônico. O regulador de tensão é responsável por mitigar as variações na tensão contínua, porém, conforme o nível do afundamento na tensão de alimentação, o equipamento pode parar seu funcionamento ou por auto desligamento, como medida de segurança, ou por falha de seus componentes. A Figura 10 ilustra uma configuração típica de fonte de alimentação de tensão contínua bem como as formas de onda de suas tensões de entrada e saída durante um afundamento de tensão.

Na Figura 10, a forma de onda em linha tracejada representa a tensão de entrada da fonte de alimentação. A tensão contínua de saída, por sua vez, está representada em linha contínua.

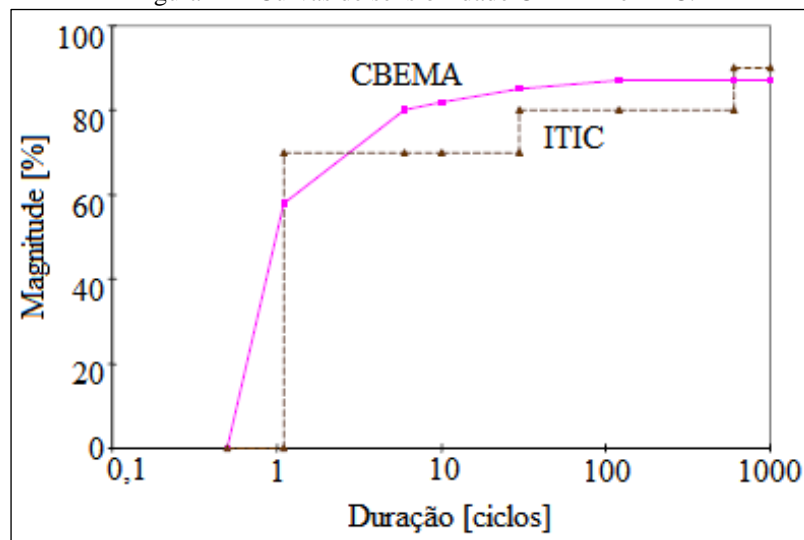
Figura 10 - Fonte de alimentação típica e tensões de entrada e saída durante um afundamento de tensão.



Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

A sensibilidade destes equipamentos frente afundamentos de tensão é tipicamente representada por duas curvas: CBEMA e ITIC. A curva CBEMA foi desenvolvida nos anos 1970 pela *Business Equipment Manufacturers Association* e ainda é muito utilizada nos dias atuais. Nos anos 1990 a curva CBEMA foi atualizada para melhor representar a sensibilidade dos equipamentos eletrônicos. Essa nova curva é conhecida como curva ITIC e foi proposta pelo *Information Technology Industry Council* (BOLLEN, 2000). A Figura 11 apresenta ambas as curvas.

Figura 11 - Curvas de sensibilidade CBEMA e ITIC.



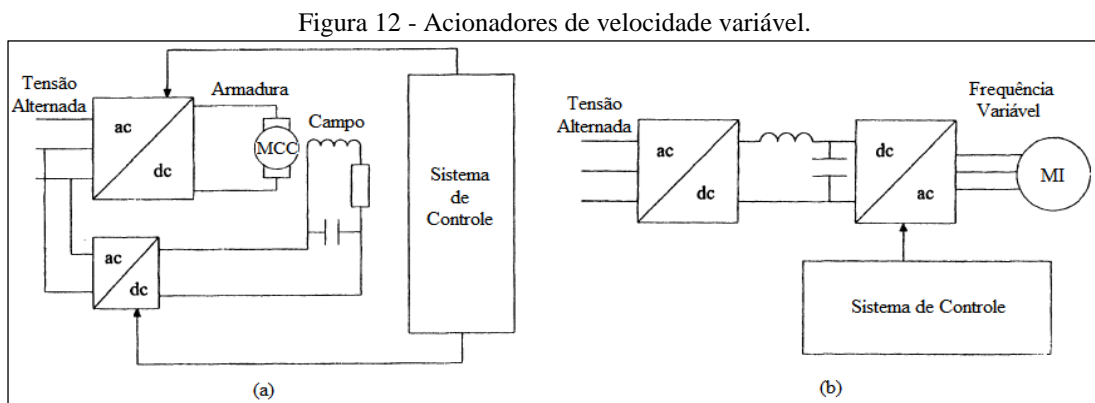
Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

As curvas apresentadas na Figura 11 foram criadas para caracterizar a sensibilidade de computadores em que pontos de operação abaixo das curvas representam o não funcionamento do equipamento. Nos dias atuais, ambas as curvas são utilizadas como referência para se

representar a sensibilidade de diversos equipamentos eletrônicos, como por exemplo, CLP's e outros dispositivos microprocessados.

### 2.6.3 Acionadores de Velocidade Variável (AVV's)

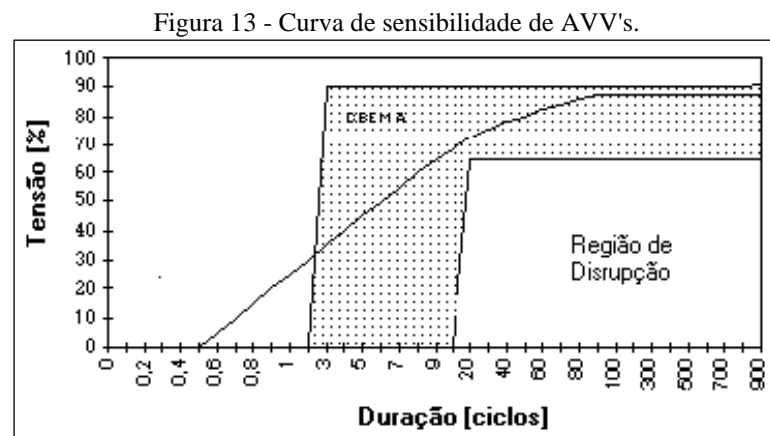
Os acionadores de velocidade variável (AVV's) podem alimentar motores tanto de corrente contínua quanto de corrente alternada e, em ambos os casos, quando da ocorrência de um afundamento de tensão, pode ocorrer o desligamento destes equipamentos. A Figura 12 apresenta de maneira simplificada a aplicação destes dispositivos.



Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

Na Figura 12, o esquemático (a) ilustra um exemplo de acionamento CC no qual o AVV aciona um motor de corrente contínua. Já o esquemático (b), apresenta um acionamento CA em que o AVV alimenta um motor de indução trifásico.

Por se tratarem de equipamentos eletroeletrônicos, os AVV's apresentam curva de sensibilidade semelhante às curvas apresentadas na Figura 11 conforme ilustra a Figura 13.



Fonte: (CARVALHO, 2000).

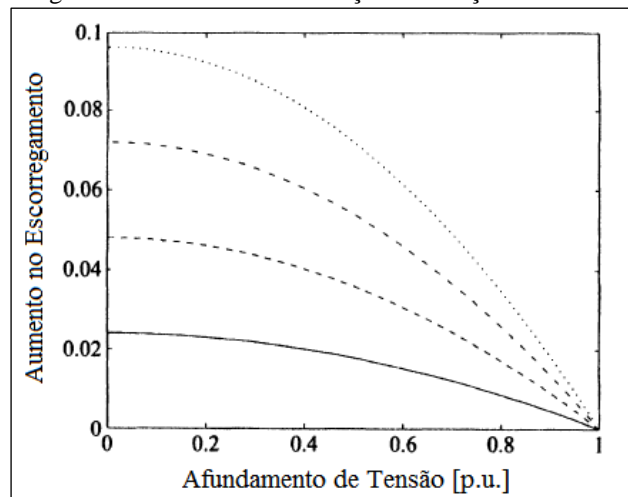


Na Figura 13, a região denominada de interrupção é onde o equipamento certamente irá falhar. A área hachurada representa uma região de incerteza em que o funcionamento do equipamento dependerá de características próprias (modelo, fabricante, etc.). Por fim, a região acima da área hachurada refere-se à normal operação do equipamento.

#### 2.6.4 Motor de Indução

Apesar da utilização massiva de AVV's, grande parte dos motores de indução é alimentada diretamente, ou seja, com tensão e frequência constantes. Neste caso, o motor de indução caracteriza-se pela baixa sensibilidade a afundamentos de tensão, sendo raros os casos em que há a parada do motor. No entanto, os afundamentos de tensão podem provocar perdas de torque e velocidade, prejudicando o processo no qual o motor está inserido. Como o torque é proporcional ao quadrado da tensão, afundamentos de 0,70 p.u. ou maiores podem não conduzir o motor a um novo ponto estável de operação (BOLLEN, 2000). A Figura 14 apresenta a influência dos afundamentos de tensão no escorregamento de motores de indução.

Figura 14 - Escorregamento de motores de indução em função de afundamentos de tensão.



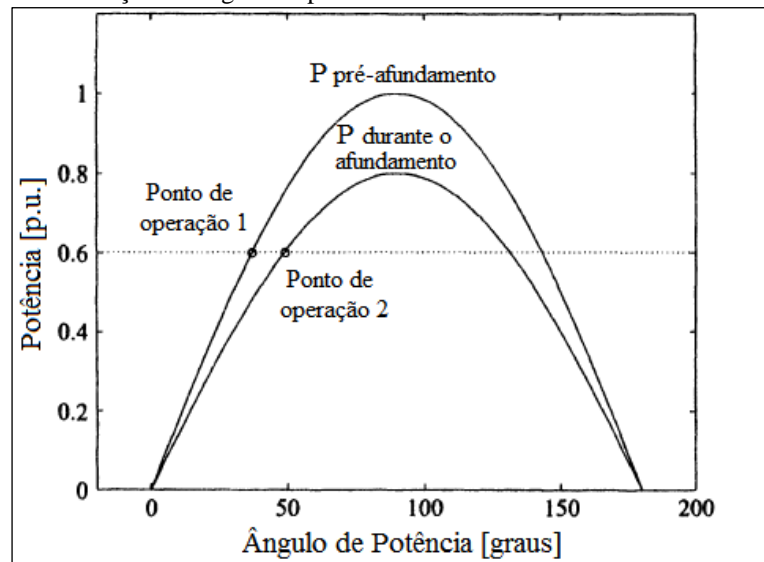
Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

Observando a Figura 14, percebe-se que quanto mais severo é o afundamento de tensão, maior é o aumento do escorregamento, e conseqüentemente, maiores são as perdas de torque e velocidade. As curvas representam afundamentos de tensão de diferentes durações. Da curva em linha contínua à curva de linha pontilhada, têm-se afundamentos de tensão com durações que vão de 50 a 200 milissegundos respectivamente.

### 2.6.5 Motor Síncrono

Os motores síncronos apresentam problemas similares aos motores de indução no que diz respeito aos afundamentos de tensão. Contudo, há um problema característico dessas máquinas: a perda de sincronismo em relação ao sistema elétrico. Para o motor síncrono se manter no mesmo ponto de operação (potência constante), ao ocorrer um afundamento de tensão, o ângulo de potência aumenta, podendo ultrapassar o limite de estabilidade ( $90^\circ$ ). A Figura 15 apresenta de forma gráfica o supracitado.

Figura 15 - Variação do ângulo de potência em detrimento ao afundamento de tensão.



Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

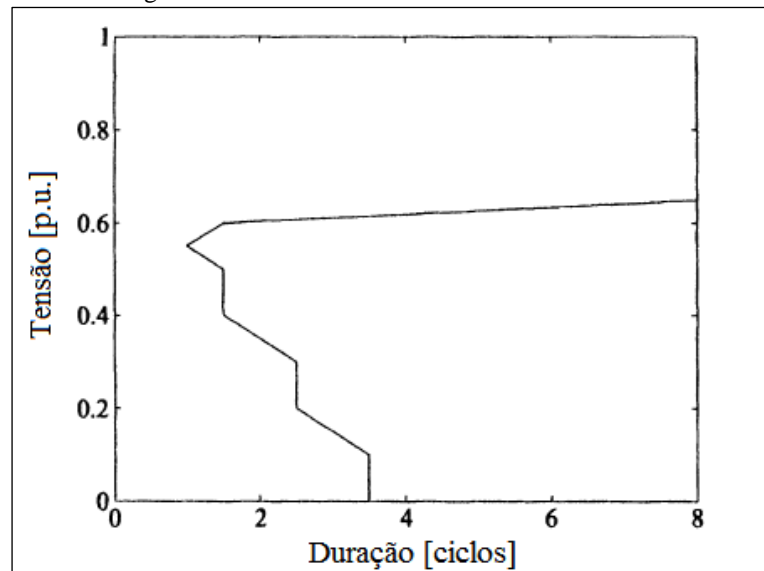
Ao observar a Figura 15, percebe-se que ao ocorrer o afundamento de tensão, o ponto de operação se desloca do 'Ponto 1' para o 'Ponto 2' a fim de se manter com a mesma potência. Em consequência disso, observa-se um aumento no ângulo de potência. Em determinados casos, o afundamento de tensão pode provocar um deslocamento no ângulo de potência que ultrapassa o ângulo limite, acarretando então, a perda de sincronismo.

### 2.6.6 Contatores

Contatores e relés auxiliares são os principais componentes utilizados nos circuitos de força e de comando dos motores instalados nos processos industriais (LEBORGNE, 2003). Em função disso, o conhecimento da sensibilidade desses equipamentos se faz importante. A curva de sensibilidade de contatores varia de acordo com o fabricante, severidade e duração

do afundamento e ângulo de fase da tensão pré-falta. A Figura 16 traz um exemplo de curva de sensibilidade de contadores.

Figura 16 - Curva de sensibilidade de um contador.



Fonte: Adaptado de (BOLLEN, 2000).

Ao se observar a Figura 16, percebe-se que os contadores tendem a não suportar afundamentos de tensão de intensidade inferior à 0,60 p.u. a não ser nos casos em que a duração do afundamento é muito breve. Nesses casos, os contadores podem suportar até mesmo interrupções (tensão remanescente menor que 0,10 p.u.).

### 2.6.7 Lâmpadas

As lâmpadas são consideradas cargas relevantes quando se analisa afundamentos de tensão uma vez que constituem a iluminação desde instalações residenciais até instalações industriais. Nas lâmpadas, os afundamentos de tensão podem ser verificados pela diminuição do brilho ou até mesmo através de desligamento. A influência dos afundamentos de tensão na iluminação não afeta diretamente os processos industriais, no entanto, o desligamento de lâmpadas pode tornar o ambiente industrial perigoso, principalmente quando da utilização de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que levam alguns minutos para reacenderem. É válido ressaltar também, a importância da manutenção da iluminação em lugares públicos, onde há grande circulação de pessoas.

### 3 CÁLCULO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

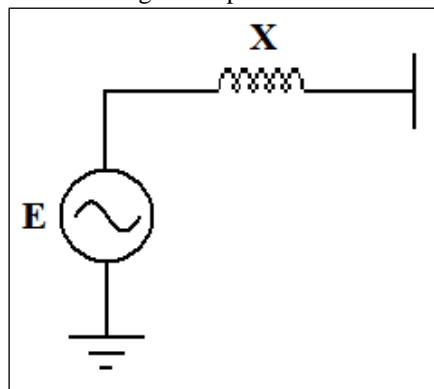
#### 3.1 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Para o cálculo dos afundamentos de tensão, deve-se definir modelos que representem os equipamentos que compõem o sistema elétrico. A rigorosidade do modelo varia conforme o tipo de estudo a que se propõe. Os modelos apresentados nesta seção visam o cálculo de afundamentos de tensão causados por faltas em regime permanente senoidal.

##### 3.1.1 Gerador

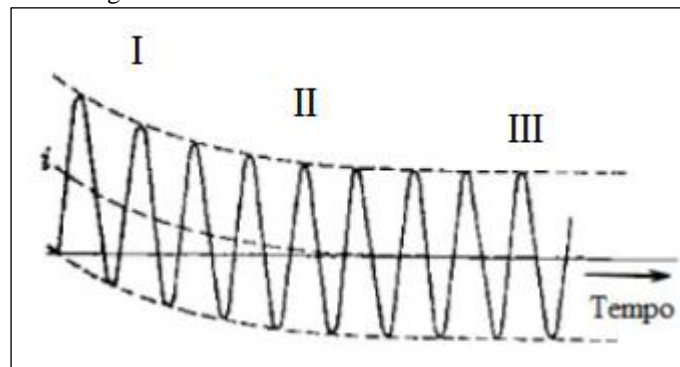
Em máquinas elétricas, os fenômenos transitórios são estudados por meio de modelos que condensam os efeitos dos enrolamentos representados pelos eixos direto e em quadratura. Para o estudo de curto circuito, é amplamente utilizado um modelo simplificado no qual consiste em uma fonte de tensão seguida de uma reatância conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Modelo de gerador para o cálculo de curto circuito.



Na ocorrência de um curto circuito nos terminais de um gerador, em função da reação de armadura, a corrente apresenta uma componente oscilatória superposta a uma componente de corrente contínua, que depende do instante de aplicação do curto circuito, ou seja, das condições pré-falta. A Figura 18 apresenta a corrente de curto circuito de uma falta trifásica nos terminais de um gerador síncrono.

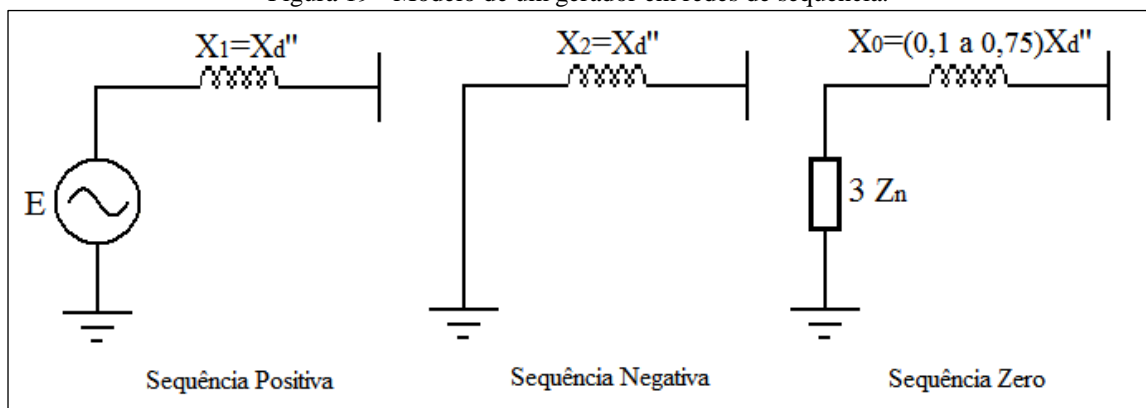
Figura 18 - Corrente de curto circuito assimétrica.



Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2006).

Observando a Figura 18, percebe-se que a forma de onda da corrente é delimitada por três regiões distintas I, II e III que são chamadas de, respectivamente, subtransitória, transitória e de regime permanente. Para o estudo de curto circuito, é importante conhecer a corrente no instante subtransitório uma vez que é nesse instante que ela apresenta maior módulo. Com o intuito de se representar essa variação na amplitude da corrente, no modelo simplificado supracitado, considera-se que a reatância ligada em série com o gerador varia com o passar do tempo, tendo seu menor valor no intervalo de tempo representado por "I". De maneira análoga à corrente, a reatância no estágio I é conhecida como reatância subtransitória. É válido ressaltar que para o estudo de curto circuito utilizam-se apenas as componentes de eixo direto dada a natureza preponderantemente desmagnetizante do curto circuito. Considerando a representação por redes de seqüência, a modelagem de um gerador é composta pelos três modelos expostos na Figura 19.

Figura 19 - Modelo de um gerador em redes de seqüência.

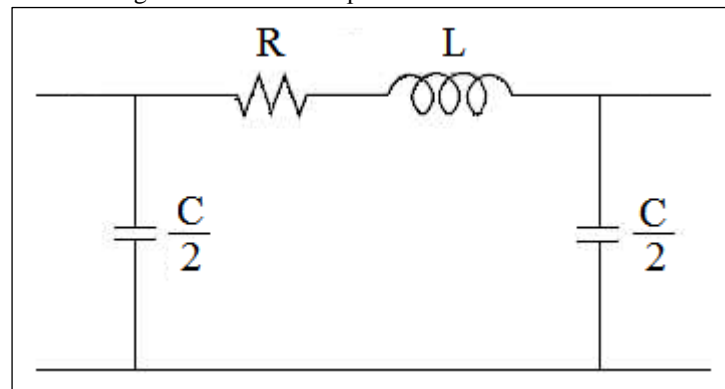


Na Figura 19,  $X_d''$  representa a reatância subtransitória de eixo direto, ao passo que  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_0$  representam as reatâncias de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente.

### 3.1.2 Linha de Transmissão

Quando se trabalha com sistemas elétricos de potência, onde predominam linhas de transmissão com níveis de tensão elevados e de grande comprimento, utiliza-se como modelo a representação em  $\pi$ . O modelo  $\pi$ , dependendo do grau de precisão que se pretende obter, é elaborado de formas diferentes. A forma mais utilizada em análise de sistemas de potência é o modelo  $\pi$  com parâmetros concentrados. Esse modelo é exposto na Figura 20.

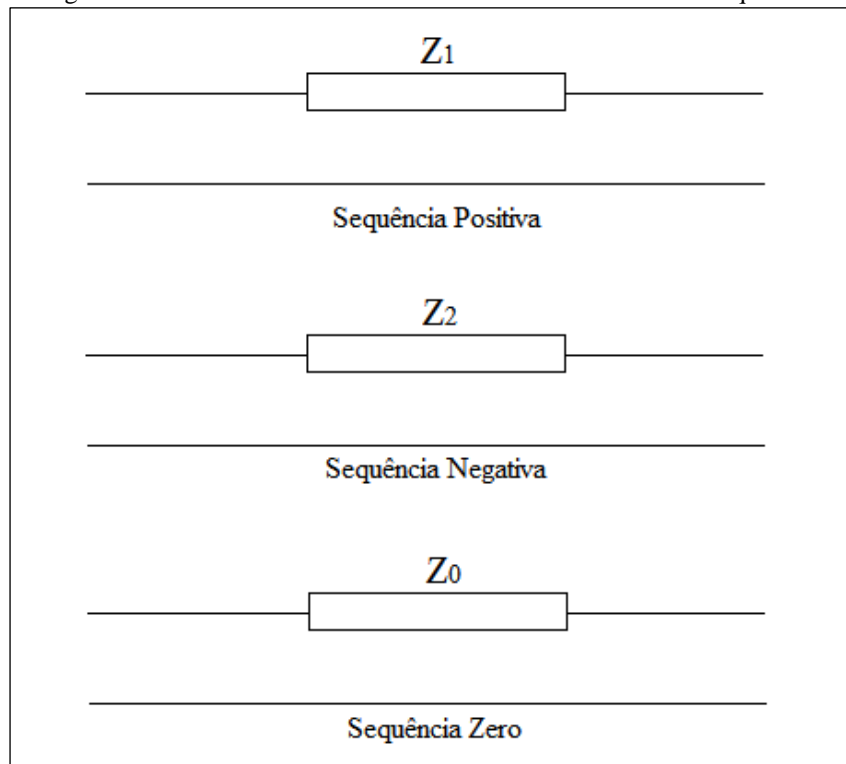
Figura 20 - Modelo  $\pi$  para linhas de transmissão.



Na Figura 20,  $R$ ,  $L$  e  $C$  são a resistência, a indutância e capacitância da linha, respectivamente. Em estudos de curto circuito, pode-se desconsiderar a capacitância da linha sem influenciar de forma significativa a precisão do modelo (GRAINGER; STEVENSON, 1994; ZANETTA, 2006). A Figura 21 traz os modelos em rede de sequência utilizados no cálculo de curto circuito.

Na Figura 21,  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_0$  representam, respectivamente, as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero da linha de transmissão. As impedâncias positiva e negativa são iguais, já a impedância de sequência zero, apresenta maior valor, tipicamente de duas à seis vezes o valor das demais.

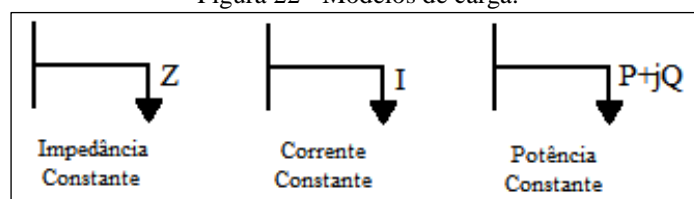
Figura 21 - Modelos de uma linha de transmissão em redes de seqüência.



### 3.1.3 Carga

O comportamento das cargas ao ocorrer um curto circuito é uma questão relativamente complexa e depende das peculiaridades de cada uma delas. De forma genérica, se trabalha com três diferentes tipos de cargas conforme ilustra a Figura 22.

Figura 22 - Modelos de carga.



Quando se propõe a predição de afundamentos de tensão por meio do estudo de curto circuito no sistema elétrico de potência, tem-se como prática comum considerar o sistema elétrico sem carga. Um sistema com esta característica é denominado de *flat* e a sua utilização não resulta em erros expressivos.

### 3.1.4 Transformador

O modelo para transformadores consiste apenas em uma impedância série. Quando se trabalha com valores por unidade (p.u.), esta impedância é a mesma, independentemente se vista do primário ou do secundário. Na representação por redes de sequência, de forma análoga às linhas de transmissão, a impedância de sequência positiva é igual à de sequência negativa. Por outro lado, a impedância de sequência zero apresenta tipicamente valores maiores e sua ligação varia conforme o tipo de conexão do transformador, conforme exposto na seção 2.4.4 e ilustrado pela Figura 6.

Como mencionado anteriormente, as faltas são a principal causa de afundamentos de tensão, e por esse motivo, é com base nos seus métodos de cálculo que os afundamentos de tensão são preditos. Pode-se dividir a predição dos afundamentos de tensão em duas análises distintas: predição da magnitude do afundamento e predição do número de ocorrências. Ambas, atreladas à ocorrência do curto-circuito.

## 3.2 CÁLCULO DA MAGNITUDE

Para se analisar as consequências na magnitude da tensão através da ocorrência de um curto circuito, deve-se considerar duas condições distintas: pré-falta e puramente faltosa. A determinação dos afundamentos de tensão segue este pressuposto e, portanto, eles são definidos como a soma ou a superposição das condições pré-falta e puramente faltosa. A equação (1) ilustra essa definição.

$$V = V_{pf} + V_f \quad (1)$$

Onde:

$V$  é o afundamento de tensão;

$V_{pf}$  é a tensão pré-falta;

$V_f$  é tensão puramente faltosa.

A tensão pré-falta ( $V_{pf}$ ) é a tensão no regime permanente anterior à ocorrência da falta. Partindo do princípio que se trabalha com sistemas elétricos equilibrados,  $V_{pf}$  apresenta apenas componente de sequência positiva e independe do tipo de falta. A tensão puramente



faltosa ( $V_f$ ) é a tensão gerada apenas pela ocorrência da falta, logo, está diretamente relacionada ao tipo de falta, e conseqüentemente, pode ser composta por diferentes sequências. As equações (2) e (3) apresentam o supracitado.

$$\begin{bmatrix} V_{pf}^0 \\ V_{pf}^1 \\ V_{pf}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{pf} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_f^0 \\ V_f^1 \\ V_f^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f^0 \\ I_f^1 \\ I_f^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$V_{pf}^0$ ,  $V_{pf}^1$  e  $V_{pf}^2$  são as tensões pré-falta de sequência zero, positiva e negativa;

$V_f^0$ ,  $V_f^1$  e  $V_f^2$  são as tensões puramente faltosas de sequência zero, positiva e negativa;

$Z^0$ ,  $Z^1$  e  $Z^2$  são as impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência zero, positiva e negativa vistas do ponto da falta;

$I_f^0$ ,  $I_f^1$  e  $I_f^2$  são as correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa.

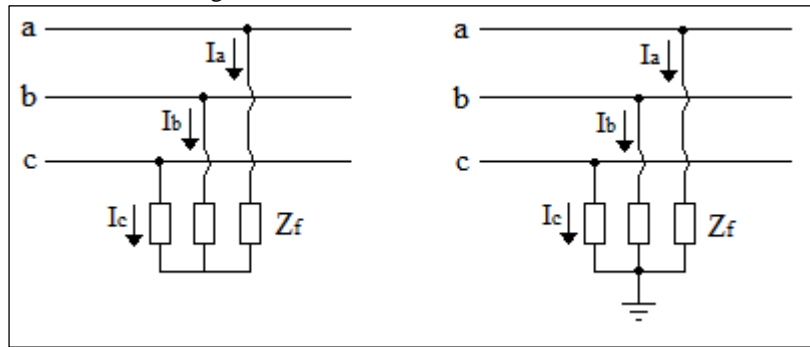
Das equações (2) e (3) tem-se que a corrente de curto circuito se apresenta como a única variável uma vez que a impedância equivalente de Thévenin e a tensão pré-falta são inerentes à condição anterior à ocorrência do curto circuito. Portanto, a determinação dos fundamentos de tensão parte do conhecimento da corrente de falta.

### 3.2.1 Falta Trifásica

A falta trifásica é aquela cuja condição faltosa envolve as três fases de um sistema, podendo ser ligada à terra ou não. Esse tipo de falta é ilustrado pela Figura 23.

Dada a condição equilibrada das faltas FFF e FFFT, para a sua análise, considera-se apenas a componente de sequência positiva dos elementos. Com base na Figura 23 chega-se às condições de contorno para o cálculo da corrente de falta conforme apresenta a equação (4).

Figura 23 - Falta simétrica, FFF e FFFT.



$$\begin{cases} I_a^0 = I_a^2 = 0 \\ V_a = V_b = V_c = 0 \\ I_a + I_b + I_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Onde:

$I_a^0$  e  $I_a^2$  são as correntes de sequência zero e negativa na fase  $a$ ;

$V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são as tensões de fase;

$I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são as correntes de fase.

Aplicando as condições de contorno nas equações (1), (2) e (3) conforme a equação (5), obtém-se enfim, a corrente de falta para faltas FFF e FFFT como ilustra a equação (6).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{pf} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_a^1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$I_a^1 = I_f = \frac{V_{pf}}{Z^1 + Z_f} \quad (6)$$

Onde:

$V_a^0$ ,  $V_a^1$  e  $V_a^2$  são as tensões de sequência zero, positiva e negativa na fase  $a$ ;

$Z_f$  é a impedância de falta;

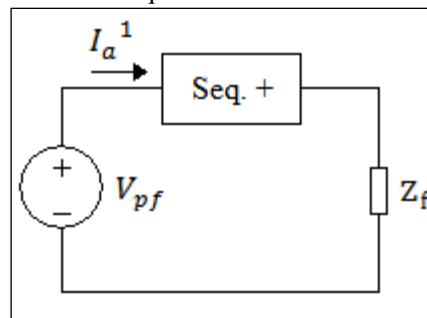
$I_f$  é a corrente de falta.

A partir da obtenção da corrente de falta, os afundamentos de tensão podem ser obtidos por dois métodos distintos: analítico e matricial.

### 3.2.1.1 Método Analítico

O método analítico consiste na solução do sistema pré-falta e puramente faltoso por meio da análise de circuitos, o que é viável apenas para a análise de sistemas pequenos. Observando a equação (6), pode-se representar o sistema puramente faltoso pelo circuito exposto na Figura 24.

Figura 24 - Circuito equivalente à uma falta FFF ou FFFT.



No circuito da Figura 24, o bloco conectado em série com a fonte de tensão  $V_{pf}$  representa um sistema elétrico qualquer composto por  $n$  barras. Portanto, deste circuito, pode-se obter a tensão puramente faltosa de qualquer barramento que porventura o compõe. Sendo as tensões pré-falta conhecidas de antemão, obtêm-se os afundamentos de tensão por meio da equação (1) anteriormente abordada.

### 3.2.1.2 Método Matricial

O cálculo matricial é comumente utilizado para estudos de curto circuito de grandes sistemas em razão de sua praticidade. Esse método consiste, primeiramente, na obtenção da matriz admitância de barras  $[Y]$ . Essa matriz é constituída pelas admitâncias entre as barras e as admitâncias próprias (diagonal principal). No entanto, para o cálculo das correntes de curto circuito, e conseqüentemente, dos afundamentos de tensão, faz-se uso da matriz impedância de barras  $[Z]$  que nada mais é do que a matriz inversa da matriz admitância de barras desconsiderando-se os acoplamentos mútuos. Por esse método, a resolução do sistema puramente faltoso proposto pela Figura 24 é substituída pela utilização da matriz  $[Z]$  conforme demonstra a equação (7).

$$\begin{bmatrix} V_{f1}^1 \\ \vdots \\ V_{fk}^1 \\ \vdots \\ V_{fn}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^1 & \dots & Z_{1k}^1 & \dots & Z_{1n}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^1 & \dots & Z_{kk}^1 & \dots & Z_{kn}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^1 & \dots & Z_{nk}^1 & \dots & Z_{nn}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_{fk}^1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde:

$V_{fi}^1$  é a tensão puramente faltosa de sequência positiva em uma barra  $i$ , sendo  $1 \leq i \leq n$ ;

$I_{fk}^1$  é a corrente de falta de sequência positiva na barra faltosa  $k$ ;

$z_{ij}^1$  é o elemento da matriz impedância de barra de sequência positiva, sendo  $1 \leq i \leq n$  e  $1 \leq j \leq n$ .

Pelo método matricial, a obtenção da corrente de falta  $I_{fk}^1$  presente na equação (7) se dá pela adaptação da equação (6) conforme apresenta a equação (8).

$$I_a^1 = I_{fk}^1 = \frac{V_{pfk}}{Z_{kk}^1 + Z_f} \quad (8)$$

Onde:

$V_{pfk}$  é a tensão pré-falta no barramento  $k$ ;

$Z_{kk}$  é a impedância equivalente de Thévenin vista da barra  $k$ .

Para a obtenção dos afundamentos de tensão pelo método matricial, basta seguir a definição apresentada na equação (1) utilizando a equação (7). Tal procedimento é exposto pela equação (9).

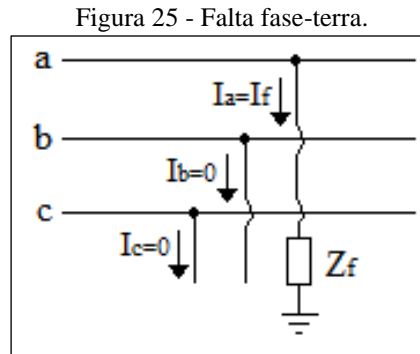
$$\begin{bmatrix} V_1^1 \\ \vdots \\ V_k^1 \\ \vdots \\ V_n^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p1}^1 \\ \vdots \\ V_{pfk}^1 \\ \vdots \\ V_{pn}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11}^1 & \dots & Z_{1k}^1 & \dots & Z_{1n}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^1 & \dots & Z_{kk}^1 & \dots & Z_{kn}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^1 & \dots & Z_{nk}^1 & \dots & Z_{nn}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{fk}^1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde:

$V_i^1$  é o afundamento de tensão na barra  $i$ , sendo  $1 \leq i \leq n$ .

### 3.2.2 Falta Fase-terra

A falta monofásica, ou fase-terra (FT), é aquela cuja condição faltosa envolve uma das fases e a terra. A Figura 25 ilustra uma falta monofásica envolvendo a fase  $a$ .



Ao observar a Figura 25, verifica-se o caráter desequilibrado da falta. Em função disso, e por envolver a terra, para a sua análise consideram-se as componentes de sequência positiva, negativa e zero. Com base na Figura 25, chega-se às condições de contorno para o cálculo da corrente de falta conforme apresenta a equação (10).

$$\begin{cases} I_b = I_c = 0 \\ V_a = I_a Z_f \end{cases} \quad (10)$$

Por componentes simétricas e considerando as condições de contorno, a equação (11) define a corrente de sequência na fase  $a$ .

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

$\alpha$  é um operador cujo valor é  $1 \angle 120^\circ$ .

Aplicando as condições de contorno, bem como o obtido pela equação (11), nas equações (1), (2) e (3) conforme a equação (12), obtém-se enfim, a corrente de falta para faltas FT como ilustra a equação (13).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{pf} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^1 \\ I_a^1 \\ I_a^1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

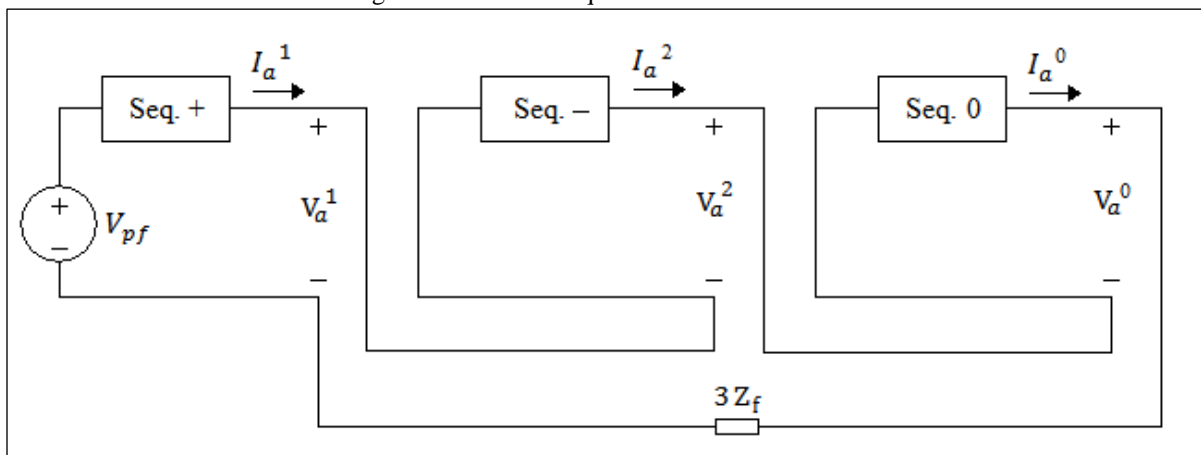
$$I_a^1 = I_f^1 = \frac{V_{pf}}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f} \quad (13)$$

De forma análoga ao caso anterior, a partir da obtenção da corrente de falta, os afundamentos de tensão podem ser obtidos por dois métodos distintos: analítico e matricial.

### 3.2.2.1 Método Analítico

Observando a equação (13), pode-se representar o sistema puramente faltoso para faltas FT pelo circuito exposto na Figura 26.

Figura 26 - Circuito equivalente à uma falta FT.



No circuito da Figura 26, os blocos conectados em série com a fonte de tensão  $V_{pf}$  representam um sistema elétrico qualquer composto por  $n$  barras por redes de sequência. Portanto, deste circuito, pode-se obter as tensões puramente faltosas das  $n$  barras. Sendo as tensões pré-falta conhecidas de antemão, obtêm-se os afundamentos de tensão por meio da equação (1) anteriormente abordada.

### 3.2.2.2 Método Matricial

Como abordado na seção anterior, para o estudo de curto circuito FT, consideram-se as componentes de sequência positiva, negativa e zero. De forma análoga ocorre com o método matricial em que se utilizam as matrizes admitância e impedância de barras nas três diferentes seqüências. Por esse método, a resolução do sistema puramente faltoso proposto pela Figura 26 é substituída pela utilização da matriz  $[Z]$  nas diferentes seqüências conforme demonstra a equação (14).

$$\begin{bmatrix} V_{f1}^s \\ \vdots \\ V_{fk}^s \\ \vdots \\ V_{fn}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^s & \dots & Z_{1k}^s & \dots & Z_{1n}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^s & \dots & Z_{kk}^s & \dots & Z_{kn}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^s & \dots & Z_{nk}^s & \dots & Z_{nn}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_{fk}^s \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

$V_{fi}^s$  é a tensão puramente faltosa em uma barra  $i$  na seqüência  $s$ , sendo  $1 \leq i \leq n$  e  $s = \{0,1,2\}$ ;

$I_{fk}^s$  é a corrente de falta da barra faltosa  $k$  na seqüência  $s$ , sendo  $s = \{0,1,2\}$ ;

$z_{ij}^s$  é o elemento da matriz impedância de barra na seqüência  $s$ , sendo  $1 \leq i \leq n$ ,  $1 \leq j \leq n$  e  $s = \{0,1,2\}$ .

Pelo método matricial, a obtenção da corrente de falta  $I_{fk}^s$  presente na equação (14) se dá pela adaptação da equação (13) conforme apresenta a equação (15).

$$I_a^s = I_{fk}^s = \frac{V_{pfk}}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_f} \quad (15)$$

Para a obtenção dos afundamentos de tensão pelo método matricial, basta seguir a definição apresentada na equação (1) utilizando a equação (14). Tal procedimento é exposto pela equação (16).

$$\begin{bmatrix} V_{a1}^s \\ \vdots \\ V_{ak}^s \\ \vdots \\ V_{an}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p f 1}^1 \\ \vdots \\ V_{p f k}^1 \\ \vdots \\ V_{p f n}^1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11}^s & \dots & Z_{1k}^s & \dots & Z_{1n}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^s & \dots & Z_{kk}^s & \dots & Z_{kn}^s \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^s & \dots & Z_{nk}^s & \dots & Z_{nn}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{fk}^s \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Onde:

$V_{ai}^s$  é o afundamento de tensão na fase  $a$  da barra  $i$  na sequência  $s$  sendo,  $1 \leq i \leq n$  e  $s = \{0,1,2\}$ .

É válido ressaltar que a tensão pré-falta é considerada apenas para a obtenção do afundamento de tensão de sequência positiva. Uma vez obtidos os afundamentos de tensão em componentes de sequência, para conhecer os afundamentos nas fases de determinada barra, basta utilizar a definição de componentes simétricas como ilustra a equação (17).

$$\begin{bmatrix} V_{ai} \\ V_{bi} \\ V_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ai}^0 \\ V_{ai}^1 \\ V_{ai}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

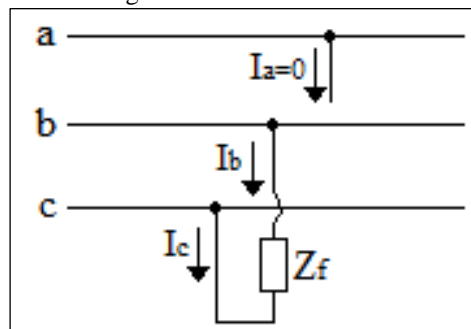
Onde:

$V_{ai}$ ,  $V_{bi}$  e  $V_{ci}$  são os afundamentos de tensão nas fases da barra  $i$  sendo,  $1 \leq i \leq n$ .

### 3.2.3 Falta Fase-fase

A falta fase-fase (FF) é aquela cuja condição faltosa envolve duas fases quaisquer de um sistema. A Figura 27 ilustra uma falta bifásica envolvendo as fases  $b$  e  $c$ .

Figura 27 - Falta fase-fase.





Ao observar a Figura 27 verifica-se que esse tipo de falta não envolve a terra, logo, para a sua análise, consideram-se apenas as componentes de sequência positiva e negativa. Com base na Figura 27, chega-se às condições de contorno para o cálculo da corrente de falta conforme apresenta a equação (18).

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = -I_c \\ V_b = V_c \end{cases} \quad (18)$$

Por componentes simétricas e considerando as condições de contorno, a equação (19) define a corrente de sequência na fase  $a$ .

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_a^1 \\ -I_a^1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Aplicando as condições de contorno, bem como o obtido pela equação (19), nas equações (1), (2) e (3) conforme a equação (20), obtém-se enfim, a corrente de falta para faltas FF como ilustra a equação (21).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{pf} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_a^1 \\ -I_a^1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

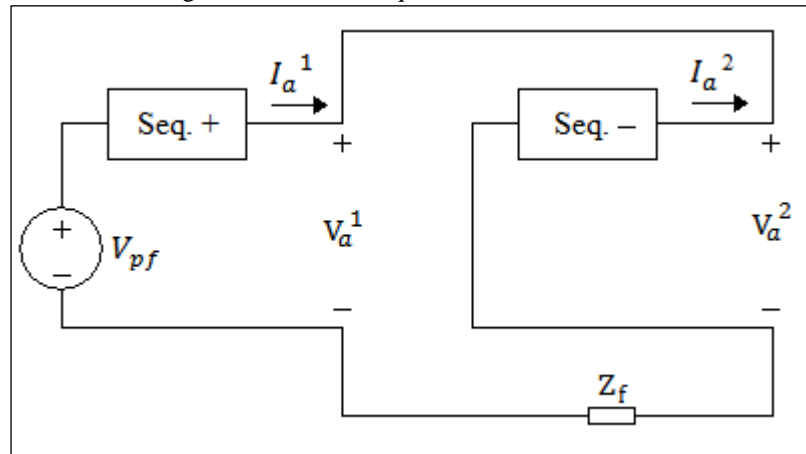
$$I_a^1 = -I_a^2 = I_f^1 = \frac{V_{pf}}{Z^1 + Z^2 + Z_f} \quad (21)$$

De forma análoga aos demais casos, a partir da obtenção da corrente de falta, os afundamentos de tensão podem ser obtidos por dois métodos distintos: analítico e matricial.

### 3.2.3.1 Método Analítico

Observando a equação (21), pode-se representar o sistema puramente faltoso para faltas FF pelo circuito exposto na Figura 28.

Figura 28 - Circuito equivalente à uma falta FF.



No circuito da Figura 28, os blocos conectados em série com a fonte de tensão  $V_{pf}$  representam um sistema elétrico qualquer composto por  $n$  barras por redes de sequência positiva e negativa. Portanto, deste circuito, pode-se obter as tensões puramente faltosas das  $n$  barras. Sendo as tensões pré-falta conhecidas de antemão, obtêm-se os afundamentos de tensão por meio da equação (1) anteriormente abordada.

### 3.2.3.2 Método Matricial

Como já demonstrado, para o estudo de curto circuito FF, consideram-se apenas as componentes de sequência positiva e negativa. De forma análoga ocorre com o método matricial em que se utilizam as matrizes admitância e impedância de barra nessas sequências. Por esse método, a resolução do sistema puramente faltoso proposto pela Figura 28 é substituída pela utilização da matriz  $[Z]$  nas sequências positiva e negativa, ou seja, utiliza-se a equação (14) com  $s$  pertencente ao conjunto  $\{1,2\}$ .

Pelo método matricial, a obtenção da corrente de falta  $I_{fk}^s$  presente na equação (14) se dá pela adaptação da equação (21) conforme apresenta a equação (22).

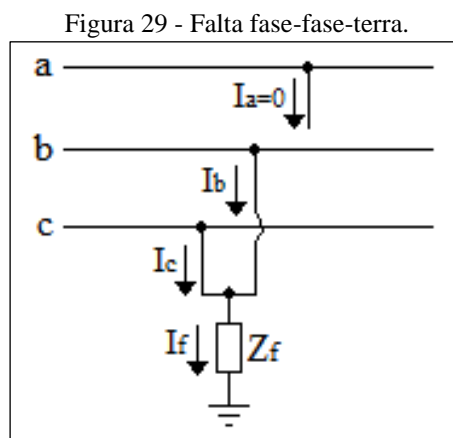
$$I_a^1 = -I_a^2 = I_{fk}^1 = \frac{V_{pf}}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_f} \quad (22)$$

Para a obtenção dos afundamentos de tensão pelo método matricial, basta adaptar a equação (16) desconsiderando  $s$  igual a zero.

Uma vez obtidos os afundamentos de tensão em componentes de seqüência, para conhecer os afundamentos nas fases de determinada barra, basta utilizar a definição de componentes simétricas como ilustra a equação (17).

### 3.2.4 Falta Fase-fase-terra

A falta fase-fase-terra (FFT) é aquela cuja condição faltosa envolve duas fases quaisquer de um sistema e a terra. A Figura 29 ilustra um curto circuito envolvendo as fases *b* e *c* e a terra.



Pelo caráter desequilibrado da falta e por envolver a terra, para a sua análise, consideram-se as componentes de seqüência positiva, negativa e zero. Com base na Figura 29, chega-se às condições de contorno para o cálculo da corrente de falta conforme apresenta a equação (23).

$$\begin{cases} I_a = 0 \\ V_b = V_c = (I_b + I_c)Z_f \end{cases} \quad (23)$$

Por componentes simétricas e considerando as condições de contorno, a equação (24) relaciona as tensões de fase  $V_b$  e  $V_c$  com as correntes e tensões de seqüência da fase *a*.

$$V_b = V_c = 3Z_f I_a^0 = V_a^0 - V_a^1 \quad (24)$$

Aplicando as condições de contorno, bem como o obtido pela equação (24), nas equações (1), (2) e (3) conforme a equação (25), obtém-se enfim, a corrente de falta para faltas FFT como ilustra a equação (26).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{pf} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$I_a^1 = -(I_a^2 - I_a^0) = I_f^1 = \frac{V_{pf}}{Z^1 + \left[ \frac{Z^2(Z^0 + 3Z_f)}{Z^2 + Z^0 + 3Z_f} \right]} \quad (26)$$

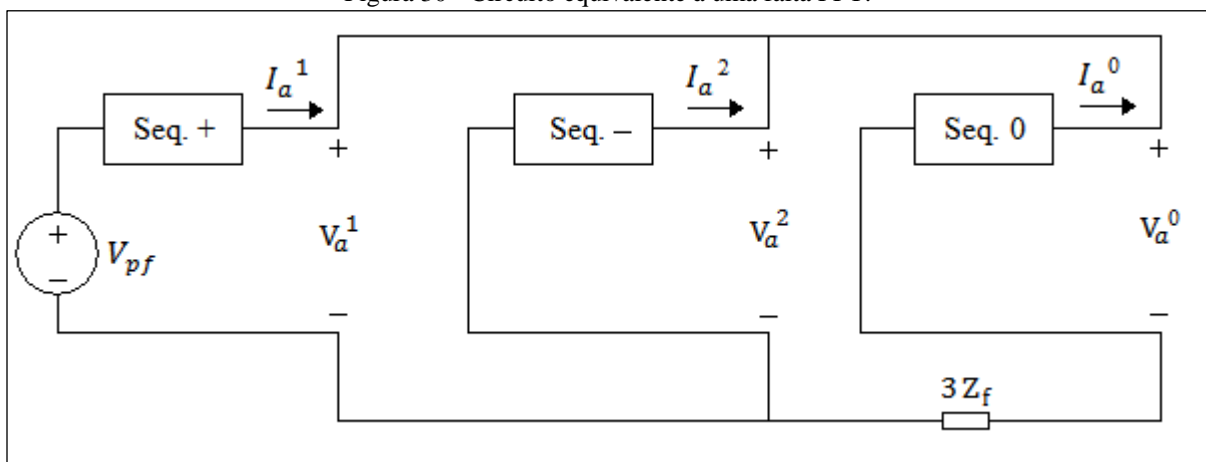
Também para os curtos circuitos FFT, a partir da obtenção da corrente de falta, os afundamentos de tensão podem ser obtidos por dois métodos distintos: analítico e matricial.

### 3.2.4.1 Método Analítico

Observando a equação (26), pode-se representar o sistema puramente faltoso para faltas FFT pelo circuito exposto na Figura 30.

No circuito da Figura 30, os blocos representam um sistema elétrico qualquer composto por  $n$  barras por redes de sequência. Portanto, deste circuito, pode-se obter as tensões puramente faltosas das  $n$  barras. Sendo as tensões pré-falta conhecidas de antemão, obtêm-se os afundamentos de tensão por meio da equação (1) anteriormente abordada.

Figura 30 - Circuito equivalente à uma falta FFT.



### 3.2.4.2 Método Matricial

Como ilustra a Figura 30, para o estudo de curto circuito FFT, consideram-se as componentes de sequência positiva, negativa e zero. De forma análoga ocorre com o método matricial em que se utilizam as matrizes admitância e impedância de barra nas três diferentes

sequências. Por esse método, a resolução do sistema puramente faltoso proposto pela Figura 30 é substituída pela utilização da matriz  $[Z]$  nas diferentes sequências conforme demonstra a equação (14). No entanto, para as faltas FFT, a corrente de falta  $I_{fk}^s$  se dá pela adaptação da equação (26) e segue conforme a equação (27).

$$I_a^1 = -(I_a^2 - I_a^0) = I_{fk}^1 = \frac{V_{pf}}{Z_{kk}^1 + \left[ \frac{Z_{kk}^2 (Z_{kk}^0 + 3Z_f)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_f} \right]} \quad (27)$$

Para a obtenção dos afundamentos de tensão pelo método matricial, basta utilizar a equação (16) de forma análoga às faltas FT, todavia, considerando a corrente de falta obtida na equação (27). É válido ressaltar que a tensão pré-falta é considerada apenas para a obtenção do afundamento de tensão de sequência positiva.

Uma vez obtidos os afundamentos de tensão em componentes de sequência, para conhecer os afundamentos nas fases de determinada barra, basta utilizar a equação (17) de forma idêntica às faltas FT.

### 3.3 CÁLCULO DO NÚMERO DE OCORRÊNCIAS

A predição do número de afundamentos de tensão em determinado ponto do sistema está sustentada sobre dois pilares principais: a magnitude do afundamento e a taxa na qual ele ocorre. A obtenção da magnitude dos afundamentos de tensão foi abordada na seção anterior e dela chega-se à matriz apresentada pela equação (28).

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n1} & V_{n2} & \dots & V_{nn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Onde:

$V_{ij}$  é o afundamento de tensão na barra  $i$  quando ocorre uma falta na barra  $j$ .

A matriz  $[V]$  é ainda transformada em uma matriz binária, ou seja, formada por zeros e uns. Um elemento de  $[V]$  é 0 se o afundamento de tensão não for significativo ( $0,9 < V <$

1 p. u.) e 1 se for significativo ( $V < 0,9$  p. u.). Essa nova matriz binária  $[V_{bin}]$  tem dimensão  $[m \times n]$  onde  $m$  é o número de barras monitoradas e  $n$  é o número de pontos faltosos.

Para se determinar o número de afundamentos de tensão a partir da matriz  $[V_{bin}]$ , faz-se uso do vetor  $[\lambda]$  chamado de vetor de frequência de ocorrência de faltas ilustrado pela equação (29). Esse vetor está diretamente relacionado às taxas de ocorrência de faltas. Portanto, é possível se obter o vetor  $[N]$  que apresenta o número de ocorrência de afundamentos de tensão esperado para cada barra de um sistema conforme ilustra a equação (30).

$$[\lambda] = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \cdots \quad \lambda_n] \quad (29)$$

$$[N]_{m \times 1} = [V_{bin}]_{m \times n} [\lambda]_{n \times 1}^T \quad (30)$$

Ao se considerar a ocorrência dos quatro tipos de faltas (FFF, FT, FF e FFT), obtêm-se quatro diferentes vetores  $[N]$  uma vez que para cada tipo de falta há uma matriz  $[V_{bin}]$  e um vetor  $[\lambda]$  diferentes.

Outra análise a se fazer é a determinação da curva de distribuição acumulada de afundamentos de tensão. Essa curva é elaborada para cada barramento em análise e é obtida variando-se as condições de contorno das quais se obtém a matriz binária  $[V_{bin}]$ . Um exemplo de curva de distribuição acumulada de afundamentos de tensão foi ilustrado anteriormente através da Figura 7.

### 3.4 DESEMPENHO DO SISTEMA

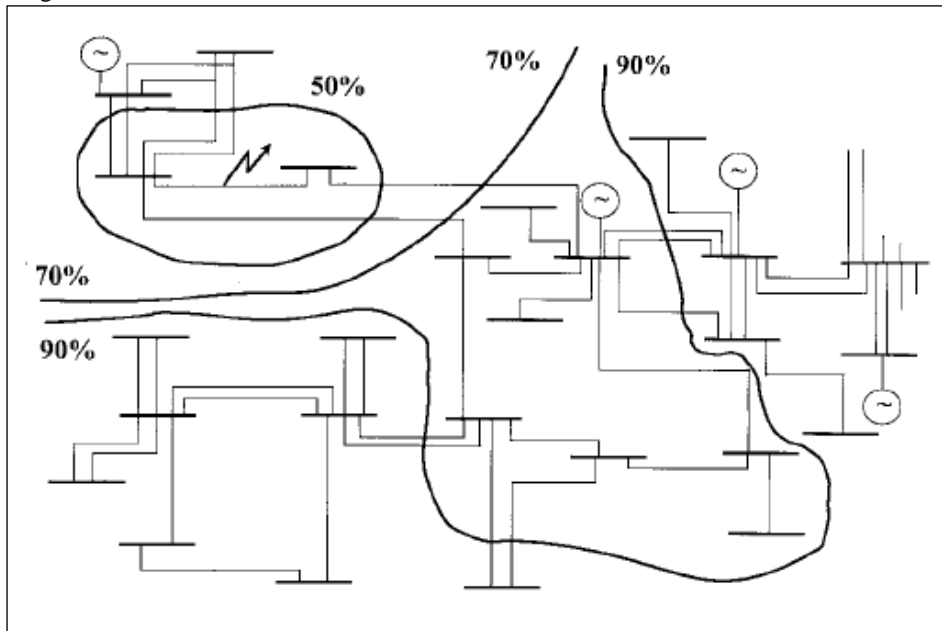
Com base nas análises previamente abordadas pode-se levantar o desempenho do sistema em questão. As informações obtidas dos estudos de magnitude e frequência de afundamentos de tensão, se considerados individualmente, pouco contribuem. Todavia, quando se confronta tais informações, pode-se conhecer o desempenho do sistema em relação aos afundamentos de tensão, o que de fato interessa.

Além da predição do número de afundamentos de tensão em uma determinada barra, na qual foi abordada na seção anterior, e que também pode ser considerada uma análise de desempenho, pode-se realizar outras.

Uma abordagem comum neste tipo de estudo, é o levantamento do mapa do sistema utilizando curvas de nível. Tais curvas de nível podem ilustrar tanto os níveis de afundamentos de tensão nos barramentos de um sistema em detrimento à ocorrência de falta em um de-

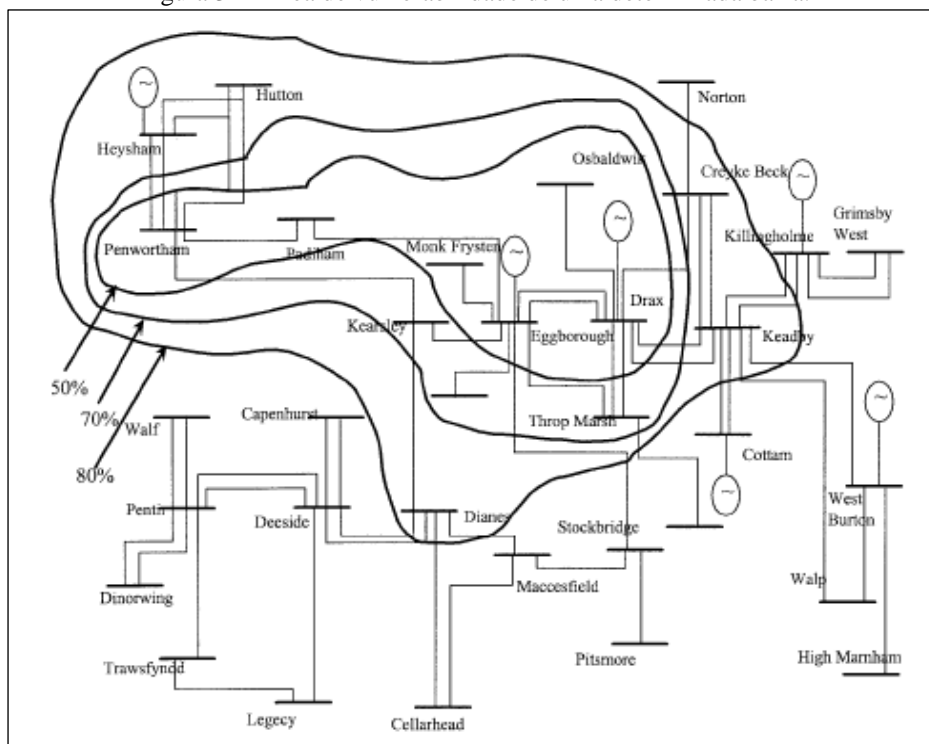
les, quanto a área de vulnerabilidade na qual um barramento está submetido, ou seja, o quanto faltas em outros barramentos o influenciam. A Figura 31 apresenta o impacto da ocorrência de uma falta em outros barramentos do sistema ao passo que a Figura 32 ilustra a área de vulnerabilidade de um barramento determinado.

Figura 31 - Níveis de afundamento de tensão em detrimento à ocorrência de uma falta.



Fonte: (QADER, et al, 1999).

Figura 32 - Área de vulnerabilidade de uma determinada barra.

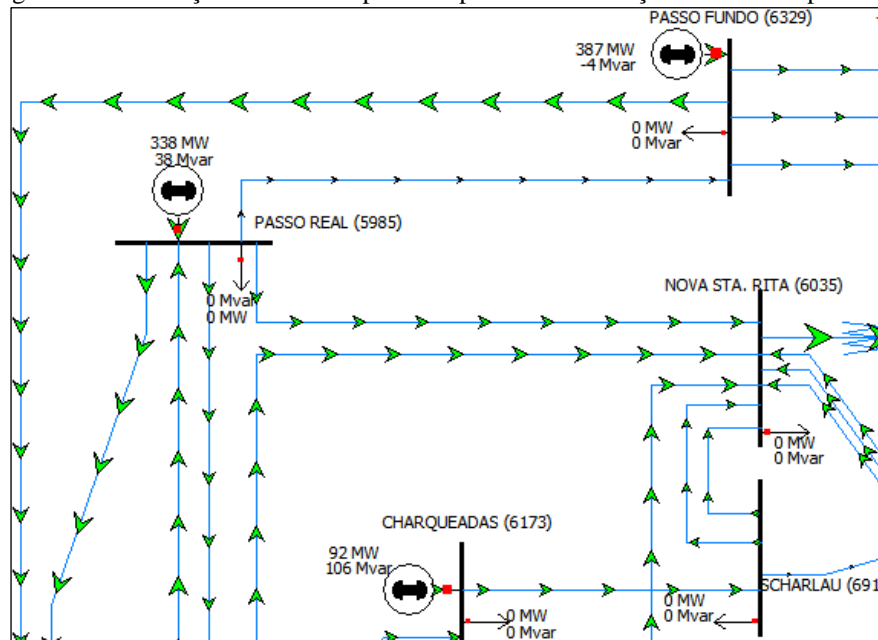


Fonte: (QADER, et al, 1999).

### 3.5 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

As ferramentas de simulação apresentam-se como essenciais no que se refere a estudos de afundamentos de tensão em grandes sistemas. Os programas computacionais auxiliam desde o cálculo do fluxo de potência que se faz necessário para a determinação das tensões pré-falta, quanto o cálculo dos afundamentos de tensão propriamente ditos. A Figura 33 ilustra um exemplo de simulação de fluxo de potência através do programa computacional *Power World*®.

Figura 33 - Simulação do fluxo de potência para a determinação das tensões pré-falta.



Nos programas computacionais de simulação elétrica, como por exemplo, o *Power World*®, pode-se configurar a simulação de acordo com os objetivos a que se almeja. Para a simulação do fluxo de potência, pode-se optar pelos diferentes métodos de cálculo iterativo. Para o cálculo dos níveis de curto circuito, e conseqüentemente, dos afundamentos de tensão, pode-se considerar a simulação do fluxo de potência, ou ainda, fazer uso do chamado sistema *flat*, que consiste na fixação das tensões pré-falta em 1 p.u., ou seja, considera-se o sistema sem carga.

Além dos programas computacionais de simulação elétrica, e não menos importantes, têm-se aqueles cujo auxílio consiste na manipulação matemática dos dados. Como se verificou ao longo deste texto, a utilização de cálculo matricial é intensa e a manipulação destes dados via programas computacionais se faz imprescindível.

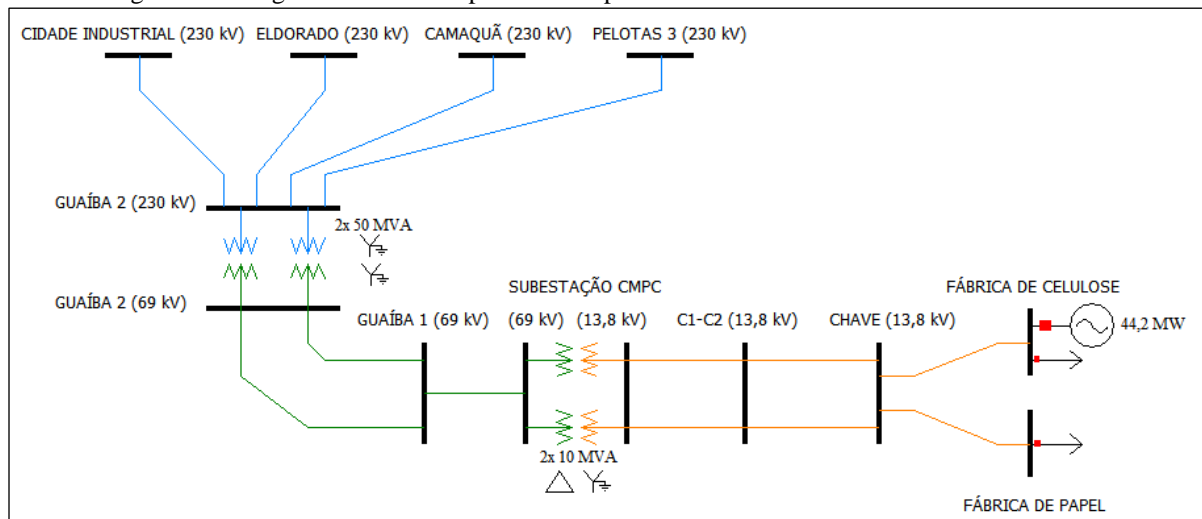


#### 4 ESTUDO DE CASO

Conforme exposto anteriormente, estimulou-se a realização de um estudo de caso referente a afundamentos de tensão a partir de observações realizadas em atividade de estágio na empresa CMPC Celulose Riograndense. Ao se observar as ocorrências acerca das variações da tensão no ponto de conexão da empresa com o SIN, propôs-se a obtenção de índices de afundamentos de tensão nesse ponto de interesse causados por faltas no sistema elétrico de potência.

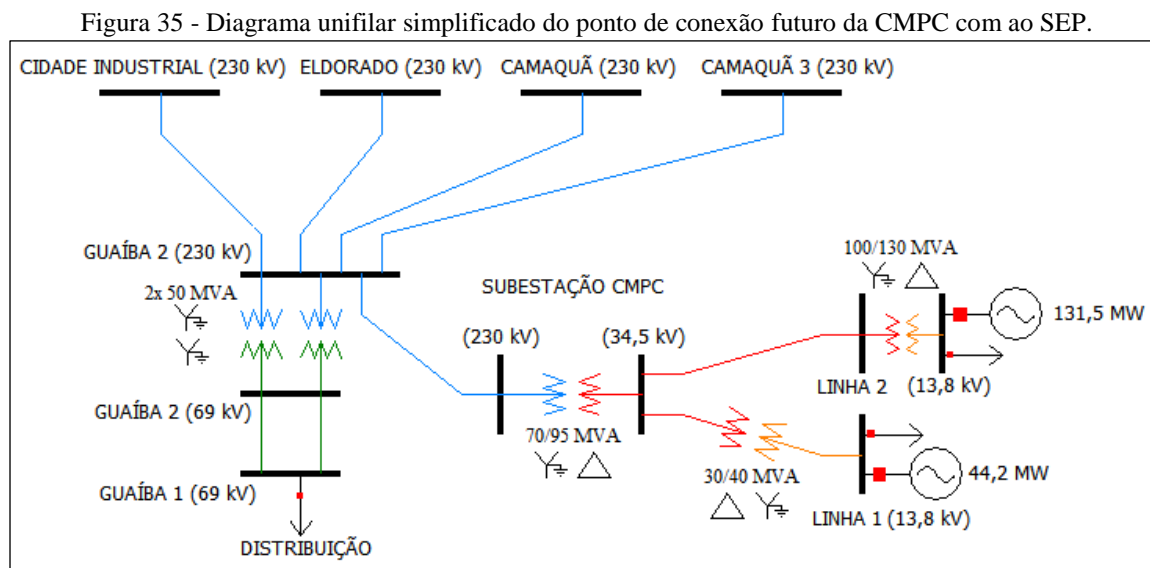
Atualmente a CMPC está conectada ao sistema de distribuição do município de Guaíba, especificamente à subestação Guaíba 1, em 69 kV através da concessionária CEEE-D. A empresa possui cogeração de energia através de três turbo geradores acionados à vapor cuja potência nominal é, em sua totalidade, igual à 57,96 MW, valor igual à demanda em condições normais de operação. Apesar de nominalmente ser autossuficiente, têm-se como geração típica 44,2 MW, e por isso, a empresa tem demanda contratada de 15 MW junto à concessionária. A Figura 34 trás o diagrama unifilar simplificado desta conexão.

Figura 34 - Diagrama unifilar simplificado do ponto de conexão atual da CMPC com ao SEP.



No entanto, a configuração exposta pela Figura 34 não perdurará em função da ampliação da fábrica a qual triplicará sua produção. Em consequência desta expansão, a configuração de conexão da CMPC com o SEP passará dos atuais 69 kV para 230 kV. A nova planta industrial, somada à planta já existente, se conectará em 230 kV com a subestação Guaíba 2 e possuirá cogeração de energia composta por cinco turbo geradores (três já existentes) também acionados à vapor cuja potência nominal total de projeto é igual à 250,99 MW. De forma análoga à situação atual, não se espera geração em valores nominais. A média histórica desse tipo

de geração indica operação a 70% da potência nominal, logo, espera-se potência gerada igual a 175,69 MW, o que não somente suprirá a demanda fabril, como também será capaz de comercializar o excedente, tendo como limiar máximo, 30 MW. A Figura 35 ilustra o diagrama unifilar simplificado desta topologia de conexão.



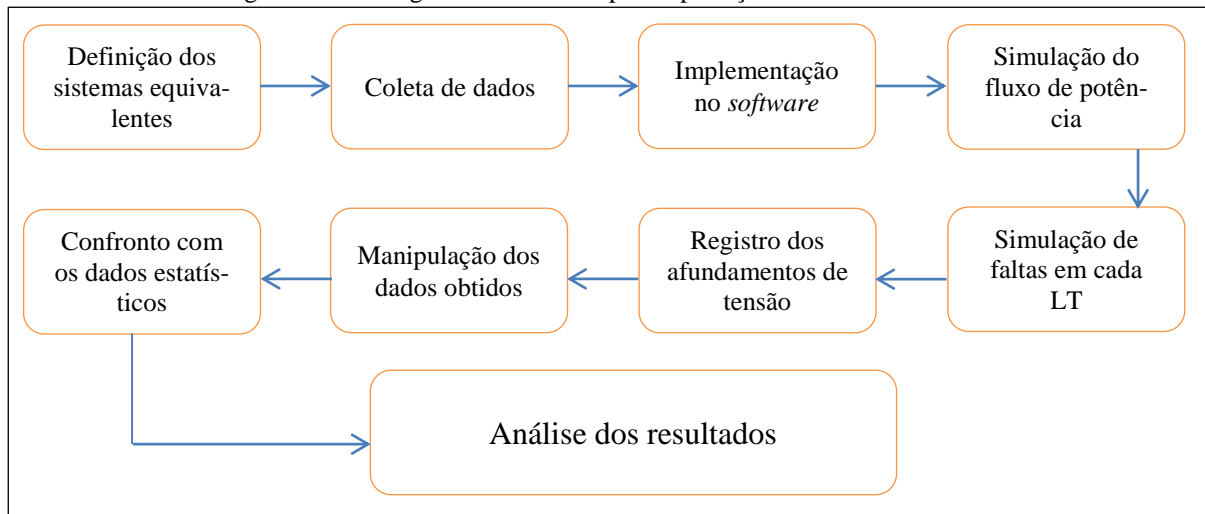
A entrada em operação da planta industrial com a topologia de conexão exposta na Figura 35 está prevista para 2015, portanto, para um estudo significativo, se faz necessária a análise dos dois cenários expostos, atual e futuro.

#### 4.1 METODOLOGIA

A predição dos afundamentos de tensão consiste basicamente em três etapas: Obtenção dos parâmetros pré-falta através de simulação do fluxo de potência; simulação de faltas nas linhas de transmissão e de distribuição; observação da variação nos níveis de tensão do ponto de interesse em detrimento às faltas; análise dos dados obtidos. O diagrama da Figura 36 ilustra os passos a serem seguidos para a predição dos afundamentos de tensão.

Para a simulação do fluxo de potência e dos curtos circuitos, optou-se pelo programa computacional *Power World*® por se tratar de uma ferramenta de boa interface gráfica, o que auxilia na elaboração e entendimento do sistema a ser implementado. Para a manipulação dos dados obtidos das simulações, fez-se uso de planilhas eletrônicas e *software* matemático.

Figura 36 - Fluxograma de trabalho para a predição de afundamentos de tensão.



## 4.2 CONSIDERAÇÕES

Ao optar-se pelo programa computacional *Power World*®, adaptações fizeram-se necessárias. Sua versão educacional tem limite de 40 barras, logo, montou-se um sistema equivalente ao real onde se priorizou os barramentos de 230 kV e 525 kV do SEP do Rio Grande do Sul. Em função do ponto de análise (subestação Guaíba 1 para o caso atual e Guaíba 2 para o caso futuro), considerou-se também os barramentos próximos à ele. Vale ressaltar que os barramentos e linhas não representados não foram omitidos, mas sim, considerados na elaboração dos circuitos equivalentes.

Ao se considerar dois panoramas distintos, atual e futuro (2015), deve-se levar em conta as modificações previstas tanto para a conexão da planta industrial quanto para o SEP de uma maneira geral. Tais considerações referem-se, por exemplo, aos planos de ampliação do SEP, ampliação da matriz energética e aumento da carga demandada.

Em relação aos índices de falta no sistema de distribuição de energia elétrica, há dificuldade em se obter valores típicos de ocorrência. Para a predição dos afundamentos de tensão no sistema de distribuição de “Guaíba 1 (23 kV)”, visando as faltas mais próximas à subestação, o número de faltas adotado foi de 12 faltas por alimentador cuja probabilidade de ocorrência por tipo de falta é de 50 % para faltas FT, 30 % para faltas FFF e 10 % tanto para faltas FF quanto para faltas FFT (CABRAL, et al., 2011).

### 4.3 ELABORAÇÃO DOS SISTEMAS EQUIVALENTES

Conforme explicitado na seção anterior, a elaboração dos sistemas equivalentes deve estar de acordo e fundamentada nas considerações previamente definidas. Com base nisso, esta seção tem como escopo ilustrar as etapas de pesquisa, elaboração e implementação via *software* dos sistemas equivalentes.

#### 4.3.1 Coleta de Dados

Para a elaboração dos sistemas equivalentes, os dados de entrada devem ser oriundos de fontes confiáveis e de relevância significativa. Quatro são as principais bases de dados. São elas: Base de dados do ONS; Base de dados da ANEEL; Informações fornecidas pela concessionária de energia local; Documentação interna da CMPC.

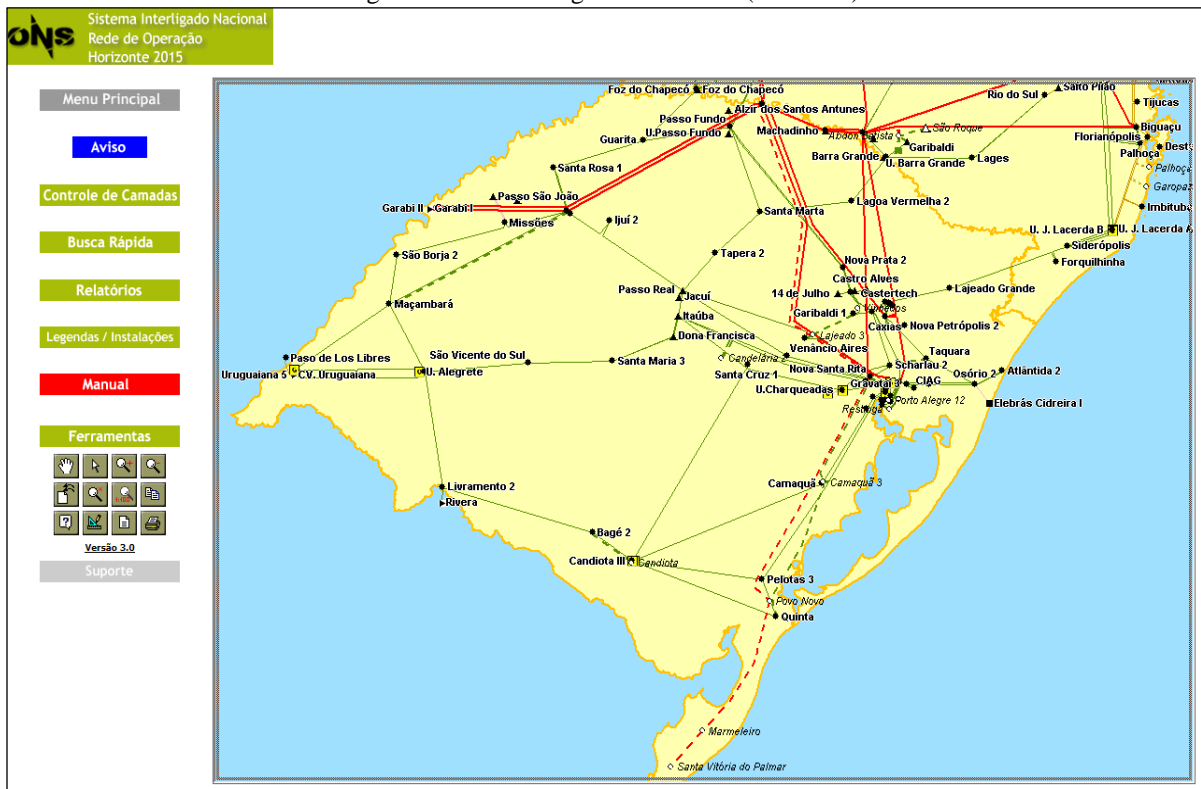
A base de dados do ONS é de fácil acesso e está disponível na página oficial do órgão na internet. No Plano de Ampliações e Reforços (ONS-PAR, 2011, 2012, 2013) estão expostos os planos anuais cuja previsão abrange os dois anos subsequentes. Isso tornou possível a elaboração do sistema equivalente de 2015 de maneira confiável. As duas principais fontes de informação disponíveis no PAR são os diagramas de impedâncias e a base de dados de curto circuito. Ambas são complementares e disponibilizam as impedâncias de sequência positiva e zero das linhas de transmissão, as reatâncias de sequência positiva e zero dos transformadores e a nomenclatura e numeração dos barramentos que compõem o SEP brasileiro.

O ONS dispõe também da ferramenta gráfica SINDAT (Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN) na qual estão diversas informações relevantes do sistema. Dentre as principais, pode-se citar o cadastro de todas as usinas, subestações e linhas de transmissão que formam a rede de operação do ONS e os relatórios individuais com características básicas das instalações e dos equipamentos que as compõem. As Figuras 37-39 ilustram a utilização dessa interface gráfica.

Através da base de dados da ANEEL é possível se obter informações a respeito das unidades geradoras, tanto as que estão em operação no momento, quanto as que estão em obras ou licitadas. Este banco de dados pode também ser utilizado de forma a complementar os dados obtidos através do ONS. A Figura 40 ilustra um exemplo de pesquisa de unidade geradora através do banco de dados da ANEEL.

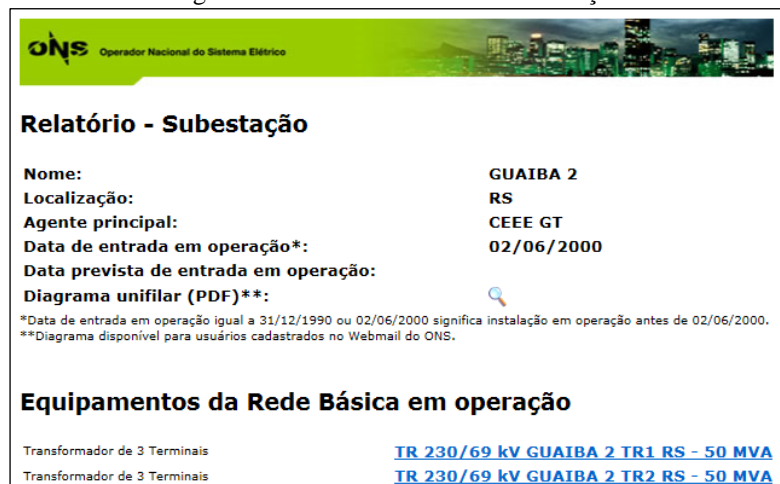
Além dos exemplos ilustrados nesta seção, todos os demais dados coletados e considerados neste projeto estão expostos no Apêndice A.

Figura 37 - Interface gráfica do ONS (SINDAT).



Fonte: (ONS-SINDAT, 2013).

Figura 38 - Relatório básico de subestação.



Fonte: (ONS-SINDAT, 2013).

Figura 39 - Relatório básico de linha de transmissão.

| ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico   |   | ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico  |   |
|---|---|--|---|
| <b>Relatório - Linha de Transmissão</b>   |   |  |   |
| Nome Longo:   | LT 230 kV C.INDUSTRIAL /GUAIBA 2 C-1 RS | Nome Longo:                                | LT 230 kV C.INDUSTRIAL /GUAIBA 2 C-1 RS |
| Tensão nominal (kV):  | 230                                     | Resistência de sequência positiva (%):     | 0.739                                   |
| Agente proprietário:  | CEEE GT                                 | Reatância de sequência positiva (%):       | 3.689                                   |
| Tipo de rede:   | BASICA                                  | Susceptância de sequência positiva (Mvar): | 6.63                                    |
| Comprimento (km):   | 38.5                                    | Resistência de sequência zero (%):         |   |
| Data de entrada em operação*:   | 29/01/2012                              | Reatância de sequência zero (%):           |   |
| Data prevista de entrada em operação:   | 29/01/2012                              | Tipo de cabo pára-raios:                   |   |
| Capacidade oper. longa duração CPST (A) **:   | 679                                     | Corrente de projeto CPST (A):              | 679                                     |
| Capacidade oper. curta duração CPST (A) **:   | 856                                     |  |   |
| <b>Outras informações:</b>  |   |  |   |
| *Data de entrada em operação igual a 31/12/1990 ou 02/06/2000 significa equipamento em operação antes de 02/06/2000.  |   |  |   |
| **Em função de ajustes de proteção, de elementos em série e de informações do próprio agente transmissor, o valor operacional pode ser diferente do valor contratado. |   |  |   |
| Empresas cujas LTs estão com a capacidade operativa atualizada na Base de Dados Técnica do ONS:<br>Todas  |   |  |   |

Fonte: (ONS-SINDAT, 2013).

Figura 40 - Dados da unidade geradora de energia da CMPC expostos pela ANEEL.

| ANEEL   |  |              |                             |
|---|--|--------------|-----------------------------|
| BIG - Banco de Informações de Geração   |  |              |                             |
| Resumo do Empreendimento de nome "CMPC (Antiga Aracruz Unidade Guaíba)"                     |  |              |                             |
| A Usina CMPC (Antiga Aracruz Unidade Guaíba) é capaz de gerar <b>57.960</b> kW de potência. |  |              |                             |
| Propriedade   |  |              |                             |
| Proprietário(s)   | Destino da Energia                       | Participação | Potência Compartilhada (kW) |
| CMPC Celulose Riograndense Ltda   | APE                                      | 100 %        | 57.960                      |
| Total   | -  | 100 %        | 57.960                      |
| Legenda   |  |              |                             |
| APE   | Autoprodução de Energia                  |              |                             |
| APE-COM   | Autoprodução c/ Comerc. de Excedente     |              |                             |
| COM   | Comercialização de Energia               |              |                             |
| PIE   | Produção Independente de Energia         |              |                             |
| REG   | Registro                                 |              |                             |
| REG-RN482   | Registro mini micro Geradores RN482/2012 |              |                             |
| SP  | Serviço Público                          |              |                             |

Fonte: (ANEEL, 2013).

### 4.3.2 Implementação no Software

Uma vez finalizada a etapa de definição dos sistemas e de coleta dos dados, deve-se montar os sistemas equivalentes no *Power World*® considerando as informações obtidas. O programa tem diversas ferramentas e possibilita diferentes tipos de análise, como por exemplo, fluxo de potência, cálculo de curto circuito e despacho econômico. Considerando as características da análise proposta nesse projeto, são configurados nos componentes dos sistemas equivalentes apenas os parâmetros necessários. No decorrer desta seção é ilustrada a montagem e configuração dos componentes dos sistemas implementados.

#### 4.3.2.1 Barramentos

Conforme mencionado anteriormente, em função da limitação da versão estudantil do *Power World*®, os sistemas equivalentes possuem 40 barramentos cada. Em cada barramento representado no *software* alguns parâmetros são configurados conforme ilustra a Figura 41.

Figura 41 - Configuração de parâmetros de barramento para as simulações.

The figure shows two instances of the 'Bus Options' dialog box. The left instance is in the 'Bus Information' tab, showing fields for Bus Number (6), Bus Name (GUAÍBA 1 (29124)), Nominal Voltage (69,0 kV), and various area/zone/owner/substation selection options. The right instance is in the 'Fault Parameters' tab, showing 'Short Circuit Load Information' with 'Neg Sequence Admittance' (G: 0,00000, B: 0,00000) and 'Zero Sequence Admittance' (G: 0,26000, B: -8,84000) highlighted in red.

Observando a Figura 41, percebem-se alguns parâmetros em destaque. Na aba “*Bus Information*” determina-se o nome e o nível de tensão da barra. De forma a facilitar a pesquisa e a utilização do sistema elaborado em trabalhos futuros, a nomenclatura dos barramentos é composta pelo nome da subestação e por seu número correspondente na base de dados do ONS. Na aba “*Fault Parameters*” deve-se entrar com a admitância equivalente de sequência zero do barramento. Essa configuração se faz necessária ao passo que no sistema equivalente algumas ligações elétricas não são diretamente representadas e a sua desconsideração influenciaria significativamente os resultados. A admitância equivalente de sequência zero do barramento representa, por exemplo, os “caminhos” à terra dos transformadores que não são representados no sistema implementado.

A relação completa dos barramentos utilizados nas simulações e de seus parâmetros está exposta no Apêndice A através das Tabelas 1 e 2.

#### 4.3.2.2 Linhas

De acordo com a definição dos sistemas, e conseqüentemente, de acordo com as equivalências necessárias, chegou-se ao número de linhas de transmissão e de distribuição representadas igual a 77 para o sistema atual e 78 para o sistema futuro. De forma análoga aos barramentos, em cada linha representada devem-se configurar alguns parâmetros conforme ilustra a Figura 42.

Figura 42 - Configuração de parâmetros de linha para as simulações.

The figure displays two side-by-side screenshots of the 'Branch Options' dialog box. The left screenshot shows the 'Parameters' tab, where the 'Length (m)' is set to 4,35, 'Series Resistance (R)' is 0,02060, and 'Series Reactance (X)' is 0,06370. The right screenshot shows the 'Fault Info' tab, where the 'Zero Sequence Impedance' values are R: 0,061400, X: 0,172000, and C: 0,000000. Red circles highlight these values in both screenshots.

Na Figura 42, e mais especificamente na aba “*Parameters*”, entra-se com os valores de resistência e reatância série de sequência positiva das linhas em p.u.. Outra informação essencial é o comprimento da linha que influencia diretamente nos níveis de curto circuito. Já na aba “*Fault Info*”, entra-se com os valores de resistência e reatância série de sequência zero das linhas em p.u..

Em alguns casos, a linha que interliga dois barramentos é na verdade uma equivalência a outras linhas ao passo que no sistema equivalente alguns nós são suprimidos. A relação completa das linhas consideradas nas simulações e de seus parâmetros está exposta nas Tabelas 3 e 4 do Apêndice A.



#### 4.3.2.3 Unidades Geradoras

A determinação das unidades geradoras levou em conta três condições distintas: Unidades em operação; Unidades em obras com previsão de operação para até 2015; Unidades previstas para iniciar a operação até 2015. Obviamente, para a representação do sistema atual, consideraram-se apenas as unidades geradoras que estão em operação no momento. Em contrapartida, para se representar o sistema futuro (2015), consideraram-se todos os casos supracitados.

Para a montagem do sistema equivalente atual, foram consideradas 38 unidades geradoras que são representadas por 17 fontes de potência. Já para o sistema equivalente de 2015, considerou-se 56 unidades geradoras, representadas na simulação também por 17 fontes. Em ambos os casos foram consideradas as capacidades nominais de geração, onde usinas cuja geração é inferior a 10 MW foram desconsideradas. A Figura 43 ilustra os parâmetros considerados para a configuração dos geradores.

Na aba “*Power and Voltage Control*”, conforme apresenta a Figura 43, entra-se com a potência nominal ativa da unidade geradora. A geração de potência reativa, de acordo com a configuração ilustrada, está livre para regular a tensão do sistema. Na aba “*Fault Parameters*” por sua vez, entra-se com os valores de resistência e reatância de sequência positiva e zero, no entanto, não somente internas ao gerador, mas também referentes ao transformador elevador e às linhas que interligam o verdadeiro ponto de conexão do gerador até o barramento representado na simulação. Isso permite que se representem as unidades geradoras conectadas diretamente em níveis de tensão elevados, como por exemplo, em 230 kV.

Figura 43 - Configuração de parâmetros da geração para as simulações.

The figure shows two instances of the 'Generator Options' dialog box. The left instance is on the 'Power and Voltage Control' tab, and the right instance is on the 'Fault Parameters' tab. Both instances are for a generator at Bus Name 'CANOAS 2 (5007)'.

**Left Screenshot (Power and Voltage Control):**

- Power Control:** MW Output: 248,000; Min. MW Output: 0,000; Max. MW Output: 248,000. Checkboxes: Available for AGC (checked), Enforce MW Limits (checked).
- Voltage Control:** Mvar Output: -18,038; Min Mvars: -9900,000; Max Mvars: 9900,000. Checkboxes: Available for AVR (checked), Use Capability Curve (unchecked).
- Regulated Bus Number:** 4
- SetPoint Voltage:** 1,0000
- Remote Reg %:** 100,0
- Power Factor:** 1,0000

**Right Screenshot (Fault Parameters):**

- Generator Impedances:** Checkboxes: Neutral Grounded (checked).
- Internal Sequence Impedances:**

|          | R:      | X:      |
|----------|---------|---------|
| Positive | 0,00000 | 0,12040 |
| Negative | 0,00000 | 0,12040 |
| Zero     | 0,00000 | 0,05630 |
- Generator Step Transformer:** R: 0,00000; X: 0,00000; Tap: 1,00000
- Neutral-to-Ground Impedance:** R: 0,00000; X: 0,00000

De forma análoga aos demais componentes do sistema, a relação completa das unidades geradoras consideradas nas simulações e de seus parâmetros está ilustrada nas Tabelas 5-8 do Apêndice A.

#### 4.3.2.4 Cargas e Compensadores de Reativo

A determinação das cargas é de extrema dificuldade e depende de diversos fatores. No entanto, uma abordagem comum para simulações de faltas é tratar as cargas como sendo de potência constante. Essa consideração se apresenta bastante eficaz para a determinação das condições pré-falta, objetivo inicial da predição de afundamentos de tensão. Dentro deste contexto, deve-se levar em consideração também os equipamentos cuja função é de compensar reativos, como por exemplo, banco de capacitores e reatores. A configuração das cargas e dos compensadores de reativo segue apresentada na Figura 44.

Figura 44 - Configuração de parâmetros de carga e compensador de reativo para as simulações.

The image displays two side-by-side configuration windows from a software application. The left window, titled 'Load Options', is for a load named 'PORTO ALEGRE 9 (S855)'. It shows fields for Bus Number (17), Bus Name, ID (1), and various parameters under 'Load Information'. The 'Constant Power' section is highlighted with a red box, showing 'MW Value' as 143,520 and 'Mvar Value' as 61,140. The right window, titled 'Switched Shunt Options', is for a shunt named 'POLO PETROQUÍMICO (S885)'. It shows fields for Bus Number (25), Bus Name, and Shunt ID (1). The 'Nominal Mvar' field is highlighted with a red box and set to 39,6. Below it, the 'Control Mode' is set to 'Fixed'. Both windows have tabs for 'Display', 'Parameters', 'Control Parameters', 'Fault Parameters', 'Custom', and 'Stability'. The bottom of each window contains 'OK', 'Save', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Como valores de potência para as cargas, consideraram-se os valores nominais dos transformadores existentes nas subestações. A equação (31) apresenta como são calculadas tais cargas.

$$S_{carga} = P_{carga} + jQ_{carga} = 0,4S_{Trafo} = 0,4 \left( 0,92S_{Trafo} + j\sqrt{(1 - 0,92^2)}S_{Trafo} \right) \quad (31)$$

Onde:

$S_{Trafo}$  é a potência aparente nominal do transformador;

$S_{carga}$  é a potência aparente da carga;

$P_{carga}$  é a potência ativa da carga;

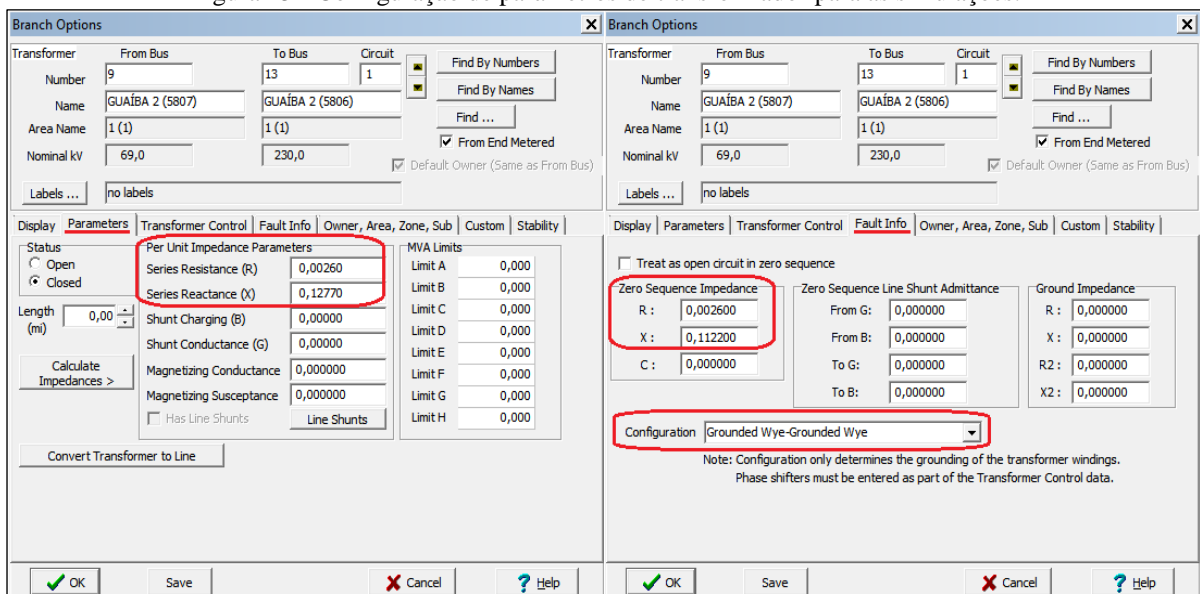
$Q_{carga}$  é a potência reativa da carga.

Observando-se a equação (31), percebe-se que a potência aparente da carga é considerada como sendo 40% da potência nominal do transformador com fator de potência igual a 0,92 (indutivo). A relação das potências consideradas para cada carga dos sistemas equivalentes também está exposta nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice A.

#### 4.3.2.5 Transformadores

A configuração dos transformadores se dá levando em consideração a modelagem simplificada, ou seja, consideram-se apenas as resistências e reatâncias série de sequência positiva e zero. A Figura 45 ilustra o supracitado.

Figura 45 - Configuração de parâmetros de transformador para as simulações.

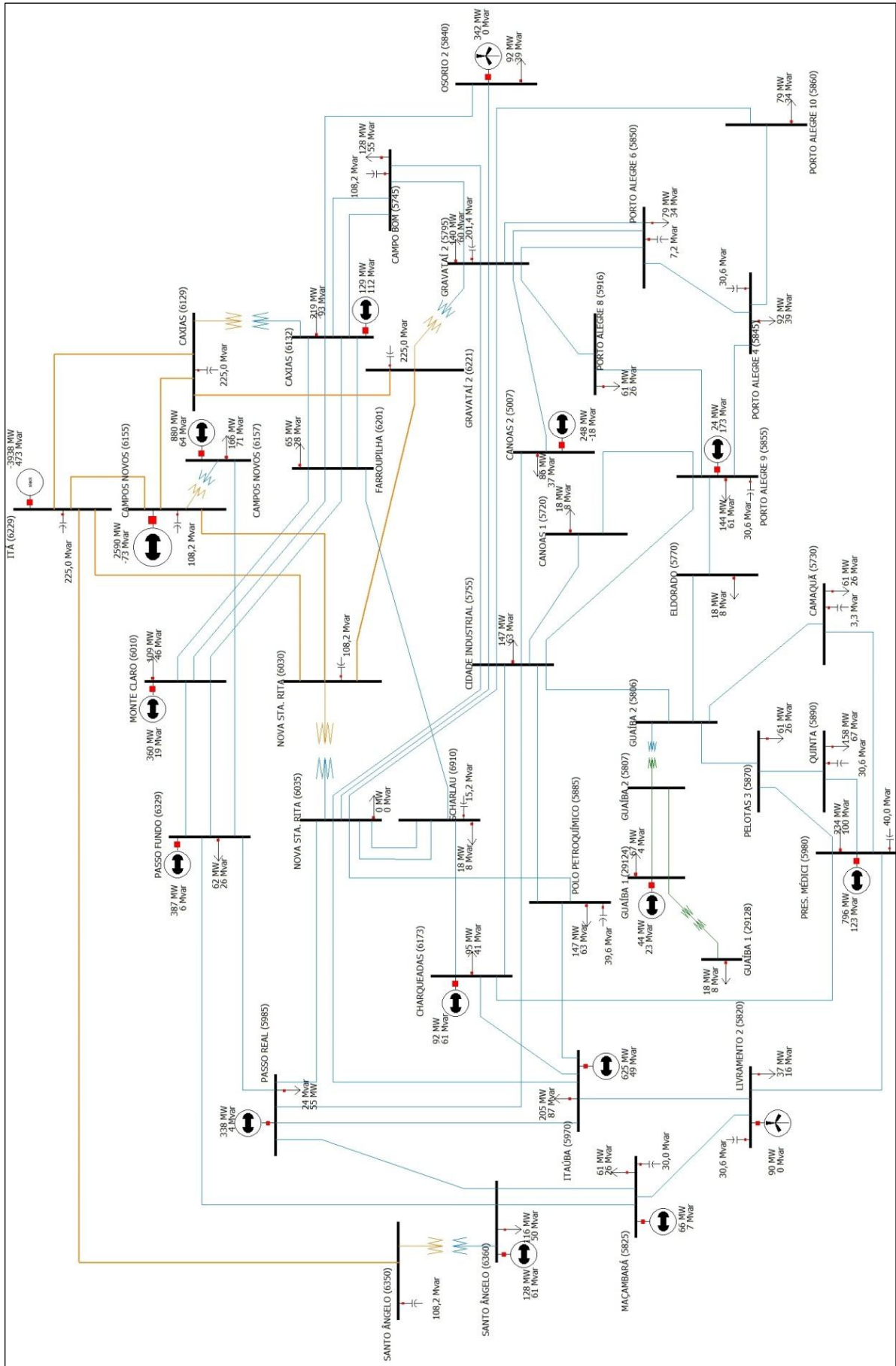


Na Figura 45, em “Parameters” entra-se com a impedância série de sequência positiva do transformador e das linhas que o interligam aos barramentos representados. Na aba “Fault

*Info*” também se entra com a impedância do transformador e das linhas, neste caso, entretanto, de sequência zero. É nesta aba também que se determina o tipo de conexão do transformador. As Tabelas 9 e 10 do Apêndice A apresentam todos os parâmetros utilizados para a configuração dos transformadores.

Com a entrada dos parâmetros de todos os componentes, chega-se aos sistemas equivalentes indicados pelas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Sistema equivalente atual implementado no Power World®.





#### 4.4 SIMULAÇÃO DE FALTAS E REGISTRO DOS AFUNDAMENTOS

Com a etapa de implementação dos sistemas no programa computacional concluída, pode-se então iniciar as simulações. De acordo com a metodologia definida na seção 4.1, a predição dos afundamentos de tensão consiste em simular faltas nas linhas que compõe o sistema e registrar o nível de tensão no barramento de interesse. Para ambos os panoramas, atual e futuro, o ponto de falta é aplicado exatamente no meio de cada linha a fim de se facilitar o cálculo da frequência de ocorrência. A título de exemplo, a Figura 48 ilustra a simulação de uma falta FT na linha de transmissão que interliga as barras “Camaquã (5730)” e “Guaíba 2 (5803)” no sistema equivalente atual.

Figura 48 - Simulação de falta FT no sistema equivalente atual.

| Number | Name                  | Phase Volt A | Phase Volt B | Phase Volt C |
|--------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1      | CANOAS 1 (5720)       | 0,92         | 0,99         | 0,99         |
| 2      | OSORIO 2 (5848)       | 0,95         | 0,99         | 0,99         |
| 3      | CANOAS 2 (5007)       | 0,93         | 0,99         | 0,99         |
| 4      | PORTO ALEGRE 6 (5850) | 0,93         | 0,98         | 0,98         |
| 5      | GUAÍBA 1 (29124)      | 0,82         | 0,99         | 0,97         |
| 6      | PORTO ALEGRE 8 (5916) | 0,92         | 0,99         | 0,99         |

Conforme ilustra a Figura 48, nas simulações de falta no sistema equivalente atual, o barramento a ser observado é o de “GUAÍBA 1 (29124)” onde todos os tipos de curtos circuitos são simulados em todas as linhas do sistema até que se tenha os afundamentos de tensão neste barramento em detrimento a tais faltas. Independentemente do tipo de falta, registra-se o nível de tensão de fase com o menor valor, ou seja, com o afundamento de tensão mais intenso.

As simulações para o sistema equivalente futuro ocorrem de forma análoga ao atual: São simuladas faltas de todos os tipos em todas as linhas do sistema, por outro lado, o barramento a ser observado é o de “GUAÍBA 2 (5806)”. A Figura 49 trás como exemplo para este caso, uma falta FF na linha de transmissão entre as barras “GUAÍBA 2 (5806)” e “ELDORADO (5770)”.

Todos os registros oriundos das simulações de faltas para ambos os casos estão expostos no Apêndice B.

Figura 49 - Simulação de falta FF no sistema equivalente futuro.

| Number | Name                   | Phase Volt A | Phase Volt B | Phase Volt C |
|--------|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1      | CANGAS 1 (5720)        | 1,02         | 0,72         | 0,71         |
| 2      | OSÓRIO 2 (5840)        | 1,03         | 0,76         | 0,82         |
| 3      | CANGAS 2 (5007)        | 1,02         | 0,75         | 0,75         |
| 4      | PORTO ALEGRE 6 (5850)  | 1,02         | 0,74         | 0,73         |
| 5      | GUAÍBA 1 (29124)       | 0,57         | 0,51         | 0,46         |
| 6      | PORTO ALEGRE 8 (5916)  | 1,02         | 0,72         | 0,71         |
| 7      | GRAVATÁI 2 (5795)      | 1,03         | 0,76         | 0,75         |
| 8      | GUAÍBA 2 (5807)        | 0,98         | 0,52         | 0,47         |
| 9      | PELOTAS 3 (5870)       | 1,02         | 0,73         | 0,83         |
| 10     | PORTO ALEGRE 10 (5860) | 1,02         | 0,73         | 0,72         |
| 11     | GUAÍBA 3 (5806)        | 1,02         | 0,54         | 0,49         |
| 12     | ELDORADO (5770)        | 1,01         | 0,53         | 0,49         |

## 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados inicia-se pela manipulação dos dados obtidos das simulações. É a partir da interpretação destes dados que se torna possível a obtenção do desempenho dos sistemas analisados neste projeto. Nesta seção, primeiramente são analisados os dois panoramas de forma separada, para que em um segundo momento, ambos sejam relacionados entre si, e conseqüentemente, tenham seus desempenhos comparados.

### 4.5.1 Desempenho da Configuração Atual

#### 4.5.1.1 Área de Vulnerabilidade da Barra “GUAÍBA 1 (29124)”

Uma análise passível de ser realizada e que expressa de forma muito clara o desempenho de determinado sistema é a obtenção das chamadas áreas ou zonas de vulnerabilidade. Para este caso, são realizadas quatro diferentes análises onde se verifica a vulnerabilidade da barra “GUAÍBA 1 (29124)” para cada tipo de falta. As Figuras 50-53 apresentam os resultados obtidos.



Figura 50 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FT.

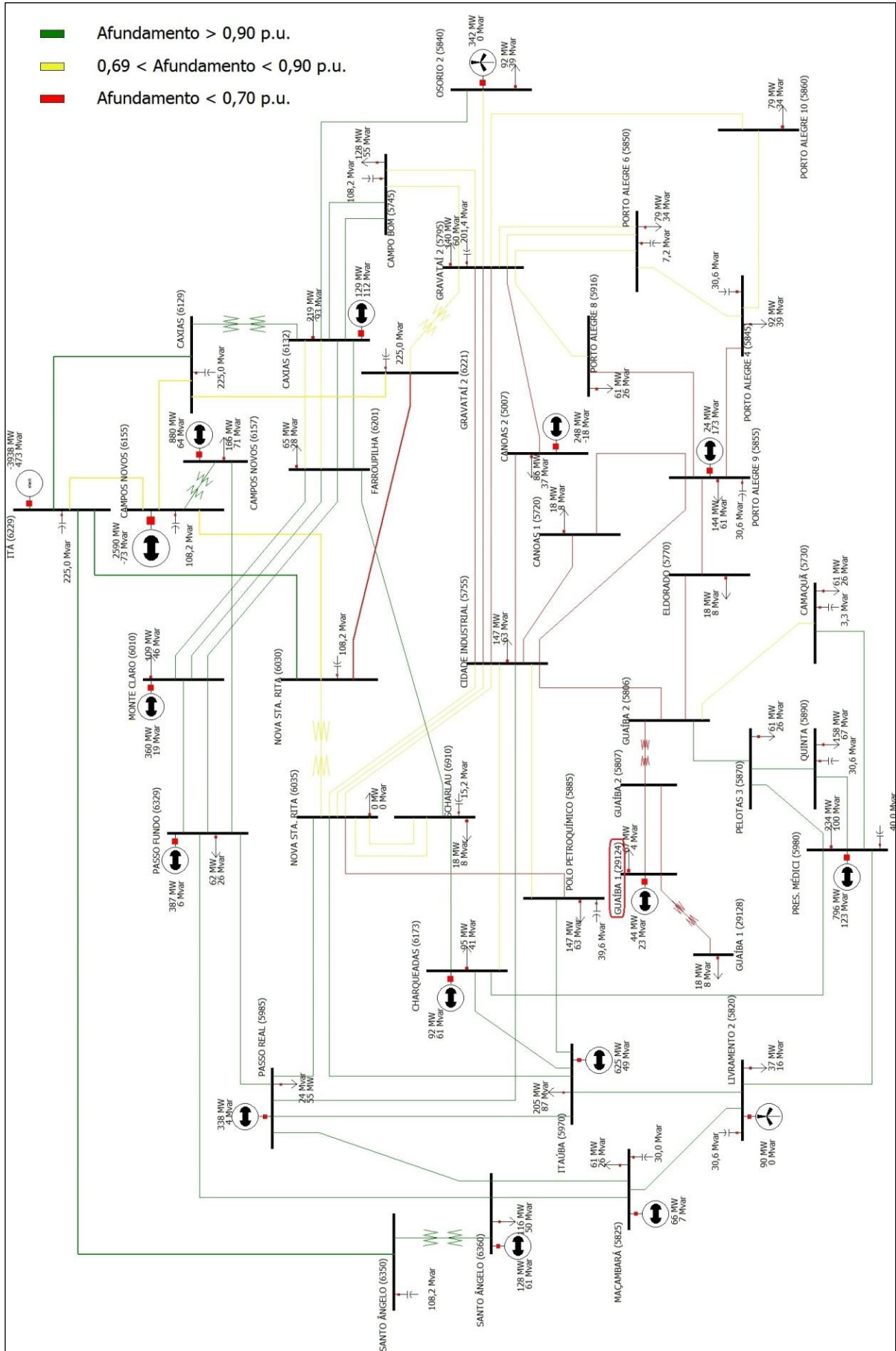




Figura 52 - Áreas de vulnerabilidade de "GUAÍBA 1 (29124)" para faltas do tipo FFT.

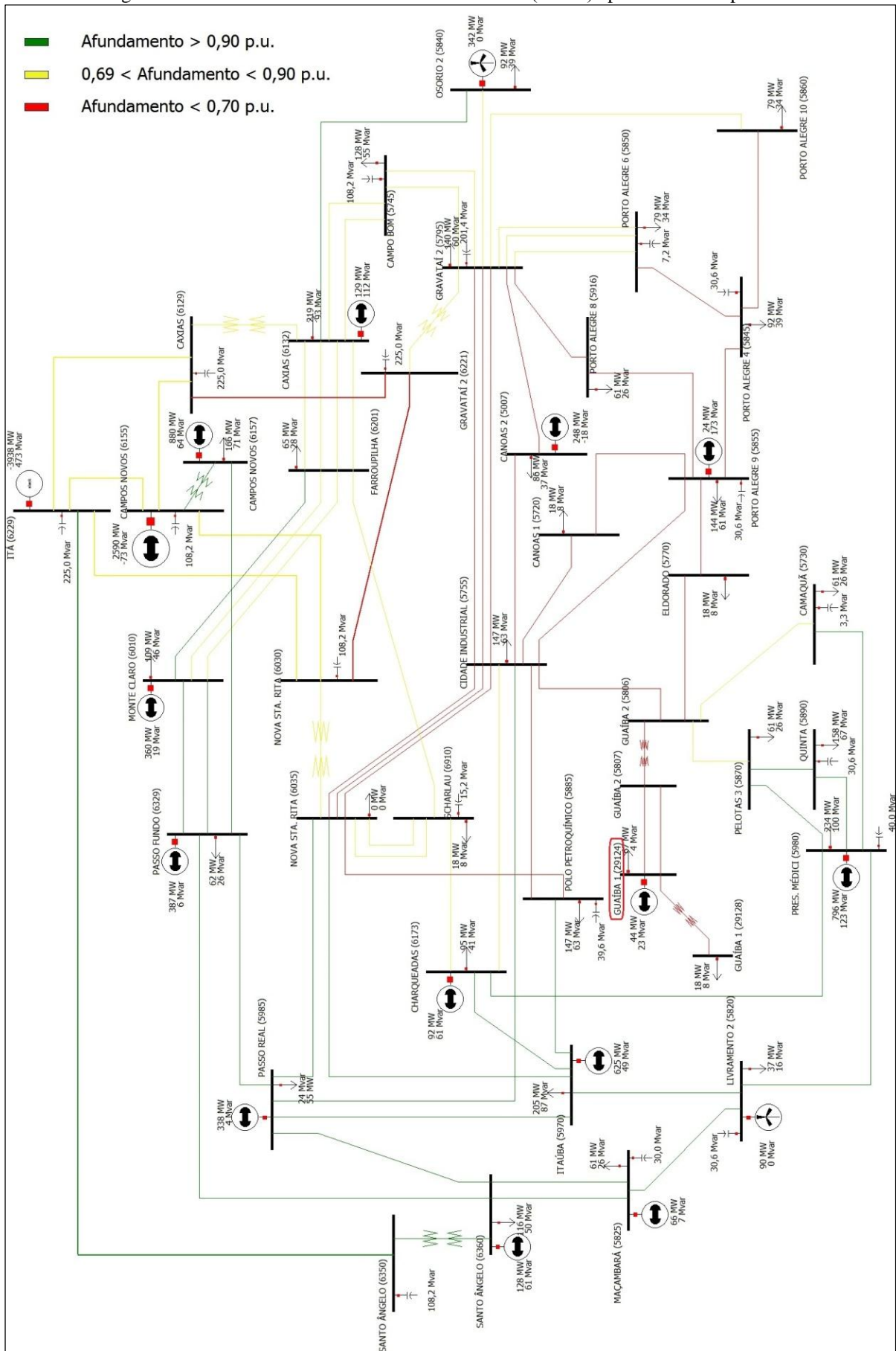
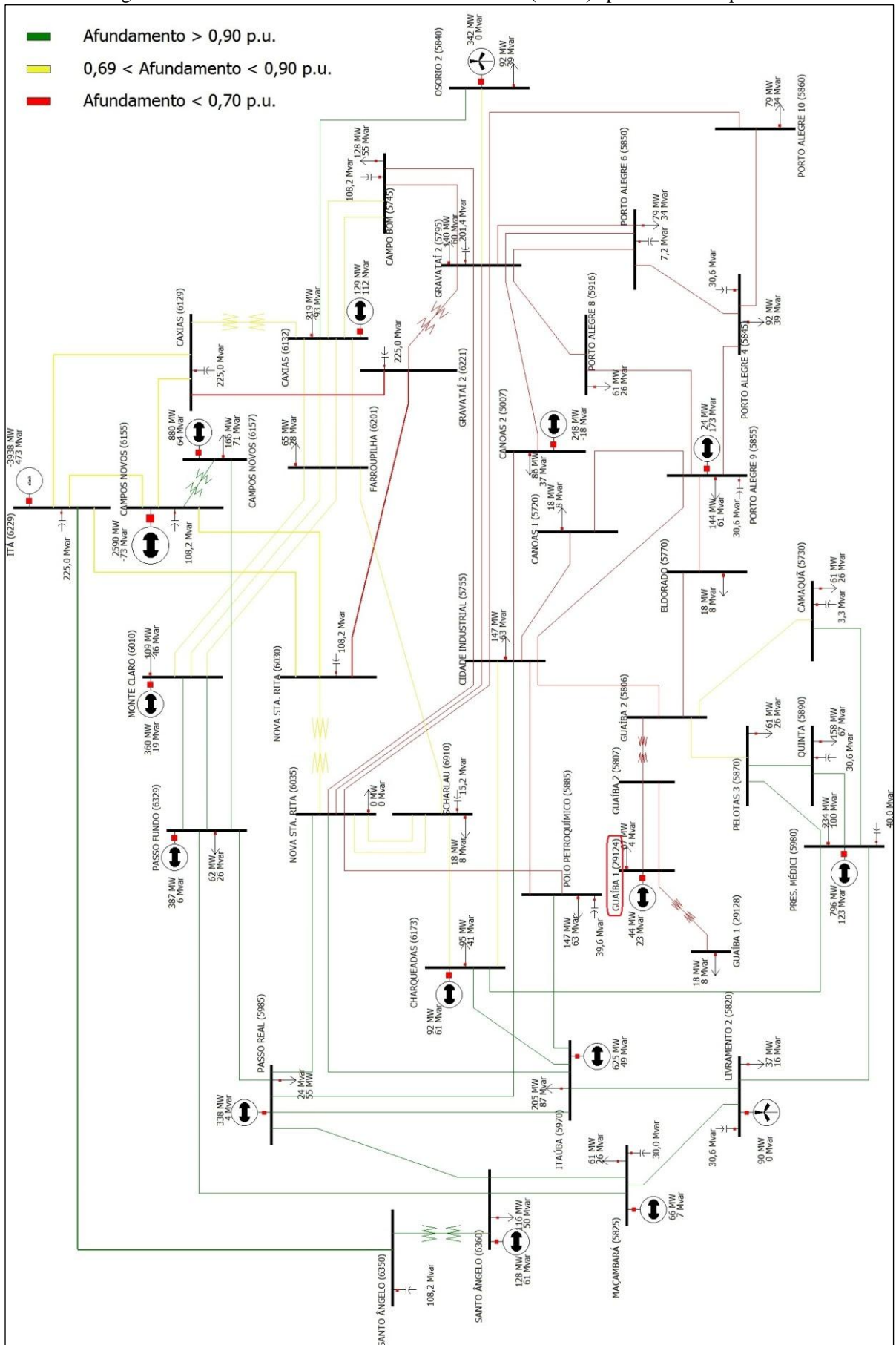


Figura 53 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 1 (29124)” para faltas do tipo FFF.



Como esperado, ao se observar as Figuras 50-53, percebe-se que os afundamentos de tensão são mais severos quando da ocorrência de curtos circuitos em linhas geograficamente mais próximas à “GUAÍBA 1 (29124)”. Verifica-se também uma maior sensibilidade em relação à faltas em linhas das regiões leste e norte do Estado quando comparadas à faltas em linhas das regiões oeste e sul, o que pode ser justificado pela menor interligação existente entre as subestações destas últimas e por estarem situadas nos extremos do SIN.

Exceto as questões geográficas, percebe-se também a influência dos níveis de tensão das linhas na delimitação das áreas de vulnerabilidade. Apesar de algumas linhas de 525 kV estarem geograficamente mais distantes em relação a outras de 230 kV, a ocorrência de curtos circuitos nestas linhas implicam em afundamentos de tensão mais severos.

A conexão da empresa CMPC na barra “GUAÍBA 1 (29124)”, cujo nível de tensão é 69 kV, apresenta-se sensível tanto para faltas no sistema de transmissão quanto para faltas no sistema de distribuição. Os afundamentos de tensão verificados no barramento “GUAÍBA 2 (5806)” provocados por curtos circuitos em linhas de 230 kV e 525 kV propagam-se e afetam de forma semelhante a barra “GUAÍBA 1 (29124)”, o que pode ser explicado pelo tipo de conexão dos transformadores que é  $Y_{\text{aterrado}} - Y_{\text{aterrado}}$ , ou seja, não filtra a componente de sequência zero da corrente de curto circuito, o que ocasiona em afundamentos de tensão mais intensos. No caso da ocorrência de faltas no sistema de distribuição, representadas por curtos circuitos na barra “GUAÍBA 1 (29128)”, verificou-se que independente do tipo de falta, há afundamentos de tensão abaixo de 0,70 p.u. no barramento de conexão da CMPC. Esse fato é bastante significativo ao passo que faltas no sistema de distribuição são muito mais frequentes quando comparadas a faltas na transmissão.

#### *4.5.1.2 Predição do Número de Ocorrências*

Para este tipo de análise, faz-se uso das taxas de ocorrência das falta em conjunto com os dados obtidos das simulações. Assim, pode-se obter o número esperado de afundamentos de tensão na barra “GUAÍBA 1 (29124)” tanto em relação aos tipos de falta, quanto em relação a intensidade dos afundamentos. As Figuras 54 e 55 apresentam os resultados obtidos.

Figura 54 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos mesmos.

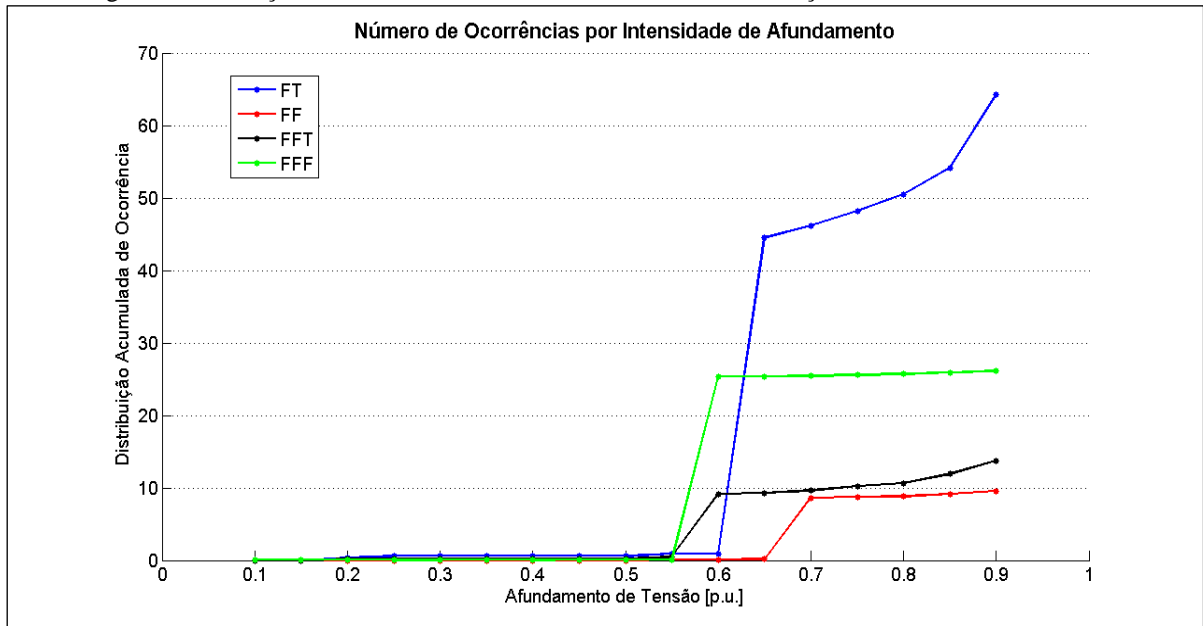
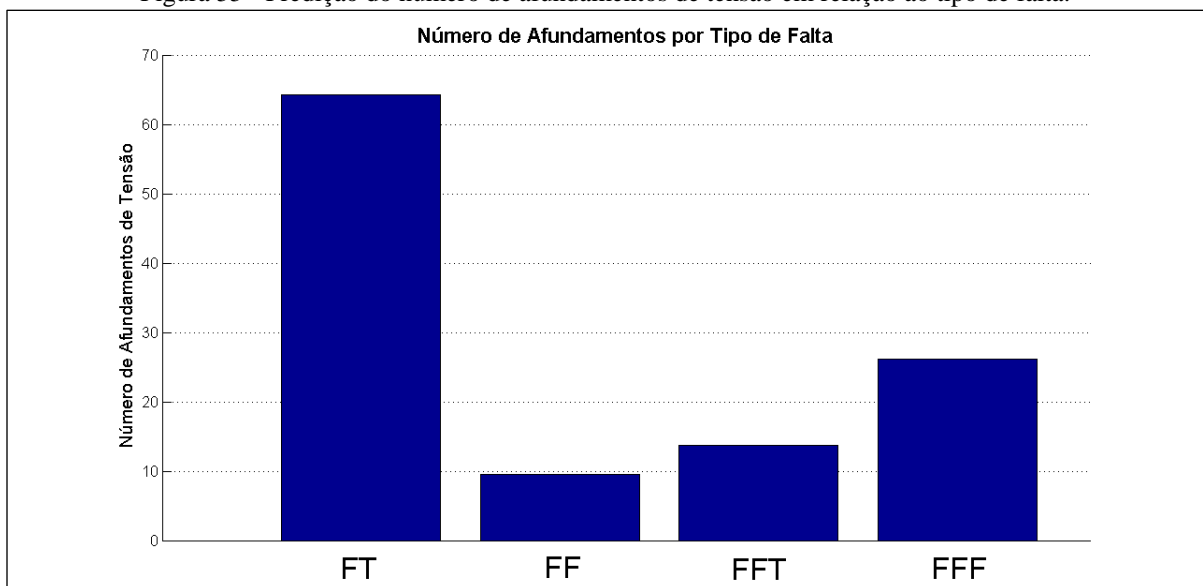


Figura 55 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta.



Observando-se a Figura 54, percebe-se um forte acúmulo nas curvas entre 0,55 e 0,70 p.u.. Esse fenômeno representa principalmente os afundamentos de tensão causados por faltas no sistema de distribuição que, para todos os tipos de falta, apresentaram-se em torno desses valores. Através disso, em sistemas de distribuição há alta probabilidade de ocorrência de curtos circuitos. É possível verificar também a continuação da ascensão das curvas, porém em menor taxa, até 0,90 p.u., principalmente para as faltas FT e FFT. Esse comportamento é comum neste tipo de análise ao passo que os afundamentos menos severos são mais frequentes. Neste sistema especificamente, um dos principais contribuintes para este comportamento

foram as faltas em linhas de transmissão em 525 kV que provocaram afundamentos em torno dos 0,80 p.u. e possuem maior probabilidade de ocorrência se comparadas às linhas em 230 kV.

A Figura 55 por sua vez, ilustra a predição dos afundamentos de tensão através de outra abordagem, na qual o número de ocorrências está atrelado aos tipos de falta. Como esperado, afundamentos de tensão oriundos da ocorrência de faltas FT predominam perante os demais. A forte contribuição das faltas no sistema de distribuição no número de afundamentos de tensão pode ser evidenciada também por este gráfico, onde as faltas FFF apresentam-se mais frequentes do que as faltas FF e FFT, característica da distribuição.

## **4.5.2 Desempenho da Configuração Futura (2015)**

### *4.5.2.1 Área de Vulnerabilidade da Barra “GUAÍBA 2 (5806)”*

De forma análoga ao exposto na seção 4.5.1.1, são realizadas quatro diferentes análises onde se verifica a vulnerabilidade do barramento de interesse, neste caso, a barra “GUAÍBA 2 (5806)”, para cada tipo de falta. As Figuras 56-59 apresentam os resultados obtidos.

Ao se observar as Figuras 56-59, de forma análoga ao panorama atual, percebe-se que os afundamentos de tensão são mais severos quando da ocorrência de curtos circuitos em linhas geograficamente mais próximas à “GUAÍBA 2 (5806)”. Uma maior sensibilidade em relação às faltas em linhas das regiões leste e norte do Estado quando comparadas às faltas em linhas das regiões oeste e sul segue evidente neste caso. Outra característica que segue inalterada, é a sensibilidade referente às faltas em linhas de transmissão de 525 kV independentemente da posição geográfica.

A conexão da empresa CMPC na barra “GUAÍBA 2 (5806)”, cujo nível de tensão é 230 kV, apresenta-se sensível para grande parte do sistema de transmissão, no entanto, no caso da ocorrência de faltas no sistema de distribuição, verifica-se que independente do tipo de falta, não há afundamentos de tensão no barramento de conexão da CMPC.

Figura 56 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FT.

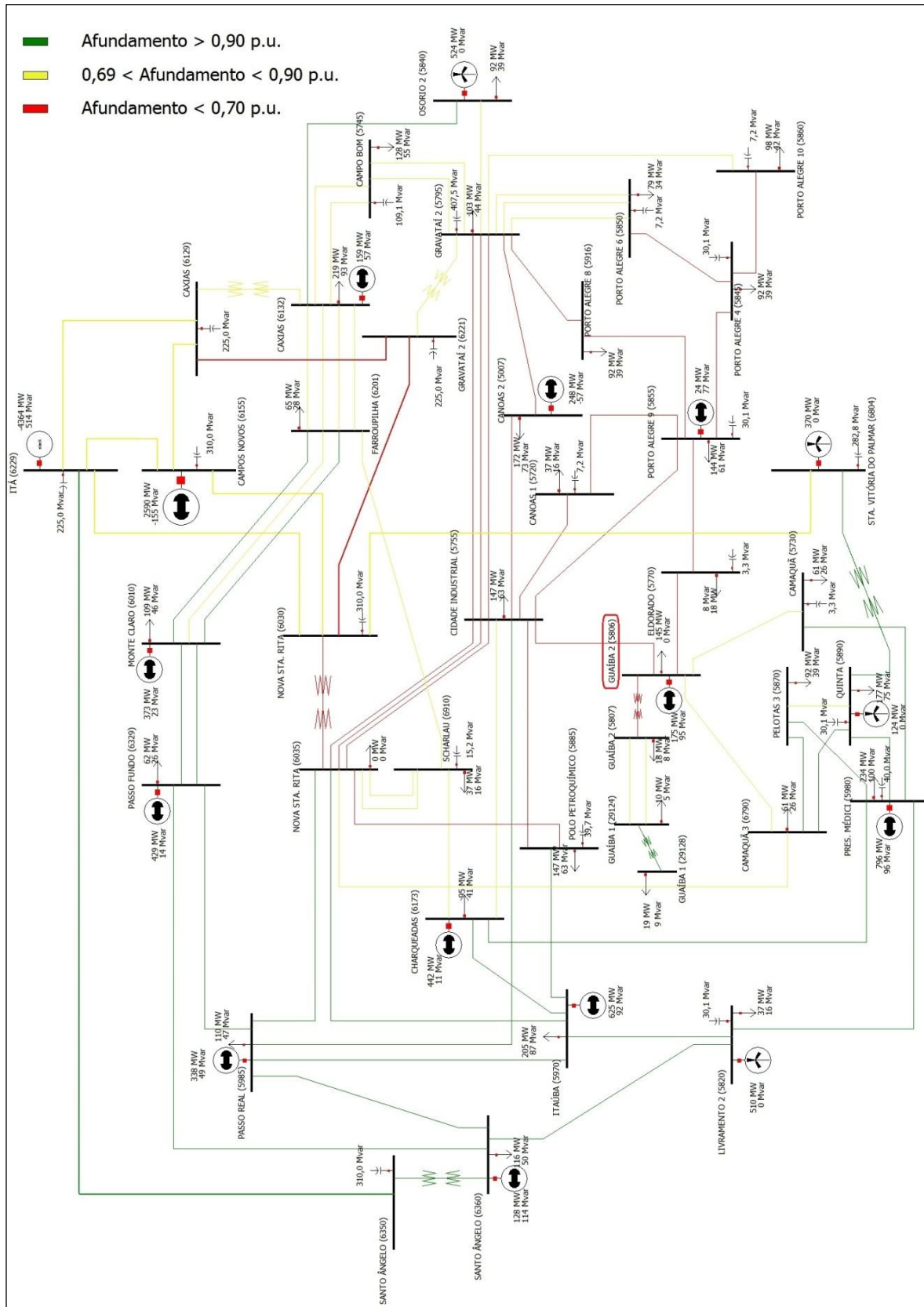




Figura 57 - Áreas de vulnerabilidade de “GUAÍBA 2 (5806)” para faltas do tipo FF.

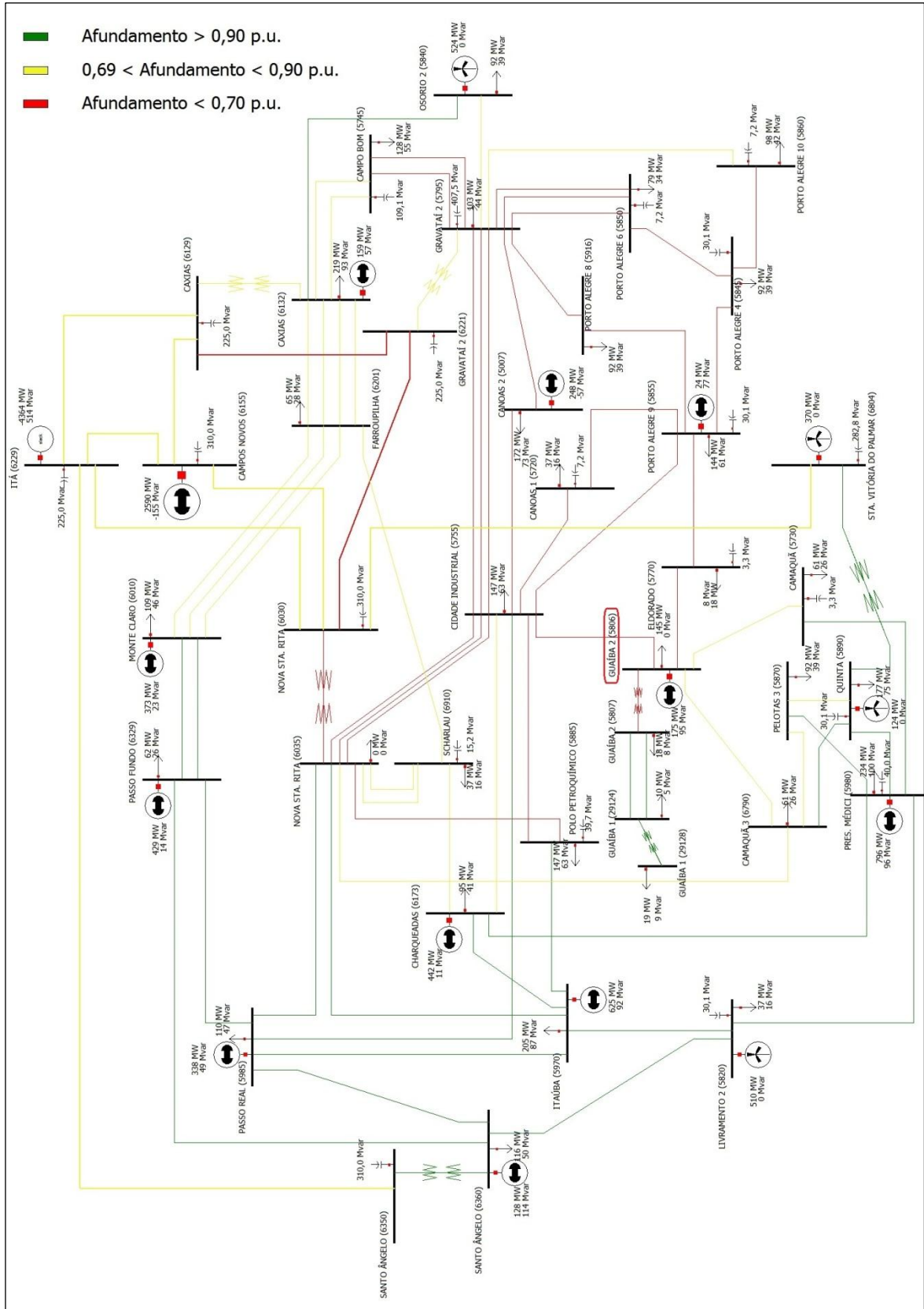


Figura 58 - Áreas de vulnerabilidade de "GUAÍBA 2 (5806)" para faltas do tipo FFT.

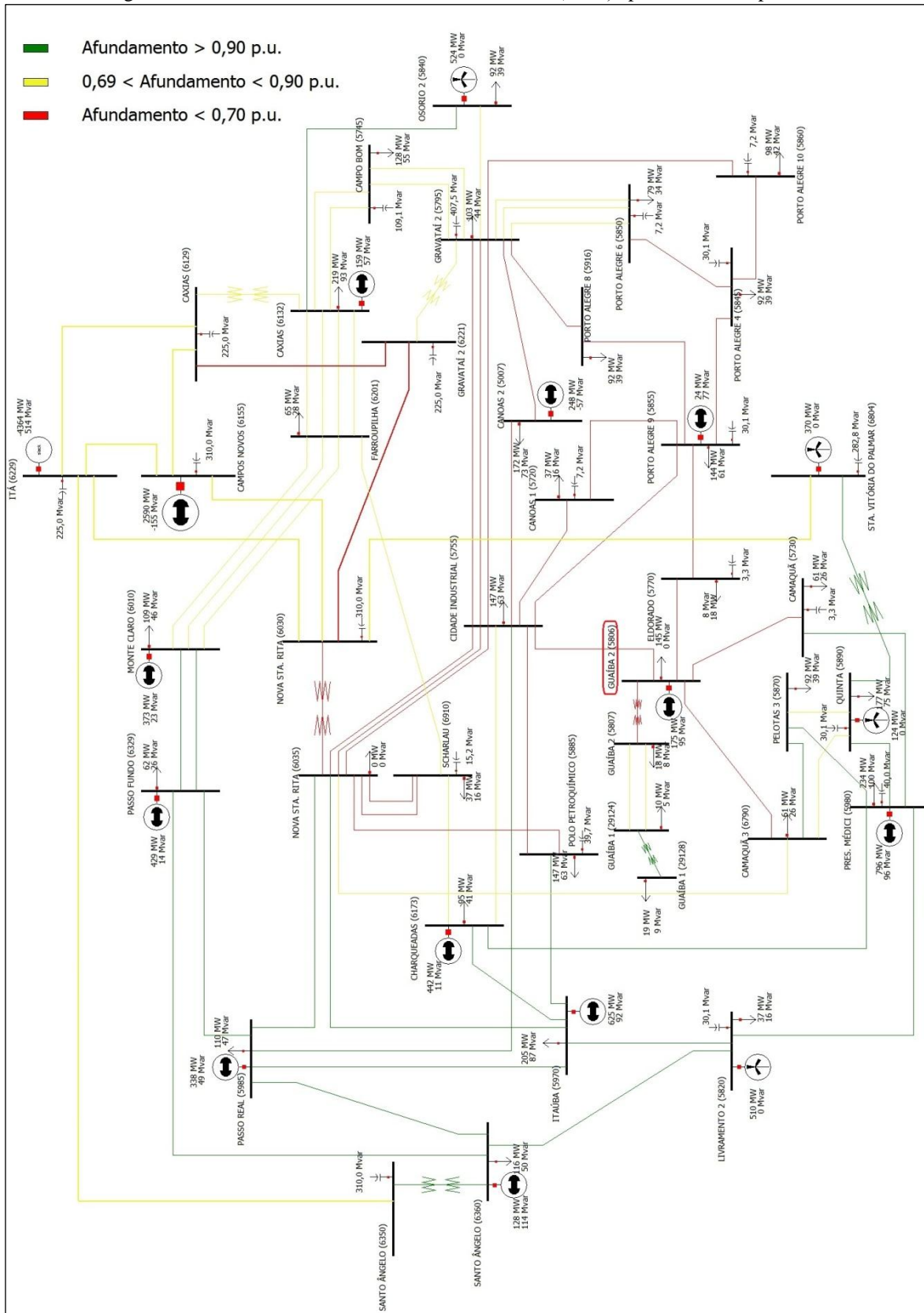
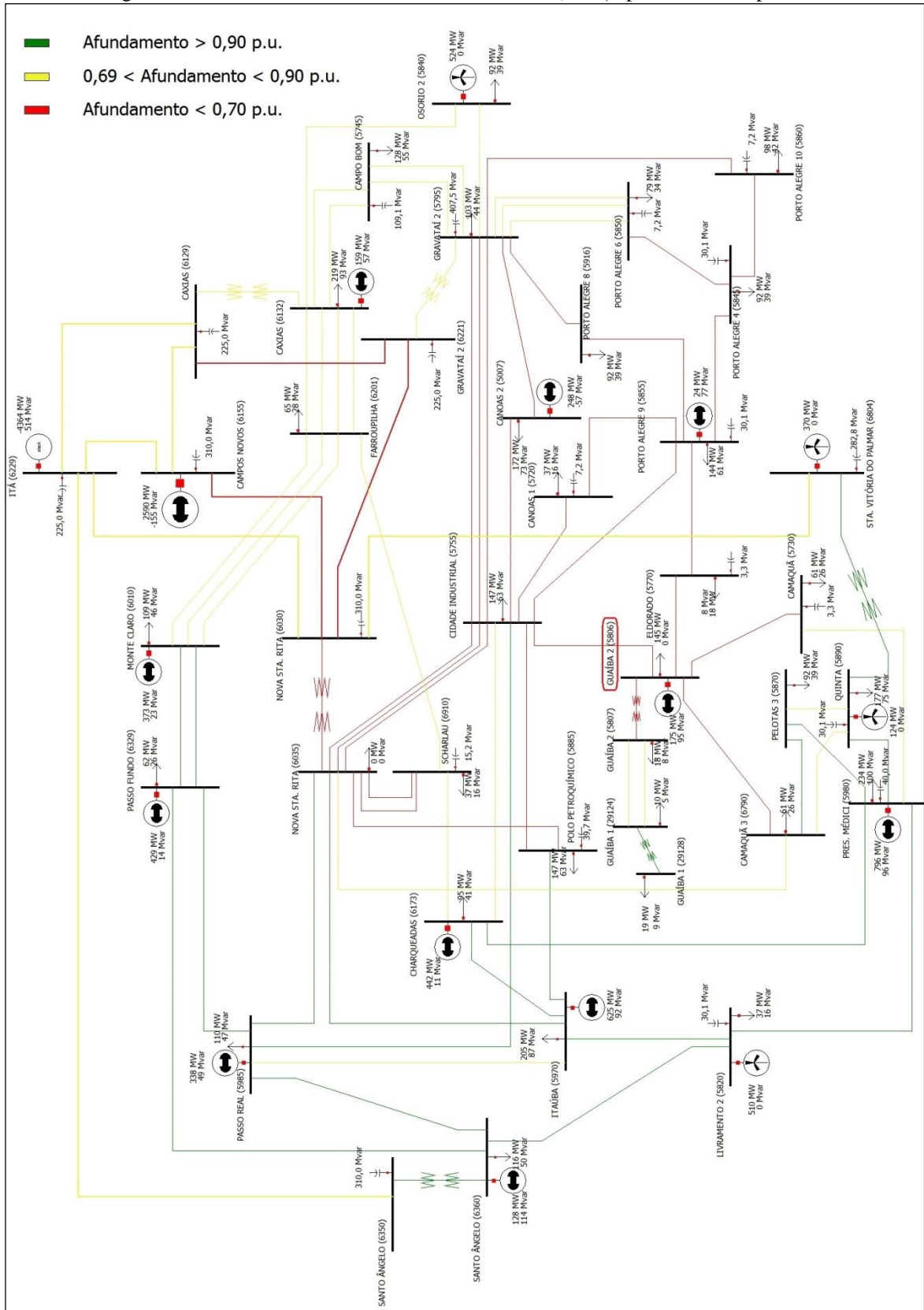


Figura 59 - Áreas de vulnerabilidade de "GUAÍBA 2 (5806)" para faltas do tipo FFF.



#### 4.5.2.2 Predição do Número de Ocorrências

De abordagem idêntica ao exposto na seção 4.5.1.2, pode-se obter o número esperado de afundamentos de tensão na barra de interesse, neste caso “GUAÍBA 2 (5806)”, tanto em relação aos tipos de falta, quanto em relação a intensidade dos afundamentos. As Figuras 60 e 61 apresentam os resultados obtidos.

Figura 60 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos mesmos.

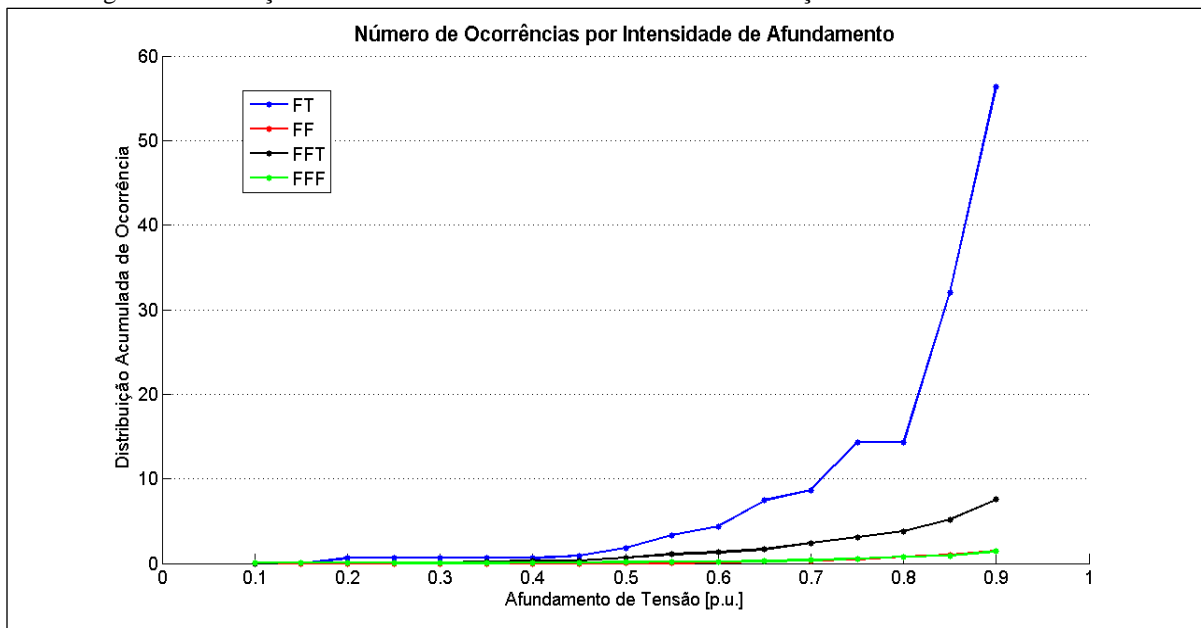
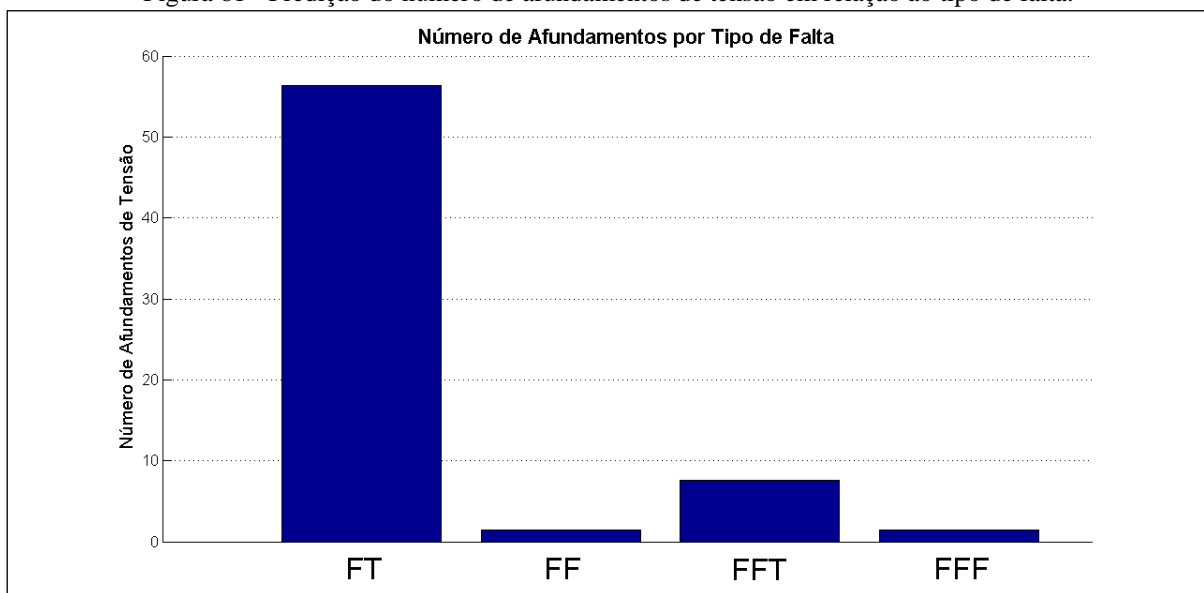


Figura 61 - Predição do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta.



Observando-se a Figura 60, percebe-se um aclave significativo nas curvas a partir de 0,70 p.u.. Esse fenômeno ilustra a robustez do ponto de conexão em 230 kV ao passo que curtos circuitos na grande maioria das linhas não acarretam em afundamentos de tensão severos. Para afundamentos de tensão oriundos de faltas FT, massiva maioria, percebe-se forte aclave entre 0,80 e 0,90 p.u., reforçando essa tese. A robustez do ponto de análise pode ainda ser evidenciada ao se comparar o número de afundamentos de tensão esperados para intensidades entre 0,70 e 0,90 p.u. com os esperados para intensidades abaixo de 0,70 p.u., cujo número é quatro vezes menor.

Através do exposto pela Figura 61 por sua vez, de forma análoga ao panorama atual, afundamentos de tensão oriundos da ocorrência de faltas FT predominam perante os demais, neste caso, de forma ainda mais significativa. A observação da disposição do número de ocorrências por tipo de falta remete à verificação da pouca influência exercida pelo sistema de distribuição no número de afundamentos preditos ao passo que segue os padrões de probabilidade de ocorrência de faltas em linhas de 230 kV, e, especialmente, em linhas de 525 kV.

#### **4.5.3 Comparativo Entre os Cenários**

Com o intuito de complementar as análises anteriormente realizadas, propõe-se a comparação entre ambos os panoramas. Essa abordagem reforça as observações já expostas e é a principal contribuição deste trabalho.

No que diz respeito às áreas de vulnerabilidade, ambos os cenários apresentam algumas características semelhantes. Nos dois panoramas se observa que os afundamentos de tensão são mais severos quando da ocorrência de curtos circuitos em linhas geograficamente mais próximas ao barramento de interesse. É comum aos dois cenários também a sensibilidade em relação à faltas em linhas das regiões leste e norte do Estado quando comparadas à faltas em linhas das regiões oeste e sul.

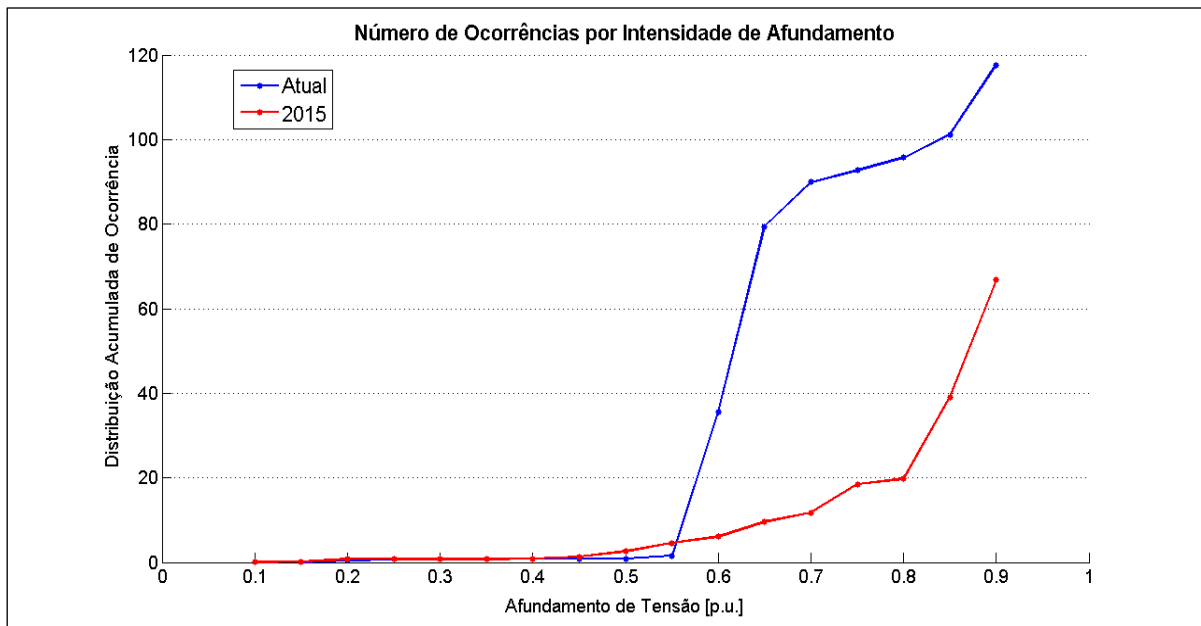
Por outro lado, os cenários também apresentam características próprias. A conexão da empresa CMPC na barra “GUAÍBA 2 (5806)”, cujo nível de tensão é 230 kV, apresenta-se mais sensível para o sistema de transmissão quando comparada à conexão pela barra “GUAÍBA 1 (29124)” em 69 kV. Isso pode ser verificado pela expansão das áreas representadas pelas cores vermelha e amarela nos diagramas de análise do panorama futuro, para todos os tipos de falta.

No caso da ocorrência de faltas no sistema de distribuição, ao se analisar os diagramas relativos à conexão futura, verifica-se que independentemente do tipo de falta, não há afun-

damentos de tensão no barramento “GUAÍBA 2 (5806)”. Em contrapartida, a conexão através da barra “GUAÍBA 1 (29124)” apresenta-se sensível à estas faltas registrando afundamentos de tensão abaixo de 0,70 p.u. em todos os casos.

Outra forma de se comparar o desempenho dos cenários consiste em analisar a predição do número de afundamentos de tensão de ambos os panoramas conjuntamente. As Figuras 62 e 63 ilustram essa abordagem.

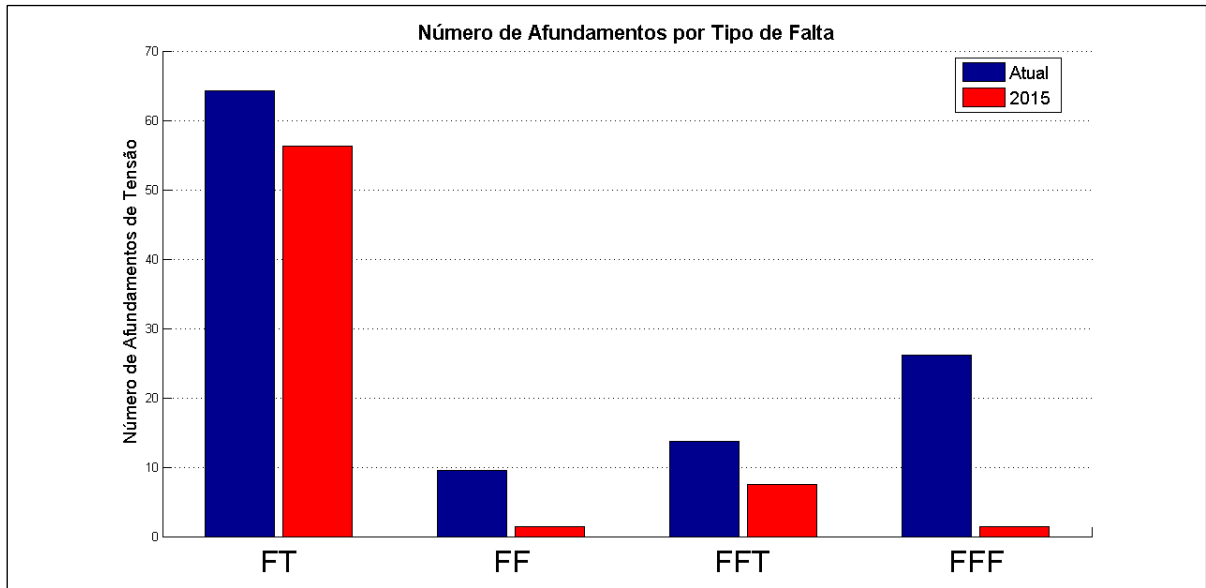
Figura 62 - Comparativo do número de afundamentos de tensão em relação à intensidade dos mesmos entre ambos os cenários.



Ao se analisar a Figura 62, percebe-se a evidente diminuição nos números totais de afundamentos previstos com a modificação da topologia de conexão. Conectando-se em 230 kV, espera-se cerca de metade do número de afundamentos preditos para a situação atual. Especificando-se a análise para o trecho entre 0,55 e 0,70 p.u., percebe-se a independência adquirida com a nova conexão em relação às faltas ocorridas no sistema de distribuição uma vez que o número de afundamentos para este trecho reduz cerca de 90%.

Voltando as atenções para o trecho entre 0,45 e 0,55 p.u., percebe-se que a conexão atual apresenta melhor desempenho se comparada à conexão futura, uma vez que consiste em números menores de afundamentos esperados neste trecho. No entanto, essa vantagem apresenta-se irrisória ao passo que a partir de 0,55 p.u. a topologia de conexão futura apresenta desempenho significativamente melhor.

Figura 63 - Comparativo do número de afundamentos de tensão em relação ao tipo de falta entre ambos os cenários.



A Figura 63 reforça as observações realizadas até então ilustrando a diminuição do número total de afundamentos e a independência adquirida em relação ao sistema de distribuição. Adicionalmente, pode-se perceber que o número total de afundamentos oriundos de faltas FT, massiva maioria, é semelhante para ambos os panoramas. No entanto, o barramento em 230 kV mostra-se mais robusto em relação ao de 69 kV, logo, tais faltas, apesar da igualdade numérica, impactam em níveis de afundamentos diferentes, no caso da conexão em 230 kV, níveis mais brandos.

Mudando o enfoque da análise para as faltas FFF, percebe-se que é principalmente através desse tipo de falta que se verifica a melhora no desempenho da conexão passando-se dos atuais 69 kV para 230 kV. Ainda que as faltas FFF não representem a maioria das causas de afundamentos de tensão, são os afundamentos oriundos destas faltas que diminuem de maneira mais significativa.

## 5 CONCLUSÕES

Através deste projeto de diplomação, realizou-se um estudo de caso no qual se propôs a predição do número de afundamentos de tensão no ponto de conexão da empresa CMPC Celulose Riograndense LTDA com a concessionária de energia elétrica oriundos de faltas no sistema elétrico de potência. Em função da expansão da planta industrial da empresa, cuja entrada em operação está prevista para 2015, analisaram-se dois cenários distintos, atual e futuro (2015). Logo, a predição de afundamentos de tensão elaborada neste trabalho realizou-se sobre os barramentos “GUAÍBA 1 (29124)” (panorama atual) e “GUAÍBA 2 (5806)” (panorama futuro).

Para que se tornasse possível a elaboração desse estudo, realizou-se revisão bibliográfica a respeito dos conceitos que tangem os afundamentos de tensão. Dentre estes conceitos, abordaram-se desde os clássicos, referentes ao estudo de curto circuito, até os mais recentes, referentes à qualidade de energia elétrica. Em razão disso, as primeiras seções deste projeto foram dedicadas a esta etapa.

A metodologia utilizada para a predição dos afundamentos de tensão consistiu na simulação de curtos circuitos no SEP, para que então, fossem registrados os níveis de tensão nos barramentos de interesse. Uma vez obtida a magnitude dos afundamentos, tais informações foram relacionadas aos índices de ocorrência de falta, obtendo-se então, o número esperado de afundamentos de tensão em relação aos níveis de tensão e aos tipos de falta.

Para a realização das simulações, optou-se pelo programa computacional *Power World*® que se mostrou bastante eficiente e de fácil manuseio, apesar das limitações impostas pela utilização da versão estudantil do *software*. A coleta de dados para a implementação dos sistemas equivalentes caracterizou-se por ser a etapa mais extensa do projeto ao passo que são diversos os dados necessários para se representar de forma satisfatória um sistema de 40 barras.

A análise dos resultados obtidos das simulações baseou-se em duas principais abordagens: Identificação das áreas de vulnerabilidade e predição do número de ocorrências. Em um primeiro momento, analisaram-se os cenários separadamente, para que em seguida, pudesse ser realizada uma análise comparativa entre eles. Tais técnicas de análise mostraram-se eficientes, expressando o desempenho dos sistemas de forma clara e objetiva.

Contudo, pôde-se constatar que a nova topologia de conexão da empresa CMPC com a concessionária de energia elétrica terá efetivamente melhor desempenho referente à sensibilidade em relação aos afundamentos de tensão quando comparada à topologia atual. Essa cons-



tatação tornou-se possível através das análises realizadas nesse trabalho que apresentaram resultados quantitativos e qualitativos a respeito do desempenho de ambos os panoramas. Essa conclusão, fundamentada em resultados, certamente é a principal contribuição deste projeto de diplomação.

Considerando as limitações impostas pelo programa computacional utilizado para realizar as simulações, sugere-se como trabalho futuro a implementação mais detalhada dos sistemas equivalentes, incluindo-se os componentes suprimidos neste estudo. Um trabalho nessa linha agregaria valor ao estudo já realizado e poderia apresentar resultados ainda mais significativos. Ainda tomando como base os sistemas implementados neste projeto, pode-se realizar também outros estudos, como por exemplo, fluxo de carga, despacho econômico e análises de estabilidade.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL, PRODIST**: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Revisão 4. Brasília, 2012.

\_\_\_\_\_. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Brasília, 2013. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Empreendimento/ResumoUsina.asp?lboxUsina=30666:C MPC%20\(Antiga%20Aracruz%20Unidade%20Gua%EDba\)](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Empreendimento/ResumoUsina.asp?lboxUsina=30666:C MPC%20(Antiga%20Aracruz%20Unidade%20Gua%EDba))>.

BOLLEN, H. J. Math; SPEYCHAL, Magnus; LINDÉN, Kerstin. Estimation of dip frequency from fault statistics – including three-phase characteristics. **International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH**. Stockholm, 2006.

\_\_\_\_\_. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. New York: IEE Press Series on Power Engineering, 2000.

CABRAL, Roberto José. **Análise Numérica de Curto Circuito Utilizando Componentes Simétricas e Componentes de Fases para Obter Índices de Afundamentos de Tensão**. 2010. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, 2010.

CABRAL, J. Roberto; LEBORGNE, C. Roberto; BRETAS, S. Arturo. Obtenção de Índices de Afundamentos de Tensão Devido a Faltas Monofásicas em Sistemas de Distribuição. **Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso**. Cuiabá, 2011.

DOUGHERTY, G. Jeff; STEBBINS, L. Wayne. Power quality: a utility and industry perspective. **IEEE Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference**. 1997.

DUGAN, R. C. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2004.

GRAINGER, J. J. ; STEVENSON JR., D. W. **Power System Analysis**. 1. Ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 1994.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1159**: IEEE Standard for Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, **IEC Std. 61000-4-30**: (EMC), part 4: testing and measurement techniques. Section 30: power quality measurement methods. Switzerland, 2003.

LEBORGNE, Roberto Chouhy. **Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão**. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, 2003.

\_\_\_\_\_. **Voltage sags: single event characterisation, system performance and source location.** 2007. 104 f. Tese (Doutorado) – Chalmers University of Technology. Division of Electric Power Engineering – Department of Energy and Environment, Göteborg, Sweden, 2007.

MCGRANAGHAN, F. Mark; MUELLER, R. Mueller; SAMOTYI, J. Marek. Voltage sags in industrial systems. **IEEE Transactions on Industry Applications.** 1993.

OLGUIN, Gabriel. **Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems Based on Stochastic Assessment and Optimal Monitoring.** 2005. 165 f. Tese (Doutorado) - Chalmers University of Technology. Division of Electric Power Engineering – Department of Energy and Environment, Göteborg, Sweden, 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Plano de Ampliações e Reforços até 2013: Procedimentos de Rede 11.3 – Diagrama de Impedâncias.** Brasília, 2011. 3 p. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/diagramas\\_impedancias.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/diagramas_impedancias.aspx)>.

\_\_\_\_\_. **Plano de Ampliações e Reforços até 2014: Procedimentos de Rede 11.3 – Diagrama de Impedâncias.** Brasília, 2012. 3 p. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/diagramas\\_impedancias.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/diagramas_impedancias.aspx)>.

\_\_\_\_\_. **Plano de Ampliações e Reforços até 2015: Procedimentos de Rede 11.3 – Diagrama de Impedâncias.** Brasília, 2013. 5 p. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/diagramas\\_impedancias.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/diagramas_impedancias.aspx)>.

\_\_\_\_\_. **Plano de Ampliações e Reforços: Casos de Referência – Curto Circuito.** Brasília, 2013. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/plano\\_ampliacao/casos\\_refer\\_curto.aspx](http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/casos_refer_curto.aspx)>.

\_\_\_\_\_. **Sistema de Informações Geográficas do SIN – SINDAT.** Brasília, 2013. Disponível em: <<http://aplicsindat.ons.org.br/sindat/>>

TLEIS, N. **Power Systems Modelling and Fault Analysis.** 1. ed. Oxford: Editora Newnes, 2008.

ZANETTA JR., L. C. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência.** 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

## APÊNDICE A

Neste apêndice estão expostos os dados coletados para a implementação dos sistemas equivalentes.

Tabela 1 - Dados de entrada dos barramentos para o sistema atual.

| Barramento             | Tensão [kV] | Potência Nominal do Transformador [MVA] | Carga Considerada [MVA] | Compensador de Reativo [MVar] | Admitância Equivalente de Sequência Zero [p.u.] |
|------------------------|-------------|---|-------------------------|-------------------------------|---|
| CANOAS 1 (5720)        | 230         | 50                                      | 18,40 + j7,84           | -                             | 0,60 - j3,97                                    |
| OSÓRIO 2 (5840)        | 230         | 249                                     | 91,63 + j39,04          | -                             | 0,57 - j13,47                                   |
| CANOAS 2 (5007)        | 230         | 234                                     | 86,11 + j36,68          | -                             | -   |
| PORTO ALEGRE 6 (5850)  | 230         | 216                                     | 79,49 + j33,68          | 7,2                           | 0,65 - j12,26                                   |
| GUAÍBA 1 (29124)       | 69          | -                                       | 67,00 + j4,00           | -                             | 0,26 - j8,84                                    |
| PORTO ALEGRE 8 (5916)  | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | -                             | 0,15 - j8,25                                    |
| GRAVATAÍ 2 (5795)      | 230         | 380                                     | 139,84 + j59,57         | 200                           | 0,93 - j16,62                                   |
| GUAÍBA 2 (5807)        | 69          | -                                       | -                       | -                             | -   |
| PELOTAS 3 (5870)       | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | -                             | -0,39 - j14,07                                  |
| PORTO ALEGRE 10 (5860) | 230         | 216                                     | 79,49 + j33,86          | -                             | 0,78 - j11,32                                   |
| GUAÍBA 2 (5806)        | 230         | 100                                     | 36,80 + j15,68          | -                             | -   |
| ELDORADO (5770)        | 230         | 50                                      | 18,40 + j7,84           | -                             | 0,09 - j2,80                                    |
| PORTO ALEGRE 4 (5845)  | 230         | 250                                     | 92,00 + j39,19          | 36                            | 1,00 - j14,11                                   |
| CAMAQUÃ (5730)         | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | 3,6                           | 0,39 - j8,93                                    |
| PORTO ALEGRE 9 (5855)  | 230         | 390                                     | 143,52 + j61,14         | 8                             | 0,67 - j10,70                                   |
| CIDADE INDUST. (5755)  | 230         | 400                                     | 147,20 + j61,71         | -                             | 0,56 - j16,3                                    |
| QUINTA (5890)          | 230         | 430                                     | 158,24 + j67,41         | 75                            | 0,28 - j11,58                                   |
| PRES. MÉDICI (5890)    | 230         | 635                                     | 233,68 + j99,55         | 40                            | 1,39 - j4,19                                    |
| LIVRAMENTO 2 (5820)    | 230         | 100                                     | 36,80 + j15,68          | 30                            | 0,33 - j5,79                                    |
| ITAÚBA (5970)          | 230         | 556                                     | 204,61 + j87,16         | -                             | 0,01 - j21,07                                   |
| CHARQUEADAS (6173)     | 230         | 259                                     | 95,31 + j40,60          | -                             | 1,40 - j21,07                                   |
| SANTO ÂNGELO (6360)    | 230         | 316                                     | 116,29 + j49,54         | -                             | 1,00 - j56,99                                   |
| POLO PETROQ. (5885)    | 230         | 400                                     | 147,20 + j62,71         | 39,6                          | 0,17 - j11,91                                   |
| SCHARLAU (6910)        | 230         | 50                                      | 18,40 + j7,84           | 15,2                          | 0,19 - j47,03                                   |
| MONTE CLARO (6010)     | 230         | 295,22                                  | 108,64 + j46,28         | -                             | 0,69 - j5,62                                    |
| FARROUPILHA (6201)     | 230         | 176                                     | 64,77 + j27,59          | -                             | 0,51 - j14,96                                   |
| NOVA STA. RITA (6035)  | 230         | 0                                       | -                       | -                             | 0,09 - j13,75                                   |
| CAXIAS (6132)          | 230         | 595                                     | 218,96 + j93,28         | -                             | 0,97 - j6,06                                    |
| PASSO FUNDO (6329)     | 230         | 168                                     | 61,82 + j26,34          | -                             | 1,12 - j37,22                                   |
| GRAVATAÍ 2 (6221)      | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| NOVA STA. RITA (6030)  | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| CAXIAS (6129)          | 525         | -                                       | -                       | 75                            | -   |
| CAMPOS NOVOS (6155)    | 525         | -                                       | -                       | 200                           | -   |
| ITÁ (6229)             | 525         | -                                       | -                       | 225                           | -   |
| SANTO ÂNGELO (6350)    | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| PASSO REAL (5985)      | 230         | 150                                     | 55,20 + j23,52          | -                             | 0,45 - j8,06                                    |
| CAMPO BOM (5745)       | 230         | 349                                     | 128,43 + j54,71         | 107,2                         | 0,84 - j15,83                                   |
| CAMPOS NOVOS (6157)    | 230         | 450                                     | 165,60 + j70,55         | -                             | 0,44 - j31,31                                   |
| MAÇARAMBÁ (5825)       | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | 30                            | 0,29 - j7,62                                    |
| GUAÍBA (29128)         | 23          | 50                                      | 18,40 + j7,84           | -                             | -   |

Tabela 2 - Dados de entrada dos barramentos para o sistema futuro (2015).

| Barramento                 | Tensão [kV] | Potência Nominal do Transformador [MVA] | Carga Considerada [MVA] | Compensador de Reativo [MVar] | Admitância Equivalente de Sequência Zero [p.u.] |
|----------------------------|-------------|---|-------------------------|-------------------------------|---|
| CANOAS 1 (5720)            | 230         | 100                                     | 36,80 + j15,68          | 7,2                           | 0,60 – j3,97                                    |
| OSÓRIO 2 (5840)            | 230         | 249                                     | 91,63 + j39,04          | -                             | 0,57 – j13,47                                   |
| CANOAS 2 (5007)            | 230         | 468                                     | 172,22 + j73,27         | -                             | -   |
| PORTO ALEGRE 6 (5850)      | 230         | 216                                     | 79,49 + j33,86          | 7,2                           | 0,65 – j12,26                                   |
| GUAÍBA 1 (29124)           | 69          | -                                       | 10,20 + j4,90           | -                             | 0,26 – j8,84                                    |
| PORTO ALEGRE 8 (5916)      | 230         | 249                                     | 91,63 + j39,04          | -                             | 0,15 – j8,25                                    |
| GRAVATAÍ 2 (5795)          | 230         | 280                                     | 103,04 + j43,89         | 200                           | 0,93 – j16,62                                   |
| GUAÍBA 2 (5807)            | 69          | 50                                      | 18,40 + j7,84           | -                             | -   |
| PELOTAS 3 (5870)           | 230         | 249                                     | 91,63 + j39,04          | -                             | -0,39 – j14,07                                  |
| PORTO ALEGRE 10 (5860)     | 230         | 266                                     | 97,89 + j41,70          | 7,2                           | 0,78 – j11,32                                   |
| GUAÍBA 2 (5806)            | 230         | -                                       | 145,00 + j0,00          | -                             | -   |
| ELDORADO (5770)            | 230         | 50                                      | 18,4 + j7,84            | 3,6                           | 0,09 – j2,80                                    |
| PORTO ALEGRE 4 (5845)      | 230         | 250                                     | 92,00 + j39,19          | 36                            | 1,00 – j14,11                                   |
| CAMAQUÃ (5730)             | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | 3,6                           | 0,39 – j8,93                                    |
| PORTO ALEGRE 9 (5855)      | 230         | 390                                     | 143,52 + j61,14         | 8                             | 0,67 – j10,70                                   |
| CIDADE INDUST. (5755)      | 230         | 400                                     | 147,20 + j62,71         | -                             | 0,56 – j16,3                                    |
| QUINTA (5890)              | 230         | 480                                     | 176,64 + j75,25         | 78,6                          | 0,28 – j11,58                                   |
| PRES. MÉDICI (5980)        | 230         | 635                                     | 233,68 + j99,55         | 40                            | 1,39 – j4,19                                    |
| LIVRAMENTO 2 (5820)        | 230         | 100                                     | 36,80 + j15,68          | 31,8                          | 0,33 – j5,79                                    |
| ITAÚBA (5970)              | 230         | 556                                     | 204,61 + j87,16         | -                             | 0,01 – j21,07                                   |
| CHARQUEADAS (6173)         | 230         | 259                                     | 95,31 + j40,60          | -                             | 1,40 – j21,07                                   |
| SANTO ÂNGELO (6360)        | 230         | 316                                     | 116,29 + j49,54         | -                             | 1,00 – j56,99                                   |
| POLO PETROQ. (5885)        | 230         | 400                                     | 147,20 + j62,71         | 39,6                          | 0,17 – j11,91                                   |
| SCHARLAU (6910)            | 230         | 100                                     | 36,80 + j15,68          | 15,2                          | 0,19 – j47,03                                   |
| MONTE CLARO (6010)         | 230         | 295,22                                  | 108,64 + j46,28         | -                             | 0,69 – j5,62                                    |
| FARROUPILHA (6201)         | 230         | 176                                     | 64,77 + j27,59          | -                             | 0,51 – j14,96                                   |
| NOVA STA. RITA (6035)      | 230         | -                                       | -                       | -                             | 0,09 – j13,75                                   |
| CAXIAS (6132)              | 230         | 595                                     | 218,96 + j93,28         | -                             | 0,97 – j6,06                                    |
| PASSO FUNDO (6329)         | 230         | 168                                     | 61,82 + j26,34          | -                             | 1,12 – j37,22                                   |
| GRAVATAÍ 2 (6221)          | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| NOVA STA. RITA (6030)      | 525         | -                                       | -                       | 300                           | -   |
| CAXIAS (6129)              | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| CAMPOS NOVOS (6155)        | 525         | -                                       | -                       | 200                           | -   |
| ITÁ (6229)                 | 525         | -                                       | -                       | 225                           | -   |
| SANTO ÂNGELO (6350)        | 525         | -                                       | -                       | 150                           | -   |
| PASSO REAL (5985)          | 230         | 300                                     | 110,4 + j47,03          | -                             | 0,45 – j8,06                                    |
| CAMAQUÃ 3 (6790)           | 230         | 166                                     | 61,09 + j26,02          | -                             | 0,03 – j13,53                                   |
| STA. VIT. DO PALMAR (6804) | 525         | 75                                      | -                       | 250                           | -   |
| GUAÍBA 1 (29128)           | 23          | 50                                      | 19,40 + j8,84           | -                             | -   |
| CAMPO BOM (5745)           | 230         | 349                                     | 128,43 + j54,71         | 107,2                         | 0,84 – j15,83                                   |

Tabela 3 - Dados de entrada das linhas para o sistema atual.

| Linha                                       | Comprimento [km] | Impedância de Sequência Positiva [p.u.] | Impedância de Sequência Zero [p.u.] |
|---|------------------|---|-------------------------------------|
| CANOAS 1 (5720) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1   | 2,00             | 0,0020 + j0,0099                        | 0,0079 + j0,0290                    |
| CIDADE IND. (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2   | 12,80            | 0,0020 + j0,0099                        | 0,0078 + j0,0290                    |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1    | 86,51            | 0,0088 + j0,0441                        | 0,0351 + j0,0627                    |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1        | 109,00           | 0,0206 + j0,1156                        | 0,0607 + j0,3527                    |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2    | 9,62             | 0,0020 + j0,0114                        | 0,0082 + j0,0293                    |
| CIDADE IND. (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1   | 9,48             | 0,0011 + j0,0063                        | 0,0054 + j0,0177                    |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c1 | 29,20            | 0,0052 + j0,0269                        | 0,0235 + j0,0760                    |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c2 | 29,20            | 0,0056 + j0,0251                        | 0,0176 + j0,0654                    |

|  |        |                  |                  |
|--|--------|------------------|------------------|
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c3      | 29,20  | 0,0056 + j0,0251 | 0,0176 + j0,0654 |
| P. ALEGRE 6 (5850) – P. ALEGRE 4 (5845) – c2     | 10,20  | 0,0014 + j0,0088 | 0,0067 + j0,0223 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1          | 7,00   | 0,0206 + j0,0637 | 0,0614 + j0,1720 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2          | 7,00   | 0,0169 + j0,0625 | 0,0587 + j0,1875 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 8 (5916) – c2      | 17,20  | 0,0032 + j0,0154 | 0,0104 + j0,0426 |
| P. ALEGRE 9 (5855) – P. ALEGRE 8 (5916) – c1     | 12,00  | 0,0018 + j0,0086 | 0,0058 + j0,0237 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 10 (5860) – c1     | 36,01  | 0,0053 + j0,0330 | 0,0282 + j0,0915 |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1      | 12,50  | 0,0025 + j0,0112 | 0,0100 + j0,0325 |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2      | 12,50  | 0,0025 + j0,0112 | 0,0100 + j0,0325 |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3      | 12,50  | 0,0025 + j0,0112 | 0,0100 + j0,0325 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1        | 21,40  | 0,0047 + j0,0223 | 0,0165 + j0,0609 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2        | 21,40  | 0,0047 + j0,0223 | 0,0165 + j0,0609 |
| GUAÍBA 2 (5806) - PELOTAS 3 (5870) – c2          | 209,40 | 0,0042 + j0,2090 | 0,1880 + j0,5016 |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1            | 43,86  | 0,0066 + j0,0073 | 0,0370 + j0,1015 |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2      | 135,00 | 0,0137 + j0,1161 | 0,0992 + j0,3791 |
| P. ALEGRE 4 (5845) – P. ALEGRE 10 (5860) – c1    | 3,53   | 0,0004 + j0,0025 | 0,0019 + j0,0063 |
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1           | 21,40  | 0,0028 + j0,0014 | 0,0105 + j0,0416 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1            | 87,25  | 0,0172 + j0,0857 | 0,0667 + j0,2468 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE IND. (5755) – c1        | 38,50  | 0,0074 + j0,0370 | 0,0326 + j0,0913 |
| ELDORADO (5770) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1        | 21,40  | 0,0054 + j0,0259 | 0,0199 + j0,0821 |
| P. ALEGRE 4 (5845) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1     | 11,00  | 0,0020 + j0,0094 | 0,0064 + j0,0261 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1        | 197,00 | 0,0375 + j0,1872 | 0,1276 + j0,3705 |
| CIDADE IND. (5755) – P. ALEGRE 9 (5855) – c2     | 15,00  | 0,0028 + j0,0135 | 0,0101 + j0,0425 |
| CIDADE IND. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2     | 46,90  | 0,0078 + j0,0403 | 0,0195 + j0,1008 |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE IND. (5755) – c1    | 23,57  | 0,0040 + j0,0215 | 0,0162 + j0,0660 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c1  | 22,40  | 0,0039 + j0,0214 | 0,0209 + j0,0594 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c2  | 23,70  | 0,0041 + j0,0226 | 0,0207 + j0,0575 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c3  | 22,50  | 0,0039 + j0,0208 | 0,0161 + j0,0615 |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE IND. (5755) – c1      | 237,56 | 0,0607 + j0,2219 | 0,1976 + j0,6258 |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2         | 153,25 | 0,0292 + j0,1436 | 0,1326 + j0,3802 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2   | 202,24 | 0,0385 + j0,1925 | 0,1735 + j0,4736 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2    | 359,30 | 0,0571 + j0,3111 | 0,2877 + j0,9542 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1         | 398,92 | 0,0633 + j0,3366 | 0,3091 + j0,8833 |
| MAÇAMBARÁ (5825) - LIVRAMENTO 2 (5820) – c1      | 211,12 | 0,0335 + j0,1733 | 0,1571 + j0,4575 |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1          | 251,70 | 0,0389 + j0,2122 | 0,1958 + j0,5464 |
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQ. (5885) – c2         | 196,86 | 0,0318 + j0,1816 | 0,1672 + j0,4692 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1       | 204,60 | 0,0353 + j0,1952 | 0,1481 + j0,5600 |
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1           | 30,00  | 0,0052 + j0,0287 | 0,0264 + j0,0739 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1        | 72,96  | 0,0179 + j0,0681 | 0,0610 + j0,1909 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - PASSO FUNDO (6329) – c1    | 230,00 | 0,0328 + j0,1590 | 0,1197 + j0,4165 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2     | 150,00 | 0,0286 + j0,1465 | 0,1367 + j0,3803 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c1      | 205,00 | 0,0226 + j0,1836 | 0,1278 + j0,6776 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c2      | 229,50 | 0,0410 + j0,2206 | 0,1694 + j0,6273 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) – c3 | 10,90  | 0,0010 + j0,0052 | 0,0034 + j0,0132 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2        | 70,77  | 0,0165 + j0,0630 | 0,0565 + j0,1767 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1     | 23,00  | 0,0039 + j0,0217 | 0,0175 + j0,0608 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2     | 23,00  | 0,0039 + j0,0217 | 0,0175 + j0,0608 |
| MONTE CLARO (6010) – FARROUP. (6201) – c3        | 55,34  | 0,0102 + j0,0494 | 0,0382 + j0,1289 |
| MONTE CLARO (6010) – FARROUP. (6201) – c4        | 30,70  | 0,0059 + j0,0304 | 0,0030 + j0,0869 |
| MONTE CLARO (6010) – FARROUP. (6201) – c5        | 30,40  | 0,0059 + j0,0304 | 0,0030 + j0,0869 |
| MONTE CLARO (6010) – P.FUNDO (6329) – c1         | 224,40 | 0,0434 + j0,2236 | 0,2195 + j0,6472 |
| MONTE CLARO (6010) – P. FUNDO (6329) – c2        | 213,20 | 0,0040 + j0,2066 | 0,2037 + j0,5908 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1          | 57,00  | 0,0073 + j0,0388 | 0,0354 + j0,0990 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2          | 47,88  | 0,0087 + j0,0459 | 0,0418 + j0,1141 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3          | 22,89  | 0,0045 + j0,0208 | 0,0153 + j0,0576 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4          | 22,89  | 0,0045 + j0,0208 | 0,0153 + j0,0567 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1   | 232,80 | 0,0435 + j0,2295 | 0,2098 + j0,5762 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1            | 61,39  | 0,0126 + j0,0590 | 0,0425 + j0,1562 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2            | 61,39  | 0,0126 + j0,0590 | 0,0043 + j0,1562 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2      | 214,70 | 0,0468 + j0,1967 | 0,1753 + j0,5693 |

|  |        |                  |                  |
|--|--------|------------------|------------------|
| CAMPOS NOVOS (6157) - P. FUNDO (6329) – c1     | 284,37 | 0,0449 + j0,2543 | 0,2285 + j0,7424 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2 | 29,50  | 0,0003 + j0,0034 | 0,0037 + j0,0141 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2         | 78,80  | 0,0007 + j0,0092 | 0,0096 + j0,0346 |
| C. NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1   | 257,40 | 0,0015 + j0,0281 | 0,0326 + j0,1268 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1        | 313,95 | 0,0029 + j0,0365 | 0,0395 + j0,1503 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2       | 203,30 | 0,0018 + j0,0235 | 0,0236 + j0,0879 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                | 255,00 | 0,0016 + j0,0303 | 0,0306 + j0,1159 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1          | 115,60 | 0,0009 + j0,0110 | 0,0120 + j0,0420 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1          | 222,50 | 0,0020 + j0,0267 | 0,0237 + j0,0998 |

Tabela 4 - Dados de entrada das linhas para o sistema futuro (2015).

| Linha   | Com-<br>primen-<br>to [km] | Impedância de<br>Sequência Posi-<br>tiva [p.u.] | Impedância de<br>Sequência Zero<br>[p.u.] |
|---|----------------------------|---|---|
| CANOAS 1 (5720) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1       | 2,00                       | 0,0020 + j0,0099                                | 0,0079 + j0,0290                          |
| CIDADE IND. (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2       | 12,80                      | 0,0020 + j0,0099                                | 0,0078 + j0,0290                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1        | 86,51                      | 0,0088 + j0,0441                                | 0,0351 + j0,0627                          |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1            | 109,00                     | 0,0206 + j0,1156                                | 0,0607 + j0,3527                          |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2        | 9,62                       | 0,0020 + j0,0114                                | 0,0082 + j0,0293                          |
| CIDADE IND. (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1       | 9,48                       | 0,0011 + j0,0063                                | 0,0054 + j0,0177                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c1     | 29,20                      | 0,0052 + j0,0269                                | 0,0235 + j0,0760                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c2     | 29,20                      | 0,0056 + j0,0251                                | 0,0176 + j0,0654                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 6 (5850) – c3     | 29,20                      | 0,0056 + j0,0251                                | 0,0176 + j0,0654                          |
| P. ALEGRE 6 (5850) – P. ALEGRE 4 (5845) – c2    | 10,20                      | 0,0014 + j0,0088                                | 0,0067 + j0,0223                          |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1         | 7,00                       | 0,0206 + j0,0637                                | 0,0614 + j0,1720                          |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2         | 7,00                       | 0,0169 + j0,0625                                | 0,0587 + j0,1875                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 8 (5916) – c2     | 17,20                      | 0,0032 + j0,0154                                | 0,0104 + j0,0426                          |
| P. ALEGRE 9 (5855) – P. ALEGRE 8 (5916) – c1    | 12,00                      | 0,0018 + j0,0086                                | 0,0058 + j0,0237                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) – P. ALEGRE 10 (5860) – c1    | 36,01                      | 0,0053 + j0,0330                                | 0,0282 + j0,0915                          |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1     | 12,50                      | 0,0025 + j0,0112                                | 0,0100 + j0,0325                          |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2     | 12,50                      | 0,0025 + j0,0112                                | 0,0100 + j0,0325                          |
| CIDADE IND. (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3     | 12,50                      | 0,0025 + j0,0112                                | 0,0100 + j0,0325                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1       | 21,40                      | 0,0047 + j0,0223                                | 0,0165 + j0,0609                          |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2       | 21,40                      | 0,0047 + j0,0223                                | 0,0165 + j0,0609                          |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1           | 43,86                      | 0,0066 + j0,0073                                | 0,0370 + j0,1015                          |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2     | 135,00                     | 0,0137 + j0,1161                                | 0,0992 + j0,1037                          |
| CAMAQUÃ 3 (6790) – PELOTAS 3 (5870) – c1        | 122,15                     | 0,0238 + j0,1190                                | 0,1071 + j0,2856                          |
| P. ALEGRE 4 (5845) – P. ALEGRE 10 (5860) – c1   | 3,53                       | 0,0004 + j0,0025                                | 0,0019 + j0,0063                          |
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1          | 21,40                      | 0,0028 + j0,0014                                | 0,0105 + j0,0416                          |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1           | 87,25                      | 0,0172 + j0,0857                                | 0,0667 + j0,2468                          |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE IND. (5755) – c1       | 38,50                      | 0,0074 + j0,0370                                | 0,0326 + j0,0913                          |
| GUAÍBA 2 (5806) – CAMAQUÃ 3 (6790) – c1         | 87,25                      | 0,0179 + j0,0895                                | 0,0805 + j0,2148                          |
| ELDORADO (5770) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1       | 21,40                      | 0,0054 + j0,0259                                | 0,0199 + j0,0821                          |
| P. ALEGRE 4 (5845) – P. ALEGRE 9 (5855) – c1    | 11,00                      | 0,0020 + j0,0094                                | 0,0064 + j0,0261                          |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1       | 197,00                     | 0,0375 + j0,1872                                | 0,1276 + j0,3705                          |
| CIDADE IND. (5755) – P. ALEGRE 9 (5855) – c2    | 15,00                      | 0,0028 + j0,0135                                | 0,0101 + j0,0425                          |
| CIDADE IND. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2    | 46,90                      | 0,0078 + j0,0403                                | 0,0195 + j0,1008                          |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE IND. (5755) – c1   | 23,57                      | 0,0040 + j0,0215                                | 0,0162 + j0,0660                          |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c1 | 22,40                      | 0,0039 + j0,0214                                | 0,0209 + j0,0594                          |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c2 | 23,70                      | 0,0041 + j0,0226                                | 0,0207 + j0,0575                          |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE IND. (5755) – c3 | 22,50                      | 0,0039 + j0,0208                                | 0,0161 + j0,0615                          |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE IND. (5755) – c1     | 237,56                     | 0,0607 + j0,2219                                | 0,1976 + j0,6258                          |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2        | 153,25                     | 0,0292 + j0,1436                                | 0,1511 + j0,4032                          |
| CAMAQUÃ 3 (6790) - QUINTA (5890) – c1           | 164,00                     | 0,0336 + j0,1680                                | 0,1326 + j0,3802                          |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2  | 202,24                     | 0,0385 + j0,1925                                | 0,1735 + j0,4736                          |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2   | 359,30                     | 0,0571 + j0,3111                                | 0,2877 + j0,9542                          |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1        | 398,92                     | 0,0633 + j0,3366                                | 0,3091 + j0,8833                          |
| STO. ÂNGELO (6360) - LIVRAMENTO 2 (5820) - c2   | 416,12                     | 0,0487 + j0,2736                                | 0,2322 + j0,7837                          |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1         | 251,70                     | 0,0389 + j0,2122                                | 0,1958 + j0,5464                          |

|   |        |                  |                  |
|---|--------|------------------|------------------|
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQ. (5885) – c2        | 196,86 | 0,0318 + j0,1816 | 0,1672 + j0,4692 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1      | 204,60 | 0,0353 + j0,1952 | 0,1481 + j0,5600 |
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1          | 30,00  | 0,0052 + j0,0287 | 0,0264 + j0,0739 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1       | 72,96  | 0,0179 + j0,0681 | 0,0610 + j0,1909 |
| SANTO ÂNGELO (6360) – P. FUNDO (6329) – c1      | 230,00 | 0,0328 + j0,1590 | 0,1197 + j0,4165 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2    | 150,00 | 0,0286 + j0,1465 | 0,1367 + j0,3803 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) -c3 | 10,90  | 0,0010 + j0,0052 | 0,0034 + j0,0132 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2       | 70,77  | 0,0165 + j0,0630 | 0,0565 + j0,1767 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1    | 23,00  | 0,0039 + j0,0217 | 0,0175 + j0,0608 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2    | 23,00  | 0,0039 + j0,0217 | 0,0175 + j0,0608 |
| MONTE CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c3    | 55,34  | 0,0102 + j0,0494 | 0,0382 + j0,1289 |
| MONTE CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c4    | 30,70  | 0,0059 + j0,0304 | 0,0030 + j0,0869 |
| MONTE CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c5    | 30,40  | 0,0059 + j0,0304 | 0,0030 + j0,0869 |
| MONTES CLARO (6010) – P. FUNDO (6329) – c1      | 224,40 | 0,0434 + j0,2236 | 0,2195 + j0,6472 |
| MONTES CLARO (6010) – P. FUNDO (6329) – c2      | 213,20 | 0,0040 + j0,2066 | 0,2037 + j0,5908 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1         | 57,00  | 0,0073 + j0,0388 | 0,0354 + j0,0990 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2         | 47,88  | 0,0087 + j0,0459 | 0,0418 + j0,1141 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3         | 22,89  | 0,0045 + j0,0208 | 0,0153 + j0,0576 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4         | 22,89  | 0,0045 + j0,0208 | 0,0153 + j0,0567 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1  | 232,80 | 0,0435 + j0,2295 | 0,2098 + j0,5762 |
| NOVA STA. RITA (6035) – CAMAQUÃ 3 (6790) – c1   | 126,00 | 0,0252 + j0,1260 | 0,1134 + j0,3024 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1           | 61,39  | 0,0126 + j0,0590 | 0,0425 + j0,1562 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2           | 61,39  | 0,0126 + j0,0590 | 0,0043 + j0,1562 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2     | 214,70 | 0,0468 + j0,1967 | 0,1753 + j0,5693 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2  | 29,50  | 0,0003 + j0,0034 | 0,0037 + j0,0141 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2          | 78,80  | 0,0007 + j0,0092 | 0,0096 + j0,0346 |
| C. NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1    | 257,40 | 0,0015 + j0,0281 | 0,0326 + j0,1268 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1         | 313,95 | 0,0029 + j0,0365 | 0,0395 + j0,1503 |
| NOVA STA. RITA (6030) – STA. VIT. DO P. (6804)  | 435    | 0,0034 + j0,0561 | 0,0059 + j0,0233 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2        | 203,30 | 0,0018 + j0,0235 | 0,0236 + j0,0879 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                 | 255,00 | 0,0016 + j0,0303 | 0,0306 + j0,1159 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1           | 115,60 | 0,0009 + j0,0110 | 0,0120 + j0,0420 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1           | 222,50 | 0,0020 + j0,0267 | 0,0237 + j0,0998 |

Tabela 5 - Unidades geradoras consideradas para o sistema atual.

| Nome                    | Tipo | Potência Nominal [MW] | Barramento de Conexão |
|-------------------------|------|-----------------------|-----------------------|
| Cidreira 1              | EOL  | 70,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Osório 1, 2 e 3         | EOL  | 100,0                 | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Sangradouro 1, 2 e 3    | EOL  | 100,0                 | OSÓRIO 2 (5840)       |
| dos Índios              | EOL  | 50,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Fazenda Rosário 1 e 3   | EOL  | 22,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Sepé Tiaraju            | UTE  | 248,0                 | CANOAS 2 (5007)       |
| Nutepa                  | UTE  | 24,0                  | PORTO ALEGRE 9 (5855) |
| Candiota III            | UTE  | 350,0                 | PRES. MÉDICI (5980)   |
| Presidente Médici A, B  | UTE  | 446,0                 | PRES. MÉDICI (5980)   |
| Cerro Chato I, II e III | EOL  | 90,0                  | LIVRAMENTO 2 (5820)   |
| Dona Francisca          | UHE  | 125,0                 | ITAÚBA (5970)         |
| Itaúba                  | UHE  | 500,0                 | ITAÚBA (5970)         |
| Charqueadas             | UTE  | 72,0                  | CHARQUEADAS (6173)    |
| São Jerônimo            | UTE  | 20,0                  | CHARQUEADAS (6173)    |
| Passo São João          | UHE  | 77,0                  | SANTO ÂNGELO (6360)   |
| Monte Claro             | UHE  | 130,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| 14 de Julho             | UHE  | 100,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| Castro Alves            | UHE  | 130,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| Canastra                | UHE  | 42,0                  | CAXIAS (6132)         |
| Passo do Meio           | PCH  | 30,0                  | CAXIAS (6132)         |
| Palanquinho             | PCH  | 14,0                  | CAXIAS (6132)         |
| Criúva                  | PCH  | 14,0                  | CAXIAS (6132)         |
| Serra dos Cavalinhos II | PCH  | 29,0                  | CAXIAS (6132)         |



|              |     |        |                     |
|--------------|-----|--------|---------------------|
| Passo Fundo  | UHE | 226,0  | PASSO FUNDO (6329)  |
| Caçador      | PCH | 22,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Jararaca     | PCH | 20,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Da Ilha      | PCH | 19,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Boa Fé       | PCH | 13,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Auódromo     | PCH | 13,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Monjolinho   | UHE | 74,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Jacuí        | UHE | 180,0  | PASSO REAL (5985)   |
| Passo Real   | UHE | 158,0  | PASSO REAL (5985)   |
| São José     | UHE | 51,0   | SANTA ROSA (5950)   |
| Alegrete     | UTE | 66,0   | MAÇAMBARÁ (5825)    |
| Campos Novos | UHE | 880,0  | CAMPOS NOVOS (6157) |
| Machadinho   | UHE | 1140,0 | CAMPOS NOVOS (6155) |
| Itá          | UHE | 1450,0 | CAMPOS NOVOS (6155) |
| CMPC         | UTE | 44,2   | GUAÍBA 1 (29124)    |

Tabela 6 - Dados de entrada das unidades geradoras equivalentes para o sistema atual.

| Barramento de Conexão | Potência Total [MW] | Impedância Interna de Sequencia Positiva [p.u.] | Impedância Interna de Sequencia Zero [p.u.] |
|-----------------------|---------------------|---|---|
| OSORIO 2 (5840)       | 342,0               | Inf   | Inf   |
| CANOAS 2 (5007)       | 248,0               | 0,0000 + j0,1204                                | 0,0000 + j0,0563                            |
| GUAÍBA 1 (29124)      | 44,2                | 0,1420 + j0,6680                                | 0,2360 + j1,1750                            |
| PORTO ALEGRE 9 (5855) | 24,0                | 0,0033 + j0,0880                                | 0,0032 + j0,0850                            |
| PRES. MÉDICI (5980)   | 796,0               | 0,0000 + j0,0294                                | 0,0000 + j0,0120                            |
| LIVRAMENTO 2 (5820)   | 90,0                | Inf   | Inf   |
| ITAÚBA (5970)         | 625,0               | 0,0000 + j0,0470                                | 0,0000 + j0,0180                            |
| CHARQUEADAS (6173)    | 92,0                | 0,0040 + j0,5515                                | 0,0000 + j0,2077                            |
| SANTO ÂNGELO (6360)   | 128,0               | 0,0406 + j0,4515                                | 0,0088 + j0,1132                            |
| MONTES CLARO (6010)   | 360,0               | 0,0008 + j0,0990                                | 0,0016 + j0,0320                            |
| CAXIAS (6132)         | 129,0               | 0,0119 + j0,0730                                | 0,0360 + j0,3190                            |
| PASSO FUNDO (6329)    | 387,0               | 0,0019 + j0,0469                                | 0,0007 + j0,0424                            |
| CAMPOS NOVOS (6155)   | 2590,0              | 0,0003 + j0,0100                                | 0,0001 + j0,0080                            |
| PASSO REAL (5985)     | 338,0               | 0,0000 + j0,1290                                | 0,0000 + j0,0371                            |
| CAMPOS NOVOS (6157)   | 880,0               | 0,0003 + j0,0376                                | 0,0026 + j0,0080                            |
| MAÇAMBARÁ (5825)      | 66,0                | 0,0250 + j0,1240                                | 0,0051 + j0,1100                            |

Tabela 7 - Unidades geradoras consideradas para o sistema futuro (2015).

| Nome                    | Tipo | Potência Nominal [MW] | Barramento de Conexão |
|-------------------------|------|-----------------------|-----------------------|
| Cidreira 1              | EOL  | 70,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Osório 1, 2 e 3         | EOL  | 100,0                 | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Sangradouro 1, 2 e 3    | EOL  | 100,0                 | OSÓRIO 2 (5840)       |
| dos Índios              | EOL  | 50,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Fazenda Rosário 1 e 3   | EOL  | 22,0                  | OSÓRIO 2 (5840)       |
| Sepé Tiaraju            | UTE  | 248,0                 | CANOAS 2 (5007)       |
| Nutepa                  | UTE  | 24,0                  | PORTO ALEGRE 9 (5855) |
| Candiota III            | UTE  | 350,0                 | PRES. MÉDICI (5980)   |
| Presidente Médici A, B  | UTE  | 446,0                 | PRES. MÉDICI (5980)   |
| Cerro Chato I, II e III | EOL  | 90,0                  | LIVRAMENTO 2 (5820)   |
| Dona Francisca          | UHE  | 125,0                 | ITAÚBA (5970)         |
| Itaúba                  | UHE  | 500,0                 | ITAÚBA (5970)         |
| Charqueadas             | UTE  | 72,0                  | CHARQUEADAS (6173)    |
| São Jerônimo            | UTE  | 20,0                  | CHARQUEADAS (6173)    |
| Passo São João          | UHE  | 77,0                  | SANTO ÂNGELO (6360)   |
| Monte Claro             | UHE  | 130,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| 14 de Julho             | UHE  | 100,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| Castro Alves            | UHE  | 130,0                 | MONTES CLARO (6010)   |
| Canastra                | UHE  | 42,0                  | CAXIAS (6132)         |
| Passo do Meio           | PCH  | 30,0                  | CAXIAS (6132)         |

|                                    |     |        |                     |
|------------------------------------|-----|--------|---------------------|
| Palanquinho                        | PCH | 14,0   | CAXIAS (6132)       |
| Criúva                             | PCH | 14,0   | CAXIAS (6132)       |
| Serra dos Cavalinhos II            | PCH | 29,0   | CAXIAS (6132)       |
| Passo Fundo                        | UHE | 226,0  | PASSO FUNDO (6329)  |
| Caçador                            | PCH | 22,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Jararaca                           | PCH | 20,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Da Ilha                            | PCH | 19,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Boa Fé                             | PCH | 13,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Auódromo                           | PCH | 13,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Monjolinho                         | UHE | 74,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Jacuí                              | UHE | 180,0  | PASSO REAL (5985)   |
| Passo Real                         | UHE | 158,0  | PASSO REAL (5985)   |
| São José                           | UHE | 51,0   | SANTA ROSA (5950)   |
| Alegrete                           | UTE | 66,0   | MAÇAMBARÁ (5825)    |
| Campos Novos                       | UHE | 880,0  | CAMPOS NOVOS (6157) |
| Machadinho                         | UHE | 1140,0 | CAMPOS NOVOS (6155) |
| Itá                                | UHE | 1450,0 | CAMPOS NOVOS (6155) |
| Fazenda Rosário 2                  | EOL | 20,0   | OSÓRIO 2 (5840)     |
| Atlântica I e V                    | EOL | 60,0   | OSÓRIO 2 (5840)     |
| Cerro Chato IV e V                 | EOL | 22,0   | LIVRAMENTO 2 (5820) |
| dos índios 2                       | EOL | 28,0   | OSÓRIO 2 (5840)     |
| Atlântica II                       | EOL | 30,0   | OSÓRIO 2 (5840)     |
| Força 1, 2 e 3                     | EOL | 72,0   | OSÓRIO 2 (5840)     |
| Cassino I, II e III                | EOL | 69,0   | QUINTA (5890)       |
| Corredor dos Senandes II, III e IV | EOL | 27,0   | QUINTA (5890)       |
| Vento Aregano I                    | EOL | 28,8   | QUINTA (5890)       |
| Ibirapuitã I                       | EOL | 30,0   | LIVRAMENTO 2 (5820) |
| Monte Cuco                         | PCH | 30,0   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Linha Aparecida                    | PCH | 25,4   | PASSO FUNDO (6329)  |
| Primavera do Rio Turvo             | PCH | 30,0   | CAXIAS (6132)       |
| Jacuí                              | UTE | 350,2  | CHARQUEADAS (6173)  |
| CMPC                               | UTE | 175,0  | GUAÍBA 2 (5806)     |

Tabela 8 - Dados de entrada das unidades geradoras equivalentes para o sistema futuro (2015).

| Barramento de Conexão      | Potência Total [MW] | Impedância Interna de Sequencia Positiva [p.u.] | Impedância Interna de Sequencia Zero [p.u.] |
|----------------------------|---------------------|---|---|
| OSORIO 2 (5840)            | 524                 | Inf   | Inf   |
| CANOAS 2 (5007)            | 248                 | 0,0000 + j0,1204                                | 0,0000 + j0,0563                            |
| GUAÍBA 2 (5806)            | 175                 | 0,0022 + j0,2228                                | 0,0068 + j0,2091                            |
| PORTO ALEGRE 9 (5855)      | 24                  | 0,0033 + j0,0880                                | 0,0032 + j0,0850                            |
| QUINTA (5890)              | 124                 | Inf.  | Inf.  |
| PRES. MÉDICI (5980)        | 796                 | 0,0000 + j0,0294                                | 0,0000 + j0,0120                            |
| LIVRAMENTO 2 (5820)        | 510                 | Inf.  | Inf.  |
| ITAÚBA (5970)              | 625                 | 0,0000 + j0,0470                                | 0,0000 + j0,0180                            |
| CHARQUEADAS (6173)         | 442                 | 0,0040 + j0,5515                                | 0,0000 + j0,2077                            |
| SANTO ÂNGELO (6360)        | 128                 | 0,0406 + j0,4515                                | 0,0088 + j0,1132                            |
| MONTES CLARO (6010)        | 373                 | 0,0008 + j0,0990                                | 0,0016 + j0,0320                            |
| CAXIAS (6132)              | 159                 | 0,0119 + j0,0730                                | 0,0360 + j0,3190                            |
| PASSO FUNDO (6329)         | 429                 | 0,0019 + j0,0469                                | 0,0007 + j0,0424                            |
| CAMPOS NOVOS (6155)        | 2590                | 0,0003 + j0,0100                                | 0,0001 + j0,0080                            |
| PASSO REAL (5985)          | 338                 | 0,0000 + j0,1290                                | 0,0000 + j0,0629                            |
| STA. VIT. DO PALMAR (6804) | 370                 | Inf.  | Inf.  |

Tabela 9 - Dados de entrada dos transformadores para o sistema atual.

| Barramentos Conectados                    | Tipo de Conexão           | Impedância de Sequência Positiva [p.u.] | Impedância de Sequência Zero [p.u.] |
|---|---------------------------|---|-------------------------------------|
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 1 (29128)       | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0010 + j0,1860                        | 0,0043 + j0,1650                    |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - GRAVATAÍ 2 (5795)     | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0044                        | 0,0001 + j0,0044                    |
| GUAÍBA 2 (5807) - GUAÍBA 2 (5806)         | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0026 + j0,1277                        | 0,0026 + j0,1122                    |
| STO. ÂNGELO (6360) - STO. ÂNGELO (6350)   | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0075                        | 0,0001 + j0,0075                    |
| N. STA. RITA (6035) - N. STA. RITA (6030) | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0041                        | 0,0001 + j0,0041                    |
| CAXIAS (6132) - CAXIAS (6129)             | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0041                        | 0,0001 + j0,0041                    |
| C. NOVOS (6155) - C. NOVOS (6157)         | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0002 + j0,0041                        | 0,0004 + j0,0103                    |

Tabela 10 - Dados de entrada dos transformadores para o sistema futuro (2015).

| Barramentos Conectados                    | Tipo de Conexão           | Impedância de Sequência Positiva [p.u.] | Impedância de Sequência Zero [p.u.] |
|---|---------------------------|---|-------------------------------------|
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 1 (29128)       | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0010 + j0,1860                        | 0,0043 + j0,1650                    |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - GRAVATAÍ 2 (5795)     | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0044                        | 0,0001 + j0,0044                    |
| GUAÍBA 2 (5807) - GUAÍBA 2 (5806)         | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0026 + j0,1277                        | 0,0026 + j0,1122                    |
| STA. V. DO PALMAR (6804) - QUINTA (5890)  | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0039 + j0,0309                        | 0,0168 + j0,0568                    |
| STO. ÂNGELO (6360) - STO. ÂNGELO (6350)   | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0075                        | 0,0001 + j0,0075                    |
| N. STA. RITA (6035) - N. STA. RITA (6030) | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0041                        | 0,0001 + j0,0041                    |
| CAXIAS (6132) - CAXIAS (6129)             | $Y_{aterr.} - Y_{aterr.}$ | 0,0001 + j0,0041                        | 0,0001 + j0,0041                    |

## APÊNDICE B

Neste apêndice estão expostos os resultados obtidos através das simulações realizadas.

Tabela 1 - Registros de afundamentos de tensão em “GUAÍBA 1 (29124)” (atual).

| Linha Faltosa                                      | Afundamento de Tensão mais Intenso em “GUAÍBA 1 (29124)” [p.u.] |      |      |      |
|--|---|------|------|------|
|  | FT  | FF   | FFT  | FFF  |
| CAMPOS NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1   | 0,89  | 0,79 | 0,78 | 0,74 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2           | 0,89  | 0,82 | 0,80 | 0,77 |
| CAMPOS NOVOS (6157) - PASSO FUNDO (6329) – c1      | 0,99  | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| CANOAS 1 (5720) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,68  | 0,64 | 0,58 | 0,51 |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2           | 0,69  | 0,66 | 0,60 | 0,54 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                    | 0,92  | 0,83 | 0,83 | 0,81 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2             | 0,74  | 0,67 | 0,63 | 0,57 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2            | 0,92  | 0,88 | 0,87 | 0,85 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3            | 0,87  | 0,83 | 0,82 | 0,78 |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1               | 0,96  | 0,93 | 0,92 | 0,91 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1            | 0,91  | 0,87 | 0,86 | 0,83 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1              | 0,91  | 0,87 | 0,86 | 0,83 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2              | 0,91  | 0,87 | 0,86 | 0,83 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4            | 0,87  | 0,83 | 0,82 | 0,78 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1          | 0,92  | 0,89 | 0,88 | 0,85 |
| CIDADE INDUST. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2    | 0,85  | 0,82 | 0,80 | 0,76 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1    | 0,63  | 0,62 | 0,54 | 0,48 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2    | 0,67  | 0,64 | 0,57 | 0,51 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2  | 0,65  | 0,63 | 0,56 | 0,50 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1  | 0,65  | 0,63 | 0,56 | 0,50 |
| CIDADE INDUST. (5755) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c2 | 0,66  | 0,63 | 0,56 | 0,49 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3  | 0,65  | 0,63 | 0,56 | 0,50 |
| ELDORADO (5770) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,63  | 0,59 | 0,50 | 0,41 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2          | 0,92  | 0,89 | 0,88 | 0,85 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2     | 0,63  | 0,60 | 0,53 | 0,48 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c2     | 0,72  | 0,68 | 0,63 | 0,57 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c1     | 0,80  | 0,74 | 0,71 | 0,66 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1          | 0,80  | 0,75 | 0,72 | 0,67 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2          | 0,80  | 0,75 | 0,72 | 0,67 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c3     | 0,79  | 0,74 | 0,70 | 0,65 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1           | 0,87  | 0,85 | 0,83 | 0,81 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1    | 0,82  | 0,76 | 0,73 | 0,68 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c2     | 0,79  | 0,74 | 0,70 | 0,65 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2            | 0,20  | 0,50 | 0,17 | 0,08 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1            | 0,19  | 0,50 | 0,17 | 0,09 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1    | 0,62  | 0,60 | 0,50 | 0,45 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1              | 0,82  | 0,80 | 0,76 | 0,73 |
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1             | 0,50  | 0,52 | 0,36 | 0,24 |
| GUAÍBA 2 (5806) - PELOTAS 3 (5870) – c2            | 0,90  | 0,88 | 0,86 | 0,86 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1            | 0,91  | 0,82 | 0,81 | 0,79 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1              | 0,89  | 0,81 | 0,80 | 0,78 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1         | 0,97  | 0,95 | 0,95 | 0,94 |
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQUÍMICO (5885) – c2      | 0,97  | 0,95 | 0,95 | 0,94 |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1            | 0,98  | 0,96 | 0,96 | 0,95 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1           | 0,99  | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2     | 0,98  | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| MAÇAMBARÁ (5825) - LIVRAMENTO 2 (5820) – c1        | 0,99  | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c5      | 0,92  | 0,89 | 0,89 | 0,86 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c4      | 0,92  | 0,89 | 0,89 | 0,86 |

|  |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c3      | 0,94 | 0,91 | 0,91 | 0,89 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c1      | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c2      | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2       | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,70 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) – c3   | 0,69 | 0,67 | 0,61 | 0,56 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c3 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,60 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c2 | 0,75 | 0,71 | 0,66 | 0,61 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c1 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,60 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2        | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2       | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1             | 0,95 | 0,93 | 0,93 | 0,91 |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1  | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,94 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1     | 0,98 | 0,96 | 0,96 | 0,95 |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1              | 0,94 | 0,93 | 0,92 | 0,91 |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE INDUST. (5755) – c1   | 0,77 | 0,72 | 0,68 | 0,62 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 10 (5860) –c1 | 0,71 | 0,69 | 0,64 | 0,59 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1 | 0,66 | 0,64 | 0,58 | 0,52 |
| PORTO ALEGRE 6 (5850) - PORTO ALEGRE 4 (5845) – c2 | 0,72 | 0,69 | 0,65 | 0,59 |
| PORTO ALEGRE 9 (5855) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c1 | 0,67 | 0,64 | 0,58 | 0,52 |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2        | 0,96 | 0,94 | 0,94 | 0,93 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2      | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2           | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,94 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1          | 0,94 | 0,92 | 0,92 | 0,90 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1              | 0,95 | 0,92 | 0,92 | 0,91 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c2        | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c1        | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - PASSO FUNDO (6329) – c1      | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1       | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,70 |
| GUAÍBA 1 (29128)                                   | 0,61 | 0,67 | 0,59 | 0,58 |

Tabela 2 - Número de faltas esperado para as linhas do sistema atual.

| Linha Faltosa                                      | Número de Faltas Esperadas |        |        |        |
|--|----------------------------|--------|--------|--------|
|  | FT                         | FF     | FFT    | FFF    |
| CAMPOS NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1   | 5,0569                     | 0,0538 | 0,2152 | 0,0538 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2           | 3,9940                     | 0,0425 | 0,1700 | 0,0425 |
| CAMPOS NOVOS (6157) - PASSO FUNDO (6329) – c1      | 4,3224                     | 0,1621 | 0,8105 | 0,1081 |
| CANOAS 1 (5720) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,0304                     | 0,0011 | 0,0057 | 0,0008 |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2           | 0,1462                     | 0,0055 | 0,0274 | 0,0037 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                    | 5,0097                     | 0,0533 | 0,2132 | 0,0533 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2             | 1,5481                     | 0,0165 | 0,0659 | 0,0165 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2            | 0,7278                     | 0,0273 | 0,1365 | 0,0182 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3            | 0,3479                     | 0,0130 | 0,0652 | 0,0087 |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1               | 1,6568                     | 0,0621 | 0,3107 | 0,0414 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1            | 0,8664                     | 0,0325 | 0,1625 | 0,0217 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1              | 0,9331                     | 0,0350 | 0,1750 | 0,0233 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2              | 0,9331                     | 0,0350 | 0,1750 | 0,0233 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4            | 0,3479                     | 0,0130 | 0,0652 | 0,0087 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1          | 1,1090                     | 0,0416 | 0,2079 | 0,0277 |
| CIDADE INDUST. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2    | 0,7129                     | 0,0267 | 0,1337 | 0,0178 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1    | 0,1441                     | 0,0054 | 0,0270 | 0,0036 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2    | 0,1946                     | 0,0073 | 0,0365 | 0,0049 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2  | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1  | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| CIDADE INDUST. (5755) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c2 | 0,2280                     | 0,0086 | 0,0428 | 0,0057 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3  | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| ELDORADO (5770) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,3253                     | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2          | 1,0757                     | 0,0403 | 0,2017 | 0,0269 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2     | 0,5796                     | 0,0062 | 0,0247 | 0,0062 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c2     | 0,2614                     | 0,0098 | 0,0490 | 0,0065 |

|   |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c1      | 0,4438 | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1           | 0,3253 | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2           | 0,3253 | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c3      | 0,4438 | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1            | 1,3150 | 0,0493 | 0,2466 | 0,0329 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1     | 0,5474 | 0,0205 | 0,1026 | 0,0137 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c2      | 0,4438 | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2             | 0,2798 | 0,0301 | 0,0947 | 0,0258 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1             | 0,2798 | 0,0301 | 0,0947 | 0,0258 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1     | 0,5852 | 0,0219 | 0,1097 | 0,0146 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1               | 1,3262 | 0,0497 | 0,2487 | 0,0332 |
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1              | 0,3253 | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| GUAÍBA 2 (5806) - PELOTAS 3 (5870) – c2             | 3,1829 | 0,1194 | 0,5968 | 0,0796 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1             | 6,1679 | 0,0656 | 0,2625 | 0,0656 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1               | 2,2711 | 0,0242 | 0,0966 | 0,0242 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1          | 3,1099 | 0,1166 | 0,5831 | 0,0777 |
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQUÍMICO (5885) – c2       | 2,9923 | 0,1122 | 0,5611 | 0,0748 |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1             | 3,8258 | 0,1435 | 0,7173 | 0,0956 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1            | 6,0636 | 0,2274 | 1,1369 | 0,1516 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2      | 3,0740 | 0,1153 | 0,5764 | 0,0769 |
| MAÇAMBARÁ (5825) - LIVRAMENTO 2 (5820) – c1         | 3,2090 | 0,1203 | 0,6017 | 0,0802 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c5       | 0,4621 | 0,0173 | 0,0866 | 0,0116 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c4       | 0,4666 | 0,0175 | 0,0875 | 0,0117 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c3       | 0,8412 | 0,0315 | 0,1577 | 0,0210 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c1       | 3,4109 | 0,1279 | 0,6395 | 0,0853 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c2       | 3,2406 | 0,1215 | 0,6076 | 0,0810 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2        | 0,3496 | 0,0131 | 0,0656 | 0,0087 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) – c3    | 0,1657 | 0,0062 | 0,0311 | 0,0041 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c3  | 0,3420 | 0,0128 | 0,0641 | 0,0086 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c2  | 0,3602 | 0,0135 | 0,0675 | 0,0090 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c1  | 0,3405 | 0,0128 | 0,0638 | 0,0085 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2         | 3,2634 | 0,1224 | 0,6119 | 0,0816 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2        | 2,2800 | 0,0855 | 0,4275 | 0,0570 |
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1              | 0,4560 | 0,0171 | 0,0855 | 0,0114 |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1   | 3,6109 | 0,1354 | 0,6770 | 0,0903 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1      | 3,5386 | 0,1327 | 0,6635 | 0,0885 |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1               | 0,6667 | 0,0250 | 0,1250 | 0,0167 |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE INDUST. (5755) – c1    | 0,3583 | 0,0134 | 0,0672 | 0,0090 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1 | 0,0537 | 0,0020 | 0,0101 | 0,0013 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1  | 0,1672 | 0,0063 | 0,0314 | 0,0042 |
| PORTO ALEGRE 6 (5850) - PORTO ALEGRE 4 (5845) – c2  | 0,1550 | 0,0058 | 0,0291 | 0,0039 |
| PORTO ALEGRE 9 (5855) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c1  | 0,1824 | 0,0068 | 0,0342 | 0,0046 |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2         | 2,0520 | 0,0770 | 0,3848 | 0,0513 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2       | 5,4614 | 0,2048 | 1,0240 | 0,1365 |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2            | 2,3294 | 0,0874 | 0,4368 | 0,0582 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1           | 2,9944 | 0,1123 | 0,5615 | 0,0749 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1               | 4,3712 | 0,0465 | 0,1860 | 0,0465 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c2         | 3,4884 | 0,1308 | 0,6541 | 0,0872 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - MAÇAMBARÁ (5825) – c1         | 3,1160 | 0,1169 | 0,5843 | 0,0779 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - PASSO FUNDO (6329) – c1       | 3,4960 | 0,1311 | 0,6555 | 0,0874 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1        | 0,3496 | 0,0131 | 0,0656 | 0,0087 |
| GUAÍBA 1 (29128)                                    | 42,000 | 8,4000 | 8,4000 | 25,200 |

Tabela 3 - Registros de afundamentos de tensão em “GUAÍBA 2 (5806)” (2015).

| Linha Faltosa                            | Afundamento de Tensão mais Intenso em “GUAÍBA 2 (5806)” [p.u.] |      |      |      |
|--|--|------|------|------|
|  | FT   | FF   | FFT  | FFF  |
| CAMAQUÃ 3 (6790) – PELOTAS 3 (5870) – c1 | 0,90   | 0,89 | 0,87 | 0,85 |
| CAMAQUÃ 3 (6790) – QUINTA (5890) – c1    | 0,92   | 0,91 | 0,89 | 0,88 |

|   |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1           | 0,73 | 0,69 | 0,64 | 0,58 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2           | 0,73 | 0,69 | 0,64 | 0,58 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2            | 0,84 | 0,75 | 0,73 | 0,70 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1    | 0,84 | 0,72 | 0,70 | 0,67 |
| CANOAS 1 (5720) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1        | 0,56 | 0,59 | 0,48 | 0,40 |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2            | 0,58 | 0,60 | 0,50 | 0,43 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2              | 0,64 | 0,59 | 0,52 | 0,46 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                     | 0,88 | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1                | 0,94 | 0,90 | 0,90 | 0,88 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2               | 0,88 | 0,83 | 0,81 | 0,78 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2             | 0,88 | 0,84 | 0,82 | 0,80 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1             | 0,87 | 0,82 | 0,81 | 0,78 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1               | 0,87 | 0,83 | 0,82 | 0,78 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3             | 0,82 | 0,78 | 0,76 | 0,72 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4             | 0,82 | 0,78 | 0,76 | 0,72 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1           | 0,89 | 0,86 | 0,85 | 0,81 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1     | 0,50 | 0,57 | 0,42 | 0,35 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2     | 0,55 | 0,59 | 0,47 | 0,39 |
| CIDADE INDUST. (5755) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c2  | 0,54 | 0,58 | 0,45 | 0,37 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3   | 0,53 | 0,58 | 0,45 | 0,37 |
| CIDADE INDUST. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2     | 0,80 | 0,78 | 0,75 | 0,70 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2   | 0,53 | 0,58 | 0,45 | 0,37 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1   | 0,53 | 0,58 | 0,45 | 0,37 |
| ELDORADO (5770) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1        | 0,47 | 0,56 | 0,38 | 0,27 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2           | 0,89 | 0,85 | 0,84 | 0,81 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2      | 0,48 | 0,53 | 0,40 | 0,34 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c2      | 0,63 | 0,62 | 0,54 | 0,47 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c1      | 0,73 | 0,69 | 0,63 | 0,58 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1            | 0,82 | 0,82 | 0,78 | 0,75 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c3      | 0,71 | 0,68 | 0,63 | 0,57 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c2      | 0,71 | 0,68 | 0,63 | 0,57 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1     | 0,74 | 0,70 | 0,65 | 0,61 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2             | 0,89 | 0,90 | 0,89 | 0,89 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1             | 0,89 | 0,90 | 0,89 | 0,89 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1     | 0,41 | 0,56 | 0,34 | 0,33 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1               | 0,73 | 0,77 | 0,69 | 0,67 |
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1              | 0,18 | 0,48 | 0,12 | 0,04 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ 3 (6790) – c1             | 0,70 | 0,75 | 0,66 | 0,65 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1               | 0,83 | 0,72 | 0,71 | 0,71 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1             | 0,87 | 0,75 | 0,74 | 0,73 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1          | 0,96 | 0,94 | 0,94 | 0,92 |
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQUÍMICO (5885) – c2       | 0,96 | 0,93 | 0,93 | 0,92 |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1             | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,94 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1            | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2      | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c4       | 0,89 | 0,86 | 0,85 | 0,82 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c3       | 0,91 | 0,88 | 0,87 | 0,85 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c2       | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,96 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c1       | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c5       | 0,91 | 0,88 | 0,87 | 0,85 |
| N. STA. RITA (6030) – STA. V. DO PALMAR (6804) – c1 | 0,89 | 0,83 | 0,82 | 0,78 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2        | 0,74 | 0,71 | 0,67 | 0,61 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) – c3    | 0,57 | 0,60 | 0,50 | 0,43 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c3  | 0,66 | 0,63 | 0,56 | 0,49 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c2  | 0,66 | 0,64 | 0,56 | 0,51 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c1  | 0,66 | 0,64 | 0,56 | 0,50 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CAMAQUÃ 3 (6790) – c1       | 0,89 | 0,86 | 0,84 | 0,82 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - PASSO FUNDO (6329) – c1       | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2         | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2        | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,95 |

|  |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1             | 0,92 | 0,90 | 0,90 | 0,89 |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1  | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,92 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1     | 0,96 | 0,95 | 0,94 | 0,93 |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1              | 0,88 | 0,86 | 0,85 | 0,82 |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE INDUST. (5755) – c1   | 0,69 | 0,66 | 0,59 | 0,52 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 10 (5860) –c1 | 0,61 | 0,63 | 0,55 | 0,49 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1 | 0,55 | 0,59 | 0,48 | 0,41 |
| PORTO ALEGRE 6 (5850) - PORTO ALEGRE 4 (5845) – c2 | 0,63 | 0,64 | 0,56 | 0,50 |
| PORTO ALEGRE 9 (5855) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c1 | 0,56 | 0,59 | 0,48 | 0,40 |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2        | 0,93 | 0,91 | 0,91 | 0,90 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2      | 0,98 | 0,96 | 0,96 | 0,95 |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2           | 0,95 | 0,92 | 0,92 | 0,91 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1          | 0,92 | 0,90 | 0,90 | 0,89 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1              | 0,93 | 0,88 | 0,87 | 0,88 |
| SANTO ÂNGELO (6360) – LIVRAMENTO 2 (5820) – c1     | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1       | 0,74 | 0,71 | 0,67 | 0,61 |
| GUAÍBA 1 (29128)                                   | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,95 |

Tabela 4 - Número de faltas esperado para as linhas do sistema futuro (2015).

| Linha Faltosa                                      | Número de Faltas Esperadas |        |        |        |
|--|----------------------------|--------|--------|--------|
|  | FT                         | FF     | FFT    | FFF    |
| CAMAQUÃ 3 (6790) – PELOTAS 3 (5870) – c1           | 1,8567                     | 0,0696 | 0,3481 | 0,0464 |
| CAMAQUÃ 3 (6790) – QUINTA (5890) – c1              | 2,4928                     | 0,0935 | 0,4674 | 0,0623 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c1          | 0,3253                     | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - CAMPO BOM (5745) – c2          | 0,3253                     | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - CAXIAS (6129) – c2           | 5,0569                     | 0,0538 | 0,2152 | 0,0538 |
| CAMPOS NOVOS (6155) - NOVA STA. RITA (6030) – c1   | 3,9940                     | 0,0425 | 0,1700 | 0,0425 |
| CANOAS 1 (5720) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,0304                     | 0,0011 | 0,0057 | 0,0008 |
| CANOAS 2 (5007) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2           | 0,1462                     | 0,0055 | 0,0274 | 0,0037 |
| CAXIAS (6129) - GRAVATAÍ 2 (6221) – c2             | 1,5481                     | 0,0165 | 0,0659 | 0,0165 |
| CAXIAS (6129) - ITÁ (6229) – c2                    | 5,0097                     | 0,0533 | 0,2132 | 0,0533 |
| CAXIAS (6132) - OSORIO 2 (5840) – c1               | 1,6568                     | 0,0621 | 0,3107 | 0,0414 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c2              | 0,8664                     | 0,0325 | 0,1625 | 0,0217 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c2            | 0,7278                     | 0,0273 | 0,1365 | 0,0182 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c1            | 0,3479                     | 0,0130 | 0,0652 | 0,0087 |
| CAXIAS (6132) - CAMPO BOM (5745) – c1              | 0,3479                     | 0,0130 | 0,0652 | 0,0087 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c3            | 0,9331                     | 0,0350 | 0,1750 | 0,0233 |
| CAXIAS (6132) - FARROUPILHA (6201) – c4            | 0,9331                     | 0,0350 | 0,1750 | 0,0233 |
| CHARQUEADAS (6173) - SCHARLAU (6910) – c1          | 1,1090                     | 0,0416 | 0,2079 | 0,0277 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 2 (5007) – c1    | 0,1946                     | 0,0073 | 0,0365 | 0,0049 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - CANOAS 1 (5720) – c2    | 0,1441                     | 0,0054 | 0,0270 | 0,0036 |
| CIDADE INDUST. (5755) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c2 | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c3  | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| CIDADE INDUST. (5755) - CHARQUEADAS (6173) – c2    | 0,1900                     | 0,0071 | 0,0356 | 0,0048 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c2  | 0,2280                     | 0,0086 | 0,0428 | 0,0057 |
| CIDADE INDUSTRIAL (5755) - GRAVATAÍ 2 (5795) – c1  | 0,7129                     | 0,0267 | 0,1337 | 0,0178 |
| ELDORADO (5770) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1       | 0,3253                     | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| FARROUPILHA (6201) - SCHARLAU (6910) – c2          | 1,0757                     | 0,0403 | 0,2017 | 0,0269 |
| GRAVATAÍ 2 (6221) - NOVA STA. RITA (6030) – c2     | 0,5796                     | 0,0062 | 0,0247 | 0,0062 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c2     | 1,3150                     | 0,0493 | 0,2466 | 0,0329 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c1     | 0,4438                     | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - OSORIO 2 (5840) – c1           | 0,4438                     | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c3     | 0,4438                     | 0,0166 | 0,0832 | 0,0111 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 6 (5850) – c2     | 0,2614                     | 0,0098 | 0,0490 | 0,0065 |
| GRAVATAÍ 2 (5795) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1    | 0,5474                     | 0,0205 | 0,1026 | 0,0137 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c2            | 0,2798                     | 0,0301 | 0,0947 | 0,0258 |
| GUAÍBA 1 (29124) - GUAÍBA 2 (5807) – c1            | 0,2798                     | 0,0301 | 0,0947 | 0,0258 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1    | 0,3253                     | 0,0122 | 0,0610 | 0,0081 |
| GUAÍBA 2 (5806) - CAMAQUÃ (5730) – c1              | 1,3262                     | 0,0497 | 0,2487 | 0,0332 |



|   |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|
| GUAÍBA 2 (5806) - ELDORADO (5770) – c1                | 0,5852 | 0,0219 | 0,1097 | 0,0146 |
| GUAÍBA 2 (5806) – CAMAQUÃ 3 (6790) – c1               | 1,3262 | 0,0497 | 0,2487 | 0,0332 |
| ITÁ (6229) - CAMPOS NOVOS (6155) – c1                 | 6,1679 | 0,0656 | 0,2625 | 0,0656 |
| ITÁ (6229) - NOVA STA. RITA (6030) – c1               | 2,2711 | 0,0242 | 0,0966 | 0,0242 |
| ITAÚBA (5970) - NOVA STA. RITA (6035) – c1            | 3,8258 | 0,1435 | 0,7173 | 0,0956 |
| ITAÚBA (5970) - POLO PETROQUÍMICO (5885) – c2         | 2,9923 | 0,1122 | 0,5611 | 0,0748 |
| ITAÚBA (5970) - CHARQUEADAS (6173) – c1               | 3,1099 | 0,1166 | 0,5831 | 0,0777 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - ITAÚBA (5970) – c1              | 3,0740 | 0,1153 | 0,5764 | 0,0769 |
| LIVRAMENTO 2 (5820) - PRES. MÉDICI (5980) – c2        | 6,0636 | 0,2274 | 1,1369 | 0,1516 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c4         | 0,8412 | 0,0315 | 0,1577 | 0,0210 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c3         | 0,4666 | 0,0175 | 0,0875 | 0,0117 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c2         | 0,4621 | 0,0173 | 0,0866 | 0,0116 |
| MONTES CLARO (6010) - PASSO FUNDO (6329) – c1         | 3,4109 | 0,1279 | 0,6395 | 0,0853 |
| MONTES CLARO (6010) - FARROUPILHA (6201) – c5         | 3,2406 | 0,1215 | 0,6076 | 0,0810 |
| N. STA. RITA (6030) – STA. VIT. DO PALMAR (6804) – c1 | 8,5460 | 0,0909 | 0,3637 | 0,0909 |
| NOVA STA. RITA (6035) - SCHARLAU (6910) – c2          | 0,3405 | 0,0128 | 0,0638 | 0,0085 |
| NOVA STA. RITA (6035) - POLO PETROQ. (5885) – c3      | 0,3602 | 0,0135 | 0,0675 | 0,0090 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c3    | 0,3420 | 0,0128 | 0,0641 | 0,0086 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c2    | 0,1657 | 0,0062 | 0,0311 | 0,0041 |
| NOVA STA. RITA (6035) - CIDADE INDUST. (5755) – c1    | 0,3496 | 0,0131 | 0,0656 | 0,0087 |
| NOVA STA. RITA (6035) – CAMAQUÃ 3 (6790) – c1         | 1,9152 | 0,0718 | 0,3591 | 0,0479 |
| SANTO ÂNGELO (6360) - PASSO FUNDO (6329) – c1         | 3,4960 | 0,1311 | 0,6555 | 0,0874 |
| PASSO FUNDO (6329) - PASSO REAL (5985) – c2           | 3,2634 | 0,1224 | 0,6119 | 0,0816 |
| PASSO REAL (5985) - SANTO ÂNGELO (6360) – c2          | 3,6109 | 0,1354 | 0,6770 | 0,0903 |
| PASSO REAL (5985) - ITAÚBA (5970) – c1                | 0,4560 | 0,0171 | 0,0855 | 0,0114 |
| PASSO REAL (5985) - CIDADE INDUSTRIAL (5755) – c1     | 2,2800 | 0,0855 | 0,4275 | 0,0570 |
| PASSO REAL (5985) - NOVA STA. RITA (6035) – c1        | 3,5386 | 0,1327 | 0,6635 | 0,0885 |
| PELOTAS 3 (5870) - QUINTA (5890) – c1                 | 0,6667 | 0,0250 | 0,1250 | 0,0167 |
| POLO PETROQ. (5885) - CIDADE INDUST. (5755) – c1      | 0,3583 | 0,0134 | 0,0672 | 0,0090 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 10 (5860) – c1   | 0,0537 | 0,0020 | 0,0101 | 0,0013 |
| PORTO ALEGRE 4 (5845) - PORTO ALEGRE 9 (5855) – c1    | 0,1672 | 0,0063 | 0,0314 | 0,0042 |
| PORTO ALEGRE 6 (5850) - PORTO ALEGRE 4 (5845) – c2    | 0,1550 | 0,0058 | 0,0291 | 0,0039 |
| PORTO ALEGRE 9 (5855) - PORTO ALEGRE 8 (5916) – c1    | 0,1824 | 0,0068 | 0,0342 | 0,0046 |
| PRES. MÉDICI (5980) - PELOTAS 3 (5870) – c2           | 2,0520 | 0,0770 | 0,3848 | 0,0513 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CHARQUEADAS (6173) – c2         | 2,9944 | 0,1123 | 0,5615 | 0,0749 |
| PRES. MÉDICI (5980) - QUINTA (5890) – c2              | 2,3294 | 0,0874 | 0,4368 | 0,0582 |
| PRES. MÉDICI (5980) - CAMAQUÃ (5730) – c1             | 5,4614 | 0,2048 | 1,0240 | 0,1365 |
| SANTO ÂNGELO (6350) - ITÁ (6229) – c1                 | 4,3712 | 0,0465 | 0,1860 | 0,0465 |
| SANTO ÂNGELO (6360) – LIVRAMENTO 2 (5820) – c1        | 6,3250 | 0,2372 | 1,1859 | 0,1581 |
| SCHARLAU (6910) - NOVA STA. RITA (6035) – c1          | 0,3496 | 0,0131 | 0,0656 | 0,0087 |
| GUAÍBA 1 (29128)                                      | 42,000 | 8,4000 | 8,4000 | 25,200 |