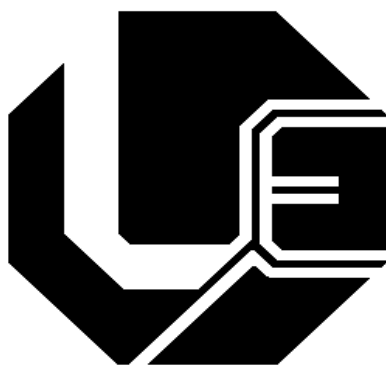




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WANDERLEY DIAS XAVIER FILHO

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE
TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE
VULNERABILIDADE**

Uberlândia
2017

WANDERLEY DIAS XAVIER FILHO

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE
TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE
VULNERABILIDADE**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Carlos de Oliveira

José Carlos de Oliveira

Coorientador: Gustavo G. dos Santos

Gustavo Gonçalves dos Santos

Uberlândia
2017

WANDERLEY DIAS XAVIER FILHO

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE
TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE
VULNERABILIDADE**

Trabalho apresentado como requisito
parcial de avaliação na disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso 2 do
curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Professor Dr. José Carlos Oliveira

Professor Dr. Antônio Carlos Delaiba

Bel. Gustavo Gonçalves dos Santos

Dedico esse trabalho aos meus pais
Wanderley e Maria Abadia, pelo apoio
e compressão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e a oportunidade de estar graduando no curso de Engenharia Elétrica.

A minha mãe Maria Abadia e o meu pai Wanderley Dias por todo apoio emocional e motivacional.

Ao Rogério Ferreira e Célia Regina por sempre estarem presentes.

Aos meus amigos por sempre estarem presentes nos momentos mais importantes da minha vida.

Ao Gustavo Santos por me ajudar a desenvolver esse projeto.

Ao professor José Carlos pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e aprendizado.

RESUMO

No contexto da Qualidade da Energia Elétrica, merecem destaque os estudos relacionados às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), com destaque aos afundamentos de tensão. Tais fenômenos encontram-se relacionado a manifestação de eventos adversos na forma de curtos-circuitos, partidas de motores de grande porte, inserção ou retirada de grandes cargas, dentre outras. Esses distúrbios podem trazer grandes impactos operacionais e enormes prejuízos financeiros em unidades consumidoras industriais, uma vez que importantes cadeias produtivas podem ser interrompidas diante de suas sensibilidades ao fenômeno em pauta. Diante dessa realidade, grandes esforços são feitos visando a determinação, à priori, dos efeitos atrelados com o fenômeno aqui tratado e, a partir deste conhecimento, proceder a definição de estratégias para mitigação dos impactos e, assim, evitar os efeitos negativos na forma de danos físicos e paradas de processos. Inserido nesse contexto, esse trabalho de conclusão de curso tem por objetivo abordar o tema, com destaque a caracterização de um método de análise aplicável à matéria, e ainda, baseado num complexo elétrico típico, ilustrar o procedimento empregado para a determinação das áreas mais vulneráveis aos fenômenos aqui contemplados.

ABSTRACT

In the context of Electric Power Quality, studies related to Short-Duration Voltage Variations should be highlighted, with emphasis on voltage sags. These phenomena are related to the manifestation of adverse events in the form of short circuits, large motor starters, insertion or withdrawal of large loads, among others. These disturbances can bring major operational impacts and enormous financial losses in industrial consumer units, since important productive chains can be interrupted due to their sensitivities to the phenomenon in question. Given this reality, great efforts are made to determine, a priori, the effects linked to the phenomenon discussed here, and, from this knowledge, to define strategies to mitigate impacts and, thus, to avoid negative effects in the form of physical damage and process stops. In this context, this course completion work aims to address the issue, with emphasis on the characterization of a method of analysis applicable to the matter, and also, based on a typical electrical complex, to illustrate the procedure used to determine the most vulnerable areas to the phenomena contemplated here.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de cada distúrbio em um sistema elétrico de potência nos E.U.A [4].....	12
Figura 2 - Custo estimado para a interrupção de processo industrial por um intervalo inferior a um minuto [3]	13
Figura 3 - Curva CBEMA [4]	16
Figura 4 - Curva ITIC [4]	16
Figura 5 - Curva SEMI F47 [3]	17
Figura 6 - Ocorrência de cada tipo de curto-circuito [13]	19
Figura 7 - Representação da falta trifásica [12]	20
Figura 8 - Representação da falta fase-terra [12]	21
Figura 9 - Circuito equivalente da falta fase-terra [14]	21
Figura 10 - Representação da falta fase-fase [12].....	22
Figura 11 - Circuito equivalente da falta fase-fase [14].....	22
Figura 12 - Representação da falta fase-fase-terra [12]	23
Figura 13 - Circuito equivalente da falta fase-fase-terra [14]	23
Figura 14 - Área de vulnerabilidade em uma rede [4].....	24
Figura 15 - Fluxograma da formação das matrizes de impedâncias	29
Figura 16 - Fluxograma do processo de cálculo das tensões pós falta .	30
Figura 17 - Diagrama unifilar do sistema-teste	31
Figura 18 – Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-terra – impedância de falta nula	37
Figura 19 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-terra – impedância de falta igual a 10Ω	39
Figura 20 - Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-fase – impedância de falta nula	41
Figura 21 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-fase – impedância de falta igual a 10Ω	43
Figura 22 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-fase-terra - impedância de falta nula	45
Figura 23 - Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-fase-terra – impedância de falta igual a 10Ω	47

Figura 24 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta trifásica - impedância de falta nula	49
--	----

Figura 25 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta trifásica - impedância de falta igual a 10Ω	51
--	----

Figura A. 1 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-terra e $Z_f=10\Omega$	56
--	----

Figura A. 2 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-terra francos	56
---	----

Figura A. 3 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase com $Z_f=10\Omega$	57
---	----

Figura A. 4 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase francos	57
--	----

Figura A. 5 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase-terra com $Z_f=10\Omega$	58
---	----

Figura A. 6 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase-terra francos	58
--	----

Figura A. 7 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos trifásicos com $Z_f=10\Omega$	59
--	----

Figura A. 8 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos trifásicos francos	59
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das impedâncias de falta para alguns curtos-circuitos	19
Tabela 2 - Classificação dos VTCD's segundo o PRODIST	25
Tabela 3 - Fatores de Ponderação e Fator de Impacto base de acordo com a tensão nominal	26
Tabela 4 - Classificação dos afundamentos de tensão segundo o ONS	26
Tabela 5 - Parâmetros das linhas de transmissão	32
Tabela 6 - Parâmetros dos geradores	33
Tabela 7 - Parâmetros dos transformadores	33
Tabela 8 - Legenda das nomenclaturas.....	34
Tabela 9 – Identificação dos barramentos	35
Tabela 10 - Falta Fase-Terra - $Z_f=0$	36
Tabela 11 - Falta Fase-Terra com $Z_f = 10\Omega$	38
Tabela 12 - Falta Fase-Fase – $Z_f=0\Omega$	40
Tabela 13 - Falta Fase-Fase - $Z_f = 10\Omega$	42
Tabela 14 - Falta Fase-Fase-Terra – $Z_f=0\Omega$	44
Tabela 15 - Falta Fase-Fase-Terra - $Z_f = 10\Omega$	46
Tabela 16 - Falta Trifásica – $Z_f=0\Omega$	48
Tabela 17 - Falta Trifásica - $Z_f = 10\Omega$	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	14
2.1 Curvas de sensibilidade de equipamentos eletrônicos.....	15
2.2 Regulamentação aplicável	18
2.3 Origens dos curtos-circuitos	18
3 ESTRATÉGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE VULNERABILIDADE	24
3.1 Síntese das normas existentes à nível nacional	24
3.2 Metodologia para detecção dos VTCD's	27
4 ESTUDOS DE CASOS	31
4.1 O sistema teste	31
4.2 Resultados obtidos.....	34
4.2.1 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Terra.....	35
4.2.2 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Fase	39
4.2.3 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Fase-Terra.....	43
4.2.4 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Trifásicos	47
4.3 Análise dos resultados de simulação	51
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE	56

1 INTRODUÇÃO

O termo “Qualidade da Energia Elétrica (QEE)” é utilizado desde o século passado, contudo, esse teve sua maior importância nas últimas décadas, em decorrência da natural modernização e das sucessivas modificações nos moldes de funcionamento dos sistemas elétricos de potência (SEP), bem como das maiores exigências dos consumidores, os quais estão mais atenciosos quanto aos padrões de energia com os quais são supridos [1].

Dentro do contexto da QEE, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's) merecem um estudo detalhado, tendo em vista que constituem um dos fenômenos mais passíveis de ocorrência em um sistema elétrico de potência (SEP). Isto pode ser constatado na Figura 1, a qual indica que cerca de 50% dos distúrbios em um sistema nos Estados Unidos são devidos a essas variações na magnitude da tensão. Nesse cenário, ficam fundamentadas as motivações para essa linha de pesquisa [2].

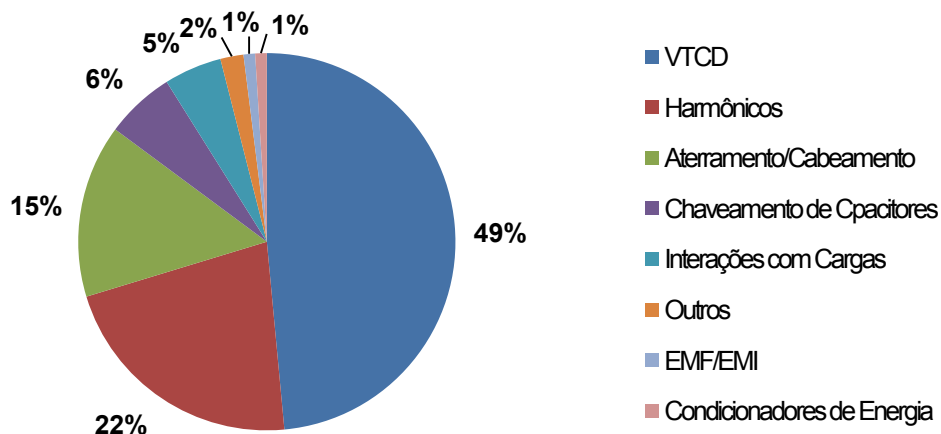


Figura 1 - Quantidade de cada distúrbio em um sistema elétrico de potência nos E.U.A [2]

Diante da relevância das variações de tensão de curta duração (VTCD's), mais especificadamente, os afundamentos de tensão, conhecidos na literatura americana como “*voltage sags*” ou “*voltage dips*”, esses se apresentam como distúrbios que mais afetam os consumidores com cargas sensíveis e, por motivo, cresce o interesse no estabelecimento de normas

regulatórias que resultem em maiores empreendimentos por parte das concessionárias de energia em técnicas de mitigação para o fenômeno ora posto.

A título de ilustração, o gráfico da Figura 2 exibe uma relação entre o prejuízo financeiro para cada tipo de indústria devido a interrupção do processo de produção em intervalo inferior a 1 (um) minuto, ficando evidente, o quanto é importante à manutenção dos níveis adequados de tensão para tais consumidores. Observe que as indústrias têxteis, siderúrgicas e, em maior grau, as refinarias de petróleo estão entre as mais atingidas financeiramente, com prejuízos de até 600 mil dólares por paradas na produção [3].

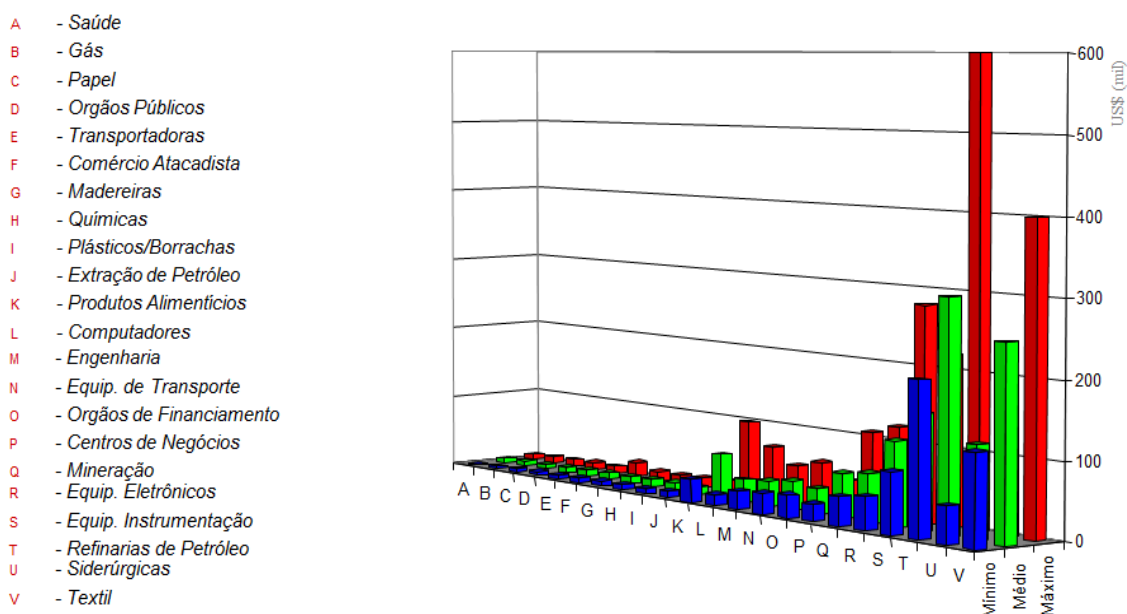


Figura 2 - Custo estimado para a interrupção de processo industrial por um intervalo inferior a um minuto [3]

À luz da problemática apresentada quanto aos afundamentos de tensão, fica exposto que os mesmos merecem ser tratados com prudência e estudados minuciosamente. Nesse sentido, esse trabalho de conclusão de curso tem por objetivo contribuir para o entendimento desse fenômeno apresentando como estudo de caso a análise das regiões de vulnerabilidade de um sistema real da região sul do Brasil. Para tanto, serão aplicados os vários tipos de curtos-circuitos, que são as principais causas de VTCD's, e analisadas as magnitudes das tensões remanescentes nos barramentos constituintes desse sistema.

2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Visando uma melhor caracterização das VTCD's, vale reconhecer que tais fenômenos são divididos em três grupos segundo o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, dependendo do seu tempo de duração e sua magnitude, a saber: interrupções, afundamentos e elevações [4].

As interrupções de tensão acontecem quando a magnitude da tensão atinge valores inferiores a 0,1 pu (por unidade) e, por conseguinte, suspendem instantaneamente a operação de uma planta industrial causando grandes prejuízos devido a parada de produção. As interrupções são subdivididas, conforme sua duração, em Interrupção Momentânea de Tensão (IMT), de 1 ciclo até 3 segundos, e Interrupção Temporária de Tensão (ITT), de 3 segundos até 3 minutos. Contudo, esses casos de VTCD's são mais raros em uma rede elétrica.

Outro distúrbio que pode ocorrer em um SEP são as elevações de tensão, caracterizadas pela magnitude da tensão acima de 1,1 pu. Elas ocorrem normalmente quando uma grande carga é desacoplada da rede ou, em casos de carregamento leve, com a permanência de capacitores shunts. As elevações são subdivididas, conforme a sua duração, em Elevação Momentânea de Tensão (EMT), de 1 ciclo até 3 segundos, e Elevação Temporária de Tensão (ETT), de 3 segundos até 3 minutos. Também, são casos mais raros de VTCD, contudo muito agressivos aos componentes e equipamentos que estejam conectados à rede.

Por fim, os afundamentos de tensão são os eventos mais frequentes em um SEP, caracterizados pela magnitude da tensão menor que 0,9 pu e maior ou igual a 0,1 pu. Assim como as interrupções e elevações de tensão, esses são subdivididos em Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT), de 1 ciclo até 3 segundos, e Afundamento Temporário de Tensão (ATT), de 3 segundos até 3 minutos. Eles são de menor impacto do que os demais fenômenos de VTCD's, entretanto, por serem muito mais frequentes, causam maiores prejuízos, especialmente, aos consumidores industriais.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pela coordenação e controle da operação do sistema de transmissão brasileiro, com níveis de tensão acima de 138 kV, possui as mesmas classificações do PRODIST para as VTCD's, exceto que as instalações em tensões próprias da rede básica, os fenômenos ETT, ATT e ITT possuem intervalo máximo de 1 minuto [5].

2.1 Curvas de sensibilidade de equipamentos eletrônicos

Cada processo de uma indústria têxtil, petroquímica, automobilística, alumínio, entre outras, são afetadas de forma diferente quanto as magnitudes dos afundamentos de tensão, sendo uns mais prejudicados do que outros, conforme indicado na Figura 2. Isso porque, as cargas instaladas em cada uma dessas tem um padrão de sensibilidade, de modo que um afundamento pode não ser significativo para determinada indústria e causar uma interrupção total do processo fabril em outra, causando perdas de insumos, danificação de aparelhos e um consequente reparo desses [6].

Nesse cenário, as curvas de sensibilidade são indicadores de suportabilidade aos VTCD's, especialmente os AMT's, mais recorrentes em um SEP [2]. Alguns exemplos clássicos destes limites encontram-se apresentados em sequência.

A norma IEEE-446 estabelece parâmetros no que se diz respeito a equipamentos eletrônicos e computadores. A curva CBEMA (*“Computer and Business Equipment Manufacturers Association”*), ilustrada na Figura 3 foi primordialmente desenvolvida para analisar os efeitos de elevações e afundamentos de tensão em microcomputares ao longo de um curto período. Nessa figura é apresentado a região de operação dos equipamentos e um pequeno filamento, com limites inferiores e superiores, onde aqueles podem operar sem que haja mau funcionamento ou danos ao dispositivo [2, 6].

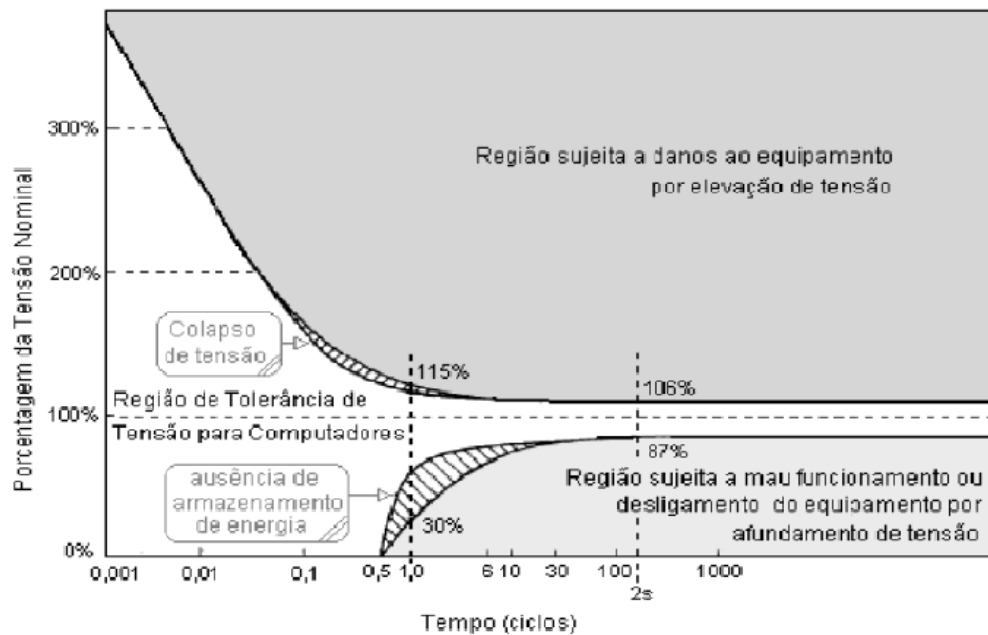


Figura 3 - Curva CBEMA [2]

Posteriormente, em 1997 a curva CBEMA foi aprimorada, pois novas tecnologias em aparelhos eletrônicos e microcomputadores exigiam novos estudos para analisar suas curvas de capacidade. Assim a curva CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC (*"Information Technology Industry Council"*) foi instituída definitivamente em 2000, com o objetivo de parametrizar os limites de tensão suportados pelos dispositivos eletrônicos modernos, como mostra a Figura 4 [2, 6].

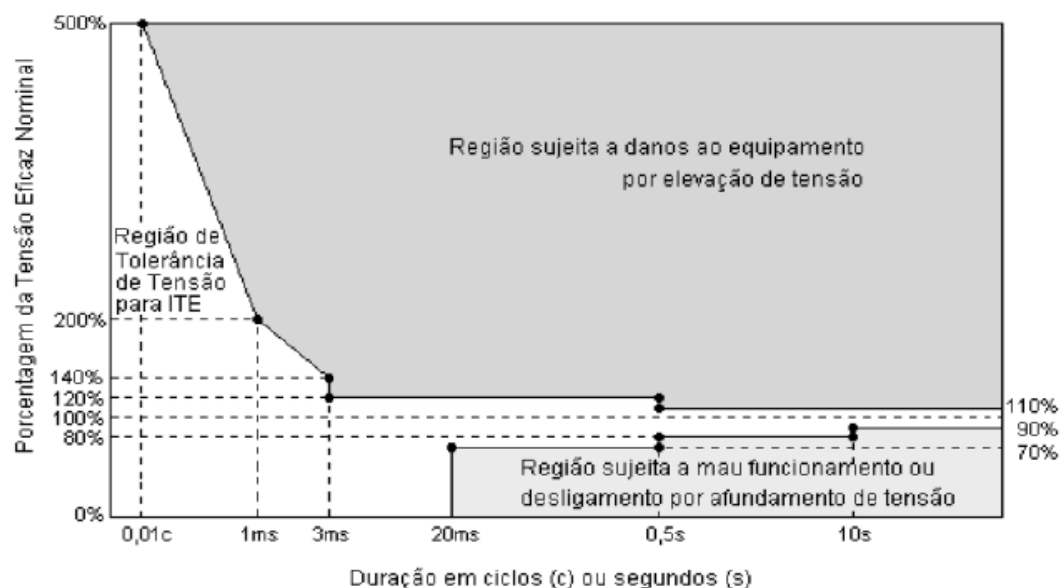


Figura 4 - Curva ITIC [4]

Na ausência das curvas de capacidade para outros equipamentos, a curva ITIC é, muitas vezes, usada pelos consumidores, principalmente os industriais, como referência de suportabilidade de seus equipamentos e definir se os danos ou as paradas no processo industrial foram causadas por distúrbios na rede elétrica, que são de responsabilidade das concessionárias [2]. Não obstante tal emprego, vale ressaltar que este procedimento não se mostra efetivamente válido para muitos equipamentos e processos, outros, que não aqueles baseados em fontes de alimentação atípicas das fontes chaveadas.

A curva SEMI F47 foi desenvolvida pela *Semiconductor Equipment and Materials International* (SEMI), uma associação mundial de indústrias produtoras de semicondutores. A Figura 5 visa verificar a imunidade dessas indústrias frente aos afundamentos de tensão [2].

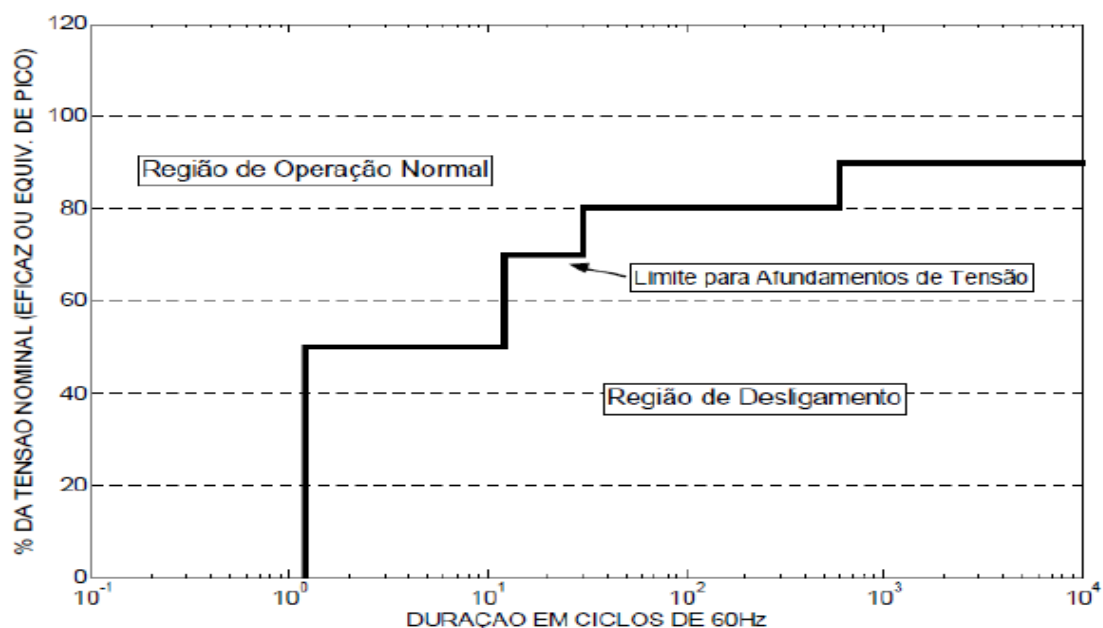


Figura 5 - Curva SEMI F47 [2]

As curvas servem como guias para os consumidores de energia elétrica. Neste caso, em se tratando de equipamentos mais sensíveis aos AMT, aqueles podem adquirir equipamentos que mantém os níveis de tensão adequados nos momentos em que ocorrer esses eventos.

Por fim, vale ressaltar que estudos específicos para os mais distintos produtos que compõem os complexos elétricos industriais, comerciais e

residenciais têm motivado pesquisadores para a busca de limites de suportabilidade próprios.

2.2 Regulamentação aplicável

Diante da relevância do fenômeno aqui tratado, a ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, estabeleceu diretrizes para o tratamento do indicador de VTCD's, o qual, para o momento se apresenta como grandeza de observação. Certamente, à medida que a metodologia proposta se apresentar com a devida sustentação e segurança para aplicação, esta deverá conduzir, num futuro, a penalizações para as concessionárias [4].

Para efeitos de medição, o valor de afundamento ou elevação é considerado o valor mínimo ou o valor máximo, respectivamente, que a tensão atingir durante o intervalo do distúrbio, sendo esse menor que 3 minutos. Ainda, a medição iniciará no momento em que a tensão exceder a zona de operação regular e finalizará quando aquela voltar a operar dentro dos padrões [4].

O ONS usa procedimentos semelhantes, contudo, o intervalo máximo considerado por eles é de 1 minuto, como contempla o submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede do ONS [5].

2.3 Origens dos curtos-circuitos

O curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental entre duas regiões com diferença de potencial e há entre eles uma baixa impedância, motivo pelo qual é caracterizado por elevadas correntes. Tais condições anômalas de operação são consideradas quanto a sua origem, duração e tipo, como reportado em [7] e [8].

Quanto ao tipo, os curtos-circuitos em redes trifásicas são divididos em duas categorias: falta simétricas e as faltas assimétricas. A primeira é referente

aos curtos trifásicos (3ϕ) e são ocasionados quando as três fases de uma rede elétrica entram em contato e ocasionam a falta. Por serem preponderantemente de impedância inferiores, nesses casos eles são mais severos e com elevados níveis de corrente. As faltas assimétricas são mais complicadas de obterem os valores das impedâncias de falta e consequente cálculo do curto. Elas são subdivididas em faltas fase-terra (ϕ -terra), fase-fase (ϕ - ϕ) e fase-fase-terra (ϕ - ϕ -terra), sendo a primeira a maior causadora dos curtos-circuitos em linhas de transmissão. A Figura 6 mostra a porcentagem dos tipos de falta ora referidos [7, 9].

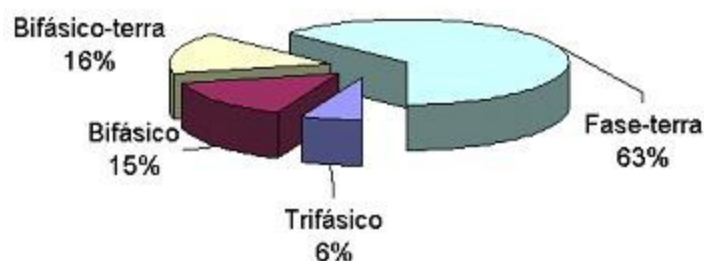


Figura 6 - Ocorrência de cada tipo de curto-circuito [9]

Outro fator a ser considerado para os estudos de curtos-circuitos é sua impedância de falta. Por serem muito influentes nas magnitudes dos curtos, elas não podem ser desconsideradas nas investigações. Para fins orientativos, a Tabela 2 indica algumas causas para a manifestação da anomalia aqui tratada e ilustra os valores típicos para suas impedâncias [7, 8].

Tabela 1 - Valores das impedâncias de falta para alguns curtos-circuitos

Causas	Resistência de Falta (Ω)
Descargas atmosféricas	0 a 10
Queimadas	10 a 70
Queda de estruturas	20 a 30
Árvores	100 a 150

Outro aspecto a ser considerado como fator de influência sobre os curtos-circuitos, no que tange a sua amplitude, propagação e duração são: o

sistema de proteção [10], os transformadores [7] e os tipos de conexões destes [2, 11].

Os tipos de curtos-circuitos contemplados neste TCC são:

- **Curto-Circuito Trifásico (3 ϕ)**

Esse curto por ser simétrico, possui a mesma magnitude e um defasamento de 120° entre as correntes. Contudo, por ser um curto entre as três fases, a tensão chega a um valor crítico e por ter uma impedância de falta ínfima, na maior parte dos casos, eles são mais severos. A Figura 7 representa esse curto [12].

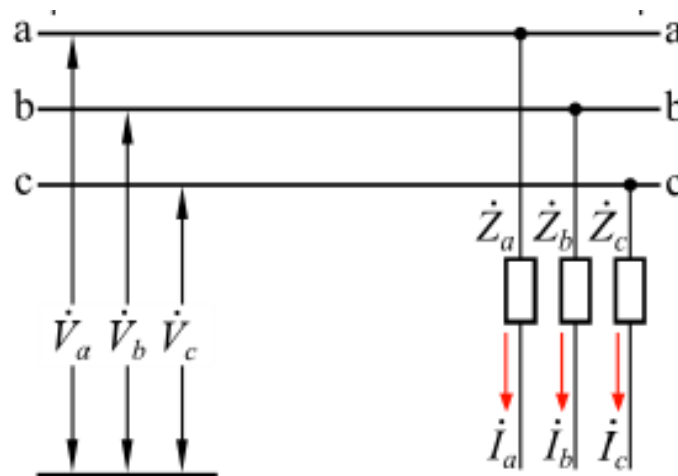


Figura 7 - Representação da falta trifásica [12]

A fórmula para o cálculo dessa falta é expressa em (2.1) [12].

$$I_f = \frac{E_{th}}{Z_{th}} \approx \frac{1}{Z_{th}} \quad (2.1)$$

- **Curto-Circuito Fase-Terra (ϕ -terra)**

Esse envolve apenas uma fase conectada ao terra e se apresenta com maior probabilidade de ocorrência. A Figura 8 representa essa falta na fase A do circuito [12].

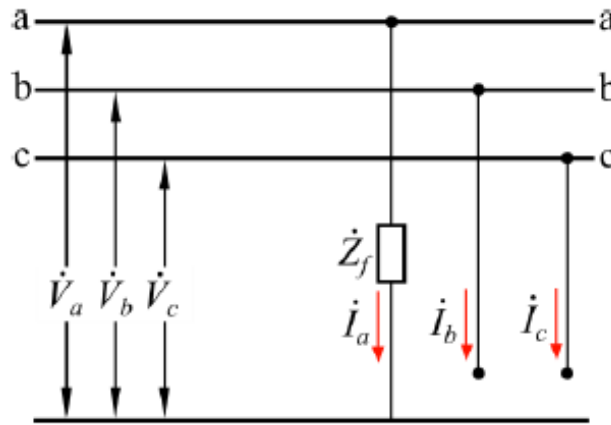


Figura 8 - Representação da falta fase-terra [12]

A Figura 9 representa o circuito equivalente e as impedâncias de seqüências das componentes simétricas [13], como é classicamente utilizado para tais estudos.

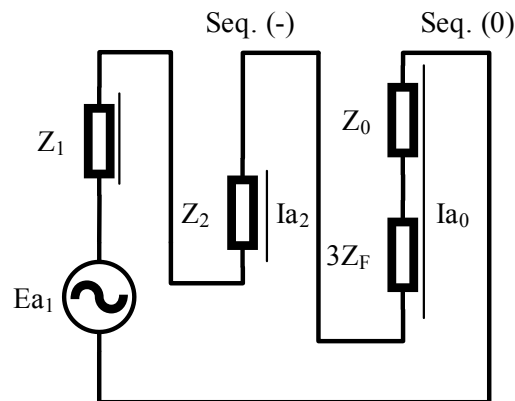


Figura 9 - Circuito equivalente da falta fase-terra [13]

Quanto a corrente de falta, esta é determinada através da expressão (2.2).

$$\frac{\dot{I}_a}{3} = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{E_{a1}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f} \quad (2.2)$$

- **Curto-Circuito Fase-Fase (ϕ - ϕ)**

A Figura 10 ilustra um curto entre as fases B e C [12].

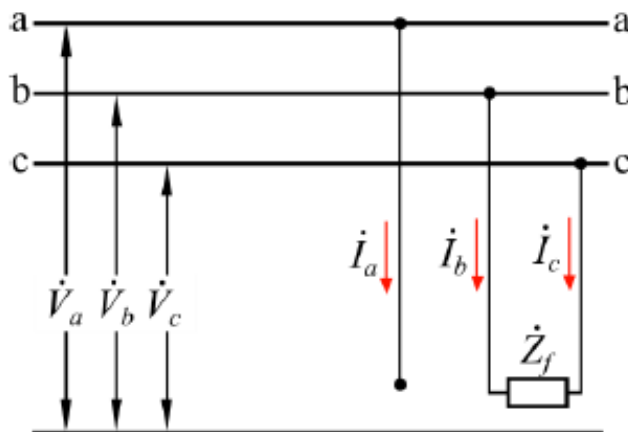


Figura 10 - Representação da falta fase-fase [12]

A Figura 11, por sua vez, é indicativa dos procedimentos aplicáveis aos cálculos da falta em questão [13].

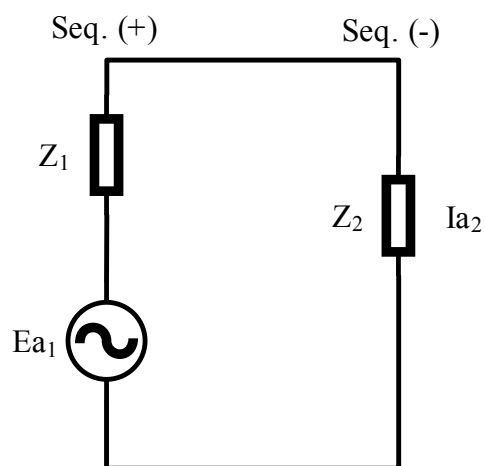


Figura 11 - Circuito equivalente da falta fase-fase [13]

Quanto a corrente de falta, esta pode ser determinada através de (2.3):

$$\dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f} \quad (2.3)$$

- **Curto-Circuito Fase-Fase-Terra (ϕ - ϕ -terra)**

A Figura 12 representa esse tipo de curto-circuito [12].

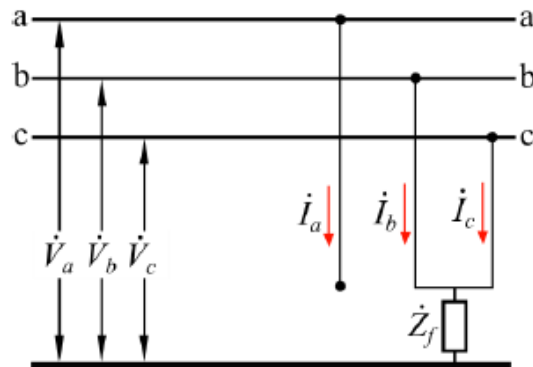


Figura 12 - Representação da falta fase-fase-terra [12]

Cujo circuito de seqüências é indicado pela Figura 13 [13].

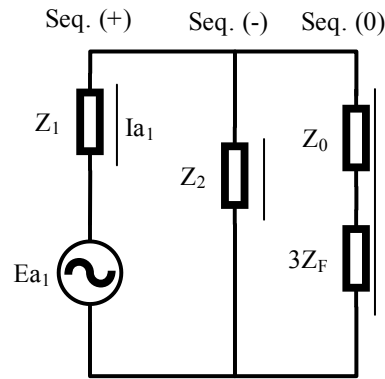


Figura 13 - Circuito equivalente da falta fase-fase-terra [13]

As equações (2.4), (2.5) e (2.6) fornecem as componentes de seqüência zero, negativa e positiva da corrente de falta fase-fase-terra.

$$i_{a1} = \frac{-(\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (2.4)$$

$$i_{a2} = \frac{-(\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (2.5)$$

$$i_{a0} = \frac{-\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1\dot{Z}_2)} \dot{E}_{a1} \quad (2.6)$$

3 ESTRATÉGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE VULNERABILIDADE

As áreas de vulnerabilidade estão intrinsecamente atreladas com aquelas sujeitas ao maior número de manifestações de VTCD's quando da manifestação de curtos-circuitos na rede elétrica. Portanto, indicam as regiões onde as cargas supridas poderiam ser mais impactadas. A título de exemplificação didática, a Figura 14 mostra uma área de maior vulnerabilidade de um sistema elétrico [7, 14].

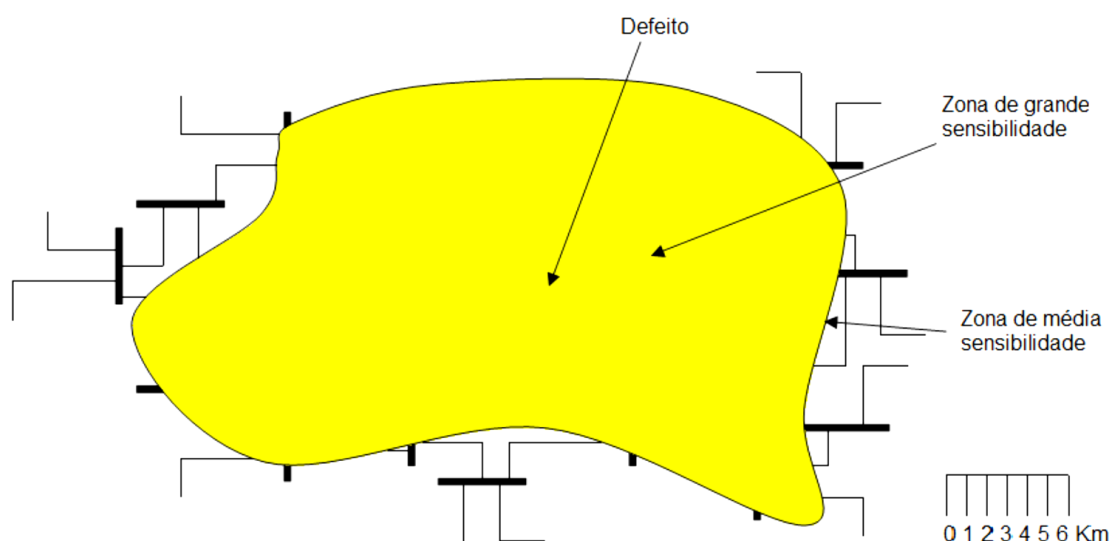


Figura 14 - Área de vulnerabilidade em uma rede [7]

3.1 Síntese das normas existentes à nível nacional

A organização dos resultados dos trabalhos de simulação foi realizada nos mesmos moldes de classificação indicadas no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Redes do ONS e no módulo 8 do PRODIST. Observa-se que essa última é mais elaborada, possuindo nove regiões nomeadas pelas letras de A a I, as quais possuem, cada uma, um determinado fator que busca expressar o grau de relevância do fenômeno, que foi definido por “fator de ponderação”.

Tabela 2 - Classificação dos VTCD's segundo o PRODIST

AMPLITUDE (PU)	DURAÇÃO						
	16,67ms-100ms	100ms-300ms	300ms-600ms	600ms-1seg	1seg-3seg	3seg-1min	1min-3min
1,15-1,20	CATEGORIA H			CATEGORIA I			
1,10-1,15							
0,85-0,90	CATEGORIA A						
0,80-0,85							
0,70-0,80	CATEGORIA B	CATEGORIA D		CATEGORIA G			
0,60-0,70							
0,50-0,60	CATEGORIA C			CATEGORIA F			
0,40-0,50							
0,30-0,40	CATEGORIA E						
0,20-0,30							
0,10-0,20							
< 0,10							

A partir das ocorrências e suas respectivas ponderações determina-se o que foi caracterizado por “fator de impacto”, nos moldes indicados pela expressão (3.1).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times fp_i)}{FI_{BASE}} \quad (3.1)$$

Em que:

f_{ei} é frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apuradas por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i, sendo i = A, B, C, D, E, F, G, H e I.

fp_i é o fator de ponderação para cada região de sensibilidade i, estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração.

FI_{BASE} é o fator de impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

O valor de referência do indicador Fator de Impacto para os sistemas de distribuição de média e alta tensão, medidos por 30 dias consecutivos, deve ser de 1,0 pu [4].

Tabela 3 - Fatores de Ponderação e Fator de Impacto base de acordo com a tensão nominal

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fp)	Fator de Impacto base (FI_{BASE})	
		1,0 KV < Vn < 69 KV	Vn ≥ 69 KV
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

A tabela 4 representa a classificação dos VTCD's frente às normas da ONS [5].

Tabela 4 - Classificação dos afundamentos de tensão segundo o ONS

AMPLITUDE (%)	DURAÇÃO				
	(16,67ms-300ms)	(300ms-600ms)	(600ms-1s)	(1s-3s)	(3s-1min)
(85-90)					
(80-85)					
(70-80)					
(60-70)					
(50-60)					
(40-50)					
(30-40)					
(20-30)					
(10-20)					
< 10					

3.2 Metodologia para detecção dos VTCD's

Para se obter informações que permitam o traçado das denominadas áreas mais sensíveis, a ideia básica passa pela utilização de uma metodologia que emprega inúmeros curtos-circuitos numa dada rede, muitas vezes denominados por “curtos-circuitos deslizantes” e, a partir da aplicação destes fenômenos, procede-se uma avaliação dos efeitos sobre as tensões em todos os barramentos do complexo elétrico sob análise. As regiões que mais sofrem as decorrências destes fenômenos são aquelas que irão originar as áreas de vulnerabilidade aqui tratadas.

Para cumprir tais objetivos, foi empregado, neste TCC, a plataforma MATLAB[®], o qual é aqui manipulado em consonância com os fluxogramas apresentados a seguir.

O fluxograma da Figura 15 está relacionado com a formação das matrizes de impedância. Inicialmente, é necessário receber as informações do sistema elétrico analisado e as impedâncias de cada componente simétrica das linhas de transmissão, dos geradores e dos transformadores, os quais são listadas em um programa nomeado “*falta33.m*”. Posteriormente, esse é lido em outro programa chamado “*final.m*”, no qual começa o processo de formação de matrizes. Esse último inicia criando uma barra fictícia, a qual será usada para representar faltas ao longo das linhas. Para tanto, é necessário inicializar uma matriz quadrada de admitâncias. Em seguida, são adicionadas as admitâncias dos geradores e dos transformadores, ressaltando que, dependendo da conexão desses, existem particularidades para a propagação do curto-circuito, conforme fora discutido anteriormente. Assim, um número representativo usado para simbolizar sua conexão é adicionado no programa “*falta33*”. As admitâncias das linhas são adicionadas subsequentemente e somadas com as anteriores.

Com o intuito de possibilitar o cálculo das correntes de falta, as matrizes são invertidas e transformadas em matrizes de impedâncias. Finalmente, na estratégia utilizada, alguns valores típicos de impedâncias de faltas podem ser

usados para representar a impedância de falta Z_f , bastando o usuário optar por utilizá-las no programa *'final.m'*.

O Fluxograma da Figura 16 representa o cálculo dos diferentes tipos de faltas, tendo por base as matrizes de impedâncias calculadas anteriormente. Primeiramente, são inicializadas todas as variáveis e, em seguida, faz-se o cálculo do curto-circuito para cada linha do sistema. O programa vai deslizando a cada 10% de linha, simulando curtos-circuitos intermediários, sendo esses falta fase-terra, falta fase-fase, falta fase-fase-terra e a falta trifásica.

Após os curtos-circuitos serem calculados, seus resultados são armazenados em uma matriz específica e o programa assim procederá até que todas as linhas sejam varridas e, por conseguinte, as tensões remanescentes em todos os barramentos terem sido calculadas.

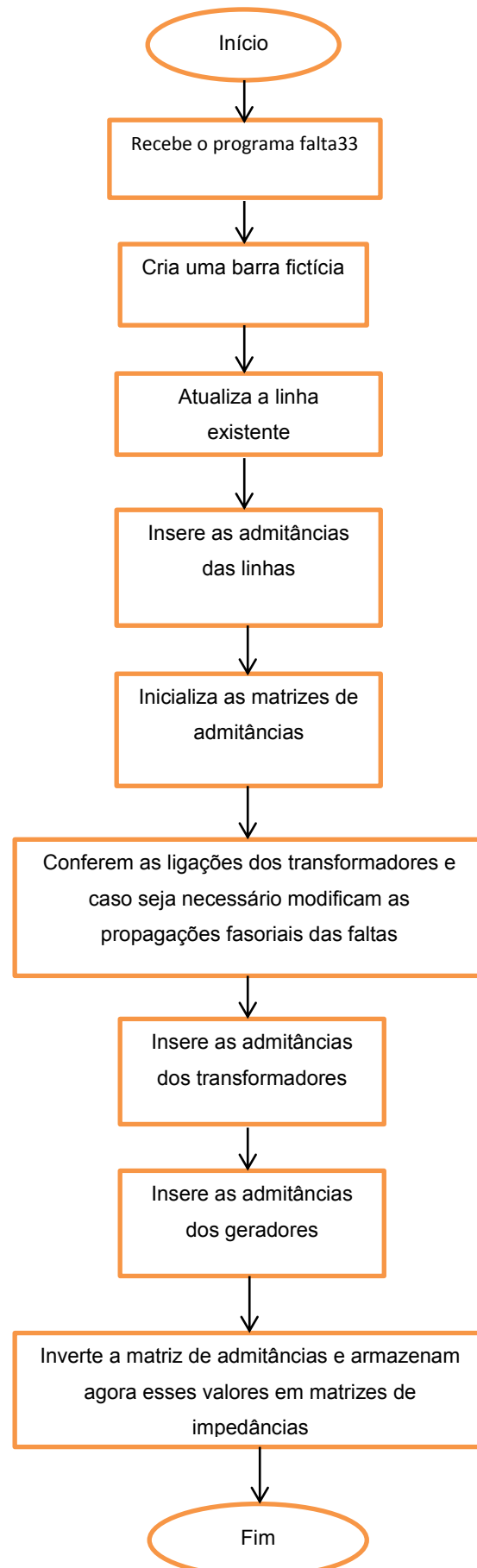


Figura 15 - Fluxograma da formação das matrizes de impedâncias

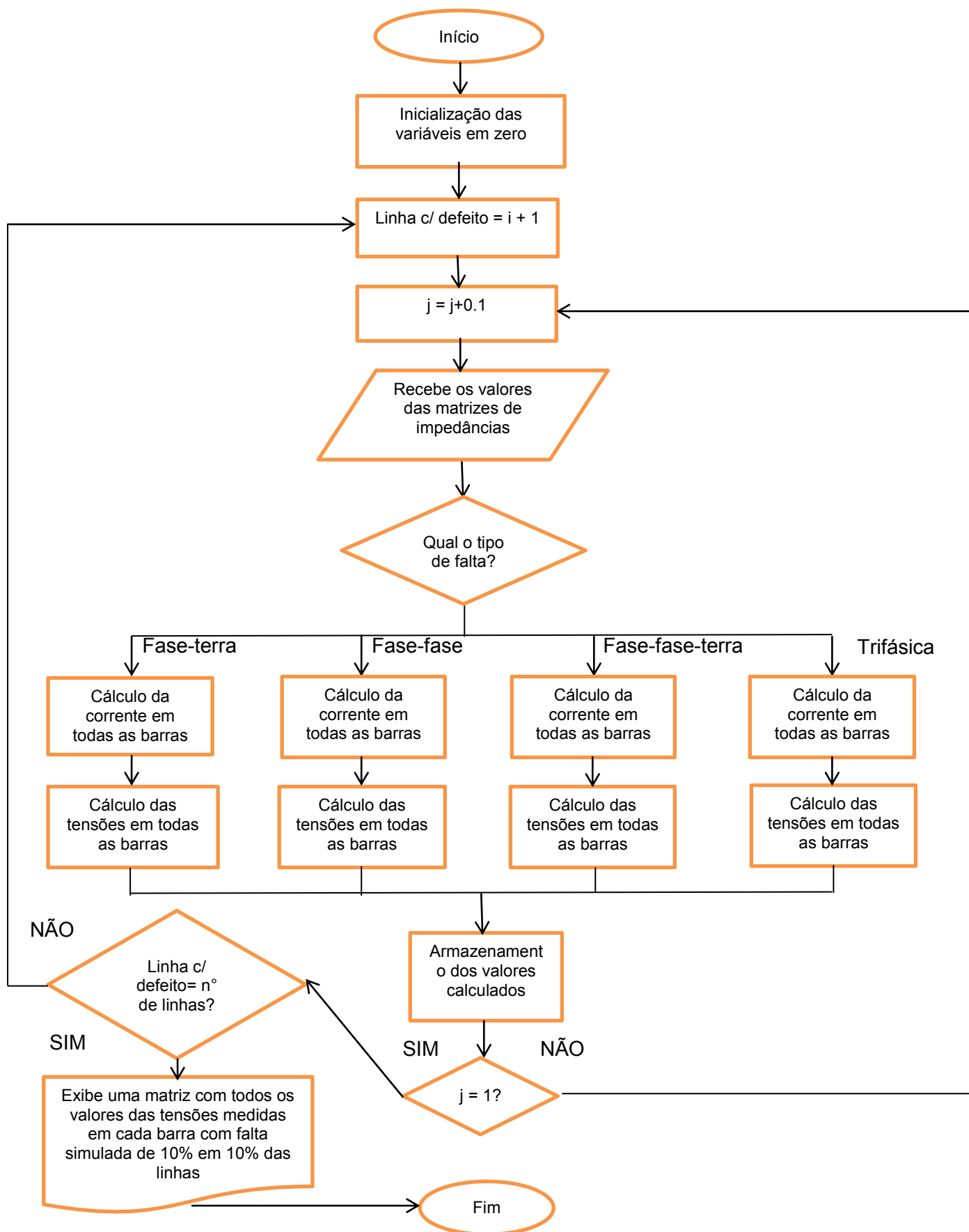


Figura 16 - Fluxograma do processo de cálculo das tensões pós falta

4 ESTUDOS DE CASOS

Para a realização dos estudos voltados para a aplicação da metodologia destinada a obtenção das áreas de vulnerabilidade, utilizou-se do sistema elétrico extraído de [16], o qual se apresenta constituído por 33 barramentos e sintetiza, através de linhas de transmissão com tensão de 500 Kv E 230 kV, em anel, a região do sul do Brasil. Como pode ser observado, o sistema é composto por 7 usinas hidrelétricas, totalizando 28 máquinas síncronas, 26 linhas de transmissão e 45 transformadores. Também, são empregados 7 bancos de capacitores shunt e 8 reatores shunt. O complexo, como um todo, possui uma capacidade de geração de 8.912 MW [15].

4.1 O sistema teste

O complexo elétrico escolhido para os estudos encontram-se dividido em duas regiões, sendo elas A e B, pois pela capacidade de geração, há um fluxo de potência da segunda região para a primeira. Elas são interligadas por duas linhas de transmissão e um transformador, como indicado na Figura 17.

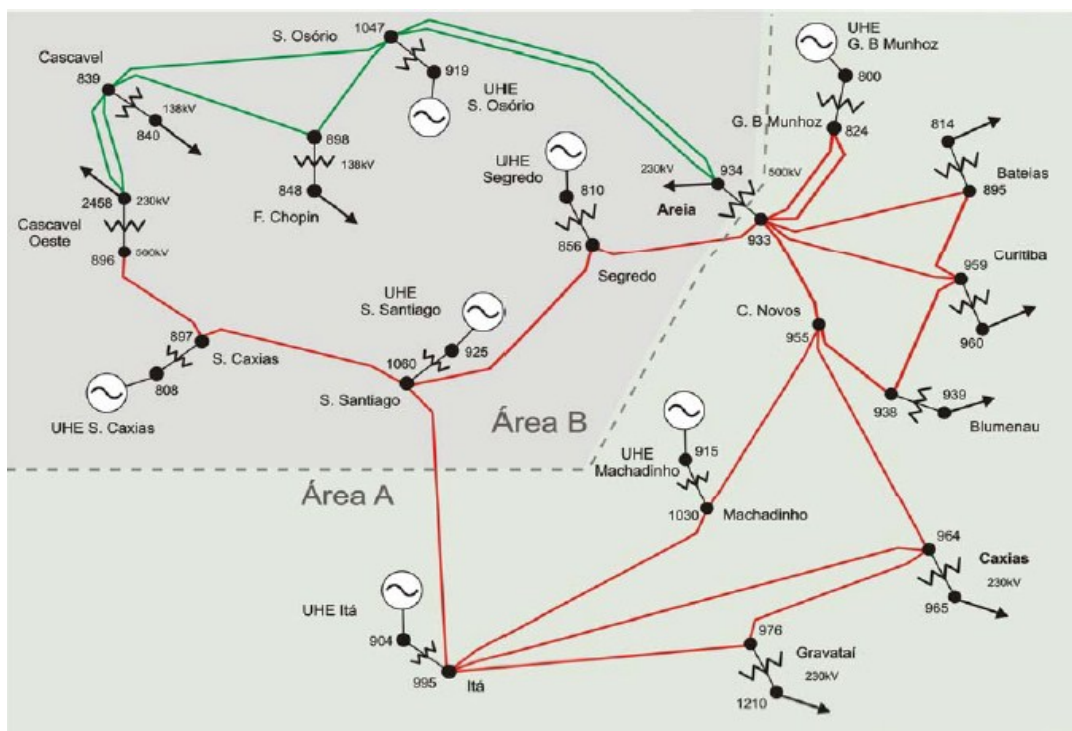


Figura 17 - Diagrama unifilar do sistema-teste

A Tabela 5 é indicativa dos parâmetros das linhas de transmissão, os dados dos geradores são fornecidos na Tabela 6 e as informações sobre os transformadores se encontram na Tabela 7.

Na Tabela 8 encontram-se identificadas as grandezas fornecidas pelas tabelas acima citadas.

Tabela 5 - Parâmetros das linhas de transmissão

DE	PARA	R+/R-	X+/X-	B	R0	X0
824	933	0,0001	0,00124	0,15204	0,0004	0,0029
824	933	0,0001	0,00126	0,15428	0,0004	0,0029
839	898	0,0113	0,0699	0,12617	0,0488	0,1951
839	1047	0,0122	0,0769	0,1381	0,0544	0,212
839	2458	0,0022	0,0109	0,0186	0,0077	0,0295
839	2458	0,0017	0,0103	0,02054	0,0065	0,0326
856	933	0,00056	0,00654	0,80493	0,0029	0,0168
856	1060	0,00056	0,00697	0,85746	0,0031	0,0179
896	897	0,0005	0,0073	0,7806	0,005	0,019
898	1047	0,0015	0,0089	0,01632	0,0062	0,0251
933	895	0,002	0,0255	3,1272	0,0277	0,1053
933	955	0,00162	0,02048	2,5017	0,0222	0,0844
933	959	0,002	0,0269	3,364	0,0272	0,1086
934	1047	0,03045	0,15738	0,27123	0,1521	0,4443
934	1047	0,03041	0,15718	0,27089	0,152	0,444
938	955	0,002556	0,029224	3,604	0,0317	0,1206
938	959	0,00127	0,00127	1,9589	0,0173	0,066
955	964	0,001877	0,023467	2,8724	0,0242	0,0876
959	895	0,0005	0,0044	0,4758	0,0047	0,018
964	976	0,000733	0,009164	1,1217	0,0098	0,0355
976	955	0,00282	0,03852	4,937	0,0362	0,1518
995	964	0,001643	0,030339	3,5488	0,0304	0,1154
995	1030	0,00073	0,0092	1,1226	0,0083	0,0322
995	1060	0,00172	0,0217	2,6516	0,0235	0,0894
1030	955	0,00047	0,0059	0,71818	0,0048	0,0186
1060	897	0,00076	0,01171	1,2458	0,008	0,0304

Tabela 6 - Parâmetros dos geradores

BARRAMENTO	X+/X-	X0
800	0,01445	99999
808	0,017175	99999
810	0,013525	99999
904	0,01572	99999
915	0,016733	99999
919	0,030875	99999
925	0,014275	99999

Tabela 7 - Parâmetros dos transformadores

DE	PARA	R+/R-/R0	X+/X-/X0	CONEXÃO
895	814	0,00032	0,01146	1
895	814	0,0003	0,01165	1
800	824	0,0000	0,0336	6
800	824	0,0000	0,0336	6
800	824	0,0000	0,0336	6
800	824	0,0000	0,0336	6
839	840	0,0000	0,0664	1
839	840	0,0000	0,0629	1
810	856	0,0000	0,042	6
810	856	0,0000	0,042	6
810	856	0,0000	0,042	6
810	856	0,0000	0,042	6
897	808	0,0000	0,0408	6
897	808	0,0000	0,0408	6
897	808	0,0000	0,0408	6
897	808	0,0000	0,0408	6
898	848	0,0000	0,0636	1
933	934	0,00031	0,01207	1
938	939	0,00031	0,0115	1
938	939	0,00032	0,01163	1
938	939	0,0000	0,01277	1
959	960	0,00032	0,01163	1
959	960	0,00031	0,01166	1
964	965	0,0002	0,01211	1
964	965	0,0002	0,01233	1
904	995	0,0005	0,04615	6
904	995	0,0005	0,04615	6
904	995	0,0005	0,04615	6
904	995	0,0005	0,04615	6
904	995	0,0005	0,04615	6
915	1030	0,0000	0,04131	6
915	1030	0,0000	0,04131	6

915	1030	0,0000	0,04131	6
919	1047	0,0008	0,06809	6
919	1047	0,0008	0,06809	6
919	1047	0,0008	0,06809	6
919	1047	0,0008	0,06809	6
925	1060	0,0004	0,04545	6
925	1060	0,0004	0,04545	6
925	1060	0,0004	0,04545	6
925	1060	0,0004	0,04545	6
976	1210	0,0003	0,01219	1
976	1210	0,00039	0,01138	1
976	1210	0,00036	0,01217	1
896	2458	0,0000	0,0127	1

Tabela 8 - Legenda das nomenclaturas

SIGLA	DESCRIÇÃO
DE	Barramento de origem
PARA	Barramento de destino
R+	Resistência de sequência positiva, em pu
R-	Resistência de sequência negativa, em pu
R0	Resistência de sequência zero, em pu
X+	Reatância de sequência positiva, em pu
X-	Reatância de sequência negativa, em pu
X0	Reatância de sequência zero, em pu
B	Susceptância shunt total do circuito, em pu
CONEXÃO	Tipo de ligação, sendo o número 1 para conexão Y_t-Y_t e o número 6 para conexão $\Delta-Y_t$

4.2 Resultados obtidos

Os estudos realizados contemplaram duas simulações para cada tipo de curto-circuito. Um conjunto considerando o valor da impedância de falta em 10Ω , e outro, considerando a impedância de falta nula. O valor de 10Ω foi considerado para as impedâncias de falta, em conformidade com informações anteriormente dadas. Esta opção se apresenta consonante com a ocorrência de descargas atmosféricas, que são os fenômenos mais típicos que conduzem aos curtos-circuitos.

Para facilitar os trabalhos, os barramentos originais foram modificados em sua nomenclatura, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Identificação dos barramentos

ANTIGO	ATUAL	ANTIGO	ATUAL
800	1	933	18
808	2	934	19
810	3	938	20
814	4	939	21
824	5	955	22
839	6	959	23
840	7	960	24
848	8	964	25
856	9	965	26
895	10	976	27
896	11	995	28
897	12	1030	29
898	13	1047	30
904	14	1060	31
915	15	1210	32
919	16	2458	33
925	17		

4.2.1 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Terra

- **Curtos-Circuitos Fase-Terra - $Z_f=0 \Omega$**

A Tabela 10 fornece os níveis obtidos para os afundamentos de tensão em cada barramento obtidos nos termos supra postos, os quais são sintetizados na Figura 18.

Os resultados evidenciam que os barramentos 20 a 27 foram os que experimentaram os maiores afundamentos e, numa proporção menor, aqueles identificados por 4, 10 e 32.

Tabela 10 - Falta Fase-Terra - Zf=0

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90-80 (%)	80-70 (%)	70-60 (%)	60-50 (%)	50-40 (%)	40-30 (%)	30-20 (%)	20-10 (%)	10-0 (%)	
1		58	16	27	4	0	0	0	0	0	105
2		18	5	0	0	0	0	0	0	0	23
3		30	43	6	0	0	0	0	0	0	79
4		41	14	15	35	17	9	17	9	43	200
5		53	61	13	9	6	6	2	2	26	178
6		40	10	4	6	3	20	22	4	26	135
7		40	10	4	6	3	20	22	4	26	135
8		63	47	18	5	2	2	1	0	15	153
9		60	38	6	0	32	7	4	2	4	153
10		41	14	15	35	17	9	17	9	43	200
11		18	16	2	0	17	12	5	18	23	111
12		18	14	4	11	12	5	7	18	20	109
13		63	47	18	5	2	2	1	0	15	153
14		90	17	7	0	0	0	0	0	0	114
15		85	19	4	0	0	0	0	0	0	108
16		53	6	6	4	0	0	0	0	0	69
17		62	14	5	0	0	0	0	0	0	81
18		54	55	22	11	4	8	3	2	27	186
19		70	67	11	10	6	5	3	19	10	201
20		15	30	10	20	19	27	32	29	14	196
21		15	30	10	20	19	27	32	29	14	196
22		4	71	32	17	40	9	5	7	9	194
23		40	15	9	29	24	11	19	14	39	200
24		40	15	9	29	24	11	19	14	39	200
25		39	11	22	44	11	7	38	9	11	192
26		39	11	22	44	11	7	38	9	11	192
27		42	9	18	49	3	10	36	6	19	192
28		39	42	65	9	9	4	3	1	4	176
29		59	33	39	31	5	12	4	4	3	190
30		79	48	7	4	0	6	3	2	5	154
31		46	31	27	11	6	4	3	2	4	134
32		42	9	18	49	3	10	36	6	19	192
33		38	10	6	4	1	21	11	22	20	133
Σ falta											5034
Σ total	4404	1494	878	481	501	296	271	383	241	489	9438

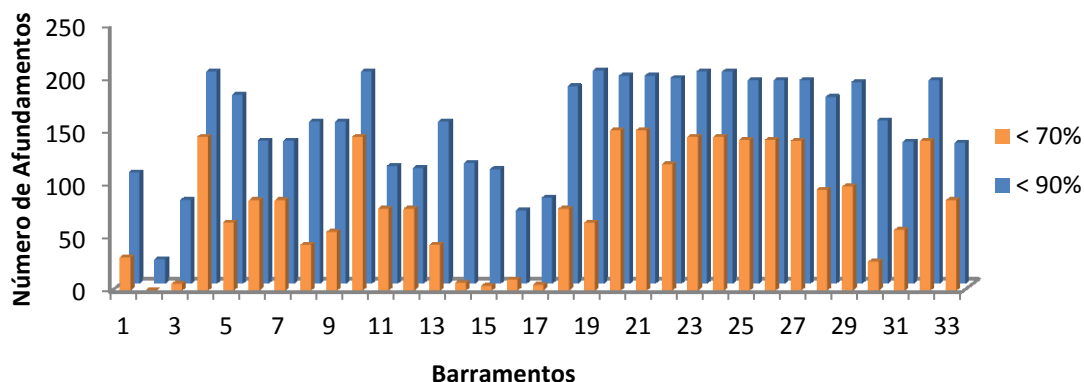


Figura 18 – Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-terra – impedância de falta nula

- **Curtos-Circuitos Fase-Terra - $Z_f = 10 \Omega$**

A Tabela 11 corresponde aos valores obtidos quanto da aplicação dos curtos-circuitos considerando a impedância de falta.

O gráfico Figura 19 resume as grandezas obtidas e evidencia que as mesmas barras anteriormente afetadas se apresentam como as mais impactadas. Naturalmente, devido à utilização de uma impedância para a falta, as amplitudes obtidas para as tensões residuais foram maiores que aqueles associados com um curto franco.

Tabela 11 - Falta Fase-Terra com $Z_f = 10\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		59	34	4	0	0	0	0	0	0	97
2		8	0	0	0	0	0	0	0	0	8
3		43	12	0	0	0	0	0	0	0	55
4		40	17	26	34	25	25	10	18	0	195
5		61	51	16	9	30	0	0	0	0	167
6		21	9	14	7	10	12	34	0	0	107
7		21	9	14	7	10	12	34	0	0	107
8		61	50	13	9	5	0	1	0	0	139
9		85	12	29	13	9	0	0	0	0	148
10		40	17	26	34	25	25	10	18	0	195
11		26	7	8	15	5	5	20	12	7	105
12		26	12	9	9	5	5	20	0	18	104
13		61	50	13	9	5	0	1	0	0	139
14		86	17	4	0	0	0	0	0	0	107
15		79	20	0	0	0	0	0	0	0	99
16		19	7	0	1	0	0	0	0	0	27
17		56	10	0	0	0	0	0	0	0	66
18		50	66	17	7	34	0	0	0	0	174
19		70	56	15	8	31	0	1	0	0	181
20		18	33	24	15	54	22	17	9	3	195
21		18	33	24	15	54	22	17	9	3	195
22		2	90	29	42	8	10	10	0	0	191
23		40	16	22	37	23	29	10	18	0	195
24		40	16	22	37	23	29	10	18	0	195
25		39	28	45	5	20	30	10	12	0	189
26		39	28	45	5	20	30	10	12	0	189
27		44	24	47	5	13	33	8	12	5	191
28		25	91	17	12	6	5	0	0	0	156
29		65	65	29	13	9	8	0	0	0	189
30		103	14	20	1	0	0	0	1	0	139
31		45	50	13	5	9	0	0	0	0	122
32		44	24	47	5	13	33	8	12	5	191
33		25	6	11	12	7	5	31	10	0	107
Σ faltas											4664
Σ total	4774	1459	974	603	371	453	340	262	161	41	9438

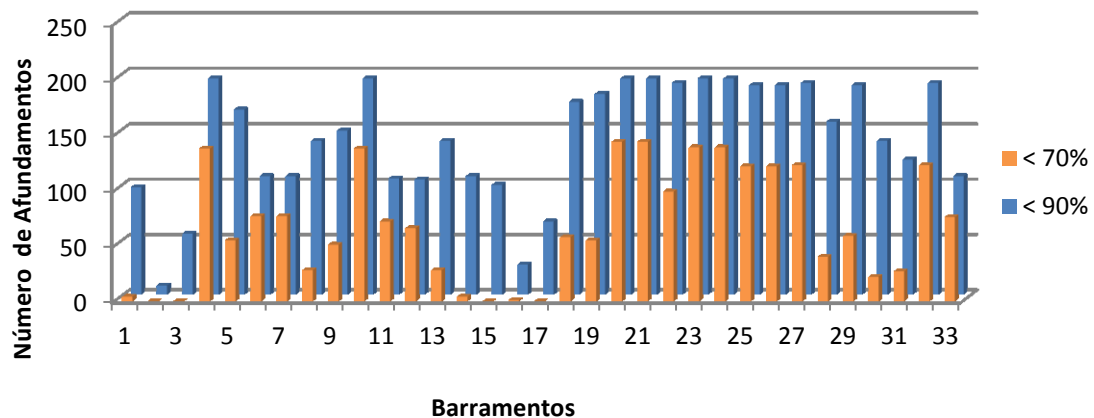


Figura 19 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-terra – impedância de falta igual a 10Ω

4.2.2 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Fase

- **Curtos-Circuitos Fase-Fase - $Z_f=0\ \Omega$**

Os resultados obtidos para o presente caso encontram-se destacados na Tabela 12, enquanto os dados foram sintetizados na Figura 20. Esta última evidencia que os afundamentos com maiores níveis (abaixo de 70%) ocorrem para os barramentos 4, 10, 20, 29 e 32.

Tabela 12 - Falta Fase-Fase – $Z_f=0\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		71	75	18	30	0	0	0	0	0	194
2		30	20	0	0	0	0	0	0	0	50
3		109	29	27	4	0	0	0	0	0	169
4		18	35	53	85	8	0	0	0	0	199
5		42	73	36	21	27	0	0	0	0	199
6		55	14	28	29	24	0	0	0	0	150
7		55	14	28	29	24	0	0	0	0	150
8		73	39	41	8	15	0	0	0	0	176
9		60	77	11	45	4	0	0	0	0	197
10		18	35	53	85	8	0	0	0	0	199
11		25	33	14	41	1	0	0	0	0	114
12		27	39	22	18	6	0	0	0	0	112
13		73	39	41	8	15	0	0	0	0	176
14		51	108	25	8	0	0	0	0	0	192
15		78	85	27	2	0	0	0	0	0	192
16		82	45	11	11	0	0	0	0	0	149
17		101	45	12	4	0	0	0	0	0	162
18		41	67	43	31	17	0	0	0	0	199
19		74	92	27	42	2	0	0	0	0	237
20		7	33	34	121	2	0	0	0	0	197
21		7	33	34	121	2	0	0	0	0	197
22		5	53	61	71	5	0	0	0	0	195
23		16	37	44	95	7	0	0	0	0	199
24		16	37	44	95	7	0	0	0	0	199
25		7	44	64	77	3	0	0	0	0	195
26		7	44	64	77	3	0	0	0	0	195
27		7	46	64	75	3	0	0	0	0	195
28		42	24	95	27	5	0	0	0	0	193
29		7	72	83	29	4	0	0	0	0	195
30		74	42	41	12	8	0	0	0	0	177
31		88	52	39	18	4	0	0	0	0	201
32		7	46	64	75	3	0	0	0	0	195
33		49	14	28	27	24	0	0	0	0	142
Σ falta											5891
Σ total	3547	1422	1541	1276	1421	231	0	0	0	0	9438

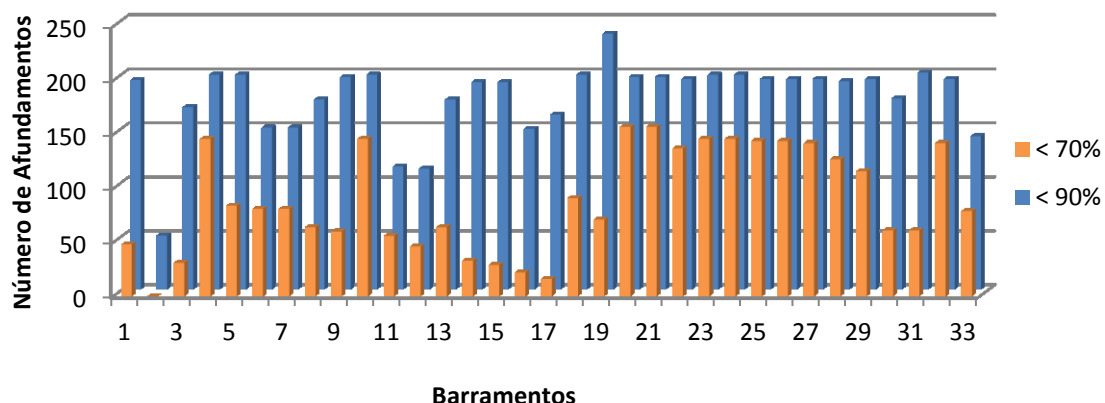


Figura 20 - Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-fase – impedância de falta nula

- **Curtos-Circuitos Fase-Fase - $Z_f=10 \Omega$**

Acrescentando a impedância de falta, os novos níveis de afundamentos de tensão são exibidos na Tabela 13, os quais são sintetizados no gráfico da Figura 21.

Observa-se que, dessa vez, não houve modificações significativas na quantidade de afundamentos, muito embora alguns barramentos tenham se mostrado afetados. Este é o caso dos barramentos 4 e 10, que diminuíram seus montantes de afundamentos críticos. Contudo, em outros barramentos, a exemplo dos 5, 18 e 19, estes se mostraram mais vulneráveis diante desses curtos após a inserção da impedância de falta.

Tabela 13 - Falta Fase-Fase - $Z_f = 10\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		61	74	19	13	27	0	0	0	0	194
2		31	20	0	0	0	0	0	0	0	51
3		110	15	38	9	2	0	0	0	0	174
4		17	31	32	43	45	34	0	0	0	202
5		41	45	53	18	11	31	0	0	0	199
6		56	12	8	35	14	18	8	0	0	151
7		56	12	8	35	14	18	8	0	0	151
8		72	35	36	14	5	1	14	0	0	177
9		54	78	12	21	22	8	2	0	0	197
10		17	31	32	43	45	34	0	0	0	202
11		25	30	9	11	36	3	0	0	0	114
12		26	41	6	19	21	2	0	0	0	115
13		72	35	36	14	5	1	14	0	0	177
14		51	100	25	11	5	0	0	0	0	192
15		70	89	22	11	0	0	0	0	0	192
16		75	59	8	9	7	0	0	0	0	158
17		108	44	12	10	0	0	0	0	0	174
18		38	40	62	17	12	31	0	0	0	200
19		71	76	32	16	13	28	1	0	0	237
20		5	33	17	47	67	28	0	0	0	197
21		5	33	17	47	67	28	0	0	0	197
22		5	46	49	43	38	14	0	0	0	195
23		15	31	26	47	47	34	0	0	0	200
24		15	31	26	47	47	34	0	0	0	200
25		5	44	8	73	59	6	0	0	0	195
26		5	44	8	73	59	6	0	0	0	195
27		5	45	7	70	61	7	0	0	0	195
28		35	24	88	25	14	7	0	0	0	193
29		7	62	57	40	20	9	0	0	0	195
30		58	59	40	6	6	7	5	0	0	181
31		83	51	33	16	9	6	3	0	0	201
32		5	45	7	70	61	7	0	0	0	195
33		50	10	24	19	16	18	6	0	0	143
Σ falta											5939
Σ total	3499	1349	1425	857	972	855	420	61	0	0	9438

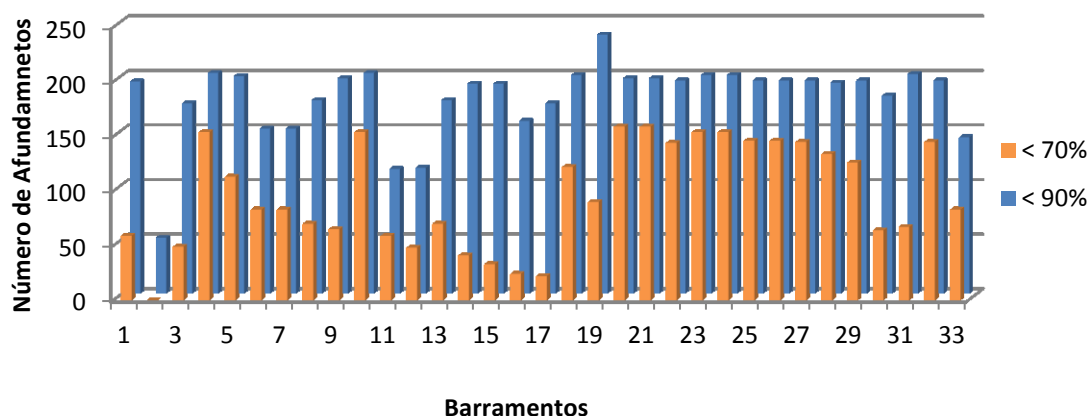


Figura 21 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-fase – impedância de falta igual a 10Ω

4.2.3 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Fase-Fase-Terra

- **Curtos-Circuitos Fase-Fase-Terra – $Z_f=0\Omega$**

Primeiramente, considerou-se uma falta que ocorre entre fases B e C com impedância de falta nula. Assim, como no caso dos curtos-circuitos fase-fase, a fase C foi a focada para a apresentação dos resultados da Tabela 14.

O gráfico da Figura 22 representa as áreas de vulnerabilidade. Nota-se que a ocorrência de tal fenômeno é bastante abrangente. Do ponto de vista de áreas vulneráveis, o barramento 19 foi o mais afetado, ultrapassando o total de 200 afundamentos, contudo, ponderando os valores, esse foi sujeito a um menor número de afundamentos abaixo de 70%. Os resultados evidenciam que os impactos também ocorreram em outros pontos físicos da rede elétrica. Outra observação pode ser feita para as barras 1, 14 e 15, que tiveram baixa incidência de afundamentos severos (abaixo de 70%).

Tabela 14 - Falta Fase-Fase-Terra – $Z_f=0\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		71	75	18	30	0	0	0	0	0	194
2		46	23	0	0	0	0	0	0	0	69
3		109	29	27	4	0	0	0	0	0	169
4		13	35	15	23	36	10	14	16	43	205
5		42	35	61	17	8	8	4	2	26	203
6		61	10	4	2	21	15	15	4	24	156
7		61	10	4	2	21	15	15	4	24	156
8		53	42	23	34	6	3	0	1	15	177
9		57	79	11	5	27	10	5	3	4	201
10		13	35	15	23	36	10	14	16	43	205
11		19	20	0	23	8	7	18	9	12	116
12		27	13	23	10	12	12	0	6	14	117
13		53	42	23	34	6	3	0	1	15	177
14		51	108	25	8	0	0	0	0	0	192
15		78	85	27	2	0	0	0	0	0	192
16		82	45	11	11	0	0	0	0	0	149
17		101	45	12	4	0	0	0	0	0	162
18		39	36	64	17	7	8	5	2	27	205
19		66	55	52	18	4	9	3	20	10	237
20		11	17	28	15	17	31	38	20	28	205
21		11	17	28	15	17	31	38	20	28	205
22		7	2	75	33	18	38	7	7	10	197
23		11	35	16	22	30	16	18	16	41	205
24		11	35	16	22	30	16	18	16	41	205
25		5	40	8	33	37	10	37	12	13	195
26		5	40	8	33	37	10	37	12	13	195
27		3	42	9	36	31	4	40	10	20	195
28		34	19	86	25	12	8	3	2	4	193
29		7	55	49	51	5	14	7	3	4	195
30		55	57	43	6	4	3	5	3	5	181
31		87	45	26	25	7	4	5	2	4	205
32		3	42	9	36	31	4	40	10	20	195
33		54	10	6	4	23	3	13	16	20	149
Σ falta											6002
Σ total	3436	1346	1278	822	623	491	302	399	233	508	9438

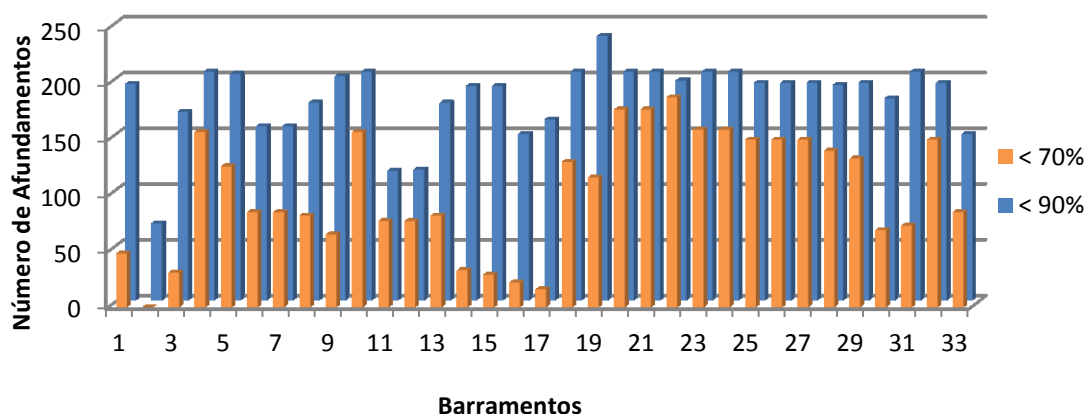


Figura 22 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta fase-fase-terra - impedância de falta nula

- **Curtos-Circuitos Fase-Fase-Terra - $Z_f = 10 \Omega$**

Os resultados para esta nova situação encontram-se indicados na Tabela 15 - Falta Fase-Fase-Terra - $Z_f = 10 \Omega$ e Figura 23. Neste caso, as regiões mais críticas continuaram sendo as compreendidas pelos barramentos 4, 10 e 32 e os de número 20 a 29, (com tensões inferiores a 70%). Outros barramentos, a exemplo do 1, 14 e 15 tiveram altas taxas de ocorrências de afundamentos, porém em menores níveis.

Tabela 15 - Falta Fase-Fase-Terra - $Z_f = 10\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		71	75	18	30	0	0	0	0	0	194
2		28	20	0	0	0	0	0	0	0	48
3		109	29	27	4	0	0	0	0	0	169
4		11	35	36	33	15	39	12	14	5	200
5		41	50	56	15	10	27	0	0	0	199
6		51	13	22	7	4	19	24	6	0	146
7		51	13	22	7	4	19	24	6	0	146
8		71	26	50	8	10	8	1	0	0	174
9		54	80	10	37	10	4	0	0	0	195
10		11	35	36	33	15	39	12	14	5	200
11		28	28	11	9	12	6	2	10	9	115
12		40	25	6	19	3	0	0	13	7	113
13		71	26	50	8	10	8	1	0	0	174
14		51	108	25	8	0	0	0	0	0	192
15		78	85	27	2	0	0	0	0	0	192
16		82	45	11	11	0	0	0	0	0	149
17		101	45	12	4	0	0	0	0	0	162
18		39	50	56	16	10	28	0	0	0	199
19		69	81	33	16	35	0	0	1	0	235
20		6	23	37	23	40	39	18	9	3	198
21		6	23	37	23	40	39	18	9	3	198
22		6	11	88	54	14	11	7	4	0	195
23		7	37	33	24	25	42	13	13	5	199
24		7	37	33	24	25	42	13	13	5	199
25		6	41	51	22	18	32	12	10	3	195
26		6	41	51	22	18	32	12	10	3	195
27		7	41	56	15	12	39	8	11	6	195
28		41	16	95	23	10	8	0	0	0	193
29		7	59	87	17	13	10	2	0	0	195
30		73	39	43	7	14	0	1	0	0	177
31		84	55	37	11	8	5	0	0	0	200
32		7	41	56	15	12	39	8	11	6	195
33		29	18	20	5	4	8	26	13	0	123
Σ falta											5859
Σ total	3579	1349	1351	1232	552	391	543	214	167	60	9438

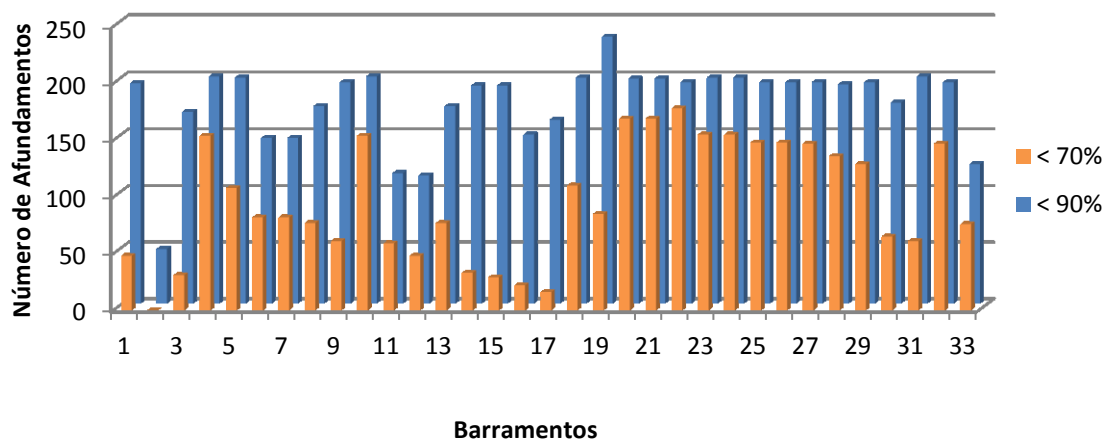


Figura 23 - Síntese dos resultados das VTCD's – falta fase-fase-terra – impedância de falta igual a 10Ω

4.2.4 Resultados obtidos para Curtos-Circuitos Trifásicos

- **Curtos-Circuitos Trifásicos – $Z_f=0\Omega$**

A Tabela 16 mostra os resultados das simulações dos curtos-circuitos deslizantes, os quais produziram as informações contidas na Figura 24. Em consonância com o fato que este é o fenômeno de maior severidade que os demais casos, houve mais de 200 afundamentos dos 286 possíveis em 14 barras. Os barramentos mais sensíveis, a exemplo do 4, 10, 32 e os 20 a 29, apresentaram afundamentos com grandes magnitudes (abaixo de 70%). Ainda, aqueles identificados por 18 e 19 se mostraram impactados.

Tabela 16 - Falta Trifásica – $Z_f=0\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		71	75	18	30	0	0	0	0	0	194
2		49	22	8	16	0	0	0	0	0	95
3		109	29	27	4	0	0	0	0	0	169
4		19	25	16	24	31	21	16	18	43	213
5		25	37	43	43	16	6	9	4	28	211
6		60	10	12	2	27	10	15	3	24	163
7		60	10	12	2	27	10	15	3	24	163
8		77	36	30	33	13	5	2	1	15	212
9		38	58	50	7	5	31	8	5	5	207
10		19	25	16	24	31	21	16	18	43	213
11		22	18	28	7	6	20	3	9	12	125
12		26	29	20	4	18	4	0	10	10	121
13		77	36	30	33	13	5	2	1	15	212
14		51	108	25	8	0	0	0	0	0	192
15		78	85	27	2	0	0	0	0	0	192
16		82	45	11	11	0	0	0	0	0	149
17		101	45	12	4	0	0	0	0	0	162
18		24	32	41	51	15	7	8	5	28	211
19		46	48	64	22	16	7	7	23	8	241
20		17	7	29	15	19	32	43	43	6	211
21		17	7	29	15	19	32	43	43	6	211
22		7	4	46	42	25	44	11	10	10	199
23		19	23	17	23	26	26	18	20	41	213
24		19	23	17	23	26	26	18	20	41	213
25		7	4	42	7	61	13	16	36	13	199
26		7	4	42	7	61	13	16	36	13	199
27		7	6	41	6	61	6	30	22	20	199
28		7	45	13	83	18	13	9	4	5	197
29		3	34	34	48	43	5	14	7	7	195
30		79	39	39	37	4	4	5	4	7	218
31		36	67	37	18	26	7	4	5	5	205
32		7	6	41	6	61	6	30	22	20	199
33		59	8	12	21	10	3	11	23	13	160
Σ falta											6263
Σ total	3175	1325	1050	929	678	678	377	369	395	462	9438

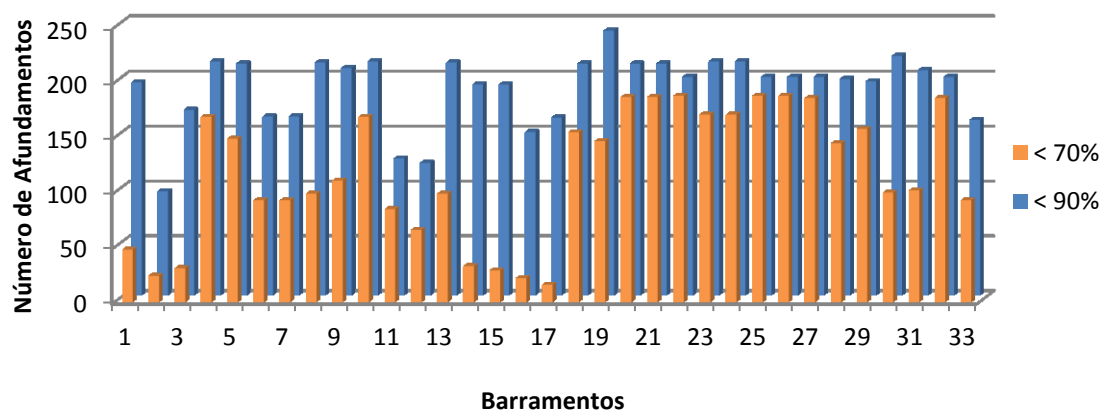


Figura 24 - Síntese dos resultados das VTCD's - falta trifásica - impedância de falta nula

- **Curtos-Circuitos Trifásicos – $Z_f=10\Omega$**

Por fim, foi simulado o curto-circuito deslizante trifásico considerando a impedância de falta, os resultados são apresentados na Tabela 17 e no gráfico da Figura 25. Observa-se que os afundamentos se mostraram bastante acentuados, não obstante o fato que apenas o barramento 19 ultrapassou o total de 200 eventos. Neste caso, os barramentos mais afetados, principalmente para tensões remanescentes (abaixo de 70%) foram aqueles identificados por 4, 10, 32, 20 a 27.

Tabela 17 - Falta Trifásica - $Z_f = 10\Omega$

Barra	Área Isenta	Número de barramentos com tensão remanescente									Σ
		90 - 80 (%)	80 - 70 (%)	70 - 60 (%)	60 - 50 (%)	50 - 40 (%)	40 - 30 (%)	30 - 20 (%)	20 - 10 (%)	10 - 0 (%)	
1		71	75	18	30	0	0	0	0	0	194
2		28	20	0	0	0	0	0	0	0	48
3		109	29	27	4	0	0	0	0	0	169
4		11	35	36	33	15	39	12	14	5	200
5		41	50	56	15	10	27	0	0	0	199
6		51	13	22	7	4	19	24	6	0	146
7		51	13	22	7	4	19	24	6	0	146
8		71	26	50	8	10	8	1	0	0	174
9		54	80	10	37	10	4	0	0	0	195
10		11	35	36	33	15	39	12	14	5	200
11		28	28	11	9	12	6	2	10	9	115
12		40	25	6	19	3	0	0	13	7	113
13		71	26	50	8	10	8	1	0	0	174
14		51	108	25	8	0	0	0	0	0	192
15		78	85	27	2	0	0	0	0	0	192
16		82	45	11	11	0	0	0	0	0	149
17		101	45	12	4	0	0	0	0	0	162
18		39	50	56	16	10	28	0	0	0	199
19		69	81	33	16	35	0	0	1	0	235
20		6	23	37	23	40	39	18	9	3	198
21		6	23	37	23	40	39	18	9	3	198
22		6	11	88	54	14	11	7	4	0	195
23		7	37	33	24	25	42	13	13	5	199
24		7	37	33	24	25	42	13	13	5	199
25		6	41	51	22	18	32	12	10	3	195
26		6	41	51	22	18	32	12	10	3	195
27		7	41	56	15	12	39	8	11	6	195
28		41	16	95	23	10	8	0	0	0	193
29		7	59	87	17	13	10	2	0	0	195
30		73	39	43	7	14	0	1	0	0	177
31		84	55	37	11	8	5	0	0	0	200
32		7	41	56	15	12	39	8	11	6	195
33		29	18	20	5	4	8	26	13	0	123
Σ falta											5859
Σ total	3579	1349	1351	1232	552	391	543	214	167	60	9438

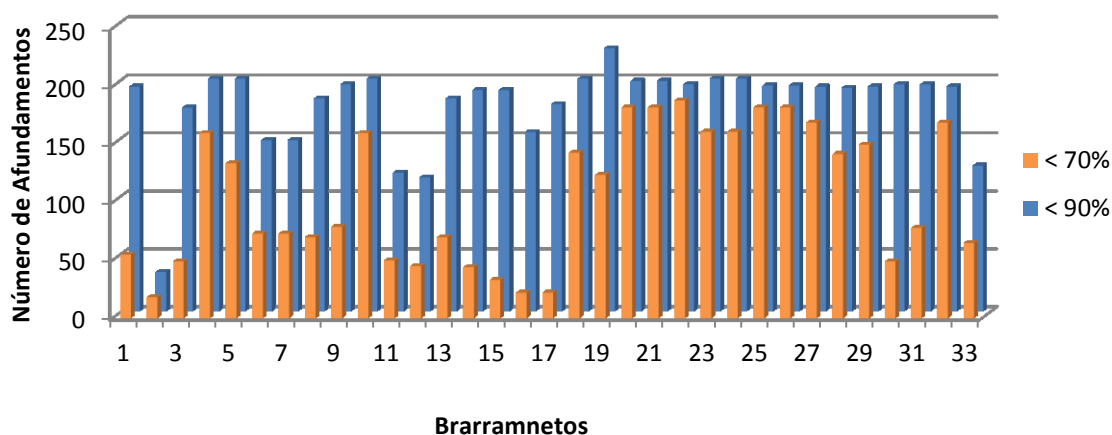


Figura 25 - Síntese dos resultados das VTCD's – falta trifásica – impedância de falta igual a 10Ω

4.3 Análise dos resultados de simulação

Ao final de todas as simulações, foram contabilizados 9438 eventos para cada tipo de falta, os quais foram organizados na forma de uma matriz de armazenamento de dados de “286x33”. Assim, as linhas dessa matriz representam o deslizamento de 10% em 10% de todas as 26 linhas de transmissão presentes no sistema, incluindo os barramentos de saída e destino delas. Por sua vez, as colunas representam as tensões remanescentes em todos os barramentos constituintes do sistema.

Conclui-se que o curto-circuito trifásico franco foi o mais severo, como seria esperado. Neste caso, foi quantificado um total de 6263 afundamentos, o que representa 261 casos a mais do que o curto-circuito fase-fase-terra franco, o qual ficou em segundo em grau de severidade. Fica, pois, evidenciado que, apesar de sua probabilidade de ocorrências serem bem menores do que os demais tipos de faltas, esses compreendem uma maior área de vulnerabilidade, caracterizadas por níveis de tensão de baixa magnitude.

Em contrapartida, os curtos-circuitos fase-terra foram os que causaram menores afundamentos de tensão. A falta com impedância igual a 10Ω

resultou em um total de 4664 eventos, o menor entre todos os tipos de faltas simuladas, enquanto o de impedância nula atingiu o número de 5034 afundamentos.

Em relação aos outros tipos de curto-circuito, foram contabilizados, para os curtos francos e com impedância de falta igual a $10\ \Omega$, um total de 5939 e 5891 afundamentos para faltas fase-fase e 5859 e 6002 para faltas fase-fase-terra.

Concluindo, no que tange a vulnerabilidade, o barramento 19 foi aquele para o qual se constatou o maior número de afundamentos para todos os tipos de falta, exceto para o caso fase-terra. Este experimentou mais de 200 afundamentos, todavia, restringindo as análises para magnitudes de tensão abaixo de 70%, verifica-se um número expressivamente menor de ocorrências. Por outro lado, os barramentos 4, 10, 20, 21 e 32 foram aqueles que evidenciaram maiores patamares para os afundamentos de tensão (inferiores a 70%), configurando assim, áreas bastante vulneráveis à VTCD's.

Em relação ao curto fase-fase-terra, a barra 22 indicou a maior quantidade de afundamentos, com baixos módulos de tensão.

Esses resultados, de um modo global, são sintetizados nos gráficos constituintes das Figuras do Apêndice A.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho de conclusão do curso, inicialmente, foi explanado a importância dos estudos relacionados às VTCD's, uma vez que consiste em um dos fenômenos de QEE que mais afetam os consumidores de energia elétrica. Posteriormente, como foco desse trabalho foi simulado curto-circuito deslizando para um sistema equivalente da região sul do Brasil, no qual foi possível concluir quais são os piores casos de curtos-circuitos, as regiões mais vulneráveis do sistema e os barramentos irão sofrer mais com os afundamentos de tensão.

Desse modo, foram explorados e constatados os grandes impactos atrelados com os fenômenos de curtos-circuitos. Uma vez concluídas quais as áreas mais fragilizadas, certamente, tais informações deverão embasar procedimentos a serem tomados pelas concessionárias de energia, visando adequá-las aos requisitos dos sistemas, nos termos propostos pelas agências reguladoras.

Como trabalhos futuros, sugere-se aprimorar os estudos feitos considerando as cargas, com seus diversos tipos de modelagem, assim como os componentes shunt de barras (banco de capacitores e reatores), de modo a se obter resultados ainda mais confiáveis. Também, simulações no domínio do tempo que permitam uma melhor avaliação quanto ao possível dano em um equipamento, considerando assim, as curvas de sensibilidade descritas no capítulo 2.

6 REFERÊNCIAS

- [1] A. C. Santos, “Uma contribuição ao processo do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas via chaveamento de unidades capacitivas,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- [2] L. E. Kenji, Uma contribuição ao estudo de VTCDs aplicado a equipamentos eletrônicos por inversores ca-cc, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Companies, 2004.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8,” 2017.
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico, Gerenciamento dos indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica, 2016.
- [6] T. V. Menezes, Estratégia para análise de afundamentos de tensão no planejamento do sistema elétrico, Belo Horizonte: Universidade federal de Minas Gerais, 2007.
- [7] G. G. Santos, “Desenvolvimento de um aplicativo computacional para cálculo de curto-circuito e estudos de afundamentos de tensão,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- [8] L. V. Cunha, Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [9] J. W. Resende, Proteção de sistemas elétricos, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- [10] T. C. Oliveira, Desenvolvimento e aplicação de um sistema de software para estudos de afundamentos de tensão, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2004.

- 11] M. H. J. Bollen, "Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1667-1671, 1997.
- [12] T. L. Oliveira, Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de código aberto para estudos de sistemas de potência, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [13] J. W. Resende, Análise de sistemas de energia elétrica, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- [14] G. G. Santos, A. C. Santos e C. E. Tavares, "Detecção de Áreas de Vulnerabilidade a Afundamentos de Tensão Devido a Faltas em Sistemas Elétricos," em VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, Brasil, 2016.
- [15] R. C. Leborgne, Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [16] W. F. Alves, Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistema de potência, Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2007.

APÊNDICE

GRÁFICO DAS ÁREAS QUE FORAM AFETADAS POR AQUELAS QUE MANTIVERAM OS PADRÕES

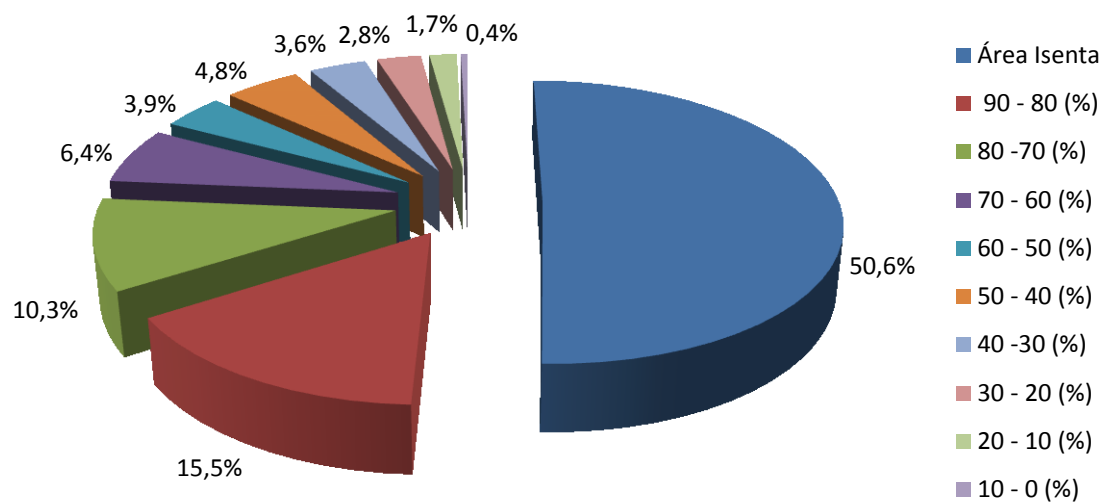


Figura A. 1 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-terra e $Z_f=10\Omega$

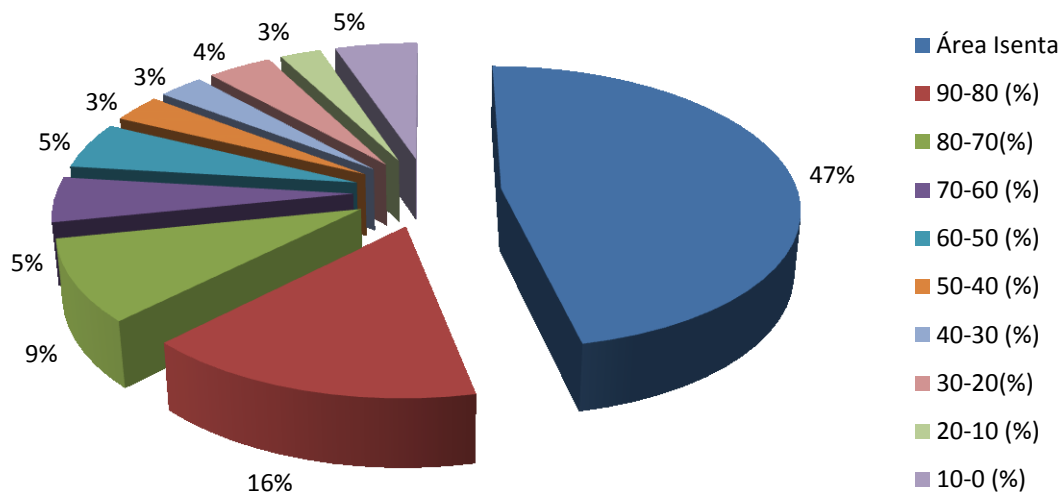


Figura A. 2 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-terra francos

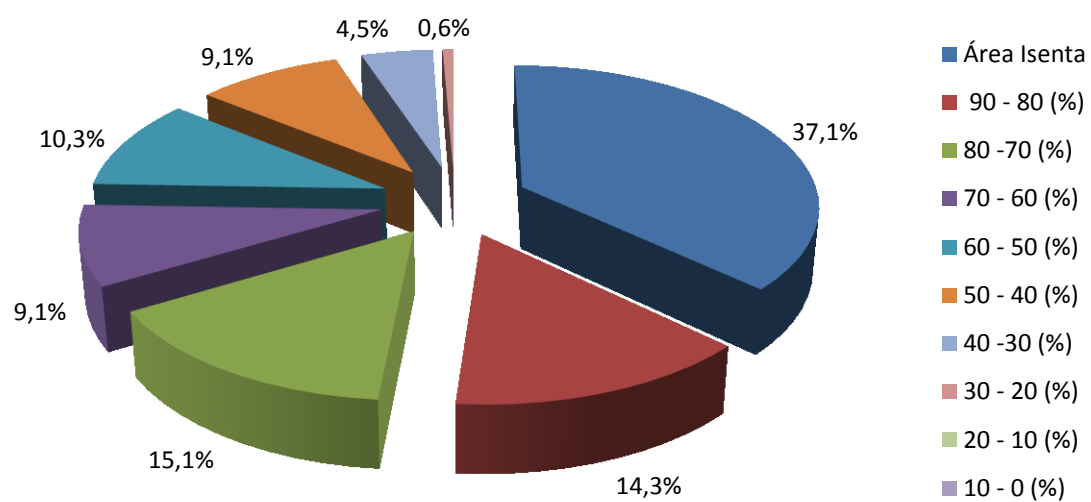


Figura A. 3 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase com $Z_f=10\Omega$

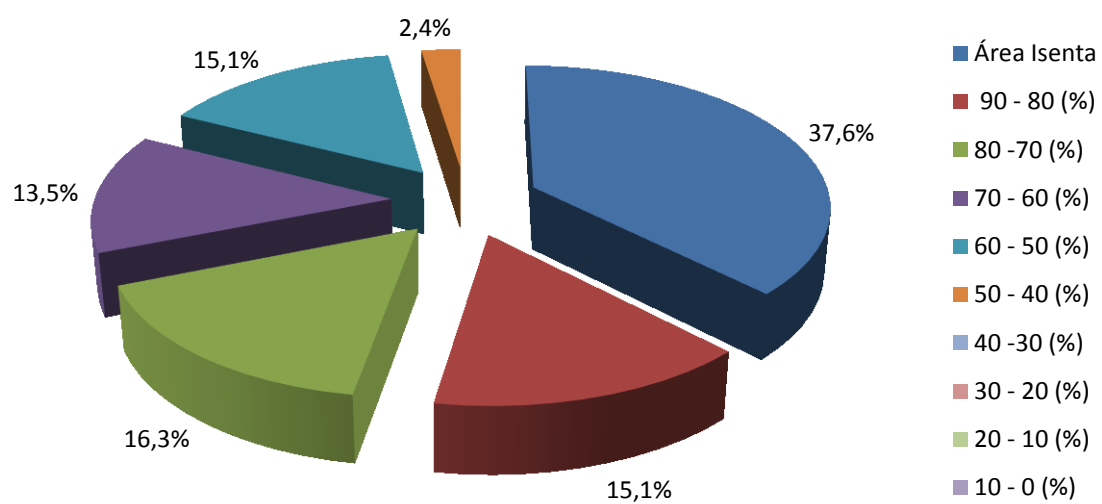


Figura A. 4 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase francos

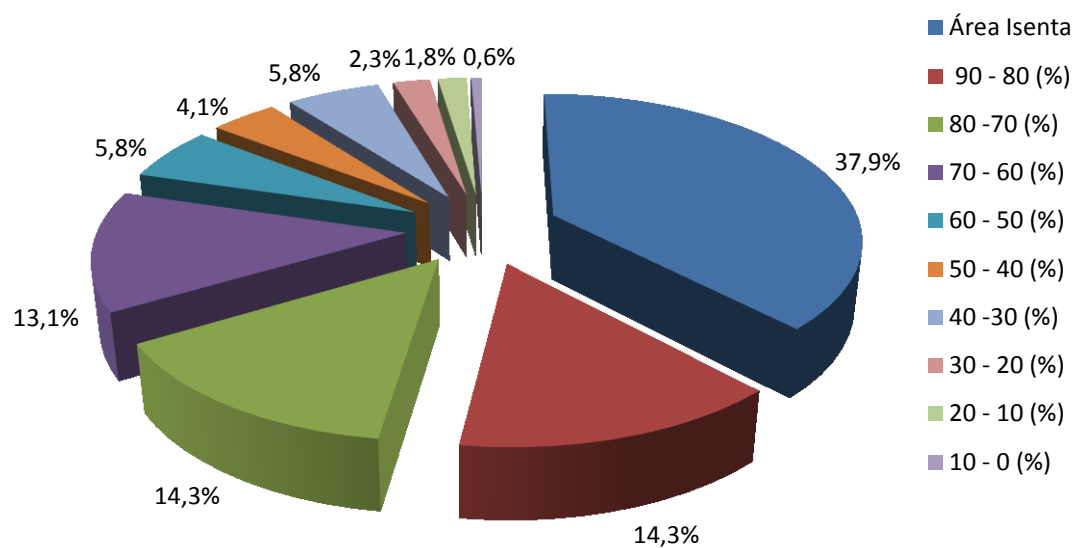


Figura A. 5 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase-terra com $Z_f=10\Omega$

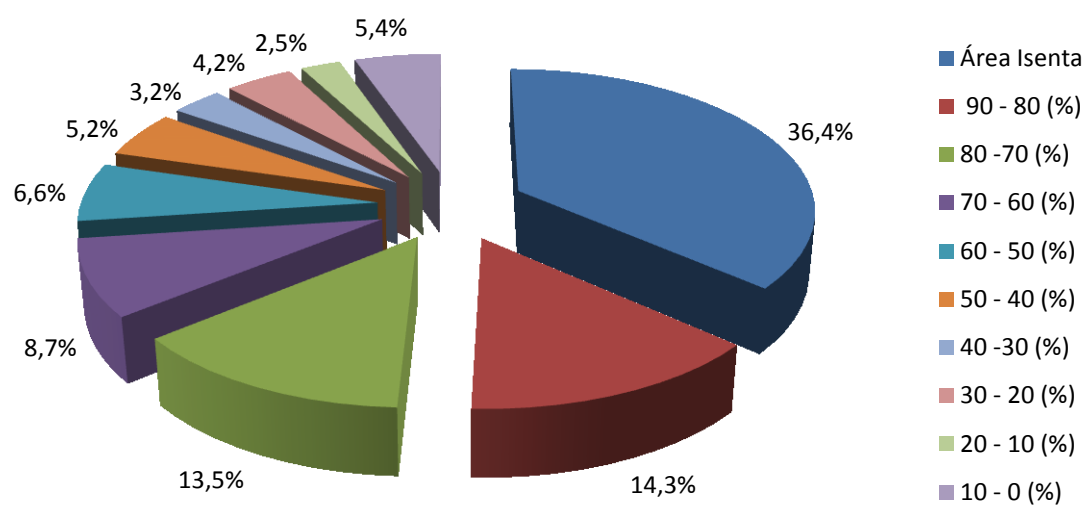


Figura A. 6 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos fase-fase-terra francos

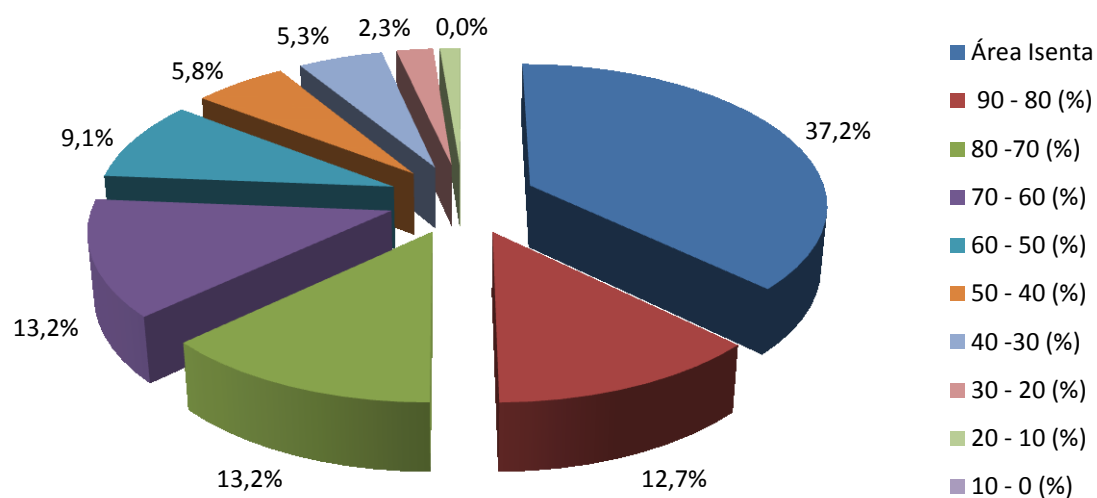


Figura A. 7 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos trifásicos com $Z_f=10\Omega$

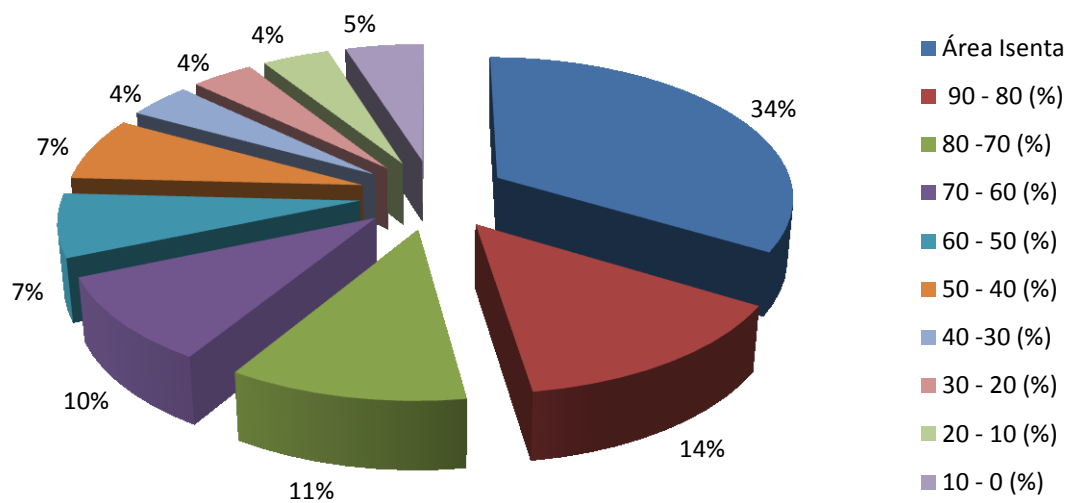


Figura A. 8 - Porcentagem de áreas afetadas pelos curtos-circuitos trifásicos francos