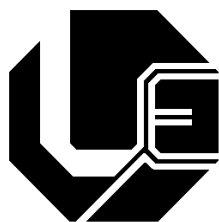


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A DETECÇÃO
DE FALTAS FASE-TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA**

Daniela de Oliveira Farina

Uberlândia

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A DETECÇÃO
DE FALTAS FASE-TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA**

Dissertação apresentada por Daniela Farina à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 16/03/2012.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) – UFU

Antônio César Baleeiro Alves, Dr. – UFG

José Wilson Resende, PhD. – UFU

Milton Itsuo Samesima, PhD. – UFU

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A DETECÇÃO
DE FALTAS FASE-TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA**

DANIELA DE OLIVEIRA FARINA

Dissertação apresentada por Daniela Farina à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira, PhD
Orientador

Alexandre Cardoso, Dr
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, acima de tudo, a todos os jovens engenheiros que precisarem dele. Porque formar-se em Engenharia não é das tarefas a mais fácil, e os sacrifícios, as dificuldades e, conseqüentemente, a vitória fazem parte da vida de cada um de nós que escolheu traçar essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, com certeza, a Deus, que me ilumina em todos os sentidos, inclusive no de tomar as decisões certas na vida.

À minha família, a qual contribuiu, como sempre, com apoio e paciência nos momentos em que mais precisei.

Aos meus amigos, parentes de alma, os quais me entenderam em momentos cruciais.

Ao Prof. José Wilson Resende, pela orientação sempre firme e dedicada, totalmente preocupada com o sucesso desta dissertação.

Ao colega de profissão Paulo César, quem me introduziu ao mundo da programação em ATP, a qual certamente fez diferença em minha carreira profissional.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Cinara, com sua simpatia e seu bom humor cotidianos.

RESUMO

Este trabalho trata da proteção de redes de distribuição de energia elétrica contra faltas de alta impedância (FAI). É proposto uma metodologia para a detecção de FAI através da detecção do grau de desequilíbrio das redes elétricas e da implementação da técnica em religadores e chaves seccionadoras. É desenvolvido um software destinado a calcular os níveis de desequilíbrio de corrente em sistemas elétricos típicos de distribuição de energia. Assim, foi possível estimar os limites de desequilíbrios típicos de cargas desequilibradas. Isso tornou possível escolher os ajustes dos detectores de desequilíbrios para que eles comandem a abertura do sistema apenas quando uma FAI ocorra, e não quando houver um desequilíbrio ordinário. O software foi testado em um alimentador típico. Finalmente, é proposto um esboço de hardware no qual o detector desequilíbrio pode ser implementado.

Palavras-Chave: Faltas de alta impedância, proteção, sistemas de distribuição, detecção de FAI.

ABSTRACT

This work deals with the protection of distribution networks of electricity from high-impedance faults (HIF). It proposed a methodology for the detection of HIF by detecting the degree of imbalance of electrical networks and the implementation of the technique in reclosers and switches. It is developed a software to calculate the levels of current imbalance in typical electrical distribution. Thus it was possible to estimate the limits of imbalances typical of unbalanced loads. This made it possible to choose the settings of the detectors imbalances for them to command the opening of the system only when an actual HIF occurs and not when there is an ordinary imbalance. The software was tested in a typical feeder. Finally, it is proposed an outline of the hardware on which the detector imbalance can be implemented.

Key-words: High impedance faults, protection, distributions systems, HIF detection.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	2
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7

CAPÍTULO II

FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 CONCEITO E CARACTERÍSTICAS.....	10
2.3 CLASSIFICAÇÃO E NATUREZA.....	11
2.3.1 FAI ATIVAS SÉRIE COM CONDUTORES CAÍDOS AO SOLO.....	11
2.3.2 FAI ATIVAS SÉRIE COM CONDUTORES TOCANDO OBJETOS EXTERNOS.....	14
2.3.3 FAI ATIVAS <i>SHUNT</i>	14
2.3.4 FAI PASSIVAS.....	15
2.4 MÉTODOS DE DETECÇÃO.....	15
2.4.1 DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE CORRENTE.....	15
2.4.1.1 <i>AMPLITUDE E ÂNGULO DE FASE DA TERCEIRA HARMÔNICA</i>	15
2.4.1.2 <i>COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NÃO CARACTERÍSTICA DAS HARMÔNICAS</i>	16
2.4.1.3 <i>FASOR DE CORRENTE DA TERCEIRA HARMÔNICA</i>	17
2.4.1.4 <i>ALGORITMO DE ENERGIA</i>	18
2.4.1.5 <i>ALGORITMO DE ALEATORIEDADE</i>	19
2.4.1.6 <i>TAXA DE VARIAÇÃO</i>	19
2.4.1.7 <i>ESPECTRO DE ARCO</i>	19
2.4.1.8 <i>EXTRAÇÃO DE CORRENTE DE FALTA</i>	20
2.4.1.9 <i>PADRÃO DE CENTELHAMENTO</i>	20
2.4.1.10 <i>CARGA</i>	20
2.4.1.11 <i>MONITOR DIGITAL DE ALIMENTADOR</i>	21
2.4.1.12 <i>REDES NEURAIS</i>	21

2.4.1.13	PACOTES WAVELET.....	22
2.4.2	DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE TENSÃO.....	22
2.4.3	DETECÇÃO POR RESPOSTA AO IMPULSO.....	26
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27

CAPÍTULO III

DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA ANÁLISE DO GRAU DE DESEQUILÍBRIO DA CORRENTE.....		29
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
3.2	DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE.....	31
3.3	DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE DESEQUILÍBRIO DE CORRENTES, NO PROGRAMA <i>ATP</i>	37
3.4	UMA PROPOSTA DE <i>HARDWARE</i> PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE PROPOSTO.....	44
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS CAUSADOS POR CARGAS E POR FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....		50
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	50
4.2	APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO.....	51
4.3	CASOS ESTUDADOS.....	53
4.4	RESULTADOS.....	54
4.4.1	CASO A.....	55
4.4.1.1	SUBCASO A-1.....	55
4.4.1.2	SUBCASO A-2.....	57
4.4.1.3	SUBCASO A-3.....	59
4.4.2	CASO B.....	61
4.4.2.1	SUBCASO B-1.....	61
4.4.2.2	SUBCASO B-2.....	65
4.4.2.3	SUBCASO B-3.....	68
4.4.3	CASO C.....	71
4.4.3.1	SUBCASO C-1.....	71
4.4.3.2	SUBCASO C-2.....	74

4.4.3.3	SUBCASO C-3.....	77
4.4.4	CASO D.....	79
4.4.4.1	SUBCASO D-1.....	79
4.4.4.2	SUBCASO D-2	82
4.4.4.3	SUBCASO D-3.....	85
4.4.5	CASO E.....	87
4.4.5.1	SUBCASO E-1.....	88
4.4.5.2	SUBCASO E-2.....	89
4.4.5.3	SUBCASO E-3.....	90
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	93
------------------------	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
--	-----------

APÊNDICES

APÊNDICE A – REPRESENTAÇÕES.....	100
A.1 INTRODUÇÃO.....	100
A.2 ALIMENTADOR-TESTE.....	100
APÊNDICE B – CÁLCULOS.....	104
B.1 INTRODUÇÃO.....	104
B.2 CARGA EM ESTRELA.....	104
B.3 CARGA EM DELTA.....	108
B.4 CAPACITORES.....	112
APÊNDICE C – TABELAS.....	115
C.1 INTRODUÇÃO.....	115
C.2 FALTA FASE-TERRA.....	115
C.3 FALTA FASE-FASE-TERRA.....	125
C.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO (S_{cc}) NOS ÍNDICES DE DESEQUILÍBRIO.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Influência da classe de tensão na corrente de falta com arco.....	13
Figura 2.2 – Função de transferência de um alimentador de um sistema elétrico.....	26
Figura 3.1 – Decomposição dos fasores I_a , I_b e I_c	32
Figura 3.2 – Sistema resultante da soma gráfica das componentes de sequências positiva, negativa e zero.....	33
Figura 3.3 – Estrutura do medidor de desequilíbrio no ambiente do <i>ATP (ATP Draw)</i>	38
Figura 3.4 – Dispositivo TACS <i>Trans Delay</i>	39
Figura 3.5 – Diagrama de blocos do dispositivo <i>Trans Delay</i>	40
Figura 3.6 – Dispositivo TACS <i>RMS meter</i>	40
Figura 3.7 – Diagrama de blocos do dispositivo <i>RMS Meter</i>	41
Figura 3.8 – Dispositivo TACS <i>Coupling to circuit</i>	41
Figura 3.9 – Dispositivo TACS <i>Fortran Statements - General</i>	42
Figura 3.10 – Exemplo de subsistema com ramificações.....	45
Figura 3.11 – Diagrama de blocos do circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases.....	47
Figura 4.1 – Esquematização do sistema escolhido.....	52
Figura 4.2 – Representação do sistema no programa ATP.....	53
Figura 4.3 – Subcaso A-1.....	56
Figura 4.4 – Subcaso A-2.....	58
Figura 4.5 – Subcaso A-3.....	60
Figura 4.6 – Subcaso B-1.....	62
Figura 4.7 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	63
Figura 4.8 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	64

Figura 4.9 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	64
Figura 4.10 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	64
Figura 4.11 – Subcaso B-2.....	66
Figura 4.12 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	67
Figura 4.13 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	67
Figura 4.14 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	67
Figura 4.15 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	68
Figura 4.16 – Subcaso B-3.....	69
Figura 4.17 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	70
Figura 4.18 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	70
Figura 4.19 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	70
Figura 4.20 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	71
Figura 4.21 – Subcaso C-1.....	72
Figura 4.22 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	73
Figura 4.23 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	73
Figura 4.24 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	73
Figura 4.25 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	74
Figura 4.26 – Subcaso C-2.....	75
Figura 4.27 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	75

Figura 4.28 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	76
Figura 4.29 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	76
Figura 4.30 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	76
Figura 4.31 – Subcaso C-3.....	77
Figura 4.32 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	78
Figura 4.33 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	78
Figura 4.34 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	78
Figura 4.35 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	79
Figura 4.36 – Subcaso D-1.....	80
Figura 4.37 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	81
Figura 4.38 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	81
Figura 4.39 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	81
Figura 4.40 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	82
Figura 4.41 – Subcaso D-2.....	82
Figura 4.42 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	83
Figura 4.43 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	84
Figura 4.44 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	84
Figura 4.45 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	84
Figura 4.46 – Subcaso D-3.....	85

Figura 4.47 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).....	86
Figura 4.48 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).....	86
Figura 4.49 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).....	87
Figura 4.50 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).....	87
Figura 4.51 – Subcaso E-1.....	88
Figura 4.52 – Subcaso E-2.....	89
Figura 4.53 – Subcaso E-3.....	90
Figura A.1 – Diagrama unifilar do sistema utilizado para estudo.....	101
Figura B.1 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,0 pu.....	104
Figura B.2 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,1 pu.....	105
Figura B.3 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,2 pu.....	106
Figura B.4 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,3 pu.....	107
Figura B.5 – Transformação Y- Δ	108
Figura B.6 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,0 pu.....	109
Figura B.7 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,1 pu.....	110
Figura B.8 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,2 pu.....	111
Figura B.9 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,3 pu.....	112
Figura B.10 – Localização dos bancos de capacitores no sistema no ATP.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Corrente de FAI em diversos tipos de superfície.....	12
Tabela 2.2 – Componentes de sequências características e não características das harmônicas de corrente presentes numa rede.....	17
Tabela 4.1 - Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	56
Tabela 4.2 - Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	57
Tabela 4.3 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	58
Tabela 4.4 – Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	59
Tabela 4.5 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema, com fase C do banco de capacitores aberta.....	59
Tabela 4.6 – Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	60
Tabela 4.7 - Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema, com fase A do banco de capacitores aberta.....	61
Tabela 4.8 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	88
Tabela 4.9 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	90
Tabela 4.10 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.....	91
Tabela A.1 – Dados de nós do NEO01N4.....	102
Tabela A.2 – Dados de trechos do NEO01N4.....	103
Tabela C.1 – Resultados tabelados para o Subcaso B-1.....	116
Tabela C.2 – Resultados tabelados para o Subcaso B-2.....	117
Tabela C.3 – Resultados tabelados para o Subcaso B-3.....	118
Tabela C.4 – Resultados tabelados para o Subcaso C-1.....	119
Tabela C.5 – Resultados tabelados para o Subcaso C-2.....	120
Tabela C.6 – Resultados tabelados para o Subcaso C-3.....	121
Tabela C.7 – Resultados tabelados para o Subcaso D-1.....	122
Tabela C.8 – Resultados tabelados para o Subcaso D-2.....	123
Tabela C.9 – Resultados tabelados para o Subcaso D-3.....	124

Tabela C.10 – Resultados tabelados para o Subcaso B-1.....	126
Tabela C.11 – Resultados tabelados para o Subcaso B-2.....	127
Tabela C.12 – Resultados tabelados para o Subcaso B-3.....	129
Tabela C.13 – Resultados tabelados para o Subcaso C-1.....	130
Tabela C.14 – Resultados tabelados para o Subcaso C-2.....	131
Tabela C.15 – Resultados tabelados para o Subcaso C-3.....	133
Tabela C.16 – Resultados tabelados para o Subcaso D-1.....	134
Tabela C.17 – Resultados tabelados para o Subcaso D-2.....	136
Tabela C.18 – Resultados tabelados para o Subcaso D-3.....	137
Tabela C.19 – Resultados tabelados para o Subcaso E-1.....	137
Tabela C.20 – Resultados tabelados para o Subcaso E-2.....	138
Tabela C.21 – Resultados tabelados para o Subcaso E-3.....	139
Tabela C.22 – Influência do nível de curto do sistema nos índices de desequilíbrio (Subcaso D-2 utilizado).....	140

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As faltas de alta impedância (FAI) são definidas na literatura como aquelas que geram níveis de corrente insuficientes para sensibilizar os equipamentos convencionais de proteção de sobrecorrente.

Dentro do contexto das FAI, encontram-se vários subtipos, em superfícies variadas. Por exemplo, o condutor pode romper e entrar em contato com superfícies como concreto, grama, areia e asfalto. Ele também pode ficar à deriva, pendurado, tendo como meio dielétrico o ar.

No caso de redes de distribuição aéreas convencionais, as FAI ainda podem causar acidentes graves com pessoas e animais, ou ainda provocar incêndios (por causa do fenômeno de arco-voltaico, segundo o que consta em [1]), principalmente nas situações que envolvem rompimento e posterior queda de condutores energizados de circuitos com altos níveis de tensão. O problema das FAI se associa mais com esse aspecto da segurança populacional do que com a proteção do sistema elétrico, já que, via de regra, nas FAI os valores das correntes são menores do que os nominais.

Assim, segundo [2], [3] e vários outros estudos a respeito, existem dois pontos aparentemente controversos que precisam ser ressaltados: a segurança do ser humano, de um lado, e a eficiência do sistema elétrico, de outro. Geralmente, quando se ganha muito em segurança, perde-se em eficiência, uma vez que a segurança máxima requer que todos os eventos de falta ou, inclusive, parecidos, façam com que o sistema de suprimento seja interrompido para determinado número de usuários, a depender do local do defeito. Por outro lado, a eficiência máxima já requer a possibilidade da continuidade do fornecimento do serviço de energia elétrica, acima de qualquer coisa. A presença desse dilema influencia muito na escolha do método de detecção das faltas de alta impedância. Ora, nenhum usuário deseja a interrupção do fornecimento de um serviço essencial, como é o fornecimento de energia elétrica, assim como nenhum está disposto a correr riscos de vida. Essa é uma relação importante que ganha relevância nos dias de hoje.

Porém, detectar com precisão é algo que ainda não aconteceu e que, segundo [4], constitui um cenário que precisará ser bastante estudado para ser desvendado. Estima-se que, segundo [5], os trabalhos desenvolvidos até hoje consigam cobrir a maioria (e não a totalidade) dos casos de FAI, o que significa que estudos ainda são demandados na área em questão. É com esse intuito, o de contribuir para o aumento da taxa de detecção desse tipo de falta, que a presente dissertação vem se apresentar.

1.2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Ao longo dos anos, várias técnicas vêm sendo estudadas e testadas na detecção de FAI. Algumas, até utilizadas de fato em sistemas de distribuição. Dentre elas, algumas merecem ser ressaltadas, tais como as Redes Neurais, as Séries Wavelet e a Análise por Desequilíbrio. Um estudo em [6] dividiu os métodos de detecção em três grupos, conforme a grandeza monitorada: corrente, tensão ou tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador. Reconhecendo a diversidade de propostas apresentadas

no assunto, far-se-á, a partir de agora, um breve resumo de várias das técnicas já estudadas e/ou aplicadas até os dias de hoje.

A abordagem através de Redes Neurais possui grande potencial de ser a estratégia mais efetiva futuramente para detecção de FAI, assim como é atualmente para as áreas de comunicação e processamento de sinais. Uma técnica otimizada que permite a uma rede neural “aprender” regras para resolver um problema através do processamento de uma série de exemplos é realmente uma das descobertas mais espetaculares dos últimos tempos. No entanto, segundo [4], uma grande quantidade de pesquisas ainda precisa ser realizada. Em [7], a rede neural é treinada usando a Caixa de Ferramentas de Redes Neurais do Matlab (*Matlab Neural Network Tool Box*) e o algoritmo de retro-propagação com uma camada escondida e 15 neurônios. Funções de ativação sigmoide-logarítmicas são frequentemente utilizadas nas camadas de um neurônio. Daí tem-se que a metodologia não é das mais simples. Pelo contrário, envolve formulação prévia de regras, profundo e detalhado estudo *a priori* do sistema, enfim, uma série de pormenorizações.

A técnica baseada na transformada *Wavelet* foi utilizada em uma série de trabalhos, dentre os quais [8], [9], [10] e [11]. O primeiro analisa os sinais do arco de corrente, decompondo-os em pacotes *Wavelet*, através da Transformada *Wavelet*. Seis diferentes superfícies (areia, asfalto, gramado, cascalho, concreto e solo) foram usadas em testes de laboratório, sendo elas secas e molhadas. Portanto, um total de doze sinais de arcos de corrente foram obtidos e decompostos nesses pacotes. Para cada sinal, dezesseis coeficientes de nós foram obtidos e, posteriormente, foram reconstruídos individualmente. Essa decomposição de sinais em sub-bandas de frequência permite que o fenômeno de arco relacionado a FAI seja discriminado.

O último trabalho supracitado [11] introduz, além da técnica *Wavelet* analisada no parágrafo anterior, o Sistema *Fuzzy* de Inferência. Ele se utiliza da Transformada *Wavelet* para extrair e selecionar primeiramente os dados, posteriormente usa um sistema *Fuzzy* de Inferência para classificar a falta e por último se utiliza de um algoritmo genético para efetuar as devidas funções de ajuste. Tal estudo, considerando o grupo de transitórios aplicados ao sistema, chegou a uma taxa de sucesso de 95%, identificando erroneamente como falta apenas um vetor de dados (de um total de sessenta). Nessa mesma área (da tecnologia *Fuzzy*), [12] demonstra que as tensões de

neutro residuais podem trazer seletividade ao sistema de detecção de FAI, surgindo elas do desequilíbrio na admitância do alimentador, algo inerente aos eventos de FAI. Assim, com o Sistema *Fuzzy*, foi possível aumentar a probabilidade mínima de detecção de 70 para 85%, porém, com um aumento consecutivo da probabilidade máxima de falsa detecção de 15 para 25%, o que representa pequena desvantagem ao método proposto.

Em [5] e [13] obtêm-se elementos que serão familiares durante toda a discussão da presente dissertação, pois estes tratam justamente do método de detecção de FAI através de desequilíbrio de corrente. Em [5], os autores salientaram que o desequilíbrio natural de um sistema pode ser um fator limitante à proteção baseada nessa metodologia. No entanto, encontraram resultados satisfatórios que serão comentados a seguir. Um dos relés testados, o qual possui uma parametrização opcional baseada na relação I_2/I_1 , apresentou relação abaixo de 10% para I_2/I_1 em relação a 97% dos pontos medidos. Assim, concluiu-se perfeitamente possível a distinção entre as FAI e os curtos-circuitos para terra, os quais apresentaram relação I_2/I_1 tendente a 50%. Em [13], a relação I_0/I_1 é usada, estendendo significativamente a faixa de detecção das faltas ora estudadas.

Muitos dos estudos basearam-se na detecção através da forma de onda, dentre eles [14], [15], [16] e [17] (e também em [10], conforme já citado anteriormente). Em [16], os autores provam que, além da análise da magnitude e fase da terceira harmônica de corrente, a taxa entre harmônicas pares e ímpares presentes nas ondas dessa variável pode fazer a diferença no progresso da detecção das FAI. São analisadas, nesse estudo, cargas que, em aspectos harmônicos, imitam o comportamento de FAI à terra. Como exemplo dessas cargas, podem ser citados os computadores pessoais e as lâmpadas fluorescentes. O trabalho [16] se utiliza das Transformadas de Fourier para implementar a metodologia ora descrita. Em [17], além de se encontrar a relação entre as correntes, as tensões fase-terra do sistema e as diferentes superfícies que ocasionam FAI, propõe-se um método de superposição, o qual consiste em somar correntes de falta em um alimentador que experimenta FAI às correntes de carga de um alimentador em estado normal de operação. Após isso, novamente a metodologia baseada nas formas de onda é utilizada para testar dispositivos de detecção de faltas desse tipo.

Uma metodologia diferente das já apresentadas se encontra em [18]. Os autores fazem uso de um método que tem por objetivo medir o período da onda de corrente. Este método consegue distinguir FAI com condutor caído ao chão dos dois lados do sistema: lado carga e lado fonte. Ainda pode ser usado em paralelo com o sistema de proteção convencional, agregando segurança à rede de distribuição protegida.

Portanto, após a breve contextualização do tema, pode-se inferir, conforme [19], que a dificuldade não está na construção de um dispositivo de detecção de FAI, uma vez que inúmeras propostas existem, já foram testadas e comprovadas. O desafio gira em torno da construção de um dispositivo que detecte seguramente todos os distúrbios relacionados às FAI, distinguindo-os ainda, daqueles distúrbios diferentes dela. Enfim, um dispositivo que seja, baseado em [3], consecutivamente seguro e sensível. E é sabido que, até os dias atuais e baseado também em [20], nenhuma das tecnologias existentes é capaz de cobrir 100% das FAI. Esse é um fato importante que deverá ser levado em consideração durante todo o desenvolvimento desta dissertação.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Partindo-se do fato de que acidentes continuam a ocorrer nas concessionárias de distribuição de energia elétrica, o objetivo primeiro deste trabalho, assim como de qualquer outro relacionado aos métodos de detecção de FAI, é contribuir para a mitigação, ainda que parcial, desses problemas. Em relação a esse assunto, esta dissertação acaba contribuindo, portanto, com a redução dos riscos causados por esse tipo de falta, uma vez que propõe um método que detecta razoavelmente bem as FAI, diferenciando-as de outros eventos da rede elétrica, e assim proporcionando a interrupção da energia no local e a retirada do risco para a população.

Além de aumentar as chances de proteção contra FAI, a proposta da presente dissertação tem como vantagem o fato de apresentar um método relativamente fácil, possível de ser implementado, inclusive, em dispositivos menos robustos. Dessa forma,

contribui-se para o estudo dessas faltas através da apresentação de um método simples, frente às Redes Neurais ou às Séries *Wavelet*, por exemplo, facilitando a avaliação da questão das FAI.

Com a vantagem da simplicidade, o método proposto nesta dissertação ainda contribui para uma maior abrangência dos sistemas de distribuição, devido à possibilidade de sua implementação em dispositivos com tecnologia muito mais simples que a de um relé, por exemplo. Dentre eles, pode-se citar os religadores e as chaves seccionadoras. Assim, como esses dispositivos estão presentes em número bem maior na rede elétrica, o monitoramento se apoia em maior número de pontos do que se realizado somente por relés.

A simplicidade do método possibilita a viabilidade financeira de sua implementação. Se os dispositivos são menos robustos, então o *hardware* possui menor custo. Se o método matemático é mais simples, logo o *software* ganha em termos de preço. Assim, apresentando-se como uma proposta com custo mais baixo frente às outras e tão eficaz quanto, as vantagens de sua utilização tornam-se bastante atraentes. Dessa forma, vale ressaltar essa importante contribuição desta dissertação.

Presumindo-se, conseqüentemente, que a proposta será implementada em mais dispositivos, então mais pontos da rede elétrica poderão ser monitorados. Sendo assim, a relação “segurança do ser humano \times eficiência do sistema elétrico” é beneficiada, pois trechos menores serão desligados da fonte de energia quando da ocorrência de uma eventual falta de alta impedância. Assim, estará priorizada a segurança da população e, também, a continuidade do serviço de energia elétrica para uma quantidade maior de consumidores. Resumindo, então, por último, porém não menos importante, está a confiabilidade da proposta apresentada por esta dissertação.

Portanto, em síntese, pode-se enumerar pelo menos cinco vantagens da presente proposta:

- 1) Redução de riscos causados pela ocorrência das faltas ora estudadas;
- 2) Técnica de detecção relativamente simples;
- 3) Maior abrangência do monitoramento da rede para esse determinado tipo de falta;
- 4) Custo financeiro relativamente mais baixo;

- 5) Ganho em segurança populacional com manutenção dos níveis mínimos de eficiência do sistema de energia requeridos pelos usuários do mesmo.

1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, nas seguintes unidades:

CAPÍTULO II – FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Este capítulo se destina a introduzir o leitor no universo das FAI, definindo-as e explicando quais são as características, a classificação e a natureza dessas faltas, descrevendo também os métodos de detecção estudados até hoje na comunidade científica. Portanto, destina-se a mostrar a importância do tema, tanto para a segurança dos seres humanos quanto para a confiabilidade do sistema elétrico de proteção.

CAPÍTULO III – DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA ANÁLISE DO GRAU DE DESEQUILÍBRIO DA CORRENTE

Esta seção visa justificar a metodologia escolhida para a detecção das FAI no que tange às vantagens em segurança e confiabilidade. Ela também propõe o desenvolvimento de um *software* que simula um sistema elétrico, calculando seus índices de desequilíbrio e fornecendo-os para um prévio estudo. Como será visto, esse prévio estudo será importante para a determinação, em cada subsistema a ser protegido, do melhor limiar de detecção. Este capítulo também proporciona uma alternativa em *hardware*, apresentando um circuito de “aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases”, sendo essa uma das partes mais importantes de um eventual detector de FAI a ser construído.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS CAUSADOS POR CARGAS E POR FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Esta etapa está centrada na análise das simulações propriamente ditas. Utilizou-se um exemplo de sistema real, e nele foram calculados, para várias condições ideais ou de falta, os parâmetros que interessam a essa dissertação, quais sejam os índices de desequilíbrio de corrente. Assim será possível um maior conhecimento do limiar de detecção a ser aplicado para esse subsistema em especial, sem falar que poderá ser constatada a real eficiência do método proposto.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Este capítulo objetiva sintetizar as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais a respeito dos pontos focados ao longo da pesquisa, ressaltando as vantagens da proposta e as direções futuras para eventuais complementações necessárias.

CAPÍTULO II

FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

2.1 – INTRODUÇÃO

As FAI (FAI) ocorrem quando um condutor primário energizado entra em contato com um objeto semi-isolado. Em geral, esse tipo de falta é associado a um arco voltaico no local de contato com a superfície. As FAI são comparáveis à impedância de carga, e conseqüentemente possuem corrente de falta muito baixa (muitas vezes, elas podem até gerar correntes cujos valores estejam bem abaixo da corrente de carga, o que torna impossível a detecção a esse tipo de proteção). As FAI podem não representar perigo iminente aos equipamentos do sistema elétrico, contudo, elas são uma grande ameaça para seres humanos e propriedades, já que em muitos casos os condutores primários da rede se rompem e permanecem energizados.

2.2 – CONCEITO E CARACTERÍSTICAS

Vários são os conceitos encontrados na literatura técnica a respeito do assunto, a saber:

- “Uma FAI ocorre quando um condutor de um circuito primário entra em contato indesejável restringindo o fluxo da corrente na detecção dos equipamentos de proteção convencionais” [21];
- “Uma FAI pode ser definida como um evento anormal num alimentador primário de distribuição o qual não pode ser facilmente detectado por dispositivos de proteção modernos” [4];
- “Uma FAI ocorre quando um condutor primário energizado entra em contato com um objeto semi-isolado. Em geral, esse tipo de falta é associada a um arco voltaico no ponto de contato. As FAI são comparáveis à impedância da carga, e conseqüentemente possuem corrente de falta muito baixa” [22];
- “FAI são geralmente definidas como o contato elétrico indesejado de um condutor numa superfície não-condutora, o qual restringe a corrente de falta abaixo do nível detectável por relés convencionais” [23].

Pode-se enumerar algumas causas para o baixo nível de corrente característico desse tipo de falta, dentre elas a alta impedância do caminho de retorno da corrente de falta e a ocorrência da falta em localização eletricamente remota em relação à fonte, podendo ainda existir a combinação dessas duas causas, ou ainda a existência de faltas passivas, as quais serão estudadas na seção a seguir.

2.3 – CLASSIFICAÇÃO E NATUREZA

As FAI podem ser essencialmente classificadas em dois tipos: faltas ativas e faltas passivas.

As primeiras (faltas ativas) são aquelas nas quais ocorre a aproximação de um condutor energizado com um objeto qualquer, formando-se um arco elétrico entre eles. Essa categoria ainda pode ser dividida em faltas série (quando há a interrupção da corrente de carga, devido ao rompimento do condutor) ou faltas *shunt* (quando há o contato do condutor, sem rompimento do mesmo).

As últimas (faltas passivas) são aquelas nas quais ocorre o rompimento do condutor, sem, no entanto, contato com nenhum outro material próximo, interrompendo o fornecimento de corrente a partir do ponto onde ocorreu a falta.

Uma classificação detalhada em seus pormenores pode ser feita segundo a natureza de cada tipo de falta, conforme descrito a seguir.

2.3.1 – FAI ATIVAS SÉRIE COM CONDUTORES CAÍDOS AO SOLO

Nesse tipo de falta há a interrupção da corrente de carga a partir do local do defeito, onde o condutor se rompeu.

Primeiramente, tem-se que a magnitude da corrente de falta é bastante influenciada pelas condições do local, ou seja, depende do tipo e umidade do solo, da presença de materiais no mesmo, etc. Em [24] mostrou-se que, num determinado nível de tensão, as correntes de faltas para diversos condutores caídos ao solo variam conforme se altera a superfície de contato. Os dados desse estudo são transcritos na tabela 2.1.

Em segundo lugar, faz-se necessário analisar as características do arco produzido nesse tipo de falta, principalmente porque esse é a linha de investigação escolhida em

vários estudos científicos para a análise e detecção das FAI. Assim, a natureza da corrente que produz o arco na falta de alta impedância com condutor rompido caído ao solo é de comportamento aleatório quanto à sua magnitude e forma de onda. Esse comportamento é ditado basicamente pelas características do solo e a dinâmica do condutor na própria falta, segundo [25].

Tipo de Superfície	Corrente [A]
Asfalto seco ou areia	0
Areia molhada	15
Relva seca	20
Grama seca	25
Relva molhada	40
Grama molhada	50
Concreto reforçado	75

Tabela 2.1 – Corrente de FAI em diversos tipos de superfície (adaptada de [24]).

Em terceiro lugar, está o efeito da classe de tensão na corrente de falta com arco. Em [24], experiências mostraram que a maioria das FAI ocorre em tensões de distribuição de classe 15 kV. O problema de detecção se torna mais complicado à medida que a classe de tensão se torna inferior a esta, e menos complicado quando a classe de tensão é maior que essa. Ainda segundo [24], acredita-se que numa classe de tensão mais baixa, a corrente poderá fluir apenas durante um pequeno percentual do meio ciclo da tensão, restringindo, portanto, o nível da corrente (por isso se torna mais complicado o problema da detecção). Já numa classe de tensão mais alta, o contrário ocorre, permitindo uma corrente total mais alta. Essa explicação, conforme mostra a figura 2.1 (adaptada de [24]), não pode servir para todos os casos, mas ajuda a descrever, ao menos, um padrão geral. Atenção para o fato de que essa figura é apenas uma adaptação, não representando, portanto, as reais forma e fase das ondas em questão.

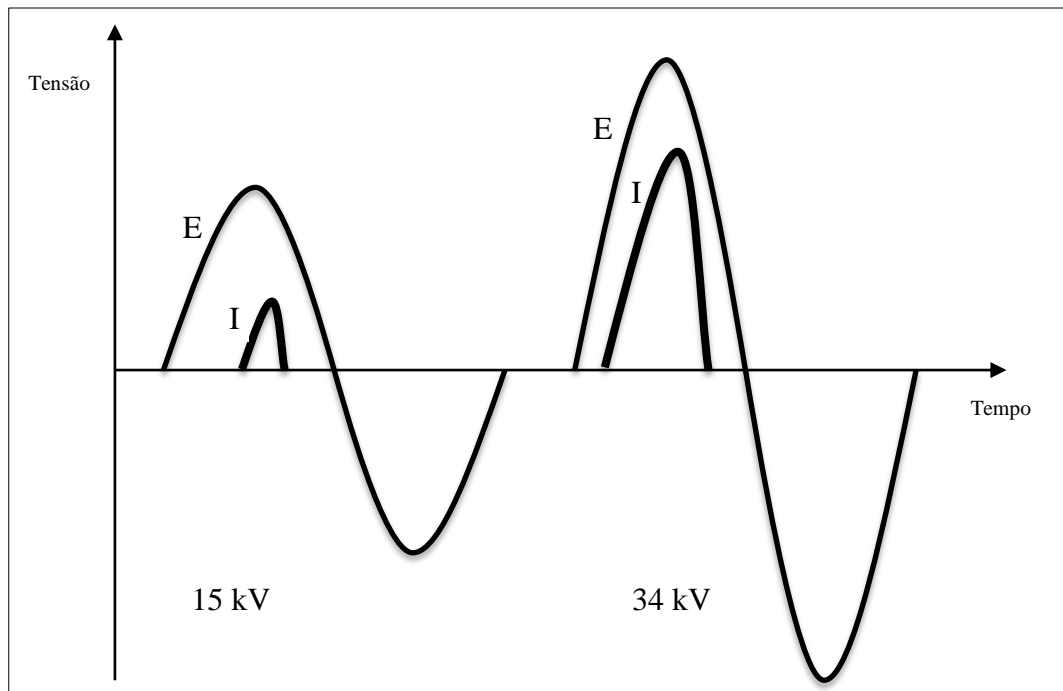


Figura 2.1 – Influência da classe de tensão na corrente de falta com arco (adaptada de [24]).

Em quarto lugar, podem ser descritas as características no domínio do tempo e da frequência. Geralmente, pode-se observar um comportamento altamente aleatório da corrente, quando esta é associada a uma falta de alta impedância ativa série, com condutor caído ao solo. Observam-se também componentes harmônicas de ordem ímpar significativas. Em alguns casos, há ainda atividade substancial em frequências não-harmônicas e em altas frequências. No domínio do tempo, uma falta com arco pode ser modelada como um trem de pulsos periódicos. Embora não seja um modelo preciso devido ao comportamento altamente aleatório da corrente de arco, pelo menos esclarece algo relativamente ao domínio da frequência.

Por último, e o mais importante para o foco desta dissertação, têm-se as características de desequilíbrio de corrente. As faltas ativas série e as passivas com rompimento de condutor, tocando ou não objetos externos ou o solo, produzem desequilíbrios de corrente à montante do ponto de rompimento, os quais podem ser usados para a indicação desse tipo de falta de alta impedância, conforme já foi implementado em [5], na função *“broken conductor”* de um relé da fabricante ALSTOM.

Esta dissertação analisa vários tipos de faltas ativas e passivas, com rompimento de condutores, sob diversas condições. Mais adiante (Capítulo IV) serão mostrados os resultados e a importante contribuição deste estudo para a detecção das faltas fase-terra de alta impedância.

2.3.2 – FAI ATIVAS SÉRIE COM CONDUTORES TOCANDO OBJETOS EXTERNOS

Nesse tipo de falta, assim como no anterior, há o rompimento do condutor. Porém, neste caso, ele não toca o solo, e sim objetos externos, como, por exemplo, árvores, sendo este o exemplo mais comum nas redes de distribuição.

Também pode haver geração de arco elétrico, a depender das condições da falta, sendo que a magnitude da corrente (que fará surgir o mesmo) terá relação com a impedância do objeto próximo ao condutor energizado. Além disso, esse tipo de falta também provocará desequilíbrios de corrente, os quais serão analisados em capítulo posterior.

O risco aqui presente é o mesmo que da situação anterior. Uma pessoa pode ser eletrocutada devido à tensão de toque, principalmente em postes de concreto com ferragens expostas.

2.3.3 – FAI ATIVAS *SHUNT*

Nesse tipo de falta não há o rompimento do condutor energizado, sendo que ele apenas toca ou se aproxima de algum objeto de alta impedância. Não há, portanto, a interrupção da corrente de carga na fase atingida pela falta. Como exemplos típicos, podem ser citados dois casos: o caso de isoladores com defeito e o caso da quebra parcial de postes.

A magnitude da corrente nesse tipo de falta dependerá da impedância do objeto externo. Poderá haver geração de arco elétrico. Também aqui haverá desequilíbrio de corrente significativo para detecção, porém este tipo de falta não será objeto do estudo desta dissertação.

2.3.4 – FAI PASSIVAS

Nesse tipo de falta haverá a interrupção da corrente de carga em uma ou mais fases, uma vez que ocorreu o rompimento do cabo, mas este não tocou nenhum objeto externo, nem mesmo o solo, ficando suspenso. Assemelha-se esse caso ao de uma abertura monopolar indesejada, a qual também ocasionará uma interrupção indevida no fornecimento de energia. Este caso em especial será estudado por essa dissertação, tanto no que diz respeito às aberturas de uma fase apenas (aberturas monopolares), quanto às de duas fases consecutivas (aberturas bipolares). Assim, haverá desequilíbrio de corrente à montante do ponto onde ocorreu o defeito e não haverá arco elétrico de longa duração, uma vez que a corrente deixa de circular.

2.4 – MÉTODOS DE DETECÇÃO

Vários métodos de detecção de FAI, baseados na grandeza monitorada, têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Eles podem monitorar a corrente, a tensão ou o tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador.

A seguir, será caracterizado cada um desses métodos, salientando-se seus problemas, suas vantagens e sua abrangência.

2.4.1 – DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE CORRENTE

Os métodos aqui relacionados são inúmeros, e por tratar-se de tantos, serão subdivididos, de forma a caracterizar qual aspecto da corrente é monitorado a fim de se detectar as FAI.

2.4.1.1 – Amplitude e Ângulo de Fase da Terceira Harmônica

Verificou-se em [24] que a corrente de arco elétrico produzida pelas FAI possuía considerável conteúdo de 3ª harmônica, sendo que o súbito deslocamento de ângulo de

fase dessa componente da corrente, de uma das fases em relação às outras duas, poderia indicar a ocorrência do defeito.

Nesse estudo, consideraram-se dois tipos de sistemas, a saber: (1): sistemas com transformadores de distribuição ligados em estrela aterrada no primário e, (2): sistemas com transformadores de distribuição ligados em delta no primário. O critério para operação de *trip* no primeiro caso deveria obedecer a três condições simultâneas:

- Deslocamento mínimo de 15° da componente de 3ª harmônica da corrente de uma fase com relação às correntes de 3ª harmônica das outras duas fases;
- Aumento de, no mínimo, 15 A na corrente de uma fase;
- Persistência de, pelo menos, 5 segundos das duas condições supracitadas.

Já o critério para operação de *trip*, no segundo caso, deveria obedecer às seguintes condições, simultaneamente:

- Aumento percentual da magnitude da corrente de 3ª harmônica atingindo um valor pré-determinado;
- Aumento de, no mínimo, 15 A na componente fundamental da corrente de uma das fases;
- Persistência de, pelo menos, 3 segundos das duas condições supracitadas.

O estudo apresentou como resultado apenas três falsos *trips* num período de um ano, porém não houve ocorrência natural de FAI no período de testes.

2.4.1.2 – Componentes de Sequência não Característica das Harmônicas

A tabela 2.2 ilustra algumas componentes de sequência características e não características das harmônicas de corrente de uma rede. Por exemplo, em um sistema equilibrado, a componente fundamental característica é aquela de sequência positiva, a 3ª harmônica característica é a de sequência zero e a 5ª harmônica característica é a de sequência negativa. As demais ocorrências mostradas na tabela 2.2 surgem em sistemas desequilibrados.

Harmônico	Componentes de sequência		
	Positiva	Negativa	Zero
1	característica	não característica	não característica
3	não característica	não característica	característica
5	não característica	característica	não característica

Tabela 2.2 – Componentes de sequências características e não características das harmônicas de corrente presentes numa rede.

Aqui estão os parâmetros que serão utilizados no método de detecção escolhido por esta dissertação. No entanto, não serão necessárias as componentes de sequência não características das harmônicas, sendo objeto de estudo do presente trabalho apenas as da fundamental.

2.4.1.3 – Fator de Corrente da Terceira Harmônica

Esse método se utiliza da relação de fase entre o fator da 3ª harmônica de corrente e o fator da tensão fundamental. Segundo a *Nordon Research and Development* [15], faltas com condutores caídos ao solo com presença de arco produzem uma corrente de 3ª harmônica com um comportamento único da fase em relação à tensão de fase sob falta. Assim, para encontrar somente a 3ª harmônica da corrente de falta, sem a contribuição da 3ª harmônica da corrente nominal do sistema, uma média do fator da 3ª harmônica é calculada e armazenada. A cada novo fator calculado, essa média armazenada é subtraída vetorialmente pelo mesmo.

O critério para operação de *trip* do detector criado por esse instituto apenas acusa falta se ocorrerem os seguintes dois critérios:

- O ângulo do fator resultante da 3ª harmônica da corrente de falta estar na mesma direção que o ângulo da tensão de fase sob falta;
- A magnitude do fator ser maior que um limiar pré-determinado, ajustado de tal forma que variações graduais do nível normal de harmônicos não sejam indicadas como faltas.

Frisa-se aqui que esse monitoramento do fasor da 3ª harmônica de corrente detecta apenas faltas de condutores caídos ao solo e que produzam arco, restringindo assim a abrangência desse método.

2.4.1.4 – Algoritmo de energia

Outra forma de se monitorar a corrente consiste em observar o aumento da atividade sustentada de alta frequência da mesma e a duração deste evento, quando da situação de faltas com condutores caídos ao solo com presença de arco elétrico. O princípio aqui utilizado é o de que a falta com arco injeta altas frequências na corrente enquanto o arco existir, sendo geralmente intermitentes. A diferença entre este e outros eventos naturais do sistema (operações normais) é que, nos outros, apesar de ocorrer a injeção de altas frequências, elas são de curta duração, não se demonstrando intermitentes.

Sendo assim, a média do nível de energia de uma frequência particular é calculada e armazenada, e tida como padrão normal. A energia é calculada a cada ciclo, e é dada como o somatório dos quadrados dos valores de corrente amostrados no mesmo (60 Hz). Se o resultado não for 1,5 vezes maior que a média padrão, o resultado do cálculo da energia é incorporado à média, mas sem considerar nenhuma ocorrência de evento, partindo-se para o cálculo da energia do próximo ciclo. Se o resultado for maior, o algoritmo considera a ocorrência de um evento e o nível de energia é incorporado à média. Assim continua-se sucessivamente, sendo que toda vez que a energia for maior que 1,5 vezes, a variável “evento” é incrementada. Isso ocorre até o término de um tempo pré-determinado (para verificar se a energia continuará se elevando). Conta-se o número de incrementos na variável “evento”, e se este for superior a um limite pré-estabelecido, o algoritmo acusa falta.

Complexo, porém interessante, esse método foi implementado em [25] e testado em campo. Durante o período de teste, não houve nenhuma ocorrência natural de falta de alta impedância com arco, mas também não houve falso *trip*.

2.4.1.5 – Algoritmo de Aleatoriedade

Muito semelhante ao anterior, esse método ainda se vale do comportamento aleatório da corrente de arco para distinguir as faltas com condutores caídos ao solo. Grandes variações de magnitude na corrente de arco ocorrem de um ciclo para outro, dificultando a aplicação de muitos algoritmos propostos. Esse algoritmo vem então tentar resolver esse problema.

Assim, esse algoritmo é testado em laboratório em [24], apresentando boa performance na maioria dos casos, com exceção para aquelas FAI com pouca atividade de alta frequência, sendo esta uma limitação para aplicação do mesmo.

2.4.1.6 – Taxa de Variação

O princípio desse método de monitoramento consiste na rapidez da taxa de variação da corrente de falta no caso de condutores caídos ao solo, em detrimento ao comportamento das correntes de carga em situação normal de operação do sistema.

Segundo [24], e embora não tenha sido construído pelos autores, o detector baseado no método ora descrito poderia monitorar um sinal proporcional ao valor eficaz da corrente de neutro. Se esse sinal variasse muito em magnitude, partindo de um valor limiar pré-determinado, estaria detectada a falta.

2.4.1.7 – Espectro de Arco

Em [25], pesquisadores analisaram o comportamento da corrente de falta produzida por FAI com condutores caídos ao solo e perceberam que seu espectro no domínio da frequência é único, produzindo sempre uma distribuição $1/f$. Assim, o detector baseado nesse monitoramento analisa o espectro de frequência sempre que o algoritmo indicar uma falta. Daí processa-se a verificação de semelhança desse espectro com aquele caracterizado por uma falta com arco. Se procedente, o sinal de *trip* é acionado.

2.4.1.8 – Extração de Corrente de Falta

Esse método consiste em extrair a corrente de falta da corrente total da linha, através de amostragem ponto-a-ponto. Numa primeira técnica, é realizada a subtração ponto-a-ponto de um ciclo da corrente do ciclo anterior. Sendo essa diferença pequena, presume-se que o sistema está em operação normal. Sendo ela grande, utiliza-se o tempo como segundo critério, sendo que se as variações de um ciclo para outro se sustentarem por muito tempo, a falta é indicada. Numa outra técnica, é o espectro de frequência do sinal de corrente que é calculado a cada ciclo. Se em algum ciclo esse espectro se mostrar muito diferente do esperado, durante um tempo pré-determinado, a falta é indicada.

2.4.1.9 – Padrão de Centelhamento

Esse método consiste no monitoramento da correlação positiva entre o ângulo de fase da tensão e o padrão de centelhamento, quando da ocorrência de uma falta de alta impedância com condutor caído ao solo. O padrão de centelhamento se dá devido à corrente que começa a fluir quando a tensão do gap de ar entre o condutor e a terra atinge um certo valor. Neste patamar de tensão ocorre uma disrupção e que continua a fluir até que a tensão no ponto de falta não consiga manter o fluxo de corrente através do gap, valor esse próximo de zero. Esse padrão descrito produz uma atividade de alta frequência que se relaciona com a tensão de fase, podendo ser monitorada e, assim, detectar as FAI com condutores caídos ao solo.

2.4.1.10 – Carga

A diferença desse método em relação aos já descritos é que, nos anteriores, para se detectar a falta com condutor rompido caído ao solo, este tem que cair do lado da fonte. Nesta técnica, como existe um mecanismo para avaliar variações súbitas de carga, se o condutor rompido cair do lado carga, ele provavelmente detectará a mesma. Mas ele apenas funcionará como um complemento, trazendo mais segurança à proteção, pois os algoritmos de detecção de corrente por condutor rompido é que irão, efetivamente, reconhecer a ocorrência desse tipo de falta.

2.4.1.11 – Monitor Digital de Alimentador

O diferencial desse dispositivo é que ele agrupa várias técnicas descritas anteriormente para detectar as FAI. Ele incorpora nove algoritmos de alta impedância, dentre eles o de energia e o de aleatoriedade. Suas entradas são as três correntes de fase mais a corrente de neutro. Também possui entrada para tensão, as quais promoverão a identificação suplementar de fase.

A intenção desse monitor digital é detectar FAI com arco, diferenciando as que apresentam condutores caídos das que não apresentam. Uma lógica de detecção que aumenta muito a segurança é assumir que um condutor está caído apenas se ocorrer uma perda de carga ou um distúrbio de sobrecorrente antes da ocorrência de um arco já detectado. Ou seja, esses dois eventos precisam preceder a ocorrência do arco para que o monitor considere o rompimento do condutor. Para determinar a presença do arco elétrico, os algoritmos de energia e de aleatoriedade são básicos. Para determinar o tipo de incidente que gerou o arco elétrico, o algoritmo de análise de carga é processado.

Assim, pode-se dizer que essa proposta se baseia no monitoramento de uma série de parâmetros relacionados à corrente de falta, dentre eles: a corrente de falta, a corrente de carga das três fases, os harmônicos presentes, etc.

2.4.1.12 – Redes Neurais

Vários são os estudos que tratam do tema Redes Neurais na detecção de FAI. Pelo fato de se assemelharem, aqui será descrito o sistema proposto em [9], o qual se baseia na metodologia das redes neurais para treinar o sistema de proteção, até que ele consiga detectar a existência de uma falta desse tipo.

O método proposto em [7] é baseado em uma rede neural que monitora um vetor que determina a sequência harmônica dominante (se negativa ou zero) nas componentes das tensões e correntes de suprimento.

A metodologia utilizada é, pois, baseada na não-linearidade produzida pelas FAI, ou seja, na presença de harmônicas. O sistema neural trata todas as harmônicas de uma só vez, e não uma de cada vez.

A rede neural é treinada usando a Caixa de Ferramentas de Redes Neurais do Matlab (*Matlab Neural Network Tool Box*) e o algoritmo de retro-propagação com uma camada escondida e 15 neurônios. Funções de ativação sigmoide-logarítmicas foram utilizadas na camada escondida e na camada de saída de um neurônio. A partir dessa breve descrição, conclui-se que o método discutido em tal artigo é mais incrementado que os anteriores.

2.4.1.13 – Pacotes Wavelet

Da mesma forma que para Redes Neurais, já existe no meio científico uma quantidade considerável de estudos relacionados aos pacotes *Wavelet*. Aqui será descrita a técnica de um deles [8], para se ter uma ideia desse tipo de monitoramento de rede.

A metodologia matemática em [8] analisa a natureza e a dinâmica do fenômeno de surgimento do arco de corrente relacionado às FAI. O trabalho analisa os sinais do arco de corrente, decompondo-os em pacotes *Wavelet*, através da Transformada *Wavelet*. Seis diferentes superfícies (areia, asfalto, gramado, cascalho, concreto e terra) foram usadas em testes de laboratório, sendo elas secas e molhadas. Portanto, um total de 12 sinais de arcos de corrente foram obtidos e decompostos nos pacotes *Wavelet*. Para cada sinal, 16 coeficientes de nós foram obtidos e, posteriormente, foram reconstruídos individualmente. Essa decomposição de sinais em sub-bandas de frequência permite que o fenômeno de arco relacionado a FAI seja discriminado.

2.4.2 – DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE TENSÃO

Esse método consiste na detecção de condutores rompidos através do monitoramento do desequilíbrio de tensão num ponto localizado à jusante da falta.

Em [26], assim como em [6], o princípio do sistema de proteção é a existência de desequilíbrio nas tensões do primário da parte do alimentador à frente do ponto partido quando do rompimento de um condutor (verificou-se estatisticamente que, de todos os casos levantados em duas concessionárias, em 95% houve rompimento de condutor).

Dessa forma, a fim de se quantificar o desequilíbrio, foram definidas duas grandezas que se relacionavam com as componentes de sequência zero e negativa das tensões, como nas equações 2.1 e 2.2, a seguir:

$$G_2 = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (2.1)$$

$$G_0 = \frac{|V_0|}{|V_1|} \quad (2.2)$$

Sendo:

V_2 – a componente de sequência negativa da tensão;

V_1 – a componente de sequência positiva da tensão;

V_0 – a componente de sequência zero da tensão.

A análise (em [26]) levou em consideração os seguintes aspectos:

- Dois tipos de conexões de transformadores de distribuição: Transformadores trifásicos com primário em delta e existência de transformadores monofásicos entre fase e neutro no sistema;
- Várias condições de carga no sistema;
- Diferentes condições de contato do condutor rompido: caído ao solo do lado carga, caído ao solo do lado fonte, e diferentes impedâncias de contato;
- Rompimento de um e dois condutores da rede;
- Presença e ausência de bancos de capacitores ligados na rede.

E chegou-se às seguintes conclusões:

- Quando apenas uma fase se rompe, o percentual de sequência negativa (G_2) e o percentual de sequência zero (G_0), para todos os casos analisados, se apresentaram dentro da faixa de 50 a 100%;
- Quando da presença de transformadores monofásicos e rompimento de duas fases do alimentador, os percentuais de sequência e sequência zero se apresentaram ambos iguais a 100%;

- Quando da presença de transformadores trifásicos ligados em delta e rompimento de duas fases do alimentador, se os cabos caíam ao solo do lado carga, ambos os percentuais se apresentaram dentro da faixa de 50 a 100%. Entretanto, quando os cabos caíam do lado fonte, apenas os percentuais de sequência zero se apresentaram diferentes de zero;
- Quando da operação normal do sistema, com apenas a presença de cargas desequilibradas, estas dificilmente produziram percentuais que excedessem 5%.

Dessa forma, em [26] utilizou-se um sensor que, através da indicação de campo elétrico resultante dos condutores primários, sem contato com nenhum deles, monitorava a componente de sequência zero das tensões de fase, já que esta se mostrou mais eficiente na detecção das faltas propostas no estudo. O princípio de funcionamento desse sensor se baseia no fato de que a tensão induzida em sua antena pelo campo elétrico resultante é aproximadamente zero no caso de existência de tensões equilibradas. No entanto, no caso de abertura de uma das fases, as tensões se desequilibram, induzindo uma tensão na antena, a qual é detectada pelo circuito eletrônico do sensor.

Apesar de essa proposta ser bastante eficiente, a filosofia de proteção precisa estar aliada à instalação de sensores em pontos estratégicos do alimentador, sendo necessário o acoplamento a um sistema de comunicação entre cada sensor e seu Centro de Operação de Distribuição.

Em [6], utilizou-se do método proposto em [26] somado ao método proposto em [32], o qual consiste em encontrar a chamada “tensão diferencial relativa”, dada por:

$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{do}|}{|V_{do}|} pu \quad (2.2)$$

Sendo:

ΔV_d – a tensão diferencial relativa, em pu;

V_d – a tensão de sequência positiva num ponto de monitoramento do alimentador depois do ponto de falta, em volts;

V_{do} – a tensão de sequência positiva num ponto de monitoramento do alimentador antes do ponto de falta, em volts.

O autor de [6] fez o módulo da tensão de sequência positiva, num ponto de monitoramento do alimentador antes do ponto de falta (V_{d0}), igual ao módulo da tensão fase-neutro nominal da fonte e, assim, analisou vários casos, comparando as três variáveis (G_0 , G_2 e ΔV_d).

Chegou-se às seguintes conclusões:

- O parâmetro G_2 não serviu para distinguir um desequilíbrio de tensão entre uma abertura bipolar e um desequilíbrio acentuado de carga no alimentador;
- Definiu-se um limiar de 30% para a sensibilização do sensor, com boa margem de segurança, sendo que todos os casos com defeito resultaram em valores acima, enquanto que todos os casos com cargas desequilibradas resultaram em valores abaixo desse limiar;
- Notou-se a pouca influência da presença de bancos de capacitores em G_0 e em ΔV_d ;
- Também notou-se a pouca influência dos valores de resistência de contato entre o cabo e o solo nesses mesmo parâmetros;
- Assim como notou-se a pouca influência do lado de rompimento dos condutores (lado carga ou lado fonte) nos mesmos parâmetros;
- Demonstrou-se a importância e suficiência de G_0 frente aos outros parâmetros para a detecção das FAI;

Dessa forma, em [6] utilizou-se um algoritmo que utiliza de uma “Matriz de Percorso de Rede” para a informação de todas as barras contidas no caminho série de qualquer barra do alimentador, proporcionando os dados necessários para a localização da falta.

Esse trabalho ainda destaca que o nível de confiabilidade do sistema de proteção vai depender do número de sensores presentes na rede, ou seja, quanto maior o número de sensores a serem instalados, maior será o nível de segurança.

2.4.3 – DETECÇÃO POR RESPOSTA AO IMPULSO

Esse método consiste na detecção e localização da falta (distância da mesma até a subestação em questão) através da resposta do alimentador ao receber uma excitação de uma fonte impulsiva. Essa resposta é analisada tanto no domínio da frequência quanto no do tempo, sendo que o primeiro verifica a existência do defeito e o segundo fornece o tipo do mesmo. O sistema elétrico responderá a essa excitação graças à Teoria das Ondas Viajantes, na qual se estudam as propriedades de reflexão e refração quando da descontinuidade do meio de propagação.

De acordo com [27], modela-se um sistema formado por um alimentador de uma rede de distribuição, o qual é linear, através de sua função de transferência, conforme pode ser visto na figura 2.2 abaixo. Assim, um impulso de tensão – $V_e(s)$ – é injetado na entrada da fase do sistema sob teste e a sua resposta – $V_s(s)$ – é medida, conforme figura a seguir e no domínio da frequência. Através desses dois sinais, encontra-se a função de transferência – $F(s)$ – e com ela, qualquer que seja o sinal de excitação de entrada, pode-se calcular a resposta do sistema. Mas sendo o sinal de entrada sempre o mesmo (conforme ocorre, na realidade, nos sistemas de distribuição), identifica-se a resposta, comparando-a com a esperada. Se elas não coincidirem, significa que alguma alteração ocorreu no sistema sob teste, podendo ser abertura/fechamento de chaves ou ocorrência de faltas (alta ou baixa impedância).

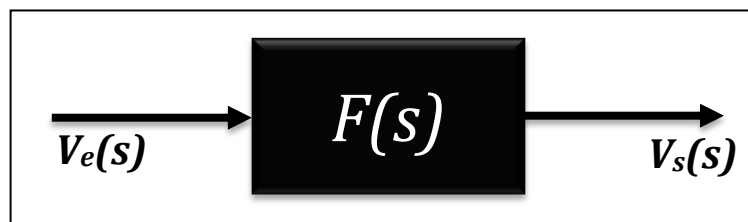


Figura 2.2 – Função de transferência de um alimentador de um sistema elétrico.

Portanto, para implementar o método descrito em [27], deve-se criar um banco de dados com as respostas esperadas e comparar sempre com a resposta obtida. Caso a diferença seja maior que uma previamente estabelecida como admissível, então se admite a existência de uma falta.

Assim, o ponto principal e, talvez, desvantajoso dessa proposta seja a montagem do banco de dados, pois sem ele, o sistema não poderá ser identificado e consequentemente os sinais provenientes de defeitos não poderão ser comparados com nada previamente estudado.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, viu-se que as FAI, apesar de muitas vezes não representarem perigo iminente aos equipamentos presentes num sistema, representam grande perigo aos seres humanos e às propriedades, uma vez que, em muitos casos, os condutores primários da rede se rompem e permanecem energizados.

Assim sendo, torna-se urgente e de extrema importância a realização de uma proteção eficaz e confiável. Vários trabalhos se ocuparam do tema e nenhum deles conseguiu cobrir totalmente os casos de FAI ocorrentes. Nem é esta a pretensão do presente estudo, o qual, por sua vez, visa apenas a somatizar simulações de vários casos de FAI, tentando abranger o maior número possível de tipos de faltas fase-terra, com uma proposta simples de detecção.

Estudou-se também neste capítulo uma boa quantidade de conceitos de FAI presentes na literatura renomada nessa área do saber. Percebeu-se que, embora se diferenciem em alguns detalhes, todos os conceitos tratam de uma mesma consequência que as FAI geram – o baixo valor de corrente, indetectável pelos dispositivos tradicionais de proteção. Classificou-se cada tipo de FAI segundo sua determinada natureza, podendo ser divididas em ativas e passivas, em séries ou *shunt*, ou ainda com condutores caídos ao solo ou tocando objetos externos. Apresentou-se uma série de métodos de detecção já propostos pela comunidade científica, dividindo-se estes segundo o parâmetro escolhido para monitoração: corrente, tensão ou resposta a impulsos.

No próximo capítulo será dada a devida ênfase ao método de detecção de FAI escolhido por esta dissertação, método este baseado no desequilíbrio de correntes.

CAPÍTULO III

DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA ATRAVÉS DA ANÁLISE DO GRAU DE DESEQUILÍBRIO DA CORRENTE

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo II foram apresentados os principais métodos de detecção de Falhas de Alta Impedância (FAI). Dentre essas, esta dissertação destaca aquela que se utiliza da análise de desequilíbrios das correntes para a detecção das FAI.

Em geral, sabe-se que, pelo menos idealmente falando, os sistemas de energia elétrica não deveriam apresentar correntes ou tensões que não fossem as fundamentais, e apenas as de sequência positiva. Porém, sabe-se também que é muito difícil se ter um sistema perfeitamente equilibrado (com ausência de componentes de sequência zero e/ou negativa).

A técnica de detecção de Falhas de Alta Impedância (FAI) é, aparentemente, simples de ser implementada, pois bastaria ajustar o detector de faltas para atuar a partir de um determinado grau de desequilíbrio. Porém, na prática, um ajuste desse tipo não é

tão óbvio assim. Isso porque há um limiar de desequilíbrio, comum tanto às cargas desequilibradas quanto às FAI.

Da teoria de Proteção de Sistemas Elétricos, tem-se que uma proteção somente é confiável se ela operar apenas e tão somente quando houver um defeito a ser retirado. Expressando isso de outra forma, uma proteção confiável deve atuar quando há falta e não deve atuar quando não há.

Com o surgimento dos relés digitais, diversos fabricantes incluíram, junto aos relés de sobrecorrente (funções ANSI 51 e 50), a função 46 (referente à detecção de corrente de sequência negativa). No entanto, em termos práticos, esta função 46, quando incluída nos relés, não tem sido ativada pelas empresas distribuidoras de energia, pelo menos no Brasil. O principal motivo para tal é que esta função pode conduzir os relés das subestações a atuarem intempestivamente, para condições de desequilíbrios de carga. Além disso, considerando-se que relés sempre devem estar abrigados em subestações, certamente os mesmos monitoram apenas as saídas dos alimentadores. Nestas condições, uma FAI localizada em local mais distante, sequer sensibilizaria este relé. Assim, em raras ocasiões que a função 46 atuar, todos os consumidores alimentados por este alimentador serão desligados. Isso pode significar alguns milhares de consumidores. Tais fatos levam à piora dos índices de DEC e FEC das distribuidoras de energia. Diante disso, não é difícil deduzir o motivo do não ativamento da função 46.

Assim, seria altamente recomendável que a função 46 fosse implementada em locais mais próximos dos eventos. Desta forma, a sensibilidade do defeito seria repassada de maneira mais real para o detector. Além disso, apenas os consumidores daquele ramal seriam desligados. Por outro lado, ao que se sabe, nenhum fabricante incluiu a função 46 em religadores ou chaves seccionadoras.

Diante destes fatos, a presente dissertação propõe que a função 46 seja desenvolvida em um microprocessador, de tal forma que ela possa ser implementada em religadores e chaves seccionadoras que possam abrir sob carga. Desta forma, certamente os riscos desta proteção atuar indevidamente para casos de desequilíbrio de cargas (portanto, sem a presença de defeitos na rede) seria bem menores.

Para evitar que a proteção contra FAI atue indevidamente para cargas desequilibradas, é prudente realizar uma profunda avaliação dos graus de desequilíbrio

devido a correntes oriundas de cargas desequilibradas operando em situações ditas “ideais” (quando não há defeitos na rede) bem como daqueles devidos, efetivamente, à existência de FAI na rede.

Neste trabalho, esta avaliação foi possível de ser realizada através do desenvolvimento de sub-rotinas no programa ATP (*Alternative Transient Program*). Tal programa é renomado tanto no meio científico quanto no mercado, sendo unanimidade entre os profissionais de que se trata de um excelente instrumento de trabalho na área de Engenharia Elétrica. Uma vez modelada a rede, os desenvolvimentos realizados permitem o cálculo de índices de desequilíbrio de corrente em quaisquer condições da mesma. Portanto, o presente estudo se utilizará de um sistema-base (um alimentador apenas), mas deixando a ideia de que o *software* ora proposto pode ser aplicado em qualquer tipo de sistema, desde que modelado e simulado a fim de se encontrar o melhor ajuste de grau de desequilíbrio.

Na seção a seguir será introduzida a teoria de desequilíbrios de corrente, fundamental para o desenvolvimento da proposta de que trata o presente capítulo.

3.2 – DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE

Sabe-se que o desequilíbrio de corrente é caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes ou nas defasagens entre as três correntes de um sistema trifásico, porque o ideal é que um sistema apresente as três correntes iguais em módulo e defasadas de 120° uma das outras (sistema equilibrado). Nesse sentido será apresentada uma breve teoria que introduzirá a teoria das componentes simétricas no desequilíbrio de correntes [28].

Segundo Forstecue, um sistema desequilibrado de correntes (ou de tensões) pode ser decomposto em três sistemas equilibrados, a saber:

1. Sistema de sequência positiva: consiste em três fasores iguais em módulo, *defasados* de 120° , e tendo a *mesma* sequência que os fasores originais;

2. Sistema de sequência negativa: consiste em três fasores iguais em módulo, *defasados* de 120° , e tendo a sequência da fase *oposta* a dos fasores originais;
3. Sistema de sequência zero: constituído de três fasores *iguais* em módulo com *defasagem* de 0° entre si.

Diante do exposto, se um sistema possui a sequência de fases “*abc*”, as sequências de fases dos componentes de sequência positiva e negativa, serão respectivamente “*abc*” e “*acb*”.

Na figura 3.1, três fasores originais de corrente (I_a , I_b e I_c) são decompostos nos três conjuntos propostos por Fortescue.

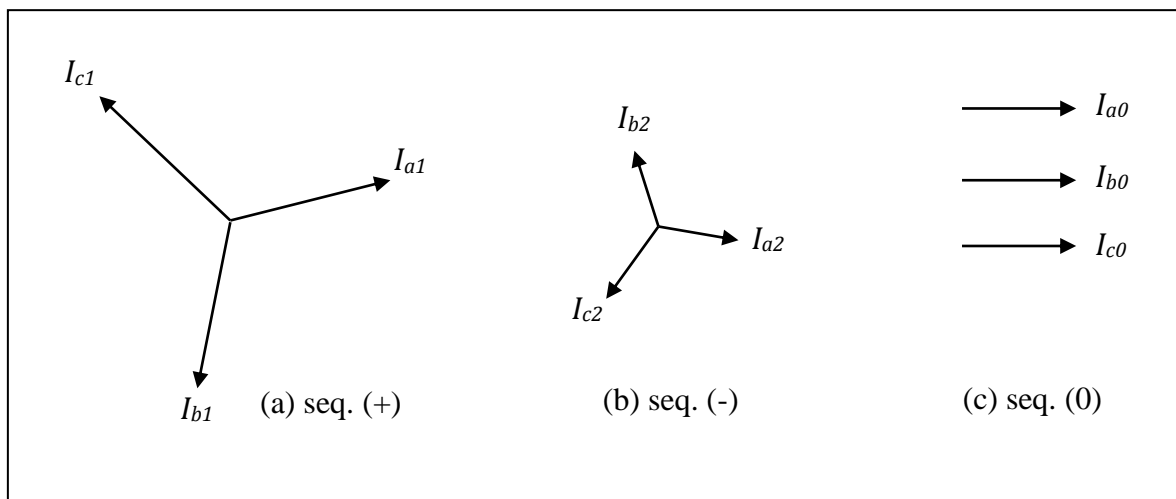


Figura 3.1 – Decomposição dos fasores I_a , I_b e I_c (adaptada de [28]).

Já na figura 3.2, os sistemas da figura anterior são somados graficamente, resultando nos fasores originais I_a , I_b e I_c .

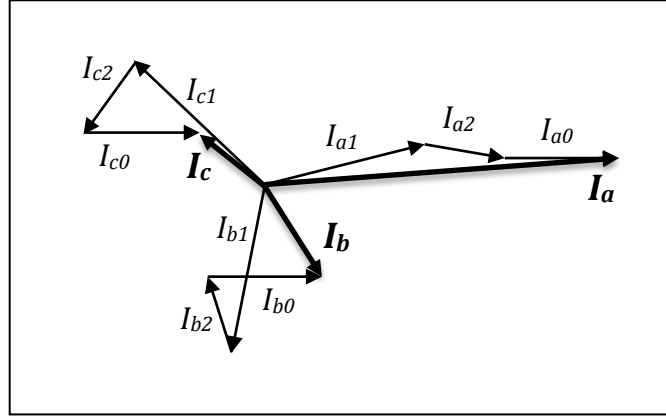


Figura 3.2 – Sistema resultante da soma fasorial das componentes de seqüências positiva, negativa e zero (adaptada de [28]).

Da figura anterior, pode-se formular as equações (3.1), (3.2) e (3.3), a seguir.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.1)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (3.2)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (3.3)$$

Será utilizado agora um operador, conhecido como operador “ a ”, que causa uma rotação de 120° no sentido anti-horário ao fasor que for aplicado. Aplicando-o duas vezes, haverá uma rotação de 240° , e três vezes, uma rotação de 360° (assim sucessivamente).

Assim, utilizando o fasor “ a ” e os conceitos retirados das figuras anteriores, têm-se o conjunto de equações (3.4) a (3.9), a seguir.

$$I_{b1} = a^2 \cdot I_{a1} \quad (3.4)$$

$$I_{b2} = a \cdot I_{a2} \quad (3.5)$$

$$I_{b0} = I_{a0} \quad (3.6)$$

$$I_{c1} = a \cdot I_{a1} \quad (3.7)$$

$$I_{c2} = a^2 \cdot I_{a2} \quad (3.8)$$

$$I_{c0} = I_{a0} \quad (3.9)$$

Substituindo esse conjunto de equações nas de número (3.2) e (3.3), tem-se a seguinte reescrita para o sistema de correntes I_a , I_b e I_c – equações (3.10), (3.11) e (3.12).

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.10)$$

$$I_b = a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2} + I_{a0} \quad (3.11)$$

$$I_c = a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2} + I_{a0} \quad (3.12)$$

Em forma matricial, tem-se a equação (3.13).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Por conveniência, será adotado o que se vê na equação (3.14).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Pode-se reescrever a equação (3.13) como se segue em (3.15).

$$[I_p] = [A] \cdot [I_s] \quad (3.15)$$

Onde: I_p – matriz padrão contendo as correntes I_a , I_b e I_c ;
 I_s – matriz contendo as componentes de sequências.

A matriz inversa de A é mostrada na equação (3.16).

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Por outro lado, pré-multiplicando a equação (3.13) por A^{-1} , têm-se as correntes de componentes simétricas para a fase “a”, que serão mostradas na equação (3.17).

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

A relação obtida na equação (3.17) é de suma importância, pois permite decompor três fasores assimétricos de corrente em seus componentes simétricos.

Desenvolvendo a equação matricial (3.17), encontra-se o conjunto de equações (3.18), (3.19) e (3.20) a seguir.

$$I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c) \quad (3.18)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) \quad (3.19)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) \quad (3.20)$$

As demais componentes simétricas são obtidas aplicando-se as equações (3.4) a (3.9).

Os índices de desequilíbrio, por sua vez, serão dados pelas equações (3.21) e (3.22), a saber:

$$\alpha_0 = \frac{|I_{a0}|}{|I_{a1}|} \times 100\% \quad (3.21)$$

$$\alpha_2 = \frac{|I_{a2}|}{|I_{a1}|} \times 100\% \quad (3.22)$$

Onde: α_0 – índice de desequilíbrio de correntes de sequência zero;

α_2 – índice de desequilíbrio de correntes de sequência negativa.

A seguir, será introduzido um exemplo que envolverá o cálculo de algumas das variáveis apresentadas anteriormente, a fim de se elucidar o assunto:

Considere-se um condutor de uma linha trifásica, com as fases \underline{a} , \underline{b} e \underline{c} , e que está aberto na fase \underline{c} . A corrente que flui para uma carga ligada em Δ pela linha \underline{a} é de 10 A. Tomando a corrente na linha \underline{a} como referência e a linha \underline{c} aberta, determine os componentes simétricos das correntes de linha e os respectivos índices de desequilíbrio de sequência zero e negativa.

Solução:

Pelo exposto acima, tem-se o que se vê em (3.23).

$$\begin{aligned} I_a &= 10 \angle 0^\circ [A] \\ I_b &= 10 \angle 180^\circ [A] \\ I_c &= 0 [A] \end{aligned} \tag{3.23}$$

Das equações (3.18), (3.19) e (3.20), pode-se calcular as componentes de sequência dessas correntes mostradas em (3.24), a seguir.

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3} \cdot (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 0) = 0 [A] \\ I_{a1} &= \frac{1}{3} \cdot (10 \angle 0^\circ + a \cdot 10 \angle 180^\circ + a^2 \cdot 0) = 5,78 \angle -30^\circ [A] \\ I_{a2} &= \frac{1}{3} \cdot (10 \angle 0^\circ + a^2 \cdot 10 \angle 180^\circ + a \cdot 0) = 5,78 \angle 30^\circ [A] \end{aligned} \tag{3.24}$$

Das equações (3.4) a (3.9), obtêm-se as componentes de I_b e I_c , como a seguir.

$$\begin{aligned} I_{b1} &= a^2 \cdot I_{a1} = 5,78 \angle -150^\circ [A] \\ I_{b2} &= a \cdot I_{a2} = 5,78 \angle 150^\circ [A] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{b0} &= I_{a0} = 0 \\I_{c1} &= a \cdot I_{a1} = 5,78 \angle 90^\circ [A] \\I_{c2} &= a^2 \cdot I_{a2} = 5,78 \angle -90^\circ [A] \\I_{c0} &= I_{a0} = 0\end{aligned}\tag{3.25}$$

Finalmente, das equações (3.21) e (3.22), obtêm-se os índices de desequilíbrio de corrente requisitados pelo exemplo.

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \frac{|I_{a0}|}{|I_{a1}|} \times 100\% = \frac{0}{5,78} = 0\% \\ \alpha_2 &= \frac{|I_{a2}|}{|I_{a1}|} \times 100\% = \frac{5,78}{5,78} = 100\%\end{aligned}\tag{3.26}$$

Com essa filosofia de cálculo será desenvolvido, na seção a seguir, o *software* que calcula os índices de desequilíbrio das correntes, dados I_a , I_b e I_c .

3.3 – DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE DESEQUILÍBRIO DE CORRENTES NO PROGRAMA *ATP*

O programa digital ATP (*Alternative Transients Program*), muito utilizado para a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos, apresenta duas alternativas básicas para a simulação de sistemas de controle e/ou modelagem de elementos não-convencionais, representadas pelas rotinas TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) e MODELS (*General Purpose Simulation Tool*).

De acordo com [29], a rotina TACS foi desenvolvida para a simulação das interações dinâmicas entre sistemas de controle e os componentes das redes elétricas, sendo os controles descritos na forma usual de diagrama e de blocos com configurações arbitrárias dos componentes básicos, funções e/ou dispositivos. As equações dos

sistemas de controle são resolvidas pela TACS no domínio do tempo, por integração implícita, através da regra de integração trapezoidal.

Ainda segundo [29], a TACS tem sido também amplamente utilizada, entre outras inúmeras aplicações, na modelagem de:

- sistemas de corrente contínua;
- compensadores estáticos;
- sistemas de excitação e regulação de máquinas síncronas.

A possibilidade de inclusão de expressões lógicas e algébricas em FORTRAN permite a formulação de algoritmos diversos, seja para a modelagem de componentes ou mesmo para a realização de cálculos.

É por essas vantagens que o medidor de desequilíbrio desenvolvido no ATP e aqui apresentado se baseia na rotina TACS, conforme figura 3.3.

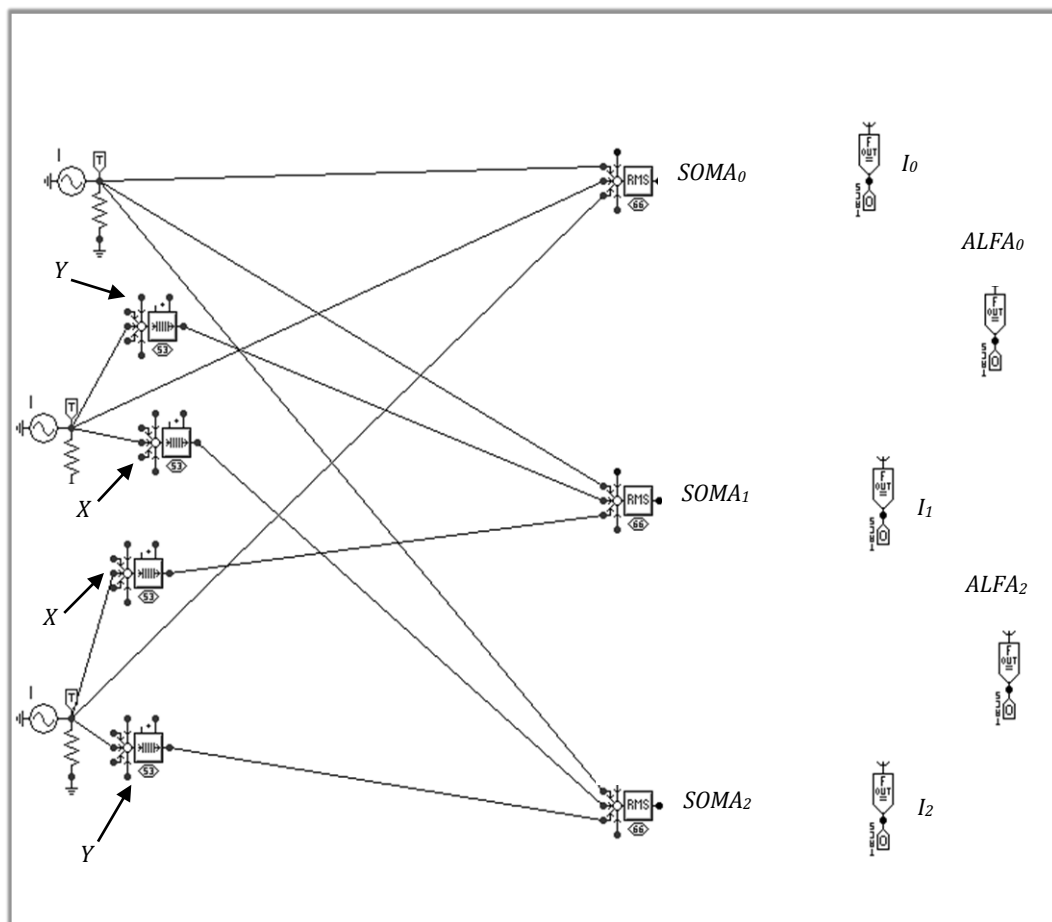


Figura 3.3 – Estrutura do medidor de desequilíbrio no ambiente do ATP (ATP Draw).

A estrutura da figura 3.3 é composta basicamente por três dispositivos TACS diferentes – os que medem o valor eficaz, os que aplicam atrasos nos sinais de entrada e os que declaram equações nas quais as variáveis envolvidas serão calculadas. Os parâmetros X e Y significam determinados intervalos de tempo de atraso aplicados pelos dispositivos para os quais apontam (seus cálculos serão mostrados posteriormente). As variáveis $SOMA_0$, $SOMA_1$, $SOMA_2$, I_0 , I_1 , I_2 , α_0 e α_2 são os parâmetros mais importantes da estrutura do medidor e serão tratados também posteriormente. Por ora, far-se-á uma breve introdução a cada dispositivo da rotina TACS utilizado, para que se possa entender plenamente o funcionamento do medidor proposto.

▪ *Trans delay* (dispositivo 53)

O dispositivo denominado *trans delay* está representado na figura 3.4, a seguir. Logo após serão inseridos os comentários pertinentes à função do mesmo.

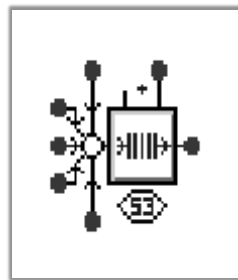


Figura 3.4 – Dispositivo TACS *Trans Delay*.

Esse dispositivo realiza a soma dos sinais de entrada e aplica um certo atraso, dado pelo usuário, a esses sinais. Na figura 3.3, os atrasos foram representados pelas letras X e Y . A única peculiaridade é que esse atraso possui unidade de medida em segundos e, portanto, para o cálculo dos desequilíbrios, como a defasagem de 120° é determinante, deve-se converter esse valor para a medida em tempo, a partir de uma simples regra de três, como se segue em (3.27).

$$\begin{aligned}
 360^\circ &\Rightarrow 1 \text{ ciclo} = \frac{1}{60} \\
 120^\circ &\Rightarrow X \text{ s} \\
 X &= \frac{\frac{120}{60}}{360} = \frac{1}{180} \text{ s} \cong 0,0055555666667 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

Esse valor será importante na explicação que se segue após a descrição dos dispositivos. Na figura 3.5, tem-se o diagrama de blocos, obtido do manual do *ATP*, relativo ao dispositivo em questão. Nota-se que o dispositivo primeiro realiza a soma dos sinais de entrada para posteriormente aplicar o atraso. Se a entrada possuir apenas um sinal, então ele aplicará o atraso apenas a esse sinal.

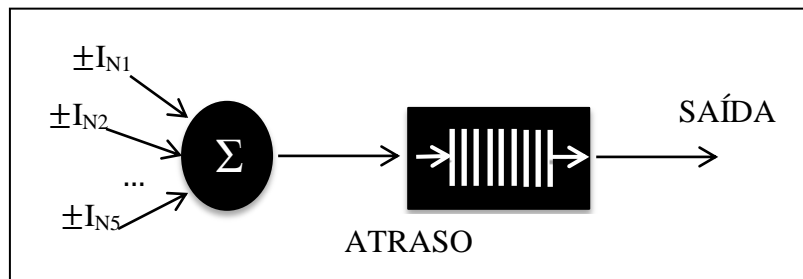


Figura 3.5 – Diagrama de blocos do dispositivo *Trans Delay*.

- *RMS meter* (dispositivo 66)

O dispositivo denominado *rms meter* está representado na figura 3.6 a seguir. Sua função é somar os sinais de entrada e devolver o valor eficaz do sinal resultante. O único dado a ser fornecido pelo usuário é uma dada frequência, na qual, consequentemente, devem estar todos os sinais de entrada.

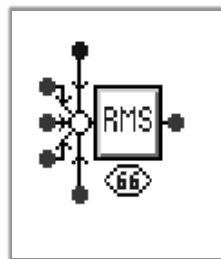


Figura 3.6 – Dispositivo TACS *RMS meter*.

Na figura 3.7 pode-se observar o diagrama de blocos do dispositivo em questão, fornecido pelo manual do *ATP*.

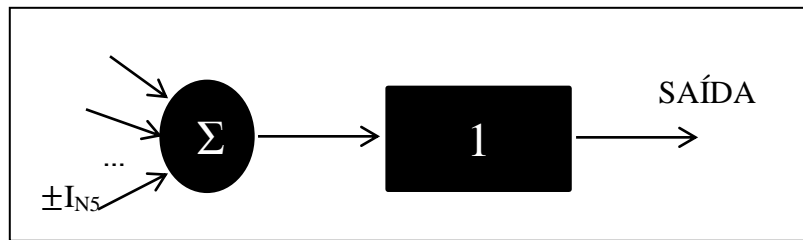


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do dispositivo *RMS Meter*.

- *TACS Coupling to Circuit*

O dispositivo denominado *coupling to circuit* está representado na figura 3.8 a seguir.



Figura 3.8 – Dispositivo *TACS Coupling to Circuit*.

Esse dispositivo tem como função captar os sinais desejados pelo usuário, a fim de que eles sejam usados por outros dispositivos. Por exemplo, no caso do medidor representado pela figura 3.3, esse dispositivo capta os sinais de corrente a serem usados pelos outros dispositivos, a saber, *RMS meter* e *Trans delay*, já explicados anteriormente.

- *TACS Fortran Statements – General*.

O dispositivo denominado *Fortran statements* está representado a seguir, na figura 3.9.

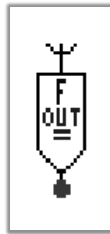


Figura 3.9 – Dispositivo TACS Fortran Statements - General.

A função do dispositivo dessa figura é aplicar uma equação qualquer, definida pelo usuário, às variáveis do sistema. No medidor da figura 3.3, esse dispositivo divide por três a soma proveniente dos dispositivos *RMS meter*. Essa divisão por três se dá devido às equações de (3.18) a (3.20), explicadas na seção 3.2.

Retomando à figura 3.3, o medidor de desequilíbrio de corrente consiste fundamentalmente em três medidores de RMS, os quais medirão, respectivamente, as correntes simétricas I_0 , I_1 e I_2 . Descrever-se-á cada um desses medidores em particular a partir de agora.

RMS₀ – O primeiro dispositivo captura diretamente os sinais de corrente I_a , I_b e I_c , os quais provêm de fontes de corrente em paralelo com resistores de 10Ω de resistência. Na verdade, as fontes de corrente estão, no desenho mostrado, substituindo os pontos do sistema de onde se pretende obter os desequilíbrios de corrente. Assim, conforme equação (3.18), para encontrar-se a corrente I_a de sequência zero, basta somar I_a , I_b e I_c e dividir por três. Portanto, nenhuma transformação precisa ser feita nas correntes I_a , I_b e I_c , razão pela qual os sinais delas são diretamente enviados para o medidor *RMS₀*. Esse dispositivo faz então a soma dos sinais de corrente e transforma o sinal resultante em valor eficaz, dividindo por $\sqrt{2}$ o valor de pico dessa onda resultante. Essa variável foi denominada *SOMA₀*. Para dividir essa soma RMS por 3, tal como fornece a equação (3.18), utiliza-se do dispositivo *Fortran Statements - General*, um dispositivo auxiliar da TACS, já explicado anteriormente. Ele é basicamente uma declaração FORTRAN, onde a entrada é a variável denominada *SOMA₀* (saída do

RMS_0) e a saída é I_{a0} (corrente de sequência zero), sendo a declaração FORTRAN justamente a divisão de $SOMA_0$ por 3.

RMS_1 – O segundo dispositivo precisa realizar a operação de soma da equação (3.19). Assim, para I_a , basta ele captar diretamente o sinal de corrente proveniente do ponto correspondente à fase A. Mas para I_b e I_c , uma transformação nesses sinais precisa ser feita. Sabe-se que o fasor a é um fasor de módulo igual a 1 e ângulo de 120° . Assim, multiplicar um sinal de onda com fase θ por um fasor a de módulo 1 e fase 120° , é o mesmo que obter uma nova onda de módulo igual à primeira, mas com defasagem de $\theta + 120^\circ$. Ou seja, é o mesmo que adiantar essa onda de 120° , ou ainda, atrasá-la de 240° . Como o dispositivo TACS *Trans Delay*, conforme visto, exige como parâmetro de entrada o valor (em segundos) do atraso a ser aplicado ao sinal de corrente, então realiza-se uma simples “regra de três” para encontrar o valor dos atrasos requeridos.

$$360^\circ \Rightarrow 0,016667 \text{ s}$$

$$120^\circ \Rightarrow X \text{ em segundos}$$

$$240^\circ \Rightarrow Y \text{ em segundos}$$

Os resultados são (com tantas casas decimais quantas forem necessárias para a maior precisão do medidor):

$$X = 0,0055555666667 \text{ s};$$

$$Y = 0,011111133333 \text{ s}.$$

Como o dispositivo requer atraso, e multiplicar por a é atrasar de 240° , então multiplicar por a^2 é atrasar de 120° . Assim, para I_{a1} , o RMS_1 deve captar diretamente o sinal de I_a , captar o sinal de I_b com atraso de Y (240°) e I_c com atraso de X (120°). Ou seja, aplicar um atraso de 0,011111133333 segundos a I_b e de 0,0055555666667 a I_c , encontrando, pois, a $SOMA_1$ (denominação da variável resultante do dispositivo RMS_1). Assim, basta, posteriormente, fazer a divisão através da declaração FORTRAN, conforme explicado anteriormente, obtendo assim I_{a1} (corrente de sequência positiva).

RMS₂ – O terceiro dispositivo precisa realizar a operação de soma da equação representada por (3.20). Retomando-a:

$$I_{a2} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) \quad (3.21)$$

Neste dispositivo, tem-se justamente o contrário das alterações aplicadas para o medidor de valor eficaz da sequência positiva (*RMS₁*). Ou seja, aplicar-se-á o atraso de *X* (120°) ao sinal de corrente *I_b* e o atraso de *Y* (240°) ao sinal de corrente *I_c*. O restante das operações não muda, sendo que do dispositivo *RMS₂* obter-se-á a variável *SOMA₂*, e depois dividir-se-á a mesma por 3, através da declaração FORTRAN da TACS. Assim, a corrente de sequência negativa (*I_{a2}*) estará calculada.

Com *I_{a0}*, *I_{a1}* e *I_{a2}* calculados e já em valores eficazes (RMS), pode-se utilizar mais duas declarações FORTRAN para se realizar os cálculos dos índices de desequilíbrio α_0 e α_2 . As equações referentes a esses índices são as de número (3.21) e (3.22).

Assim, de posse das variáveis *I_{a0}*, *I_{a1}* e *I_{a2}*, basta uma declaração FORTRAN, dividindo *I_{a0}* por *I_{a1}*, a qual será denominada *ALFA₀* e, outra mais, dividindo *I_{a2}* por *I_{a1}*, a qual será denominada *ALFA₂*.

Através desse simples desenvolvimento, o medidor de desequilíbrio de corrente estará pronto para ser usado.

3.4 – UMA PROPOSTA DE *HARDWARE* PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE PROPOSTO

No capítulo subsequente serão simuladas com o programa desenvolvido neste capítulo várias situações de FAI, a fim de se investigar em busca de um bom valor de

limiar entre cargas meramente desequilibradas e reais situações de perigo que devem ser afastadas. Vai se constatar, também, que o método de desequilíbrios de corrente consegue separar bem essas duas ocasiões, e que, após realizado um estudo prévio num dado sistema, basta designar esse valor limiar, definindo-o para o detector, o qual abrirá o dispositivo que comanda somente para situações cujos índices resultarem em valores acima desse ajuste.

No histórico das redes elétricas atuais tem-se que a proteção contra FAI é realizada nas subestações, para uma função denominada 46, presente nos relés. Na verdade, essa função vem sendo desativada por muitas concessionárias, como a Eletropaulo, por exemplo. O que acontecia era justamente um problema de confiança e segurança da proteção – o relé, por estar localizado bem no início de todo um subsistema (na subestação), não indicava FAI quando deveria. E mesmo quando detectasse, causaria a interrupção do fornecimento de energia a muitos consumidores, os quais não necessariamente precisariam que a proteção atuasse. Ilustrando, conforme pode ser visto na figura 3.10, se a FAI ocorre em apenas uma das ramificações do diagrama, por que todo o sistema deve sofrer com a interrupção de energia? Esse é um dos problemas que a presente dissertação, com a proposta de implementação do atual capítulo, pretende esclarecer.

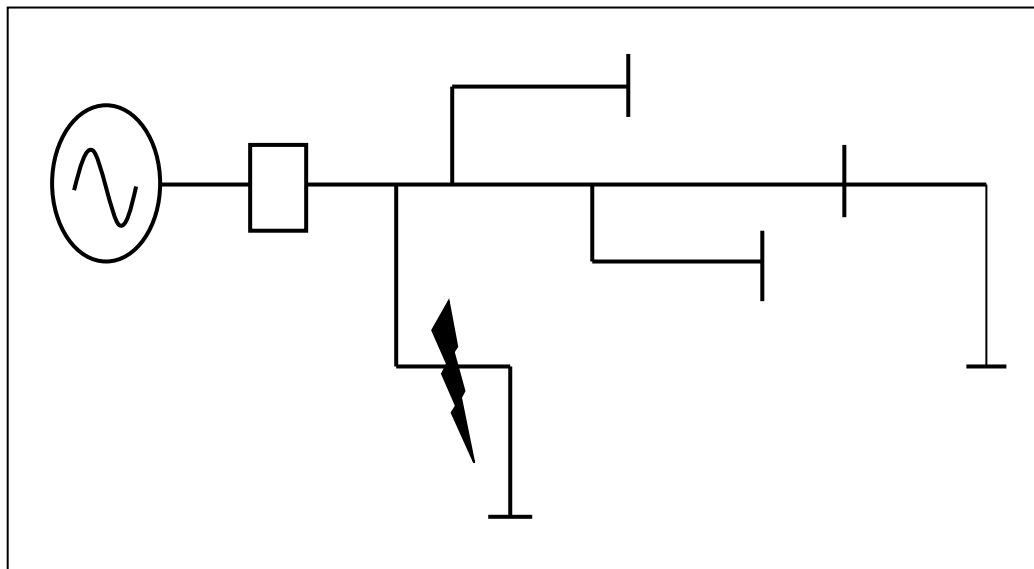


Figura 3.10 – Exemplo de subsistema com ramificações.

De acordo com a simplicidade da metodologia proposta nesta dissertação, e baseado no fato de que os curtos-circuitos provenientes de FAI não produzem altas correntes, chegou-se à conclusão de que o método poderia ser implementado em qualquer religador presente na rede, ou até em chaves seccionalizadoras. Do ponto de vista de comando, esses dispositivos são mais simples que os relés, não possuindo todas as inúmeras funções de proteção que estes possuem. Assim, a partir de uma “caixa preta” conectada a um dispositivo como esse, a proteção contra FAI seria possível. Sem falar que segurança e confiança da proteção estariam aliadas, uma vez que se essa metodologia estiver presente em religadores e/ou chaves seccionalizadoras, os quais se apresentam em maior número espalhados pela rede que os relés, uma quantidade maior de consumidores estará protegida, tanto das FAI, quanto do fato de sofrer interrupção de energia desnecessariamente.

Então, o trabalho atual não só se preocupou com o desenvolvimento do programa que calcula os índices de desequilíbrio, como também apresenta, neste capítulo, uma proposta de solução em *hardware*, com o diagrama de blocos relativo à aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases. Faz-se necessário ressaltar que, para obter-se um *hardware* completo, precisa-se de mais elementos. O objetivo aqui é mostrar uma maneira simples de como adquirir os sinais de corrente da rede, a fim de que estes sejam processados pela metodologia proposta na seção 3.3 (anterior).

A proposta é simples e está representada na figura 3.11. Ela se trata de um circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases. Faz-se necessário observar a presença do importante transformador de corrente (TC), com fins de diminuir a corrente para ordens de grandeza compatíveis com a eletrônica do detector.

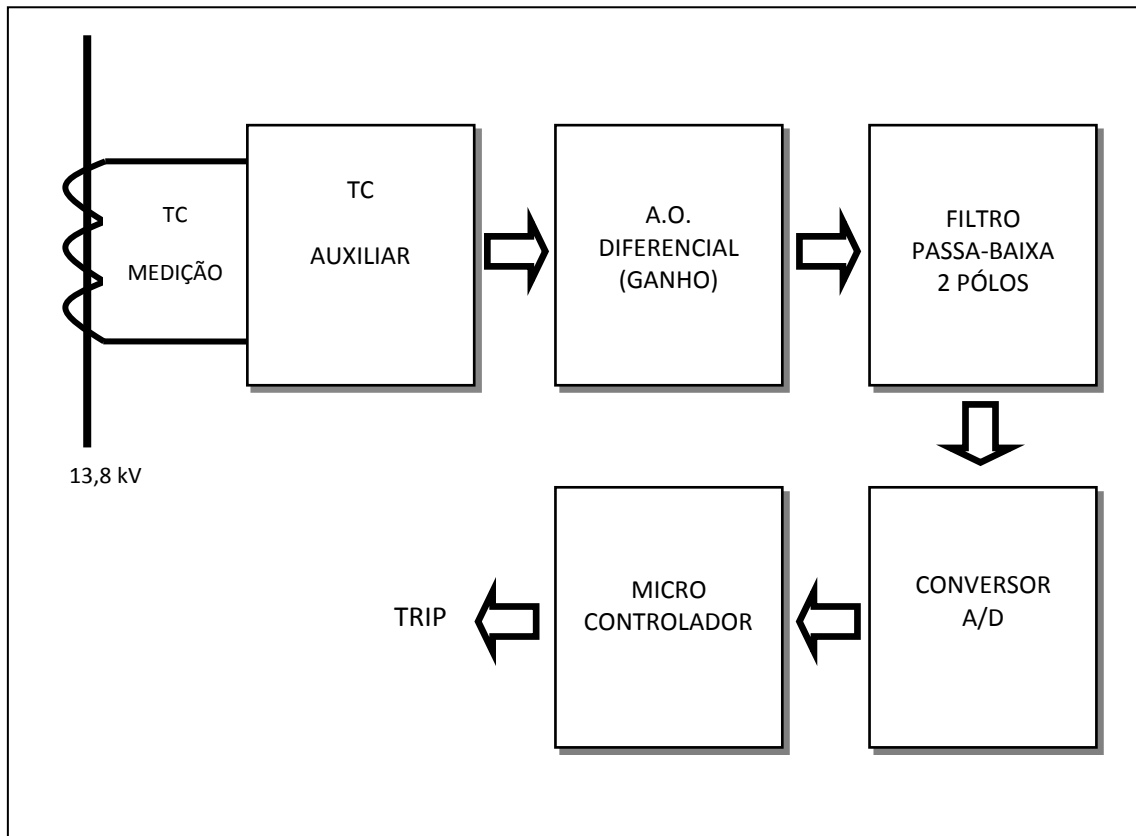


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases.

A relação entre esses blocos no funcionamento do detector de FAI pode ser descrita por uma sequência de cinco etapas, conforme a seguir.

- 1) A entrada do primeiro bloco corresponde às correntes provenientes do TC ligado à rede. Portanto, esse esquema representa apenas o *hardware* do circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente das fases, sendo que o *hardware* completo do detector de FAI necessitaria de mais elementos, os quais fogem dos objetivos desta dissertação;
- 2) Um amplificador operacional diferencial será necessário no segundo estágio a fim de realizar a função de rejeição de ruídos;
- 3) Um filtro passa-baixa com frequência de corte conforme desejado (por exemplo, 3kHz) é necessário nesse estágio para filtrar os ruídos remanescentes e garantir a passagem da corrente fundamental sem distorções, a qual será utilizada posteriormente para o cálculo dos desequilíbrios;

- 4) No quarto estágio tem-se um conversor A/D, que transformará os dados analógicos de entrada em dados digitais de saída, podendo ser posteriormente tratados por um microcontrolador;
- 5) No quinto bloco tem-se o microcontrolador propriamente dito, no qual estará presente a metodologia matemática utilizada para cálculo dos indicadores de desequilíbrio de corrente. A saída desse microcontrolador será enviada diretamente à rede, com informações do tipo “trip” ou “do not trip”.

3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo propôs a metodologia de detecção de faltas de alta impedância, através da análise do grau de desequilíbrio da corrente. Para implementar esta proposta basta ajustar o detector de faltas para atuar a partir de um determinado grau de desequilíbrio. Apesar de parecer simples, esse ajuste não é tão óbvio, uma vez que é preciso estudar-se o alimentador no qual se deseja instalar tal proteção e investigar qual é o grau de desequilíbrio usual quando da presença de cargas desequilibradas em situações normais (sem a presença das FAI).

Deu-se essencial importância ao fato de que a segurança e a confiança da proteção nunca devem ser deixadas de lado. A proteção contra FAI deve atuar com precisão e certeza nos casos de defeito e, paralelamente, não deve indicar, de forma indevida, a presença das FAI para casos em que o alimentador não possui faltas, mas, sim, cargas em desequilíbrio.

Neste capítulo também foi apresentado o desenvolvimento de um programa, em ambiente ATP, o qual calcula os índices de desequilíbrio que expressam as quantidades de correntes de sequência negativa e sequência zero presentes na rede. Esse programa pode ser aplicado a qualquer alimentador e suas ramificações, desde que o mesmo seja inserido corretamente no *software* ATP.

O medidor de correntes implementado neste capítulo possui, pois, duas vantagens especialíssimas: (1) a facilidade matemática da metodologia empregada e, conseqüentemente, (2) o menor grau de complexidade da programação a ser

desenvolvida no microcontrolador. Essas vantagens permitem a sua implementação em pontos mais distribuídos pela rede, e não só em relés como os do tipo ANSI 46, que só podem estar nas subestações. Assim, pode-se empregar tal *software* criado em diversos tipos de dispositivos, desde os mais simples aos mais complexos, como chaves seccionadoras, religadores, relés, etc. Todos possuem a capacidade de se compatibilizar com a metodologia ora proposta, sem muitos custos, sem muita complexidade, conforme será visto em capítulo subsequente (capítulo IV).

A parte do *hardware* a ser implementado como sendo o circuito de aquisição e condicionamento do sinal de corrente nas três fases, que é a parte mais importante do detector de FAI, também é simples e eficiente.

No capítulo a seguir (capítulo IV) será introduzido um exemplo da aplicação do medidor de desequilíbrio de corrente desenvolvido no presente capítulo. Vários tipos de defeitos relacionados às FAI serão aplicados a fim de se determinar um bom limiar de ajuste para a detecção das mesmas.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIOS CAUSADOS POR CARGAS E POR FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo trata da análise quantitativa dos índices de desequilíbrios causados por cargas desequilibradas e por faltas fase-terra de alta impedância (FAI). Tais comparações são essenciais para o sucesso da técnica de detecção de FAI proposta neste trabalho, uma vez que se deseja que a abertura do circuito somente ocorra em casos de FAI verdadeiras (e nunca para cargas desequilibradas). Para atingir esses objetivos, tomou-se um sistema elétrico de distribuição típico e, nele, foram simuladas diversas condições de cargas desequilibradas, bem como de FAI.

Neste estudo serão analisadas outras faltas além das FAI pois, muitas vezes, antes de surgirem estas ocorre, por exemplo, uma simples abertura monofásica, esta devida a eventos naturais ou à abertura de um disjuntor.

Segundo [28], a maioria das faltas que ocorre nos sistemas elétricos é assimétrica. Essas faltas podem ser do tipo série ou do tipo *shunt*. As faltas série são

aquelas em que um ou dois condutores, de um circuito trifásico, se abrem, desequilibrando o sistema (também podem ser denominadas de aberturas monopolares ou bipolares – e assim é feito neste trabalho). Essas faltas causam dois tipos de problemas: (1) diferenças de potencial entre os dois lados do condutor que se abriu e, (2) a indesejável falta de fase na carga (que pode danificar cargas trifásicas como motores, por exemplo). Por outro lado, as faltas *shunt* podem ser caracterizadas pela queda de um ou dois condutores ao solo ou mesmo pelo curto-circuito entre duas fases de um sistema elétrico.

O presente capítulo trata da aplicação dessas faltas a sistemas contendo cargas de variados graus de desequilíbrio.

4.2 – APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

De uma maneira geral, os ramais em 13,8 kV usuais nas redes de Distribuição de Energia Elétrica podem ser resumidos no diagrama unifilar ilustrado na figura 4.1 (embora o esquema de configuração do segundo transformador possa ser encontrado com outros tipos de conexões).

Para efetuar as simulações que permitirão avaliar os graus de desequilíbrios encontrados nas redes, adotou-se um alimentador típico, descrito em [30], ali denominado de NEO01N4 (o diagrama unifilar detalhado, com todos os dados de nós e trechos do mesmo, se encontra no Apêndice A desta dissertação).

A seguir, na figura 4.1, representar-se-á um resumo do diagrama unifilar original do alimentador NEO01N4, a fim de se entender a representação através do programa ATP.

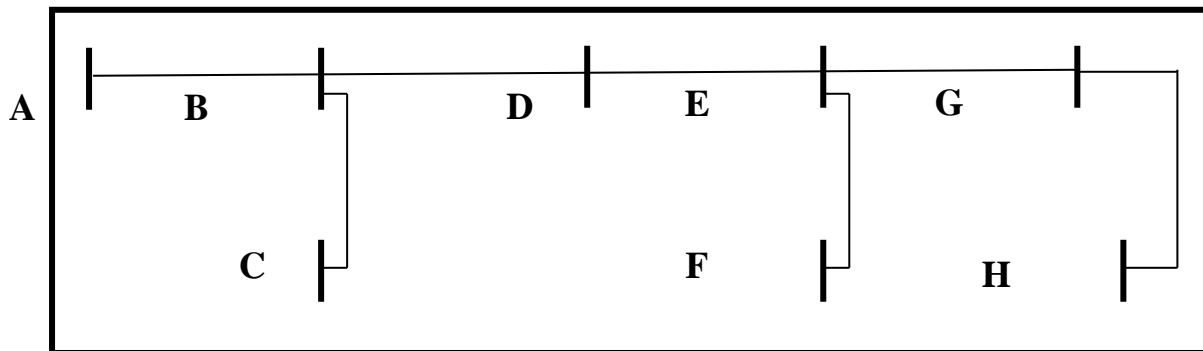


Figura 4.1 – Esquematização do sistema escolhido.

Esse mesmo diagrama foi representado no ATP, conforme a Figura 4.2. O que se fará através de simulações no ATP é a aplicação de defeitos no presente sistema, ora com cargas equilibradas, ora com cargas desequilibradas, medindo-se sempre os dois índices de desequilíbrio já introduzidos no capítulo anterior, α_0 (índice de desequilíbrio de sequência *zero*) e α_2 (índice de desequilíbrio de sequência *negativa*). Assim, poder-se-á tecer conclusões a respeito de como um dispositivo de detecção de desequilíbrios baseado na metodologia aqui proposta se comportaria diante dos defeitos ora estudados.

Para mais informações a respeito desse sistema, tem-se em anexo à presente dissertação o Apêndice A, o qual possui todos os detalhes técnicos a respeito do alimentador adotado pelo presente trabalho, inclusive o diagrama unifilar original.

Na mudança de configuração do sistema, as cargas representadas na figura 4.2 ora estarão em estrela aterrado, ora em delta. A configuração delta para as cargas representa mais realmente um sistema presente na rede elétrica atual, uma vez que, no sistema simulado da ilustração, não foram colocados transformadores, pois tudo está em um mesmo nível de tensão (13,8 kV). Mas as cargas em delta representam, da mesma forma, a colocação de transformadores de distribuição cuja configuração seja delta (13,8 kV)/estrela aterrado (220 V), sendo estes os transformadores mais comuns presentes na rede elétrica. Os cálculos realizados para a transformação das configurações das cargas desse sistema se encontram no Apêndice B desta dissertação.

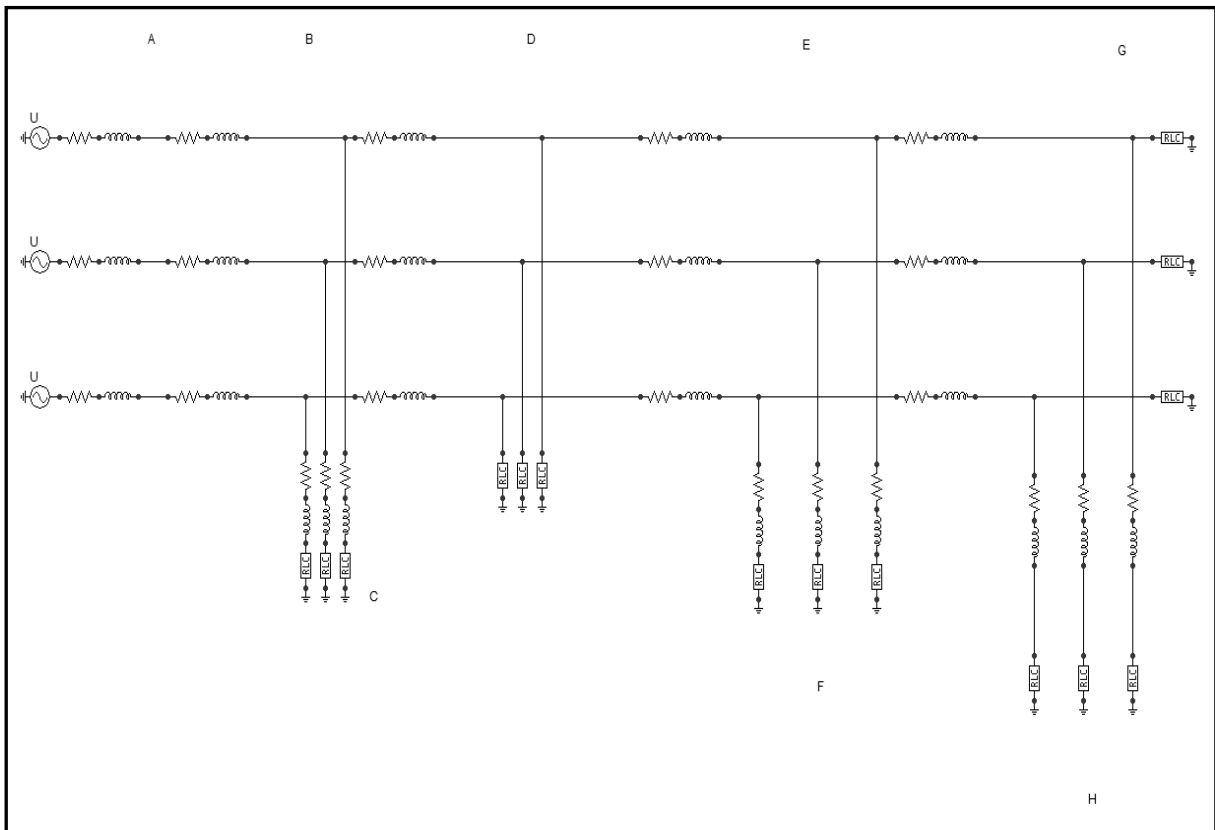


Figura 4.2 – Representação do sistema no programa ATP.

4.3 – CASOS ESTUDADOS

Os casos estudados subdividem-se em cinco diferentes hipóteses, sendo cada uma delas representante de uma situação do sistema, como se segue:

- A) Caso ideal, sem defeitos na rede;
- B) Caso em que o condutor se rompe e entra em contato com uma impedância de falta apenas do lado fonte;
- C) Caso em que o condutor se rompe e entra em contato com uma impedância de falta apenas do lado carga;
- D) Caso em que o condutor se rompe e entra em contato com uma impedância de falta dos dois lados (fonte e carga);
- E) Caso em que o condutor apenas se rompe, não entrando em contato com nenhuma impedância de falta.

Cada um dos 5 grupos anteriores possui 3 subcasos, a saber:

- 1) Configuração de todas as cargas do sistema em estrela aterrado;
- 2) Configuração de todas as cargas do sistema em delta, configuração esta a mais comum nos sistemas elétricos atuais, dado que o primário dos transformadores de distribuição está em delta;
- 3) Presença de bancos de capacitores com uma de suas fases aberta no sistema. Essa escolha se deve ao fato de ser comum nos sistemas elétricos a presença de bancos de capacitores antigos, os quais costumam perder uma das fases com o passar do tempo (capacitância nula, logo, impedância capacitiva muito alta, que abre a fase).

Em cada estudo ter-se-á a carga com desequilíbrios, nas 3 fases, da seguinte forma (inspirada em [31]):

Fase a: Manutenção da impedância da carga no valor fixo Z ;

Fase b: Variação da impedância da carga, Z , de um valor “ ΔZ ”, de 0% a 30%;

Fase c: Variação da impedância da carga, Z , de um valor “ ΔZ ”, de -0% a -30%;

4.4 – RESULTADOS

Os índices de desequilíbrio de corrente (α_0 e α_2) resultantes para cada um dos casos apresentados anteriormente encontram-se nos tópicos a seguir. Neles serão mostrados gráficos, os quais possuem as seguintes características:

- Z_f : impedância de falta, representada no eixo x ;
- α_0 : índice de desequilíbrio baseado nas correntes de sequência zero, em porcentagem, representado no eixo y ;
- α_2 : índice de desequilíbrio baseado nas correntes de sequência negativa, em porcentagem, representado no eixo y ;
- ΔZ : grau de desequilíbrio das cargas do sistema, variando de 0 a 0,3 pu (cada um será mostrado em um gráfico separadamente).

Para fins de análise da sensibilidade dos desequilíbrios, a princípio será admitido que o ajuste do detector de faltas será para índices de desequilíbrios de 15% (ou seja, o dispositivo emitiria um sinal de *trip* para resultados acima deste valor, e, obviamente, não detectaria para resultados abaixo). Na seção 4.4.1, a seguir, será explicada a razão da escolha deste valor. Assim, é representada em todos os gráficos uma linha para esse valor, sendo que resultados abaixo dessa linha significam que o parâmetro de desequilíbrio de corrente (α_0 ou α_2) não foi capaz de detectar o defeito.

4.4.1 – CASO A

O caso A, como consta, é a situação ideal, sem defeitos na rede. Foi realizada apenas uma simulação no ATP para cada tipo de carga e os resultados se encontram em tabelas, a seguir.

4.4.1.1 – Subcaso A-1

Nesta situação, as cargas do sistema são representadas por uma configuração estrela aterrada. Tal configuração não é muito usual nas redes elétricas reais, mas é uma situação interessante a ser analisada. A Figura 4.3 representa o subcaso a ser estudado no momento.

Na tabela 4.1, pode-se observar o óbvio, ou seja, à medida que se aumenta o grau de desequilíbrio do sistema, os índices de desequilíbrio de corrente (α_0 e α_2) também aumentam. É possível constatar-se também a igualdade entre os dois índices: as cargas do sistema são aterradas, o que causa, segundo o Método dos Componentes Simétricos, correntes de sequência zero e negativa iguais em módulo. Daí os índices, que dependem dos valores dessas correntes (I_0/I_1 e I_2/I_1) de maneira proporcional e direta, também serem teoricamente iguais (exatamente iguais eles não são devido ao erro inerente ao próprio programa computacional utilizado nas simulações).

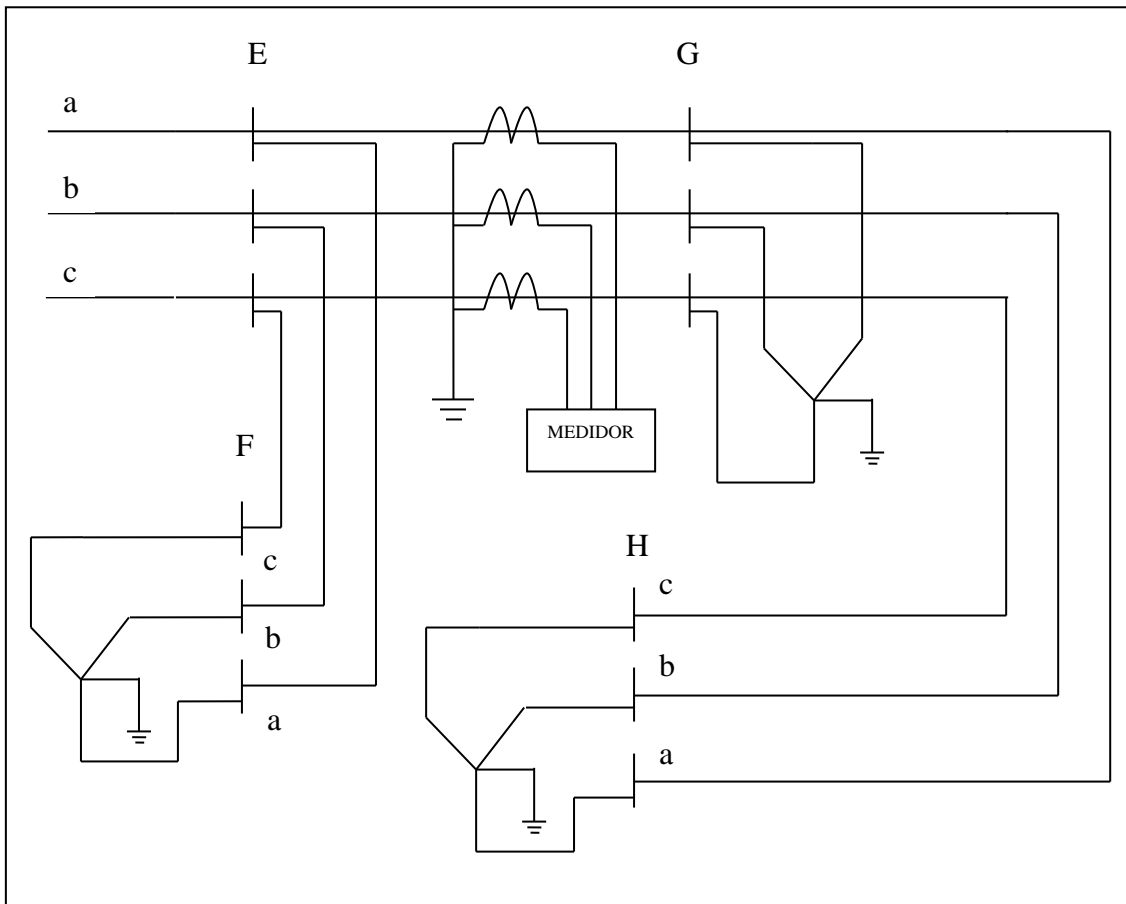


Figura 4.3 – Subcaso A-1.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	0
0,1	5,1	5,0
0,2	10,9	10,8
0,3	16,8	16,5

Tabela 4.1 - Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.

Conforme se pode observar na tabela 4.1, um bom limiar para o detector de FAI seria 15%, uma vez que se pode admitir que o caso de ΔZ (grau de desequilíbrio) igual a 0,3 pu praticamente não ocorreria (segundo explicações constantes no Apêndice B deste trabalho, este grau de desequilíbrio de cargas equivaleria realmente a um desequilíbrio de 0,6 pu entre as fases 1 e 3, sendo, assim, um desequilíbrio muito grande e irreal nos sistemas trifásicos da rede urbana). Portanto, na proposta deste trabalho, para valores de

índices de desequilíbrio (α_0 e α_2) abaixo de 15%, o detector de faltas não acusaria nada, enquanto que para valores acima, ele indicaria a presença de uma FAI.

A tabela 4.2 mostra as correntes nominais resultantes desta análise, em função dos graus de desequilíbrio. Dela, pode-se concluir que a amplitude média da corrente nominal, para esse caso, ficou em torno de 127,6 A (conforme pode ser extraído da média das correntes da tabela).

ΔZ [pu]	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]
0,0	124,9	124,9	124,9
0,1	124,8	114,8	136,8
0,2	124,9	106,2	151,2
0,3	124,9	98,9	168,9

Tabela 4.2 - Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.

Observa-se, portanto, que conforme a corrente na fase diminui/aumenta, a impedância dessa mesma fase aumenta/diminui (respectivamente), pois foi justamente essa a proposta anteriormente apresentada para se aplicar graus de desequilíbrio num sistema previamente equilibrado.

4.4.1.2 – Subcaso A-2

Nesta hipótese, tem-se a configuração das cargas do sistema em delta, o que representa mais verdadeiramente um sistema real, típico na rede elétrica brasileira, uma vez que a maioria dos transformadores de distribuição são ligados em delta (13,8 kV)/estrela aterrado (220 V). Este subcaso está representado na figura 4.4, abaixo.

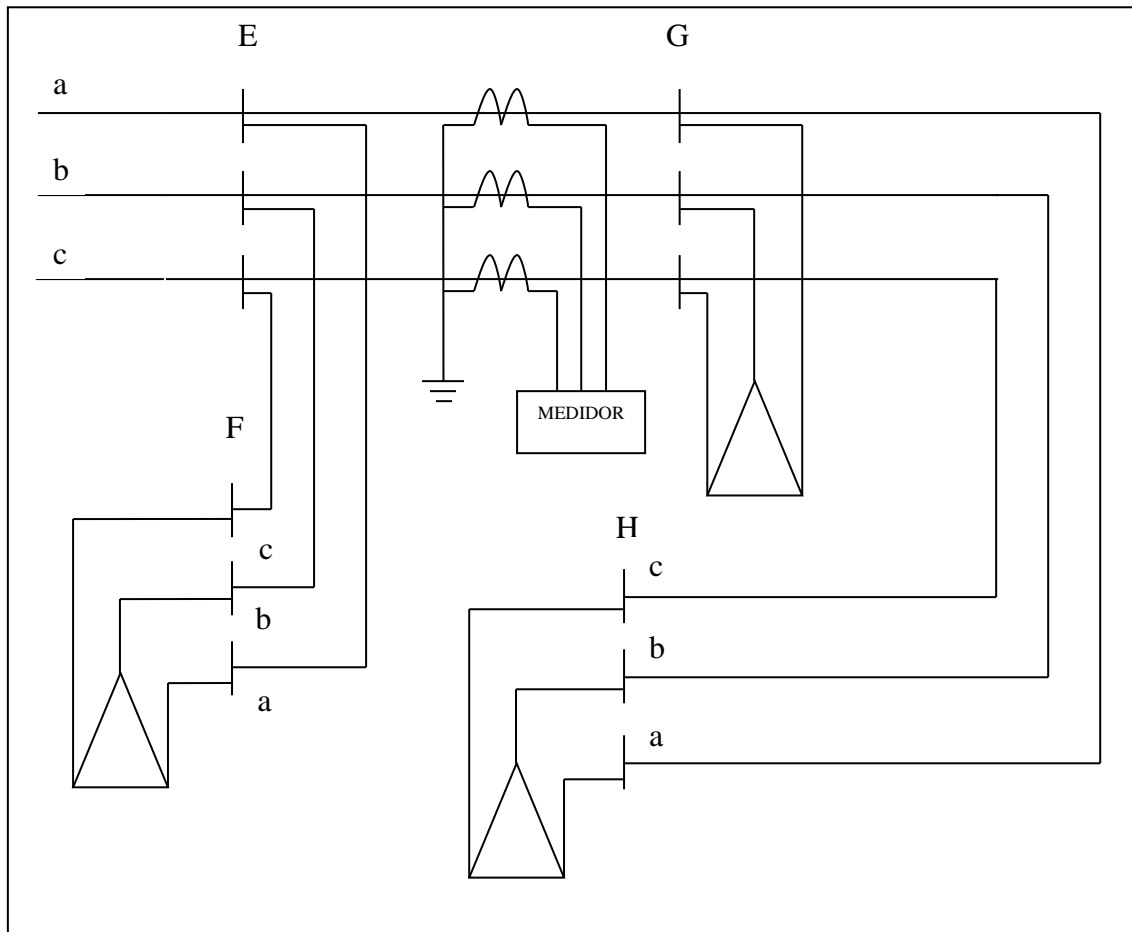


Figura 4.4 – Subcaso A-2.

A seguir, pode-se observar o seguinte: a configuração das cargas do sistema é delta, não possuindo aterramento, o que causa, segundo o Método dos Componentes Simétricos, correntes de sequência zero e negativa diferentes entre si em módulo. E mais, como não há caminho para as correntes de sequência zero, logo essas correntes serão nulas e o índice de desequilíbrio dependente dessas variáveis será também igual a zero. Daí os resultados nulos para α_0 . Já as correntes de sequência negativa circulam, e assim seus valores são diferentes de zero. Assim, na tabela 4.3 apenas o índice de desequilíbrio de sequência negativa é diferente de *zero*.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	0
0,1	0	5,39
0,2	0	10,91
0,3	0	16,75

Tabela 4.3 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.

Pode-se dizer que a corrente nominal para esse caso ficou em torno de 127,9 A, conforme pode ser extraído da média das correntes da tabela 4.4:

ΔZ [pu]	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]
0,0	124,9	124,9	124,9
0,1	126,9	130,5	119,5
0,2	131,6	137,4	115,0
0,3	139,2	146,3	111,1

Tabela 4.4 – Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.

4.4.1.3 – Subcaso A-3

Nesse grupo de casos, mantém-se a configuração das cargas do sistema em delta, porém se acrescenta dois bancos de capacitores (um banco no ponto H e outro no ponto D do sistema), ambos com suas fases c abertas. Este subcaso está representado na figura 4.5, a seguir. Para obter o mesmo efeito de uma fase aberta no banco de capacitores, foi adicionado ao parâmetro de capacitância do banco, no ATP, o valor de 1 farad, ou seja, aproximadamente zero. Isso significa uma reatância capacitiva tendente a infinito, e portanto, um ramo aberto do banco de capacitores.

Na tabela 4.5, pode-se observar o seguinte: como a representação da configuração das cargas do sistema está em delta, ou seja, sem aterramento, segundo o Método dos Componentes Simétricos, apenas existem correntes sequência negativa. E mais, como não há caminho para as correntes de sequência zero, logo essas correntes serão nulas e o índice de desequilíbrio dependente dessas variáveis será também igual a zero. Daí os resultados nulos para α_0 . Já as correntes de sequência negativa circulam, e assim seus valores são diferentes de zero. Serão, pois, mostrados na tabela 4.5.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	8,2
0,1	0	10,7
0,2	0	14,5
0,3	0	19,3

Tabela 4.5 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema, com fase C do banco de capacitores aberta.

Ressalta-se que a fase do banco aberta é a fase c, ou seja, o valor da capacitância dessa fase é nulo.

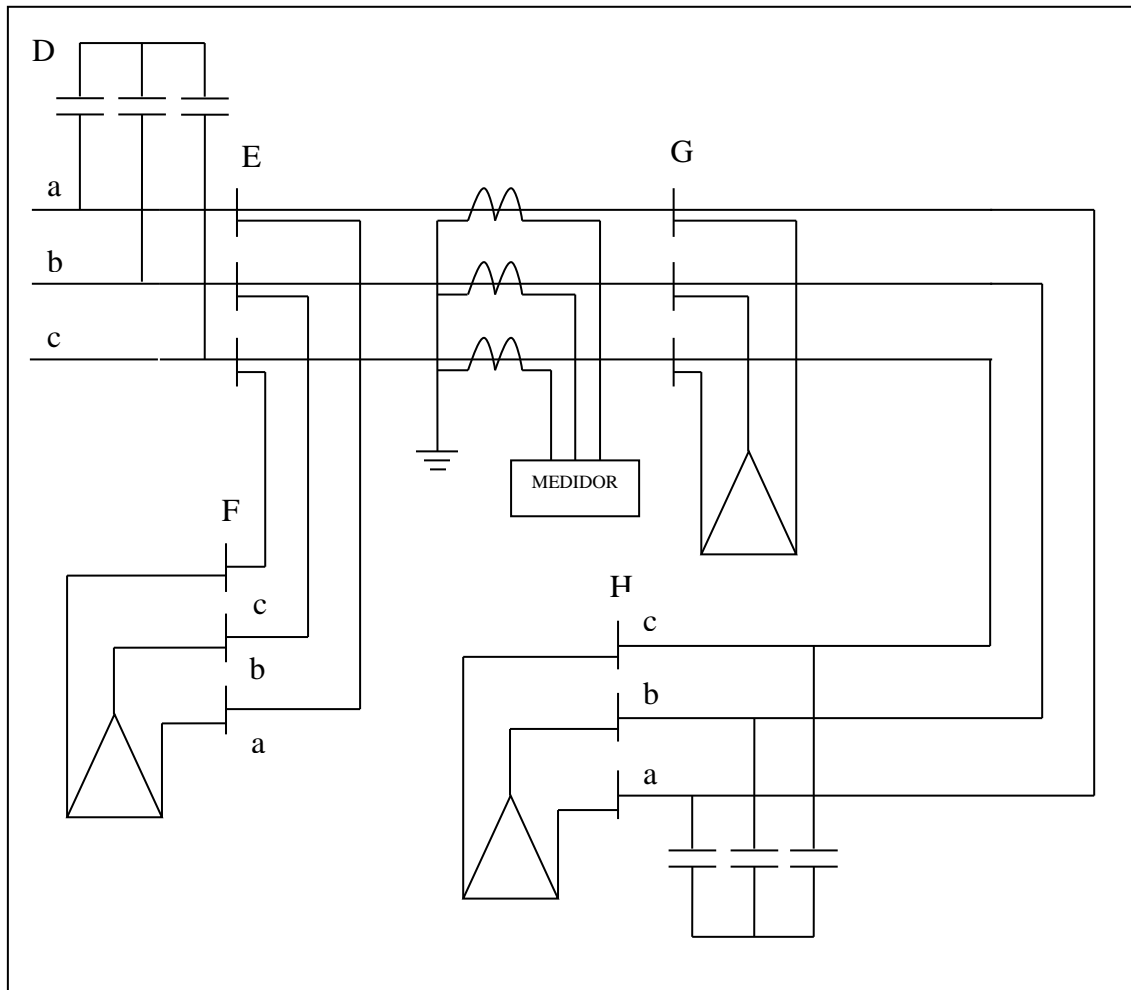


Figura 4.5 – Subcaso A-3.

Pode-se dizer que a corrente nominal para esse caso ficou em torno de 127,6 A, conforme pode ser extraído da média das correntes da tabela 4.6:

ΔZ [pu]	I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]
0,0	115,8	132,7	124,9
0,1	118,9	138,0	119,4
0,2	124,7	144,6	114,8
0,3	133,5	153,0	110,9

Tabela 4.6 – Correntes nominais em função do grau de desequilíbrio do sistema.

Como curiosidade, abriu-se outra fase do banco, a fase a, e os seguintes valores de desequilíbrio de corrente foram encontrados, conforme tabela 4.7.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	8,3
0,1	0	3,6
0,2	0	5,0
0,3	0	10,9

Tabela 4.7 - Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema, com fase A do banco de capacitores aberta.

Observa-se que os resultados encontrados para α_2 foram menores do que aqueles para a capacitância nula na fase c. Os próximos casos terão como base as tabelas anteriores a esta, ou seja, a fase aberta dos bancos sendo a fase c, não coincidente com as fases defeituosas (a e b) do sistema.

4.4.2 – CASO B

No caso B, ocorre uma falta fase-terra e os condutores se rompem, indo de encontro ao solo ou encostando em objeto externo, apenas do lado da fonte. A modelagem para o solo se deu da forma mais simples possível uma vez que o foco das simulações era o medidor de desequilíbrio, ou seja, os índices de desequilíbrio propriamente ditos. Conforme análise anterior, cada subcaso tratará de uma configuração diferente do sistema, mais especificamente, do transformador de distribuição. Os resultados se encontram em gráficos, presentes nas subseções a seguir.

4.4.2.1 – Subcaso B-1

A representação deste subcaso encontra-se na figura 4.6, a seguir.

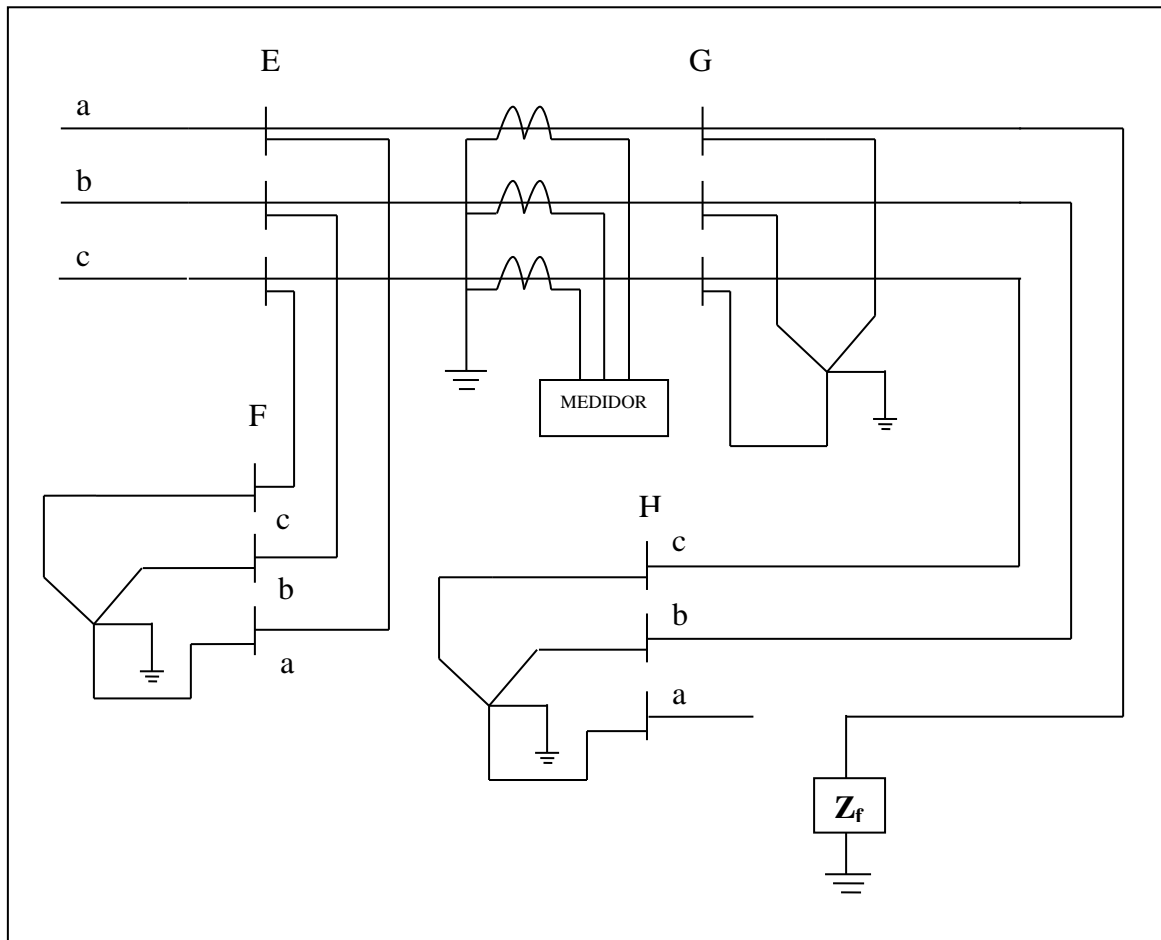


Figura 4.6 – Subcaso B-1.

Conforme gráficos a seguir (figuras 4.7 a 4.10), pode-se observar o comportamento dos índices de desequilíbrio α_0 e α_2 à medida que se aumenta:

(a) o grau de desequilíbrio da carga do sistema (conforme se muda de figura (figura 4.7: ($\Delta Z=0,0$ pu); figura 4.8: ($\Delta Z=0,10$ pu); figura 4.9: ($\Delta Z=0,20$ pu); figura 4.10: ($\Delta Z=0,30$ pu);)) e

(b) a impedância de falha (conforme aumentam-se as abscissas numa mesma figura), ou seja, diminui-se a corrente de falha, aproximando-se assim de uma falha de alta impedância.

De uma maneira geral, à medida que o grau de desequilíbrio do sistema aumenta, também aumentam os valores encontrados para os índices de desequilíbrio, excetuando-se, nesta regra, alguns pontos, conforme será comentado a seguir.

Na figura 4.9, onde o grau de desequilíbrio das cargas é nulo, os pontos de impedâncias de falta iguais a 50 e 75 Ω indicam que os níveis de índices de desequilíbrio ficaram abaixo de 15% (impossibilitando que o dispositivo detecte o defeito, caso seu ajuste para *trip* seja ajustado para 15%). Para $Z_f = 50 \Omega$, a corrente de falta será de 159,4 A (vide Apêndice C), ou seja, 27,6% maior que a nominal de 124,9 A. Para $Z_f = 75 \Omega$, a corrente de falta será de 112,3 A, ou seja, 29,6% menor que a corrente nominal. Talvez algum dispositivo da proteção convencional consiga detectar o primeiro caso como uma sobrecorrente mas, no segundo, esta proteção falhará, pois a corrente está basicamente em torno da nominal, o que caracteriza tipicamente certas faltas de alta impedância (ressaltando que seus valores podem chegar até perto de 0 A).

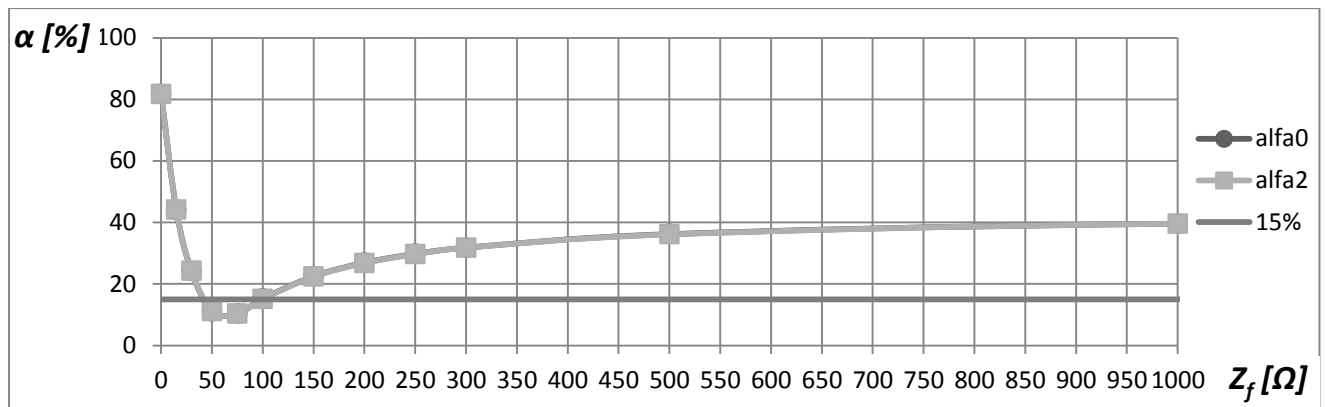


Figura 4.7 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

Outros pontos desfavoráveis à detecção das FAI, caso o ajuste de α_2 seja em 15%, são os seguintes:

- Na figura 4.10 (grau de desequilíbrio da carga: 0,1 pu) e impedâncias de falta de 50, 75 e 100 Ω ;
- Na figura 4.11, (grau de desequilíbrio da carga: 0,2 pu) e impedâncias de falta de 50 e 75 Ω ;
- Na figura 4.12, (grau de desequilíbrio da carga: 0,3 pu) e impedâncias de falta de 50 e 75 Ω .

Embora esses pontos estejam em destaque, eles não requerem bastante cautela, uma vez que, pelo menos α_0 é capaz de detectar a falta (enquanto que α_2 deixou a desejar).

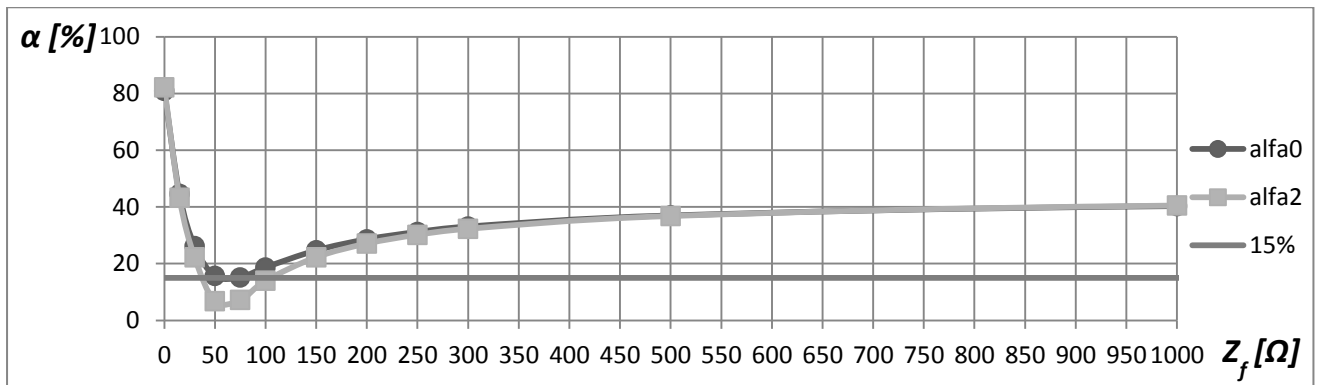


Figura 4.8 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,1$ pu).

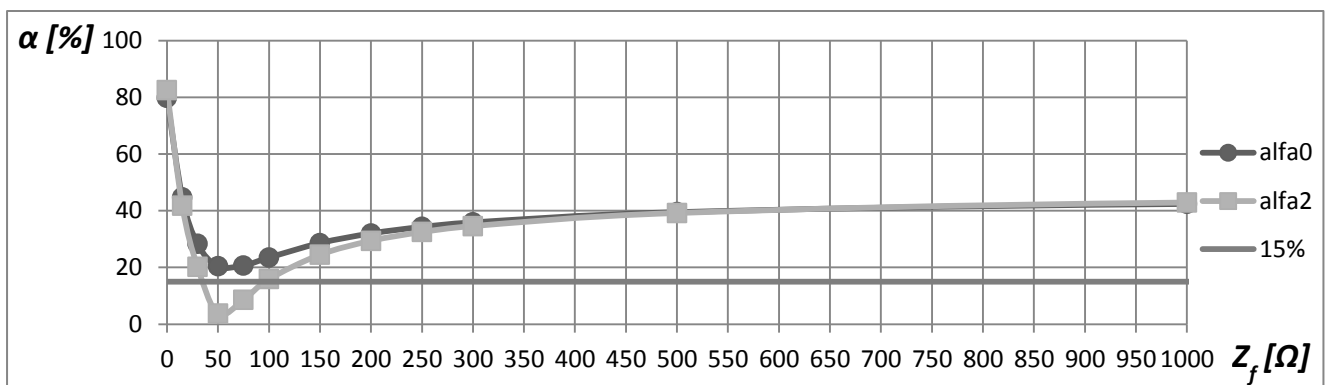


Figura 4.9 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

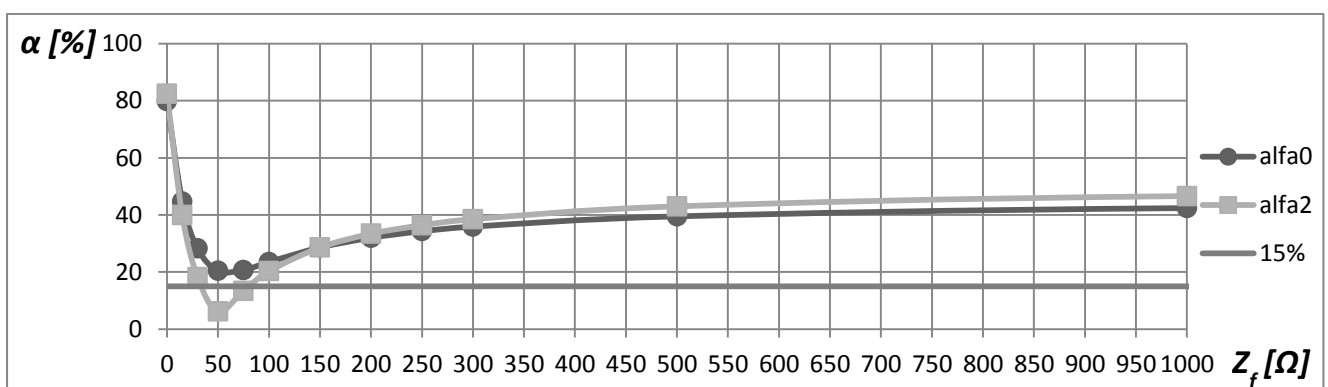


Figura 4.10 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,3$ pu).

Interessante observar, para o subcaso em questão, que os pontos mais sensíveis estão na ocorrência das faltas que geram correntes sempre próximas à nominal, ou seja, para impedâncias de falta sempre de valores iguais a 50 e 75 Ω .

4.4.2.2 – Subcaso B-2

Neste caso, tal como para B-1, tem-se que o condutor vai ao chão apenas do lado fonte do sistema. Porém, agora, a configuração das cargas do sistema é delta. Representa-se a situação na figura 4.11, a seguir.

A fase que sofrerá o defeito ora proposto será a fase a do sistema. Os resultados encontrados estarão ordenados, por ordem de grau de desequilíbrio aplicado ao sistema (ΔZ), nos gráficos das figuras 4.12 a 4.15.

Observa-se que, conforme já determinado anteriormente, os pontos abaixo da curva de 15% (pontos da curva azul – α_0 – nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15) merecem atenção, mas não implicam em ausência de detecção pelo dispositivo, uma vez que a detecção também depende do valor do outro índice (α_2), resultando este em valores bem aceitáveis (acima de 15%), de acordo com os resultados mostrados a seguir.

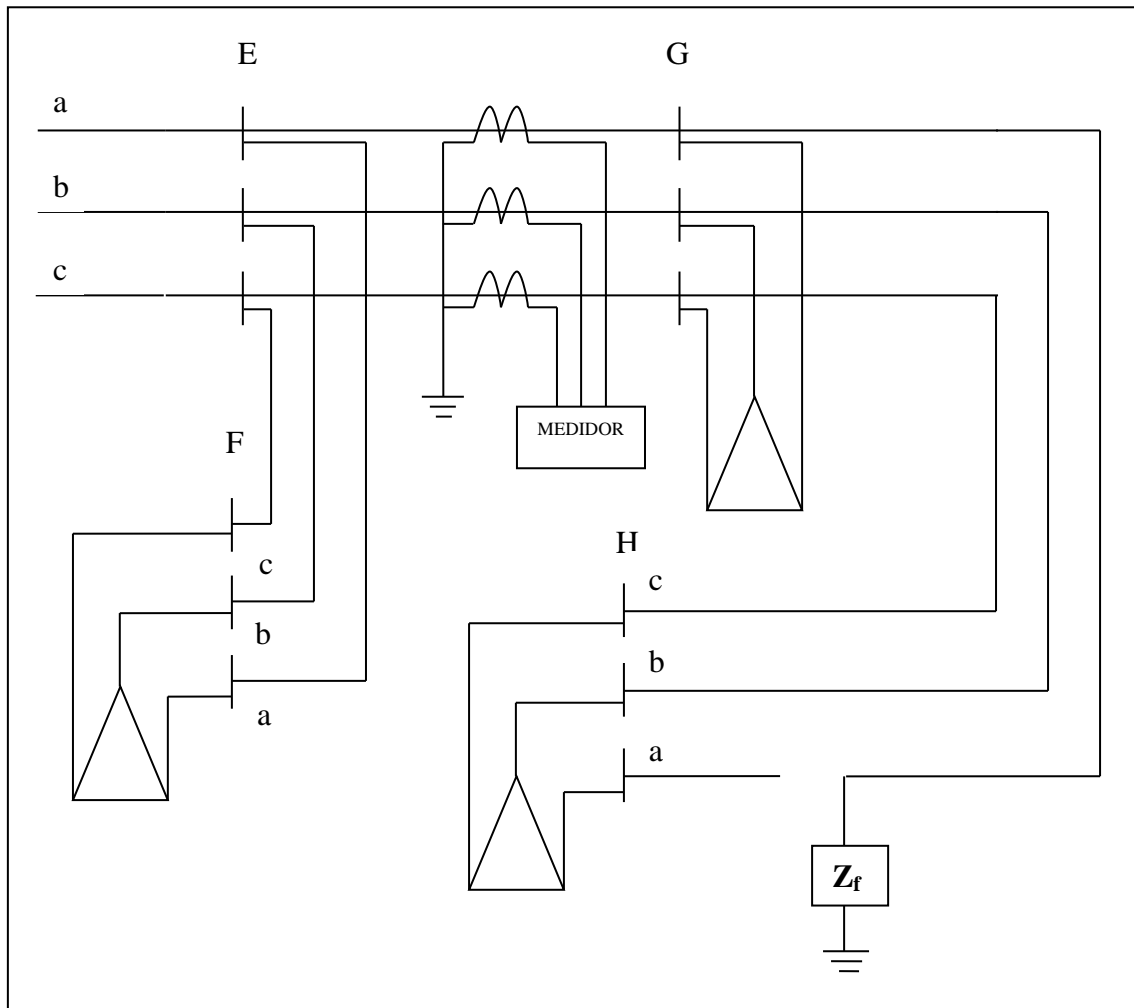


Figura 4.11 – Subcaso B-2.

Observa-se também que, diferentemente do caso B-1, os valores dos índices, à medida que se aplica diferentes graus de desequilíbrio ao sistema (conforme muda-se de figura), variam muito pouco, permanecendo praticamente constantes. Esta seria uma curiosidade entre os dois casos, lembrando que a única diferença entre os mesmos está na configuração das cargas do sistema (caso B-1 em estrela e caso B-2, atual, em delta).

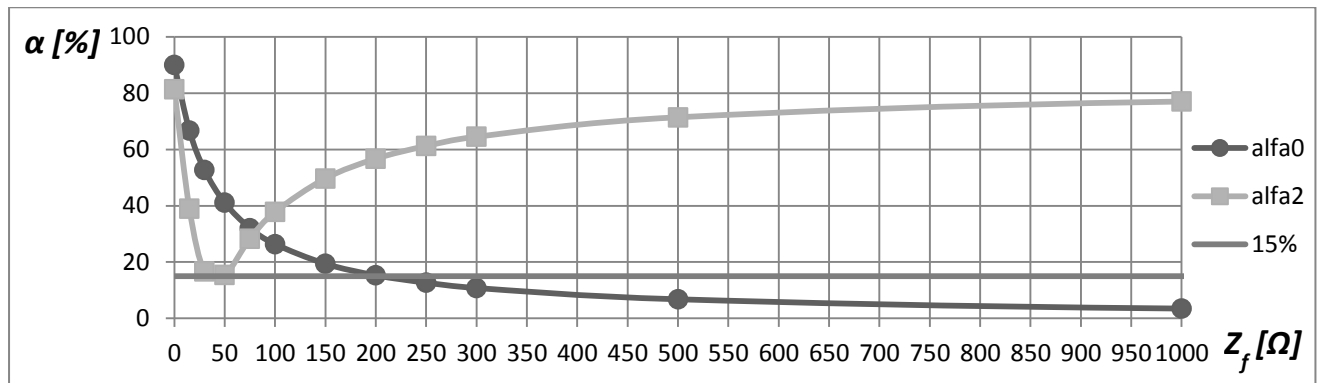


Figura 4.12 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

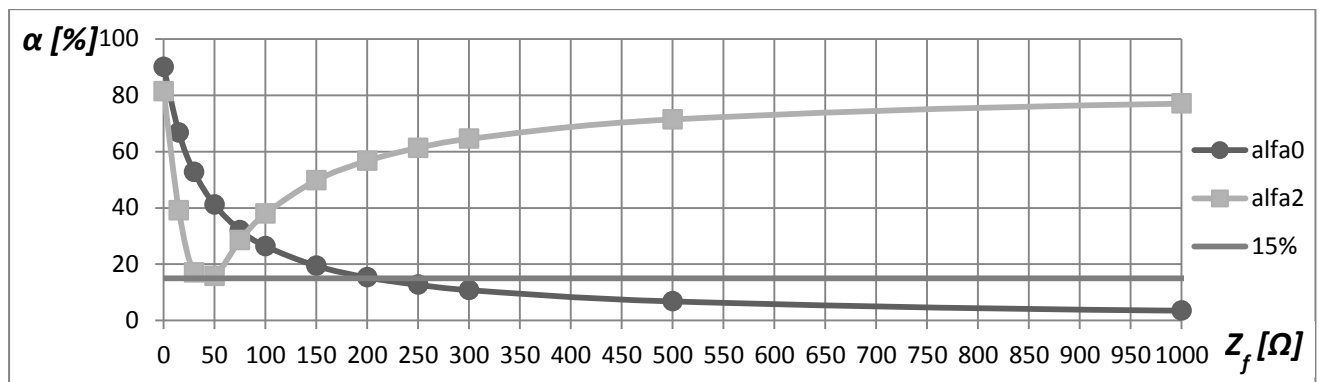


Figura 4.13 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).

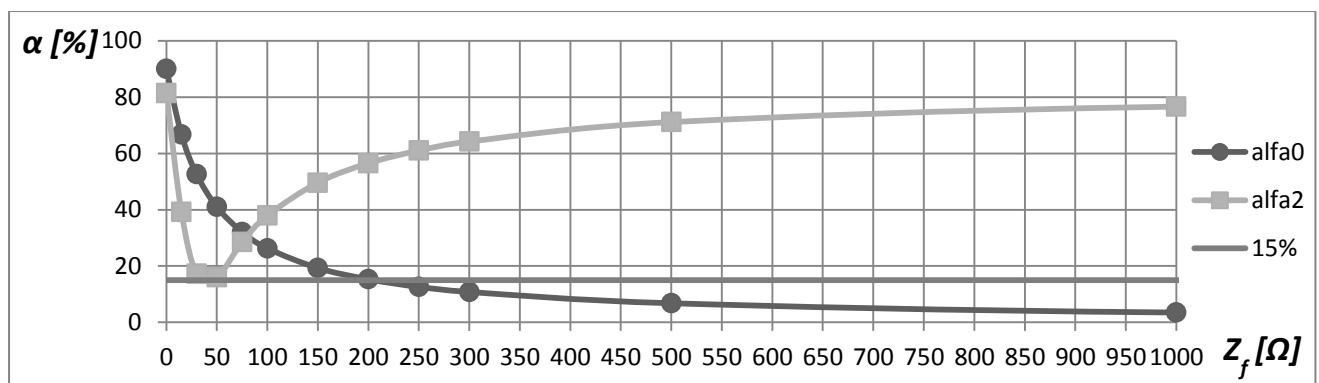


Figura 4.14 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).

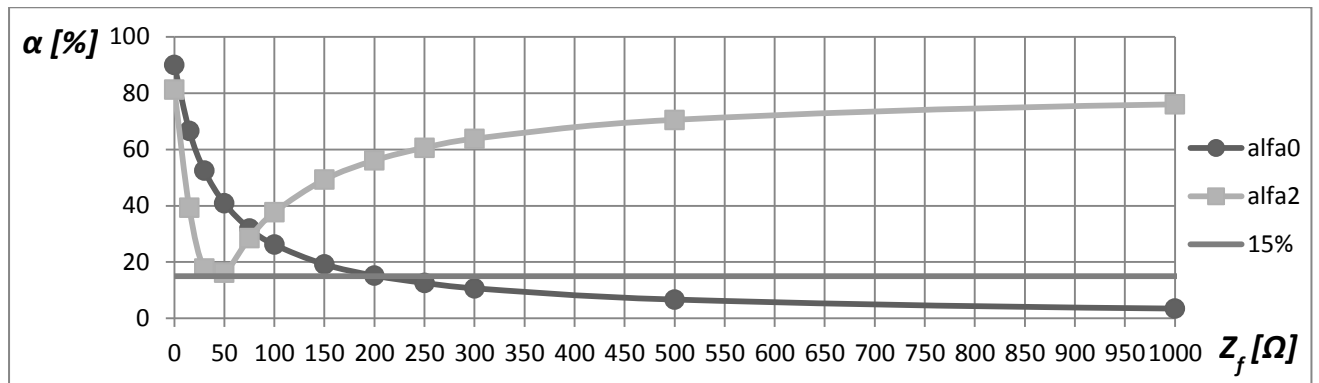


Figura 4.15 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.2.3 – Subcaso B-3

Neste subcaso, tal como para B-1 e B-2, o defeito fase-terra aplicado causará a queda dos condutores do lado fonte do sistema. Assim, o lado fonte da fase a irá de encontro ao solo, conforme representado na figura 4.16. Mantém-se a configuração delta para as cargas do sistema.

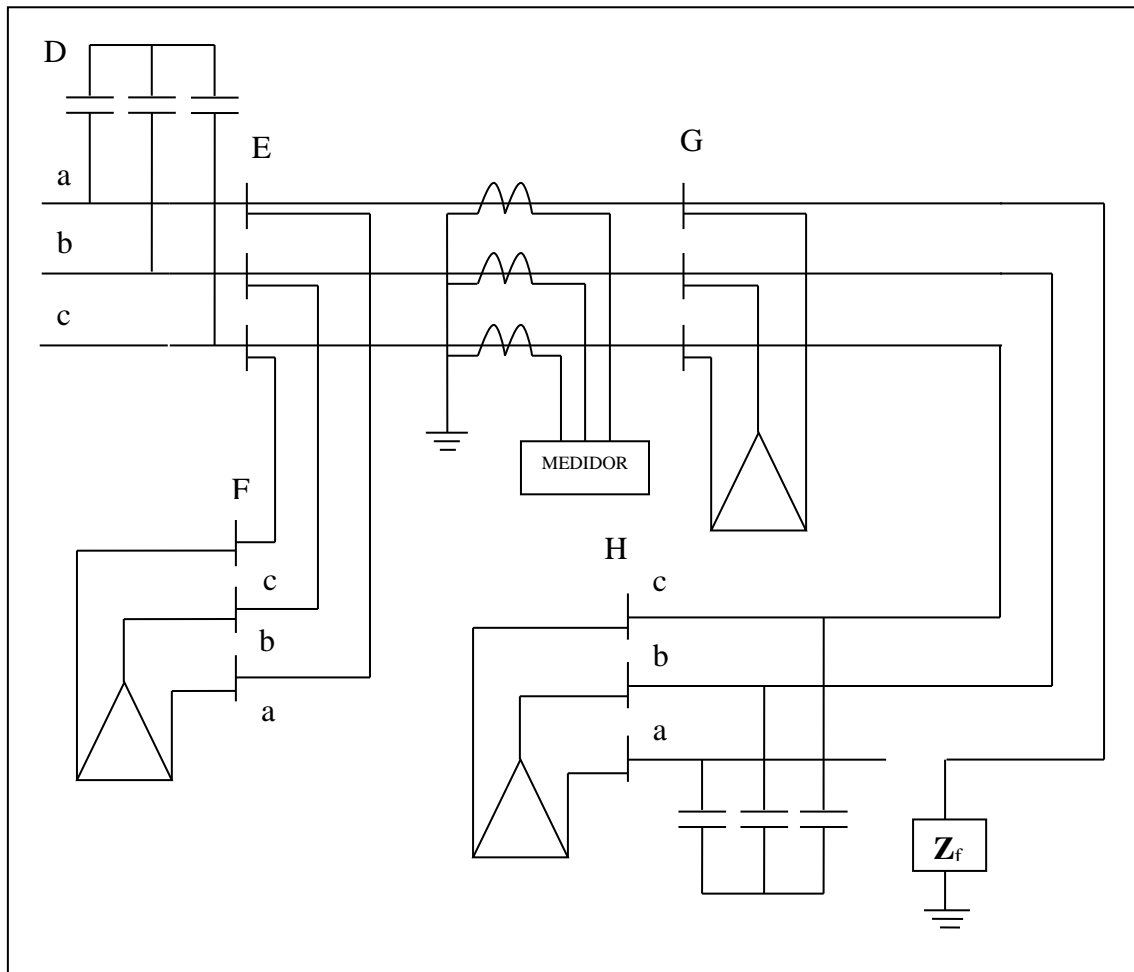


Figura 4.16 – Subcaso B-3.

Os resultados para as simulações deste sistema se encontram nas figuras 4.17 a 4.20, novamente separados pelos graus de desequilíbrio da carga, à medida que se muda de figura.

Neste subcaso, em relação ao que já se mostrou, não há nada importante a acrescentar: os valores praticamente permaneceram iguais com a mudança de grau de desequilíbrio do sistema. Os valores encontrados satisfazem o limite de 15%, uma vez que sempre se tem um dos dois índices acima da curva desse limite, sendo que a detecção propõe a utilização de ambos os parâmetros.

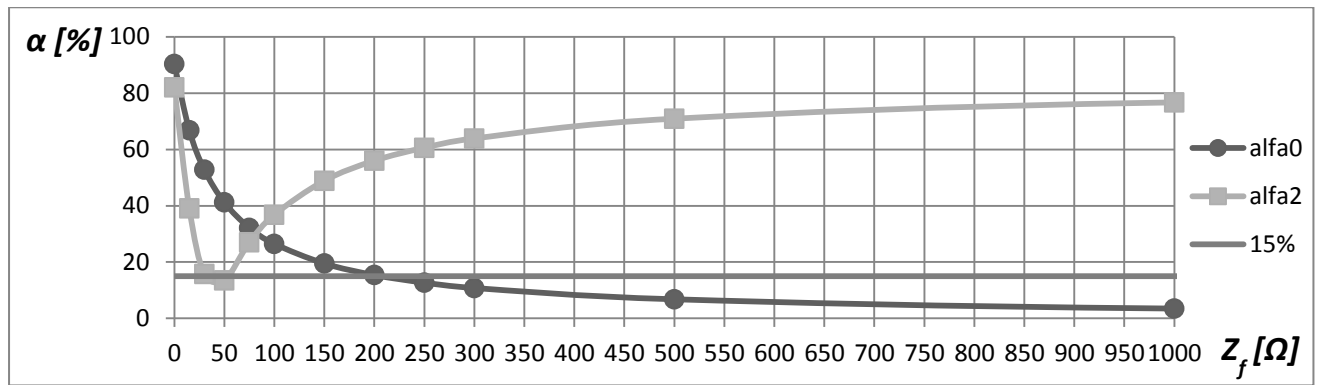


Figura 4.17 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z = 0,0$ pu).

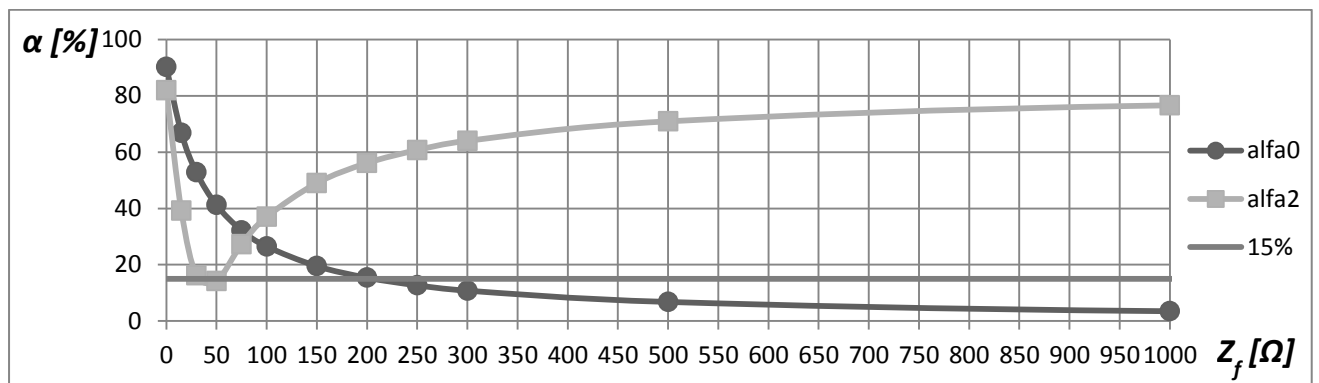


Figura 4.18 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

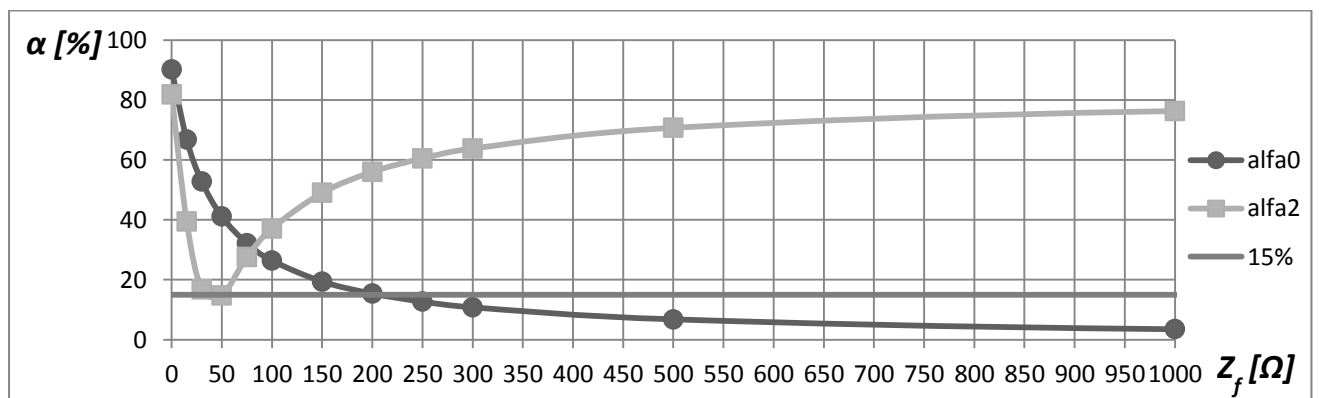


Figura 4.19 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

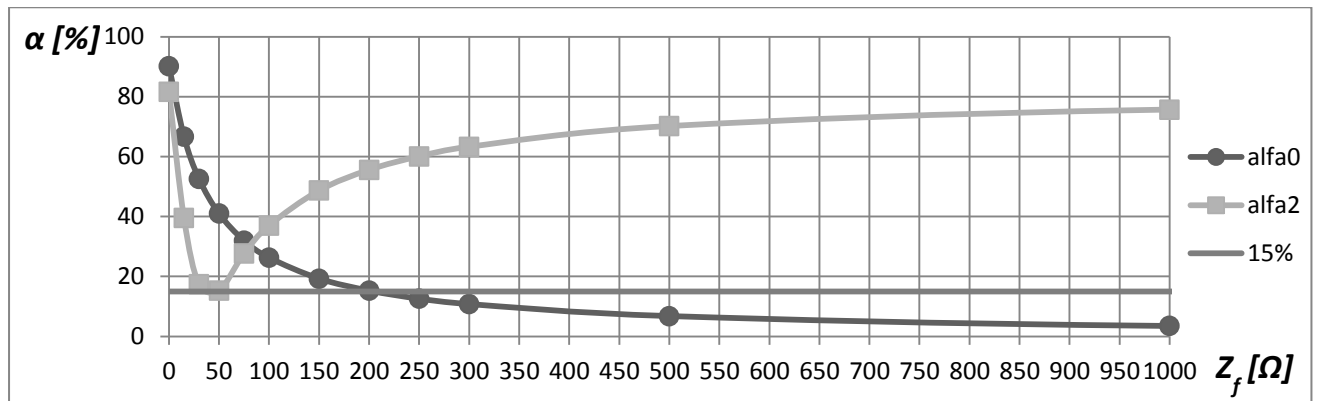


Figura 4.20 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.3 – CASO C

No caso C, os condutores se rompem, indo de encontro ao solo, do lado da carga. Este caso, assim como os anteriores, se dividirá em três análises, a primeira para configuração estrela aterrado das cargas do sistema, a segunda para configuração delta das cargas do sistema e a terceira para a presença de bancos de capacitores com uma fase aberta.

4.4.3.1 – Subcaso C-1

Este subcaso pode ser ilustrado conforme mostra figura 4.21.

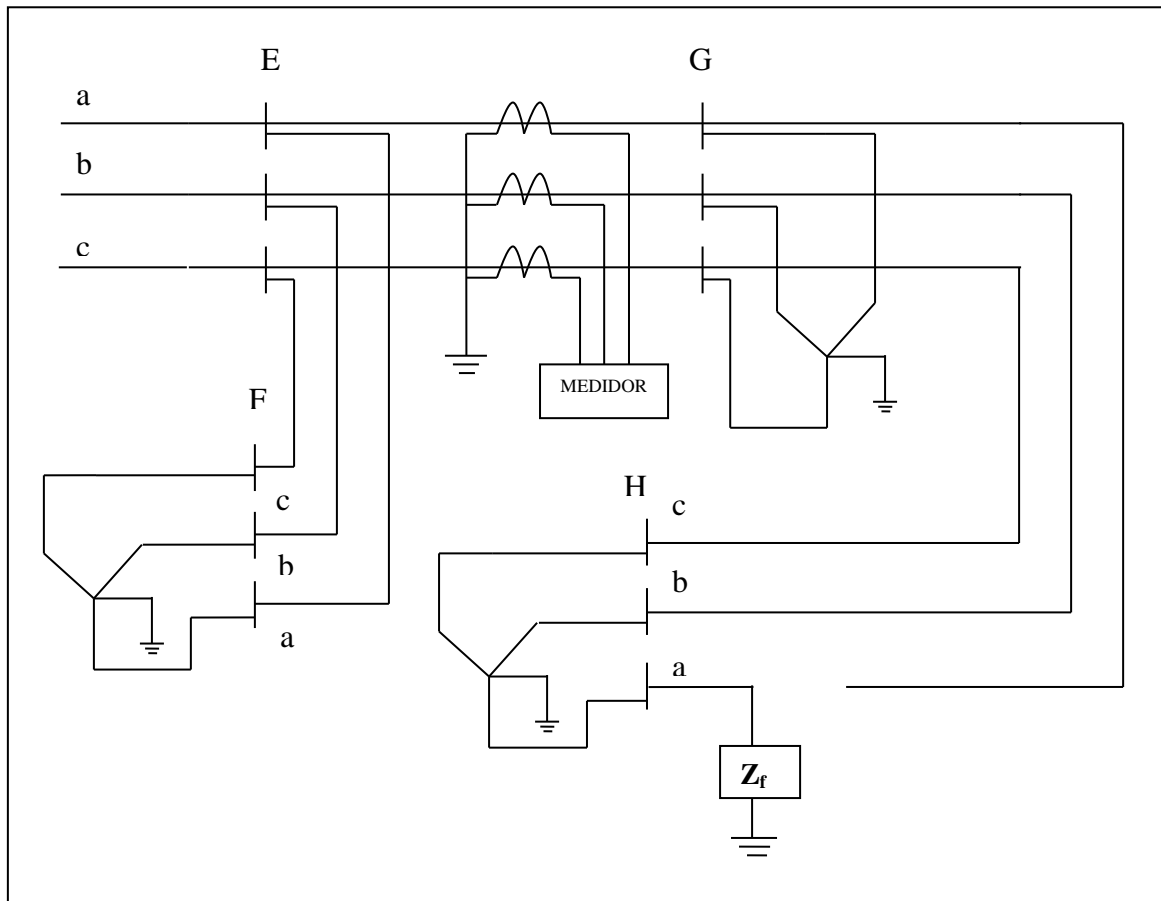


Figura 4.21 – Subcaso C-1.

De acordo com os gráficos nas figuras de 4.22 a 4.25, pode-se observar o comportamento dos índices de desequilíbrio α_0 e α_2 à medida que se muda o grau de desequilíbrio do sistema (cada figura refere-se a um grau de desequilíbrio da carga). Também, à medida que se aumenta a impedância de falta (aumentam-se as abscissas numa mesma figura), ou seja, diminui-se a corrente de falta, aproximando-se assim de uma falta de alta impedância.

A partir da análise dos gráficos, observa-se que os valores dos índices de desequilíbrio independem da impedância de falta, relacionando-se apenas com o grau de desequilíbrio do sistema. À medida que se aumenta o grau de desequilíbrio, também crescem os valores para ambos os índices.

Usando uma aproximação modesta, pode-se dizer, inclusive, que os valores para esse defeito se apresentaram tipicamente em torno de 50%. Isso não acontece na análise de nenhum outro tipo de defeito presente nesta dissertação.

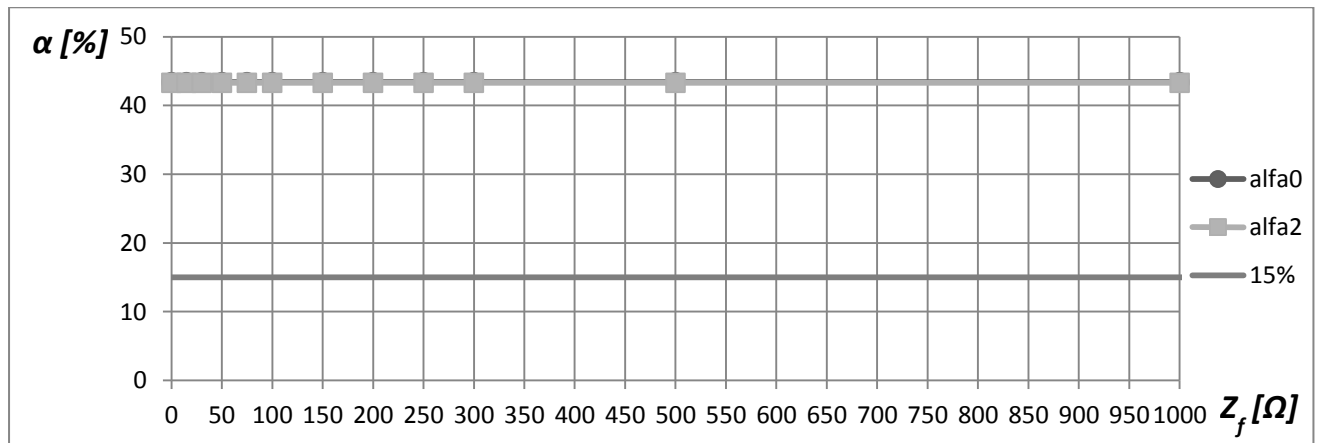


Figura 4.22 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

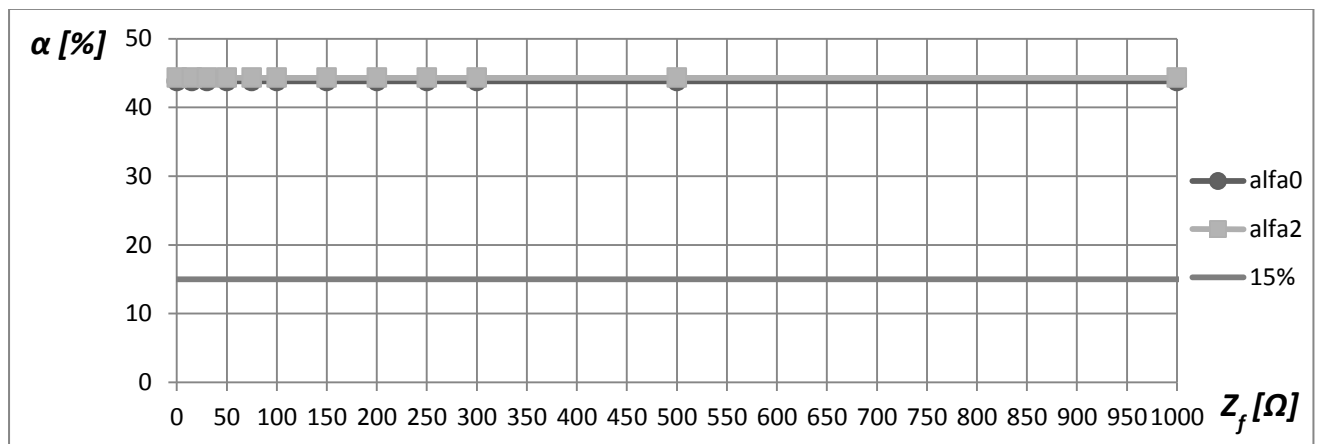


Figura 4.23 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).

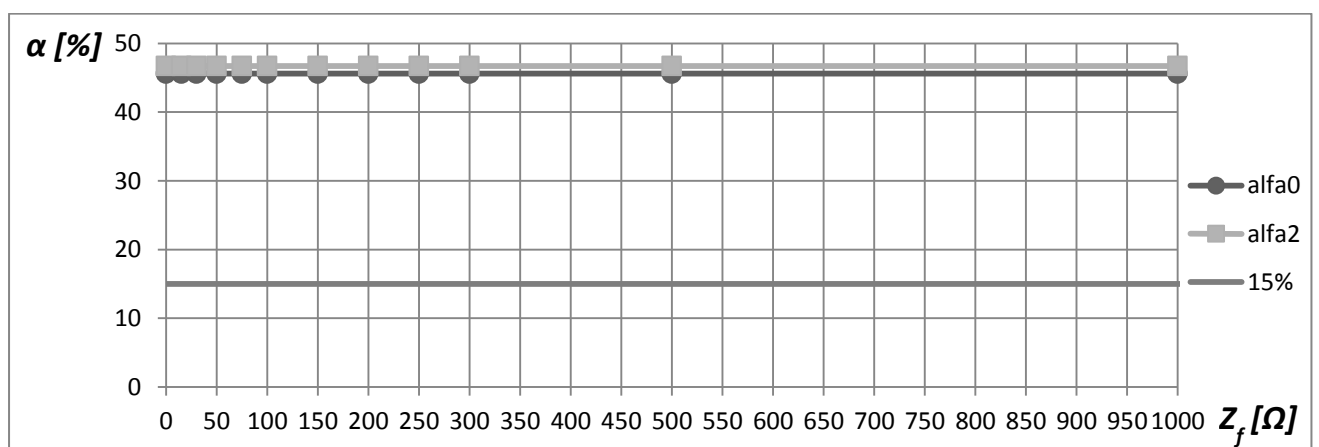


Figura 4.24 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).

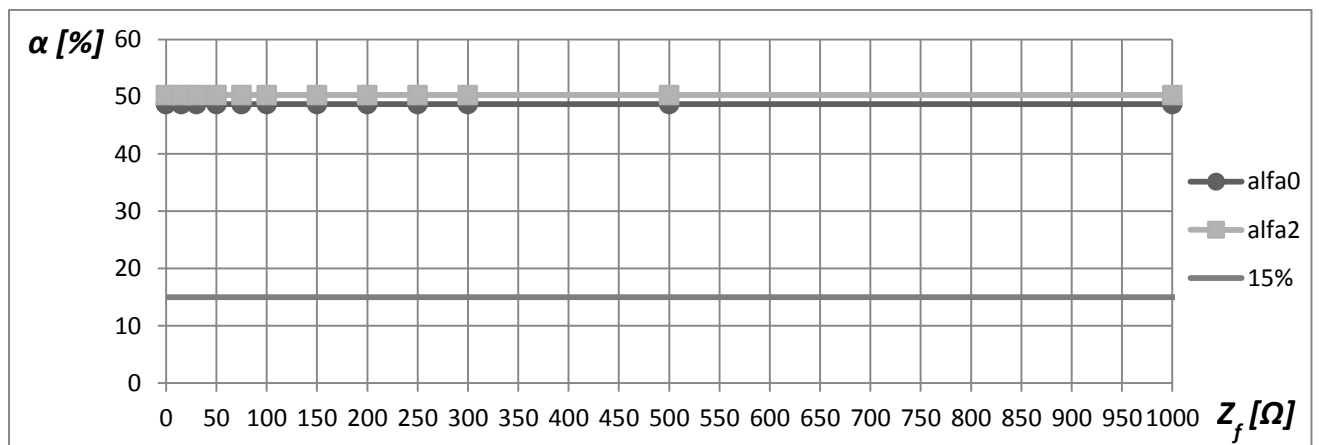


Figura 4.25 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.3.2 – Subcaso C-2

Conforme já dito antes, em todos os casos C, o condutor rompido que vai ao chão está localizado do lado carga. Neste subcaso C-2, a configuração das cargas do sistema é delta. Apesar desta se parecer com a situação em 4.4.2.2, o fato de o condutor cair do lado fonte ou do lado carga resultará em valores diferentes de índices. A figura 4.26 ilustra a situação proposta.

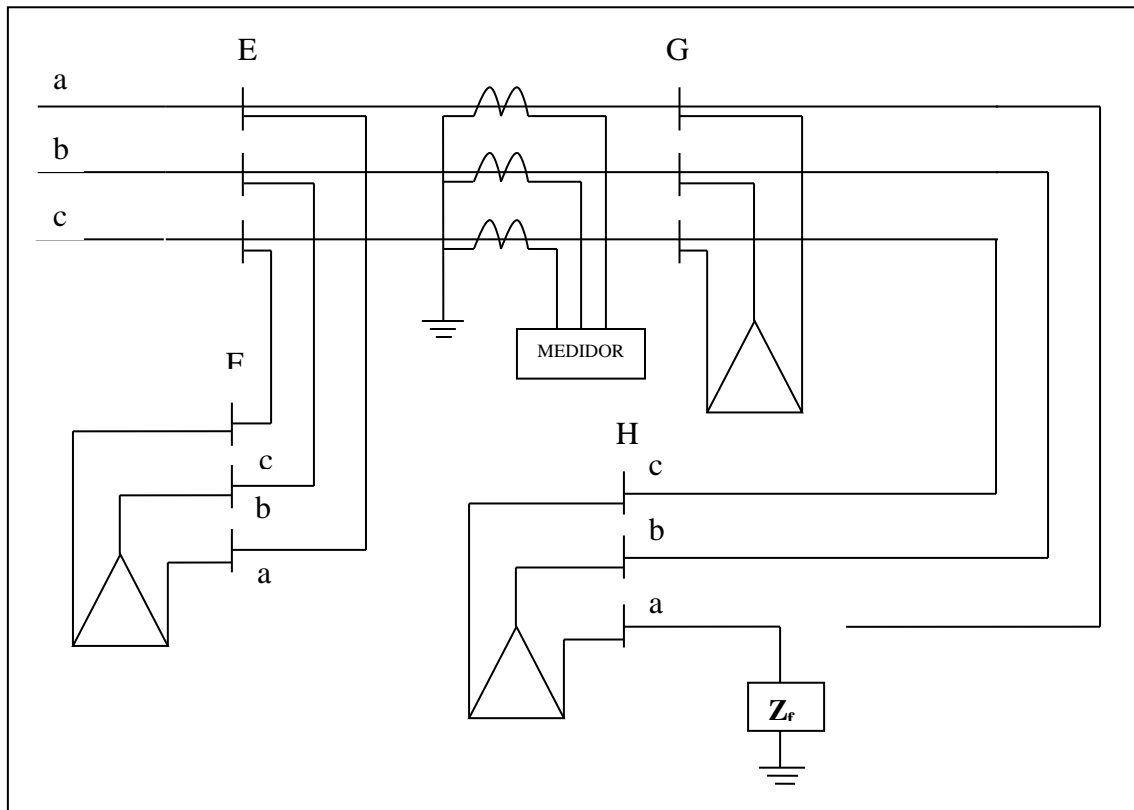


Figura 4.26 – Subcaso C-2.

Para a situação de falta fase-terra na fase a, têm-se os resultados nos gráficos das figuras 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30.

A partir da análise dos gráficos, conclui-se que, apesar dos pontos abaixo da curva de 15%, apenas um dos índices falha na detecção do defeito. Como o sistema detector depende também da outra variável, α_2 , esta acaba resultando em valores bem acima do limite imposto, detectando, com folga, os casos para esse tipo de defeito.

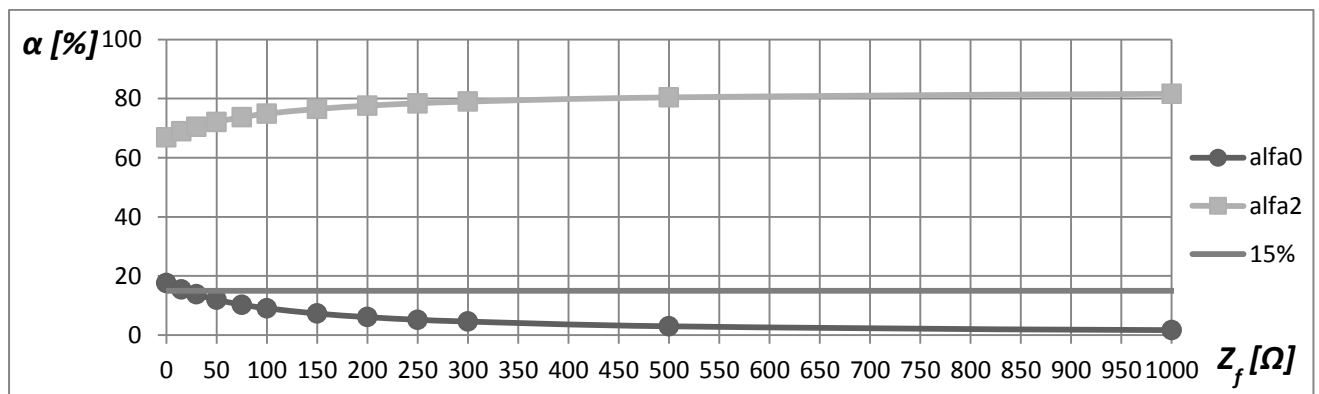


Figura 4.27 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

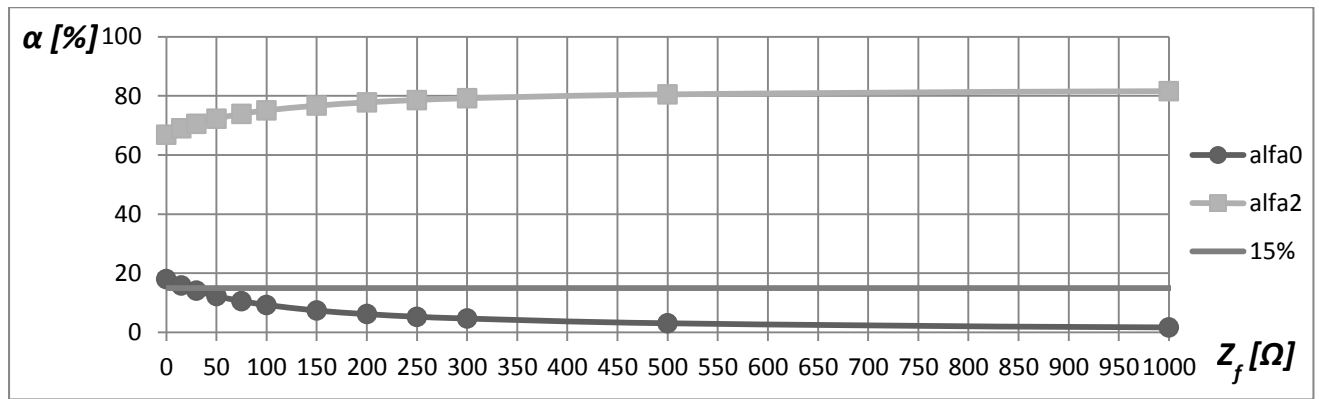


Figura 4.28 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,1$ pu).

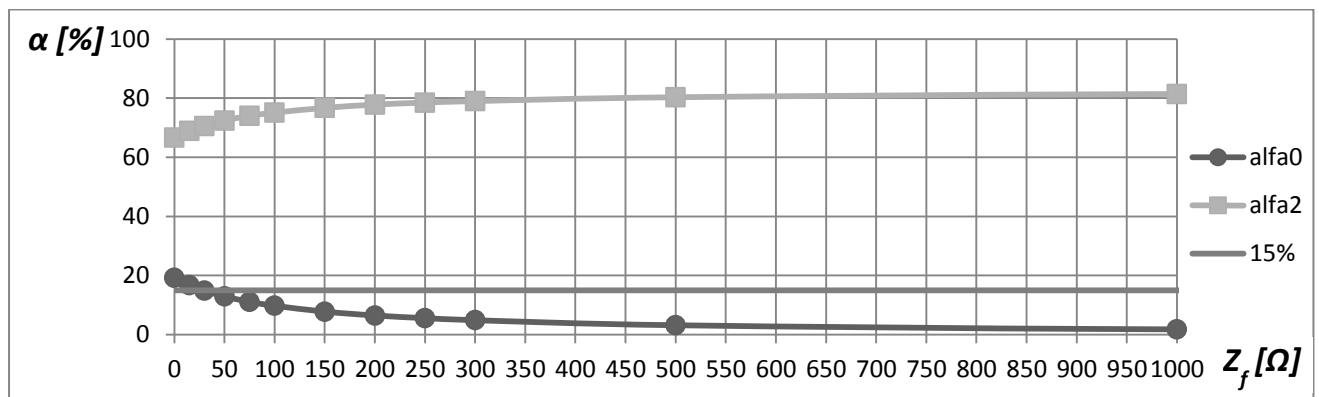


Figura 4.29 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

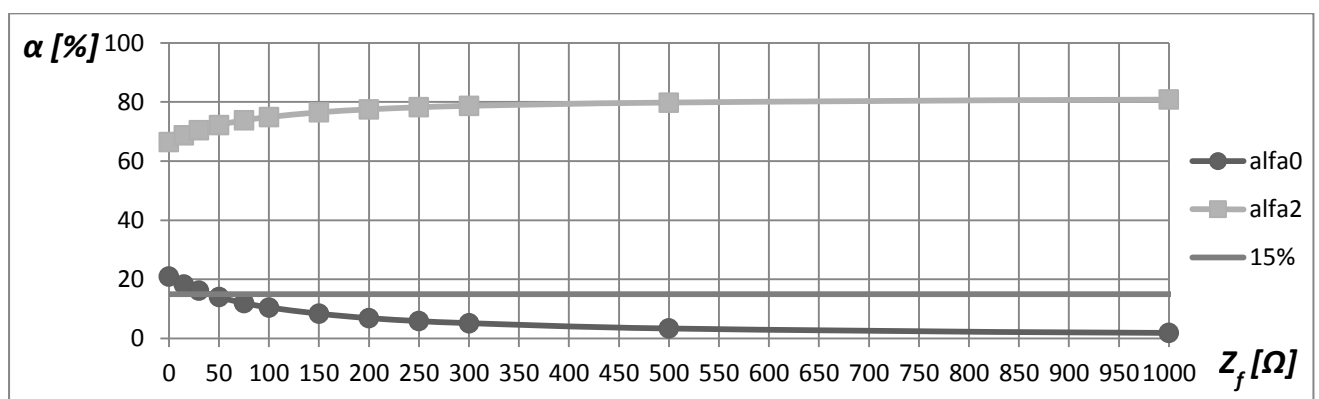


Figura 4.30 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,3$ pu).

4.4.3.3 – Subcaso C-3

Neste subcaso, os capacitores estão presentes, mantém-se a configuração das cargas do sistema em delta, e a falta ocorre levando à queda do condutor do lado carga. Essa situação está ilustrada na figura 4.31.

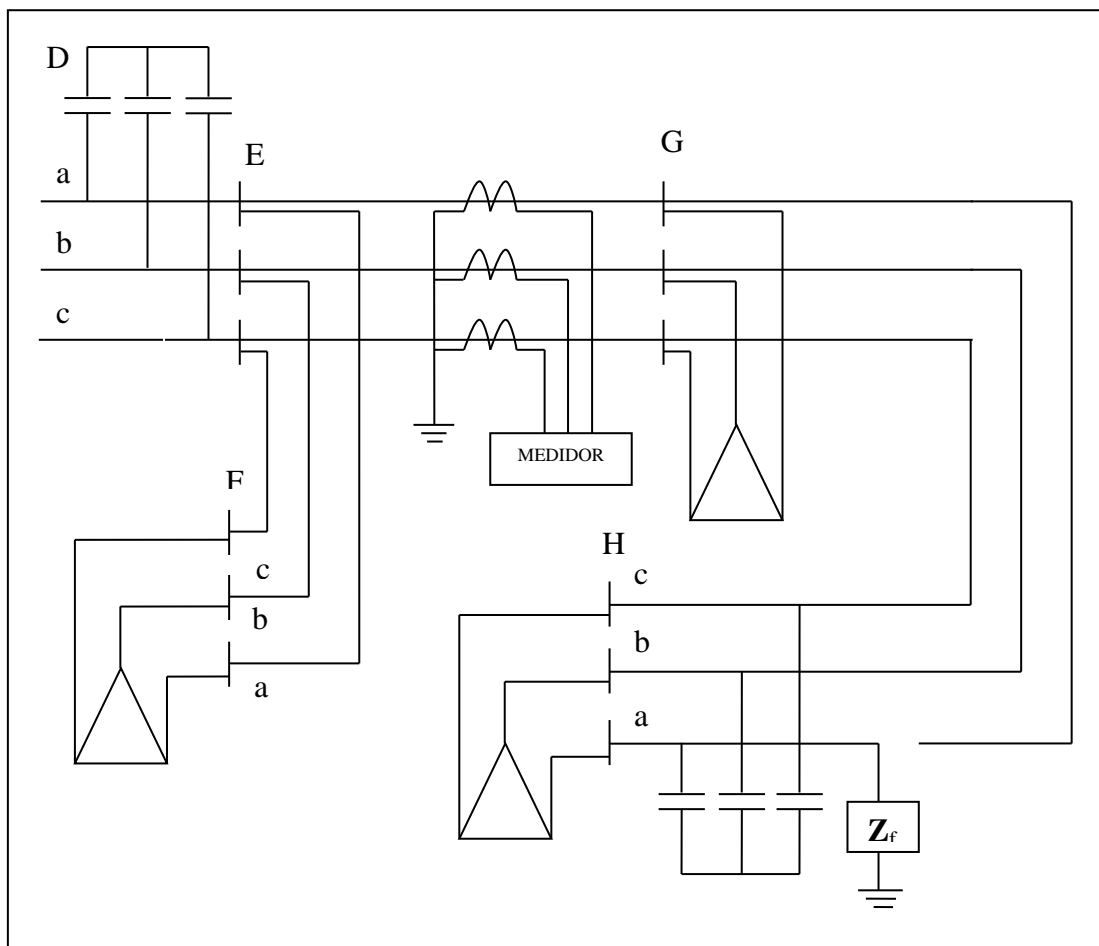


Figura 4.31 – Subcaso C-3.

Os resultados são mostrados nas figuras 4.32 a 4.35.

Observa-se que a maioria dos resultados para α_0 se mostraram abaixo do valor limite de 15%. No entanto, isso não leva a nenhuma complicação, uma vez que os resultados para α_2 mostram-se notavelmente acima do valor limite estipulado.

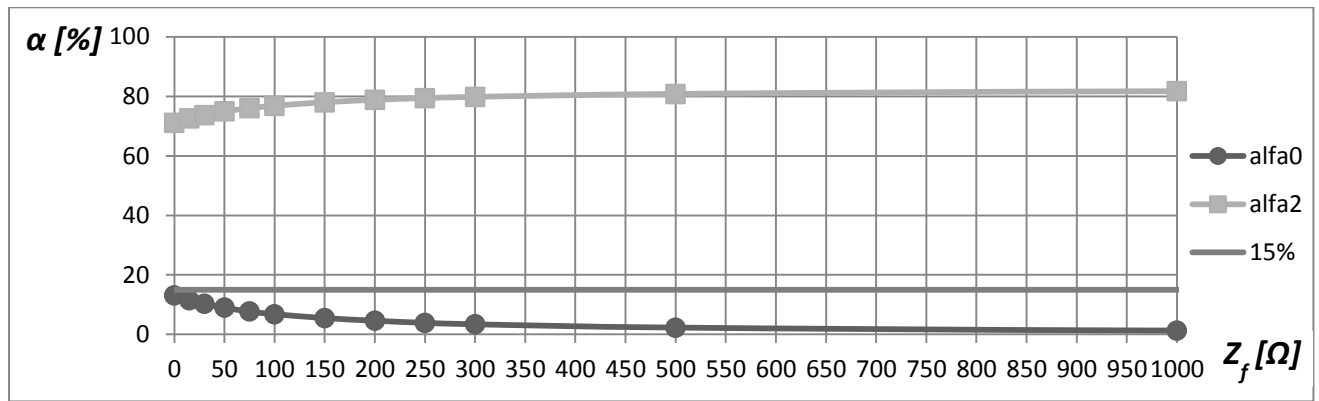


Figura 4.32 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

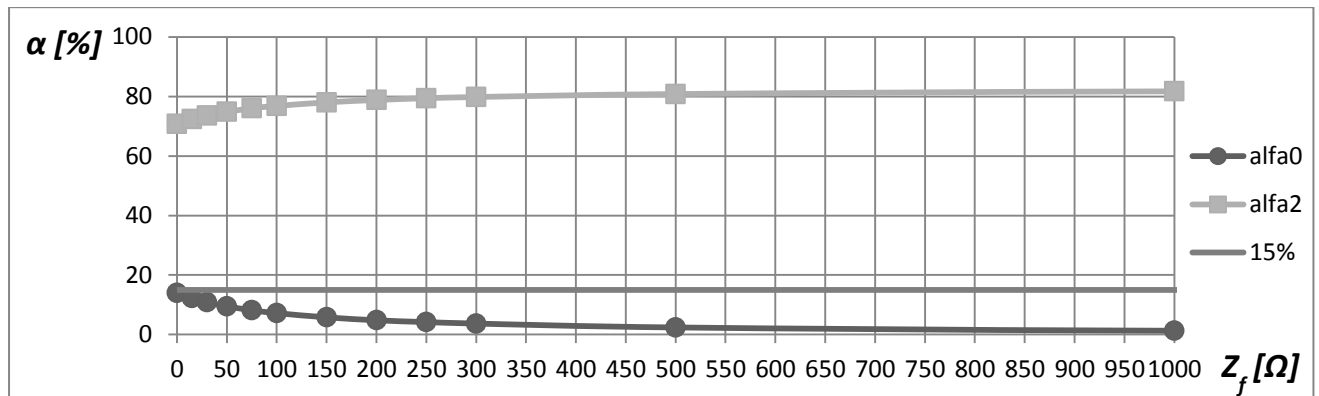


Figura 4.33 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).

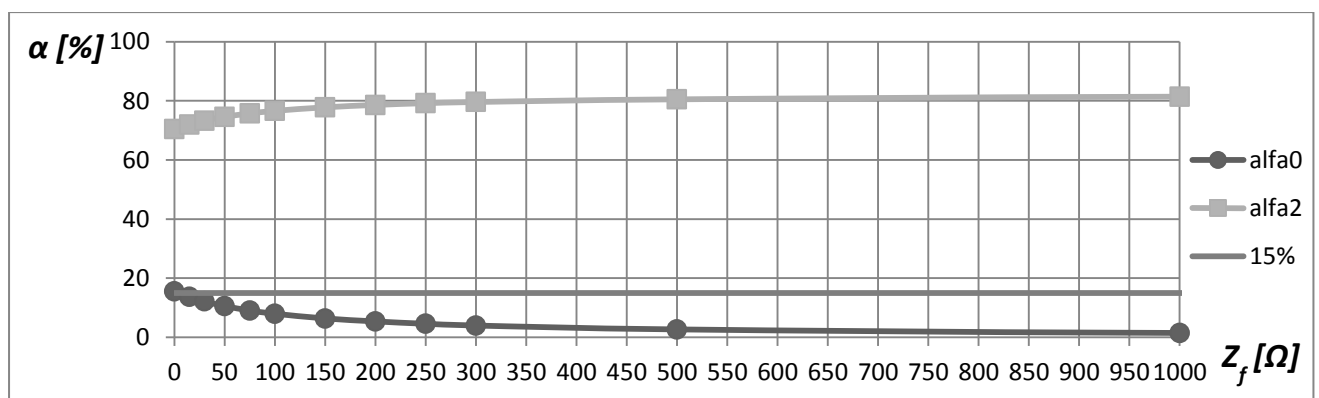


Figura 4.34 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).

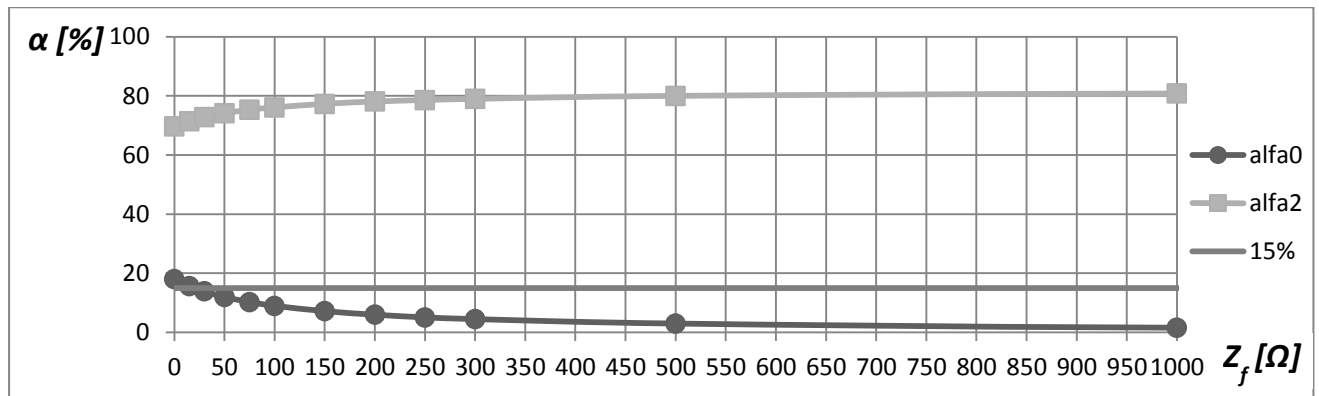


Figura 4.35 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.4 – CASO D

No caso D, o condutor rompido vai ao chão em ambos os lados do sistema, tanto do lado fonte, quanto do lado carga. Também, este caso se dividirá em três subcasos: Configuração estrela aterrado para carga; configuração delta para carga; presença de banco de capacitores.

4.4.4.1 – Subcaso D-1

Neste subcaso, a configuração das cargas do sistema é estrela aterrado e a falta ocorre levando à queda de ambos os condutores (do lado carga e do lado fonte). Essa situação está ilustrada na figura 4.36.

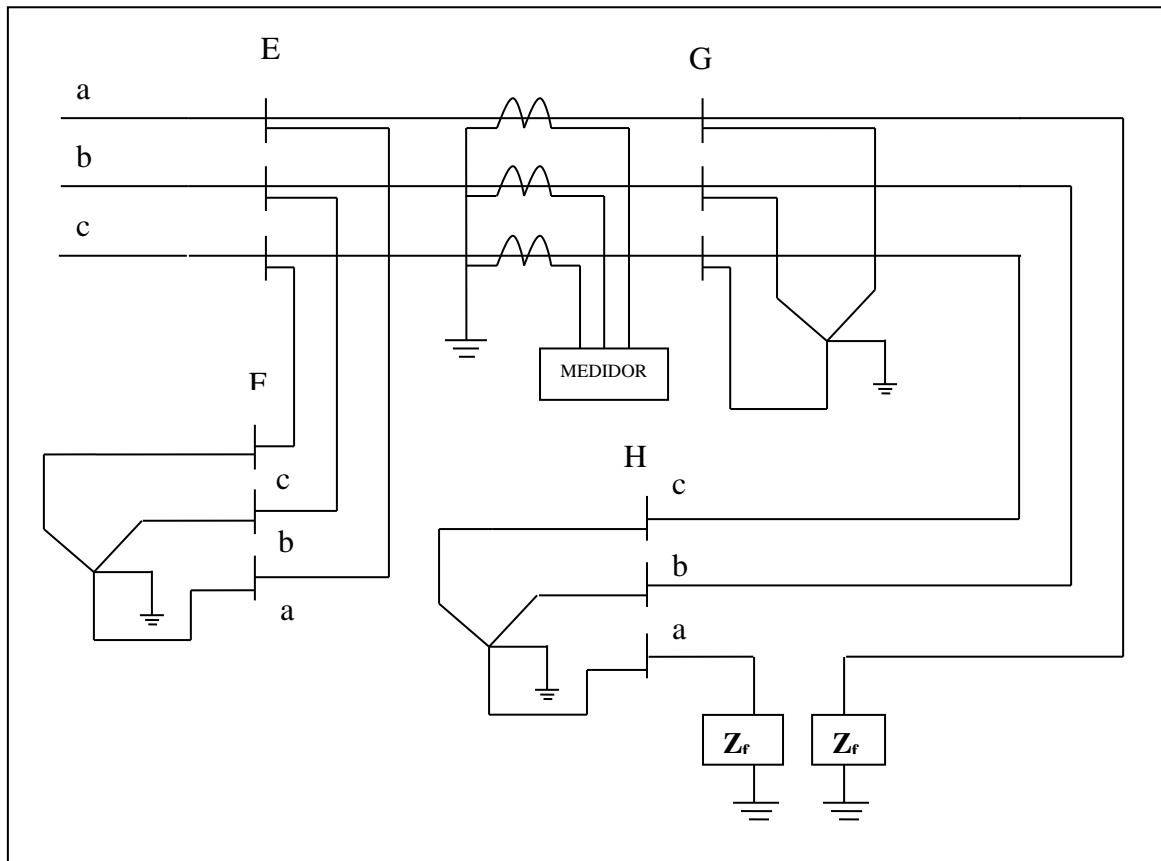


Figura 4.36 – Subcaso D-1.

Analisando os gráficos das figuras de 4.37 a 4.40 observa-se que os únicos dois pontos de faltas que passam despercebidos para a metodologia dos desequilíbrios de corrente são os pontos de Z_f igual a 50Ω e Z_f igual a 75Ω (para ΔZ igual a $0,0 \text{ pu}$ – na figura 4.39). Ou seja, ambos os índices de desequilíbrio acusam valores abaixo da curva limite. Para os demais pontos (demais figuras), sempre um dos índices (neste caso, α_0), consegue detectar o defeito normalmente.

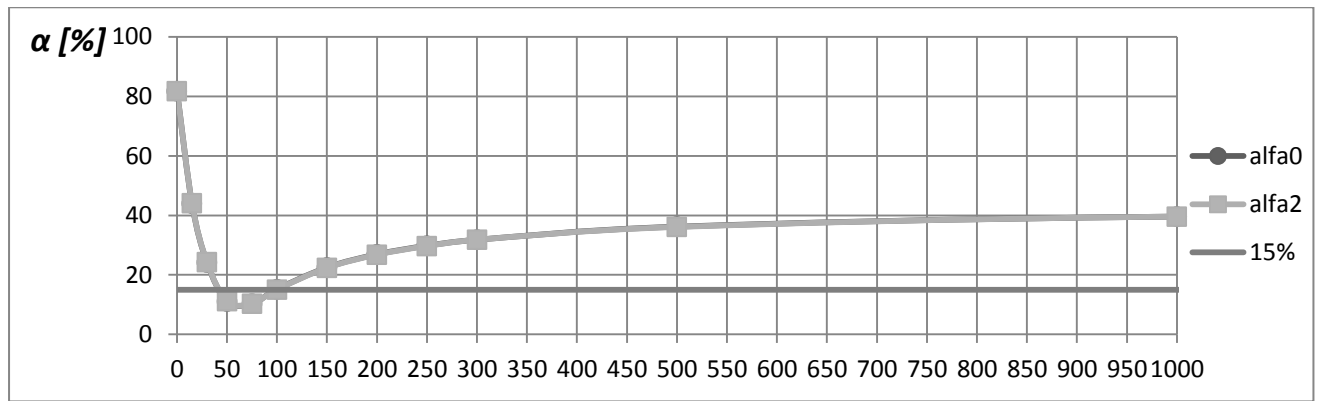


Figura 4.37 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z = 0,0$ pu).

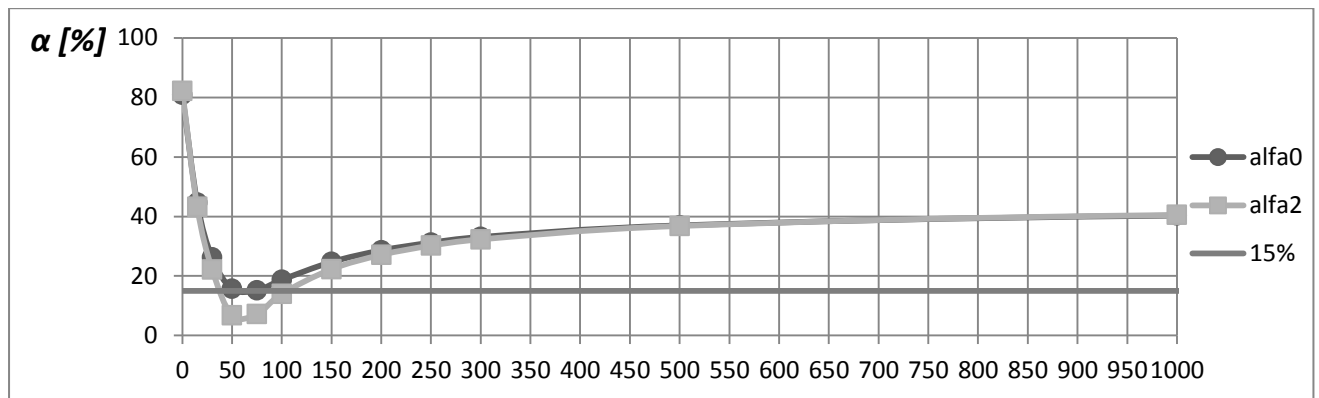


Figura 4.38 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,1$ pu).

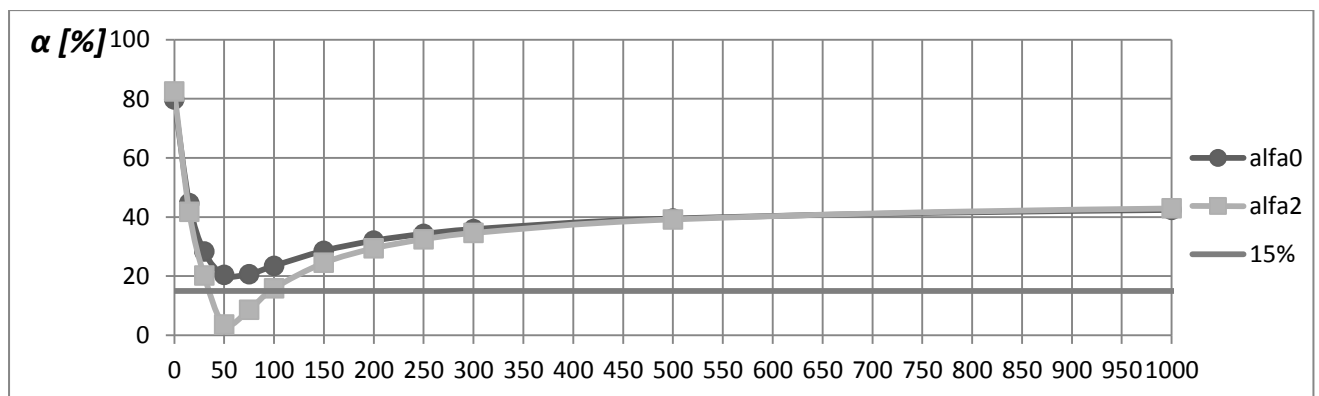


Figura 4.39 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

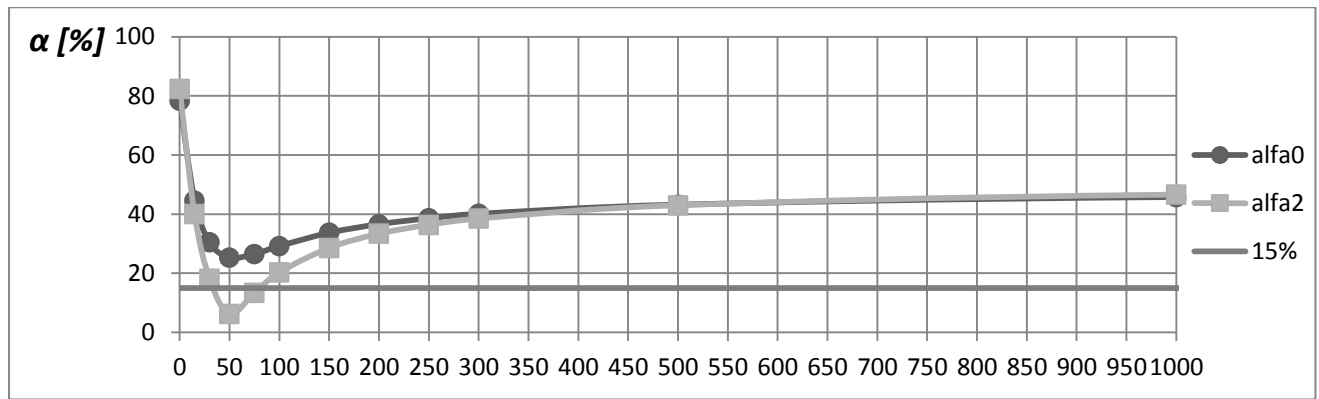


Figura 4.40 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.4.2 – Subcaso D-2

A representação dessa situação se encontra na figura 4.41.

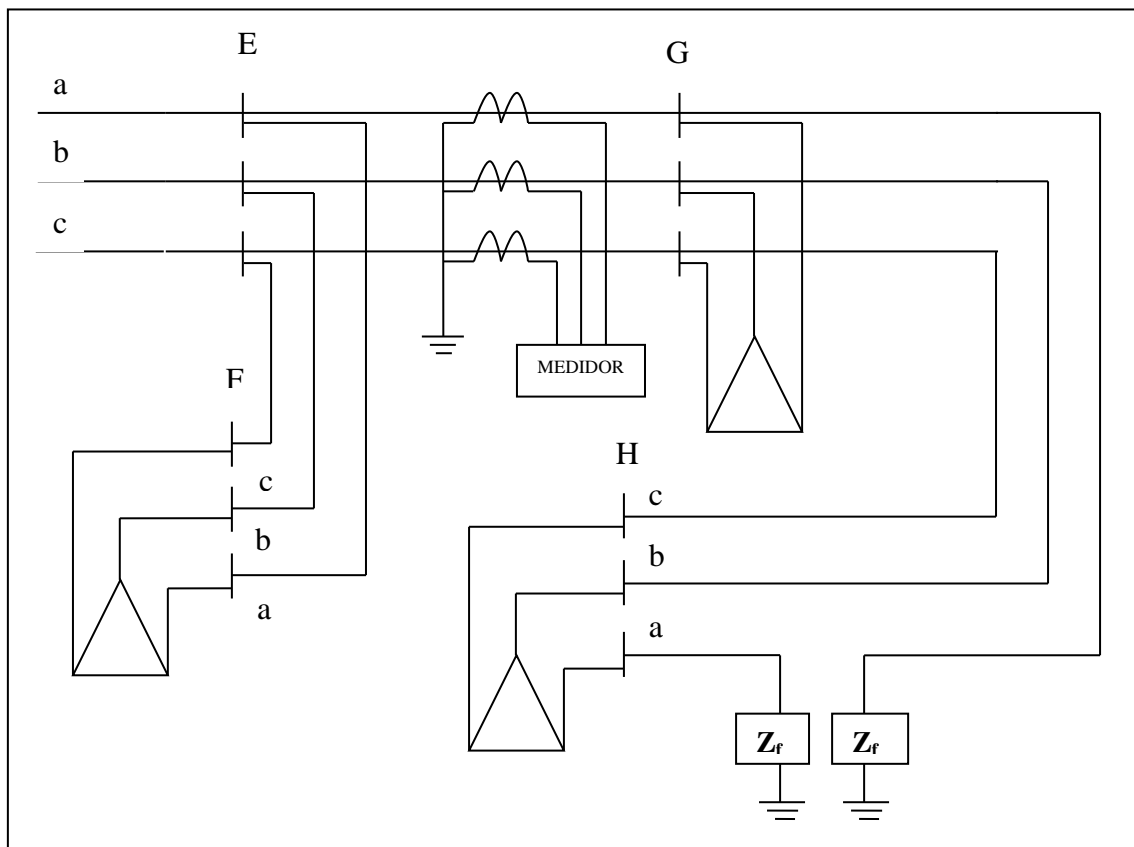


Figura 4.41 – Subcaso D-2.

Nos gráficos das figuras 4.42 a 4.45, encontram-se os resultados para a falta fase-terra, ou seja, quando o defeito ocorre na fase a do sistema. A fase escolhida foi, como um padrão para todos os casos, a fase a.

Faz-se necessário observar algo curioso: à medida que se aumenta o grau de desequilíbrio do sistema para uma mesma impedância de falta, o índice de desequilíbrio α_0 diminui, enquanto o índice α_2 aumenta (o esperado é sempre aumentar, uma vez que se está acrescentando desequilíbrio à rede). Isso ocorre para todos os valores de impedâncias de falta, exceto para a impedância igual a zero.

Da mesma forma que nos casos anteriores, os pontos abaixo da reta limite não necessitam do dispêndio de grande atenção, já que o dispositivo proposto para detectar as FAI se utilizará dos dois índices para a detecção do defeito e, em qualquer das figuras relacionadas com este subcaso, conclui-se que sempre um dos dois índices estará acima de 15%.

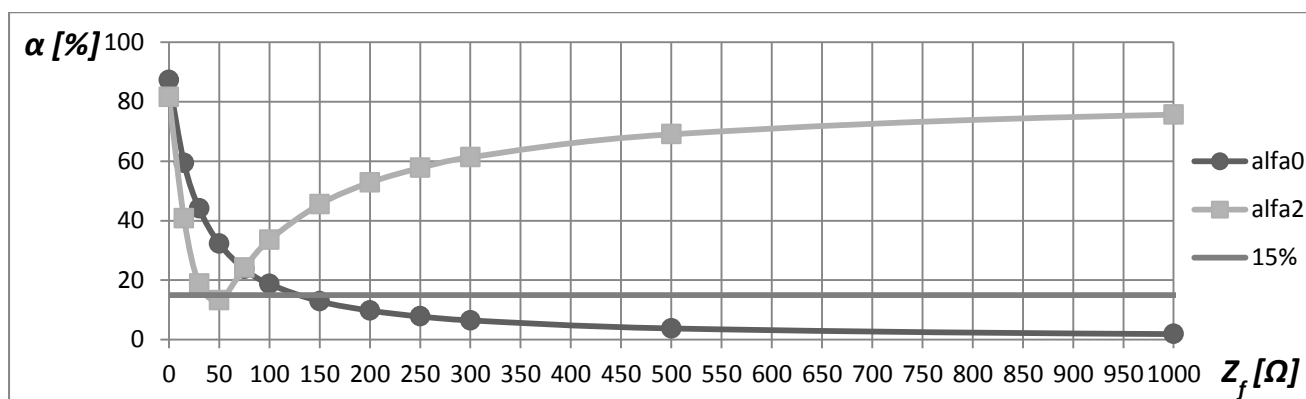


Figura 4.42 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

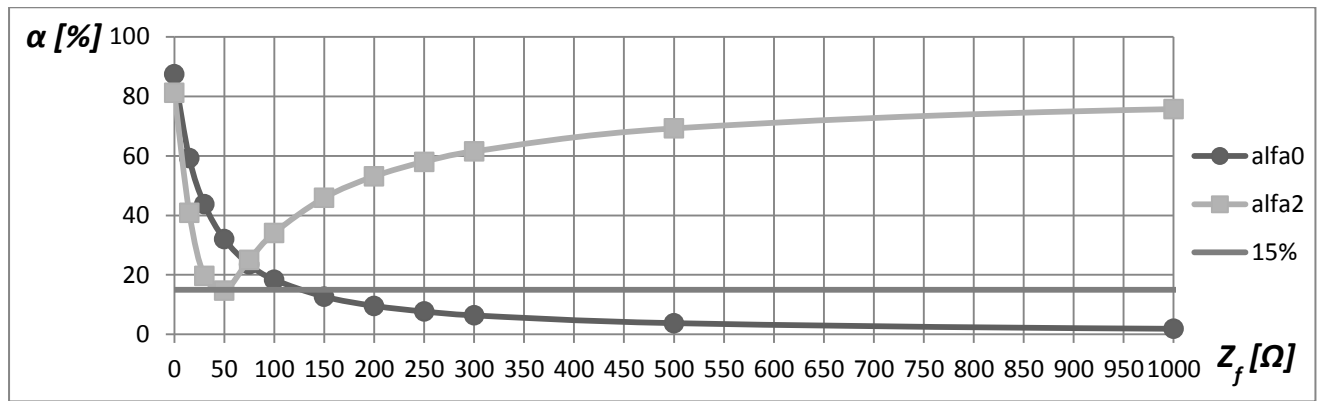


Figura 4.43 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).

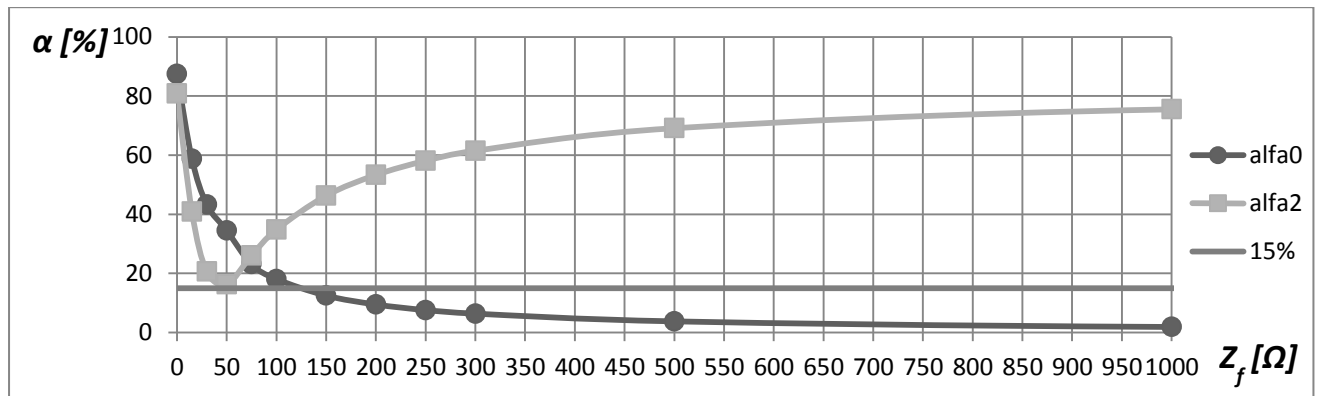


Figura 4.44 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,2$ pu).

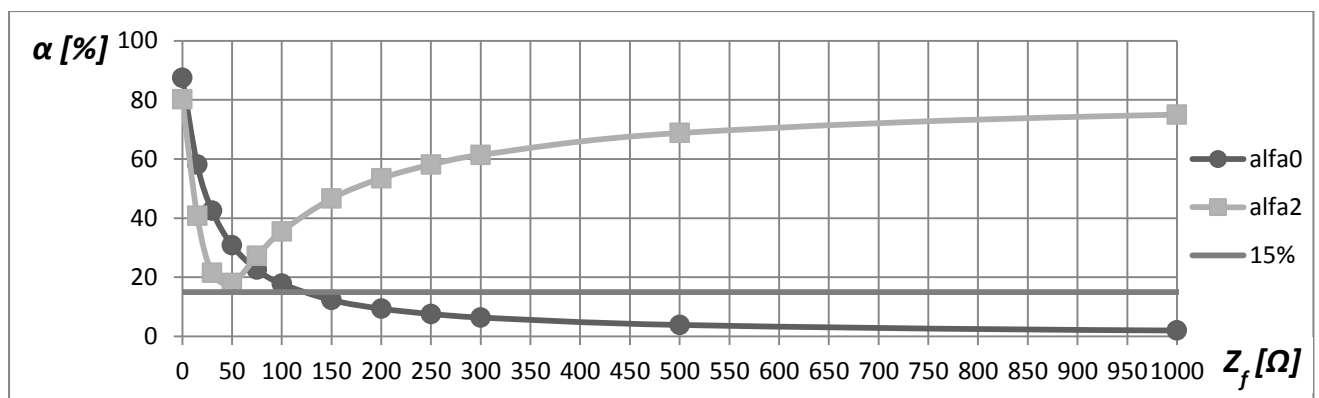


Figura 4.45 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,3$ pu).

4.4.4.3 – Subcaso D-3

O subcaso em questão encontra-se representado na figura 4.46, a seguir.

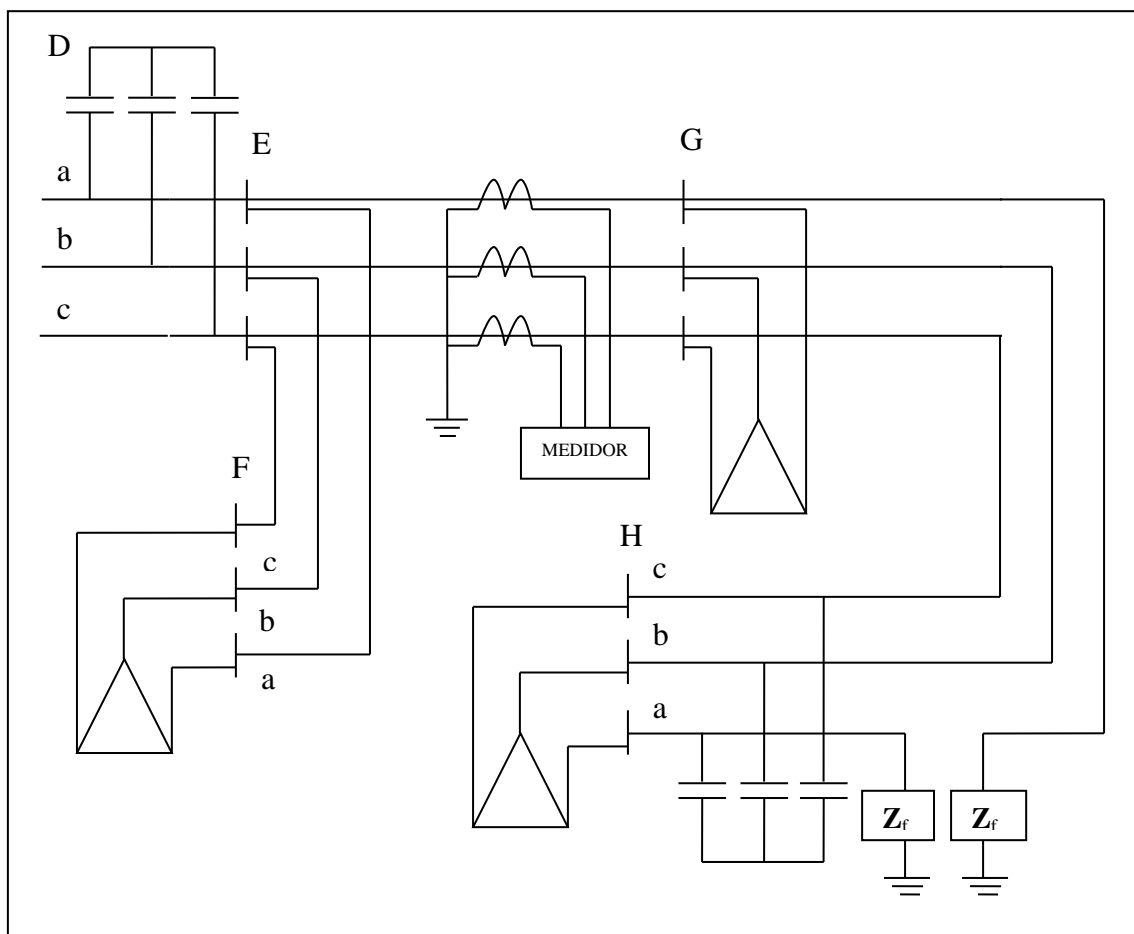


Figura 4.46 – Subcaso D-3.

Este subcaso, ilustrado na figura 4.46 acima, apresenta os seguintes aspectos:

- Presença de bancos de capacitores;
- Cargas do sistema em configuração delta;
- Queda dos condutores à terra de ambos os lados do sistema (fonte e carga).

Abaixo, encontram-se os resultados para a aplicação de diferentes valores de impedância de falta, no caso de um defeito fase-terra. As figuras 4.47 a 4.50 mostram os gráficos contendo os mesmos.

Conforme já visto anteriormente, os resultados não apresentam problemas, uma vez que pelo menos um dos índices consegue detectar a falta através de seus pontos acima da linha de 15%.

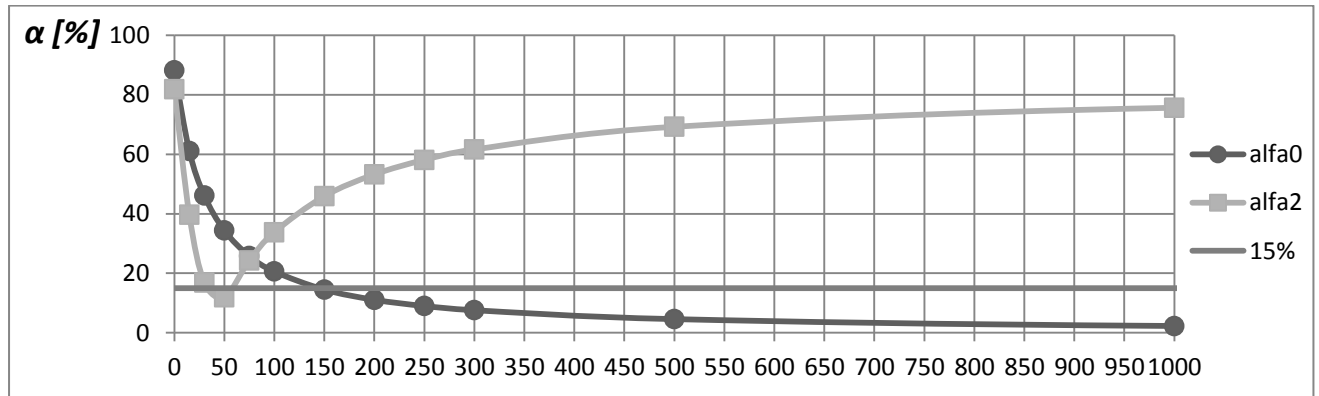


Figura 4.47 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema totalmente equilibradas ($\Delta Z=0,0$ pu).

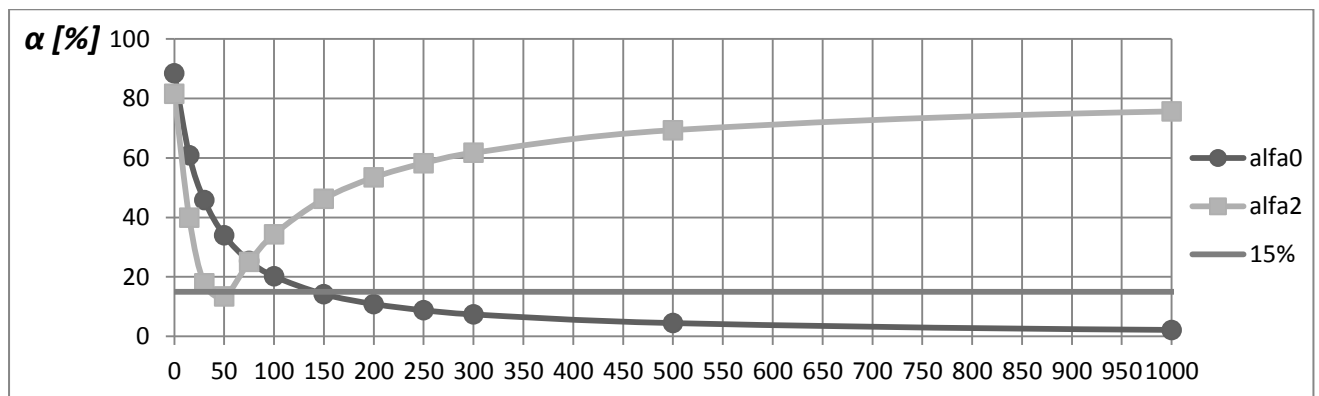


Figura 4.48 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 10% de desequilíbrio ($\Delta Z=0,1$ pu).

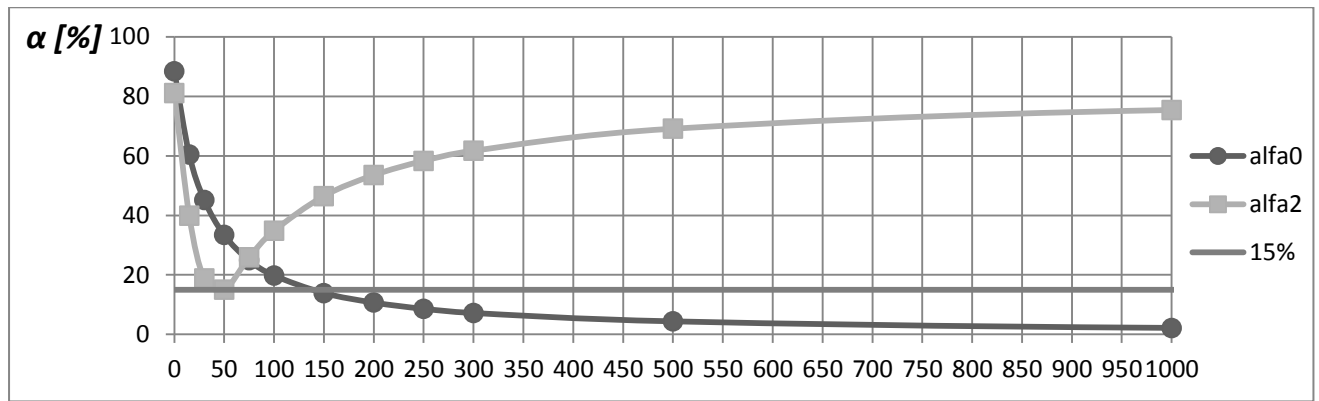


Figura 4.49 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 20% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,2$ pu).

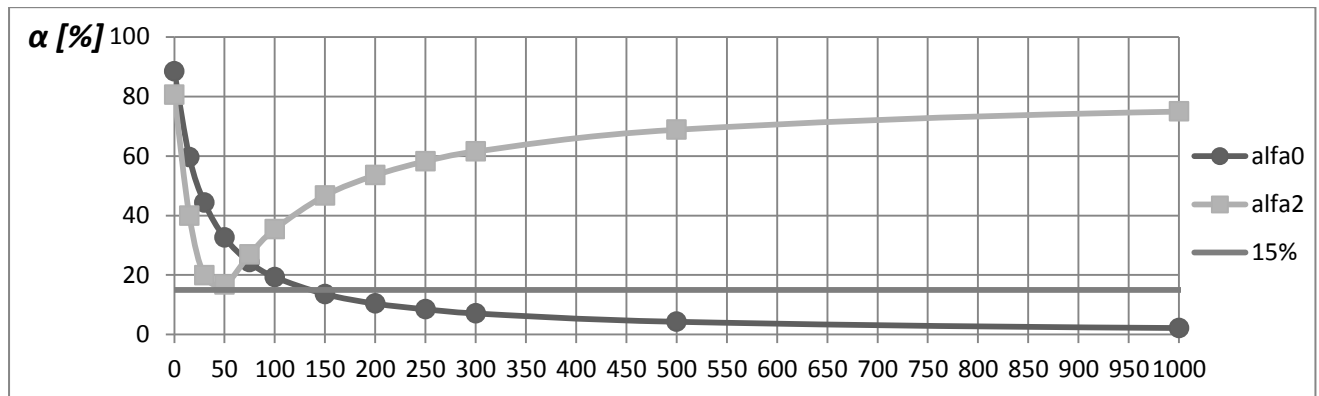


Figura 4.50 – Comportamento dos índices de desequilíbrios α_0 e α_2 em função da impedância de falta (Z_f) estando as cargas do sistema com 30% de desequilíbrio ($\Delta Z = 0,3$ pu).

4.4.5 – CASO E

Neste caso, nenhum dos condutores vai ao chão. Trata-se de uma abertura monopolar, operação comum em sistemas elétricos, porém muitas vezes indesejada. A seguir, analisar-se-ão as diferentes configurações possíveis para as cargas do sistema no caso de uma abertura como a descrita.

4.4.5.1 – Subcaso E-1

Nesta abertura, a fase a do sistema será aberta. As outras duas fases permanecerão em pleno funcionamento, conforme se verifica na figura 4.51. A configuração das cargas do sistema é estrela aterrado.

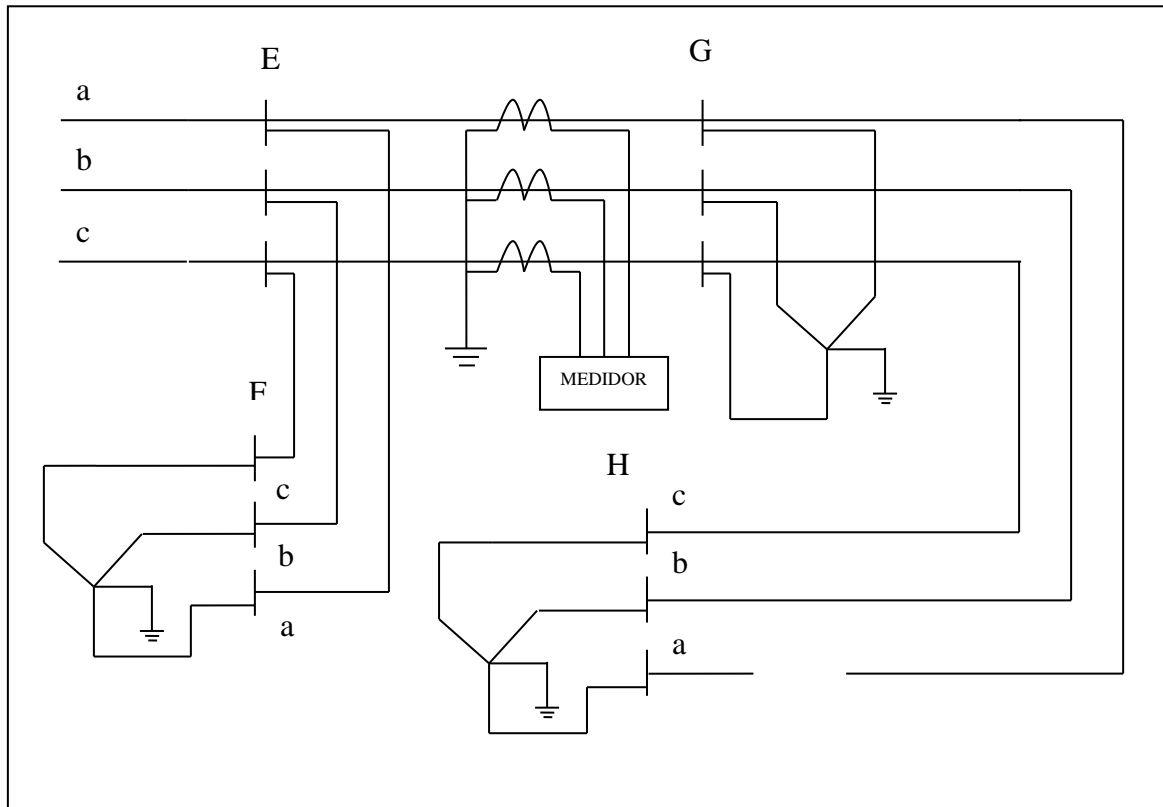


Figura 4.51 – Subcaso E-1.

Observa-se, através da tabela 4.8, que se o limite de detecção estiver em 15%, ambos os índices acusarão a presença de um defeito, fazendo com que o fornecimento de energia à rede seja interrompido.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	43,4	43,3
0,1	43,8	44,3
0,2	45,6	46,7
0,3	48,7	50,3

Tabela 4.8 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.

Outro ponto a ser observado é a constância dos resultados. Conclui-se que, para esse tipo de defeito, eles sempre se encontram próximos ao valor médio de 45%.

4.4.5.2 – Subcaso E-2

Neste caso o que muda em relação ao caso E-1 é que a configuração das cargas do sistema é delta, segundo a ilustração da figura 4.52.

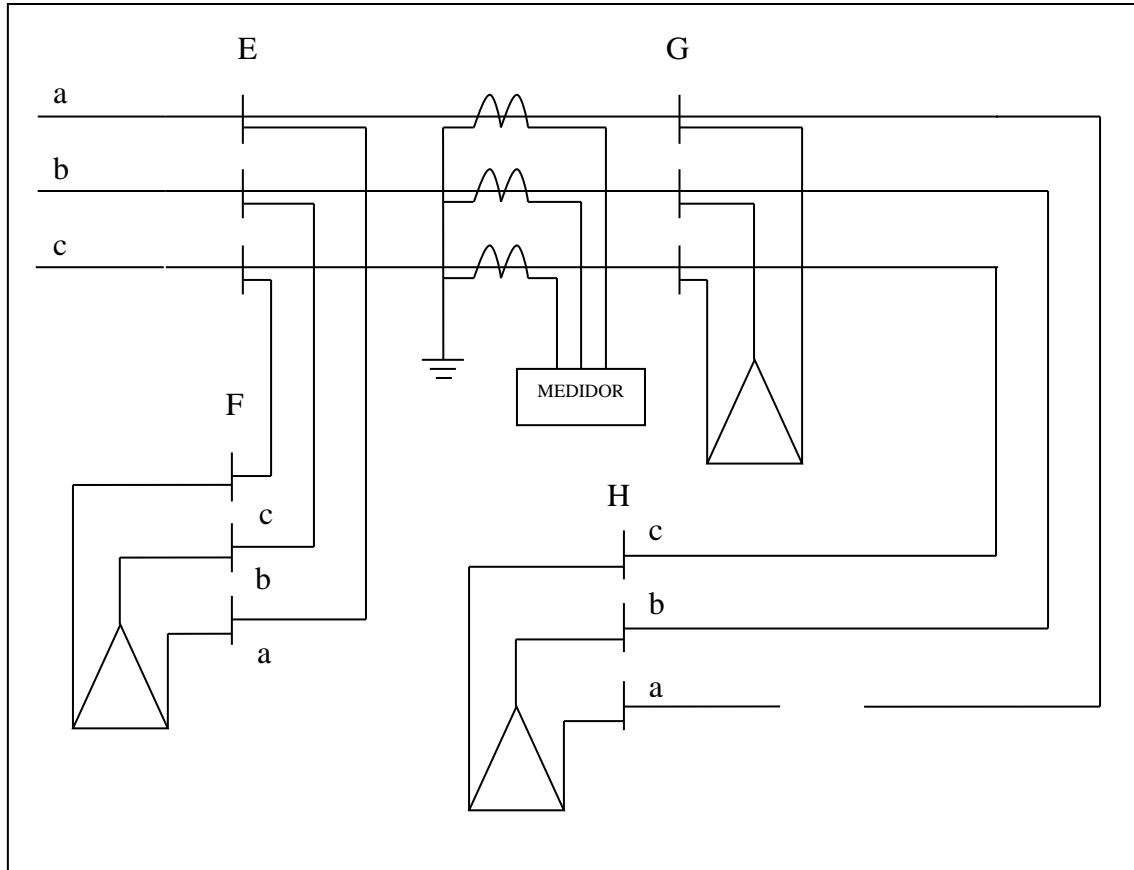


Figura 4.52 – Subcaso E-2.

Ressalta-se que, neste caso, a fase a do sistema sofrerá o defeito, sendo aberta indevidamente, ou sofrendo um rompimento sem contato dos condutores com uma impedância de falta. As outras duas fases permanecerão em pleno funcionamento.

Segundo os resultados da tabela 4.9, é comum também a este subcaso a ausência de maiores complicações no que se refere à detecção do defeito. Pela tabela 4.9 nota-se que o índice α_0 não é capaz de detectar o defeito (conforme já explicado antes, os valores nulos para α_0 se devem ao fato de não existir caminho para as correntes de sequência zero, anulando-se também os indicadores de desequilíbrio). Porém, o índice α_2 certamente fará a detecção da falta, pois os resultados encontrados foram bem acima

Neste subcaso também a detecção da falta ocorreria sem nenhum problema, pois os valores de α_2 , segundo tabela 4.10, conseguem categoricamente detectar o defeito (estão bem acima de 15%).

ΔZ [pu]	I [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	12,34	0,0	82,8
0,1	12,51	0,0	82,7
0,2	12,98	0,0	82,4
0,3	13,80	0,0	81,7

Tabela 4.10 – Índices de desequilíbrio em função do grau de desequilíbrio do sistema.

4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tratou da análise de desequilíbrios causados por cargas e por faltas de alta impedância. A partir dessas análises, foi possível conhecer os diversos graus de desequilíbrio da rede, em função dos desequilíbrios causados tanto pela rede quanto pelas faltas associadas às FAI. O objetivo principal disso foi conhecer a sensibilidade dos índices de desequilíbrios à presença de cargas desequilibradas no sistema e à presença de FAI dos mais diversos tipos.

A partir de uma análise geral dos resultados apresentados, chega-se à conclusão de que os índices de desequilíbrio de corrente conseguem detectar várias situações de FAI, deixando a desejar em apenas um caso específico: Subcaso D-1 (4.4.4.1), nos pontos onde Z_f é igual a 50 Ω e 75 Ω (figura 4.38), para grau de desequilíbrio do sistema igual a 0,0 pu. Mas esse caso, é necessário lembrar, ocorre para uma configuração de transformador de distribuição em estrela / estrela aterrado e sistema totalmente equilibrado. Uma vez que essa situação é bastante incomum nos sistemas elétricos existentes (pois a configuração de transformador de distribuição mais comum é a delta / estrela aterrado e sempre existe um grau, por menor que seja, de desequilíbrio), esses dois pontos descritos acabam não desmerecendo o método ora proposto. Assim, pode-se dizer que os índices de desequilíbrio conseguiram detectar, de forma razoável, os tipos de defeitos aqui propostos.

Para se ter uma ideia, estatísticas presentes em [28] demonstram que, dentre todos os casos de curto-circuito, 70% seriam os de falta fase-terra, 15% os de falta fase-fase, 10% os de falta fase-fase-terra e os 5% restantes de faltas trifásicas (as chamadas faltas simétricas).

Para consultas mais detalhadas aos dados que resultaram nos gráficos aqui expostos, vale consultar o Apêndice C desta dissertação, o qual contém todas as tabelas utilizadas para confecção dos mesmos. E a fim de tornar o presente estudo mais completo e detalhado, demonstrando que o método ora proposto pode ir além e também detectar alguns outros tipos de defeito, foi desenvolvido o mesmo raciocínio presente neste capítulo para os defeitos de faltas bifásicas a terra. Os resultados tabelados encontram-se também no Apêndice C, mais especificamente em sua subseção C-3.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Não obstante os diversos comentários e análises feitos ao longo da dissertação, este capítulo final visa tecer considerações de modo a enfatizar os principais pontos associados com os desenvolvimentos feitos ao longo desta pesquisa.

Iniciando pelo Capítulo II, este foi centrado na apresentação de um panorama geral sobre as faltas de alta impedância de acordo com a literatura científica e experiências no campo. O conteúdo do capítulo, muito embora tenha empregado conceitos amplamente difundidos na área, contribuiu no sentido de oferecer uma compilação detalhada sobre o assunto, referenciando-se em diversos documentos renomados da área. Foi disponibilizado não só um estudo da natureza de cada tipo de FAI, como também foram descritos vários métodos de detecção já estudados até os dias de hoje. Métodos estes que monitoram a corrente, a tensão e a resposta ao impulso. Dentre eles, encontra-se o método de desequilíbrio de corrente, o qual foi explorado por esta dissertação. Esse método possui a simplicidade como vantagem intrínseca. Esses apontamentos formaram a base para o desenvolvimento de dispositivos detectores de FAI, presentes hoje no mercado e em desenvolvimento pela comunidade científica. Também foram esses estudos que direcionaram a presente dissertação a oferecer uma proposta para a detecção das mesmas.

O Capítulo III foi centrado na apresentação da proposta propriamente dita. Além de explicar o método de desequilíbrio de corrente de maneira detalhada, a terceira unidade da dissertação apresenta a contribuição para a detecção de FAI – um *software* medidor dos índices de desequilíbrio α_0 e α_2 , relacionados, respectivamente, à presença de componentes de sequência zero e negativa da corrente fundamental de uma das fases.

Um fator determinante para a escolha de tal metodologia está ligado à confiança aliada à segurança da proteção. Quando se fala em confiança, é preciso lembrar da eficiência do sistema elétrico. Segurança se relaciona diretamente à vida humana. Dizendo em outras palavras, um sistema de proteção seguro é aquele que detecta o que realmente é defeito numa rede elétrica e um sistema de proteção confiável é o que não detecta o que, de fato, não é defeito. Isso tornou o medidor de desequilíbrio proposto um detector com uma potencialidade diferencial – um baixíssimo grau de complexidade da programação (devido justamente à facilidade matemática da metodologia empregada). Sendo assim, o *software* descrito poderia ser implementado em qualquer dispositivo mais simples do que um relé, podendo ser um religador, ou uma chave seccionalizadora, por exemplo. Portanto, essa proteção pode estar distribuída em mais locais do sistema.

Objetivando realizar testes e estudos de vários tipos de FAI aplicados a diferentes configurações de um sistema, simulações no programa ATP foram realizadas no âmbito do Capítulo IV. Faltas fase-terra série ativas e passivas foram aplicadas a quinze situações diferentes, dentre estas um sistema ideal sem desequilíbrios, um sistema com desequilíbrios, outro com a presença de bancos de capacitores, etc. Em cada caso, variou-se a impedância de falta, de zero até valores que causassem correntes de pequeno módulo, típicos de FAI. Diante dos resultados obtidos, para um limiar pré-determinado de 15%, ficou evidenciado que a busca de uma proposta para a detecção de FAI do tipo fase-terra se mostrou efetiva, desde que, conforme já demonstrado, se realize um estudo prévio do sistema a ser protegido.

Assim, as vantagens que o método ora proposto apresenta puderam ser consolidadas ao longo do presente trabalho. As parcelas mais importantes da contribuição total que esta dissertação intenta efetivar são: a redução de riscos causados pelas FAI; a técnica simples do método proposto; o aumento da abrangência do monitoramento da rede elétrica; o custo financeiro menor; e o consequente ganho em segurança populacional. Espera-se, pois, que ela tenha logrado êxito nesse aspecto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aucoin, M., *Status of High Impedance Fault Detection*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, nº. 3, março 1985.
- [2] Baker, E. E., *An utility Perspective of High Impedance Fault Detectors*, Florida Power Corporation, IEEE Transmission and Distribution Conference, setembro 1996.
- [3] Russell, B. D., *Balancing Security Versus Sensitivity – The Challenge For High Impedance Fault Detection Technology*, Texas A&M University, IEEE Transmission and Distribution Conference, setembro 1996.
- [4] Ebron, S., Lubkeman, D. L., White, M., *A Neural Network Approach To The Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, nº. 2, abril 1990.
- [5] Figueiredo, R. G., Filho, O. O., Chagas, F. A., Nova, I. F., Santos, L. E. D., *Medições, Estudos e Ensaio para Avaliação e Projeto de Proteção para Falhas Fase-Terra em Sistemas com Alta Impedância de Contato*, COELCE e CEPEL, 2002.
- [6] Oliveira Jr, D. A., *Faltas de alta impedância: Detecção e localização de rompimento de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão*, Dissertação de Mestrado, 176 p., CPDEE / Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, maio 2006.
- [7] Sharaf, A. M., Snider, L. A., Debnath, K., *A neural network based relaying scheme for distribution system high impedance fault detection*, First New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems, novembro 1993.

- [8] Lazkano, A., Ruiz, J., Aramendi, E., Leturiondo, L. A., *A New Approach To High Impedance Fault Detection Using Wavelet Packet Analysis*, Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000.
- [9] Jiang, F., Bo, Z. Q., Yang, Q. X., *The wavelet transform applied to distinguish between transient and permanent faults*, International Conference on Power System Technology, agosto 1998.
- [10] Ming-Ta Yang, Jhy-Cherng Gu, Wen-Shing Hsu, Yuan-Chi Chang, Chiang Cheng, *A Novel Intelligent Protection Scheme For High Impedance Fault Detection in Distribution Feeder*, IEEE Region 10 Conference, novembro 2004.
- [11] Haghifam, M. -R., Sedighi, A. -R., Malik O. P., *Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection*, Generation, Transmission and Distribution IEEE Proceedings-, vol.153, nº. 3, maio 2006.
- [12] Ruz, F., Fuentes, J. A., *Fuzzy decision making applied to high impedance fault detection in compensated, neutral grounded MV distribution systems*, Seventh International Conference on Development in Power Systems Protection, 2001.
- [13] Lin Wang, Chen, F., Allen, G., Cheung, H., Mander, T., Cheung, R., *Network-Integrated DSP-based Adaptive High Impedance Ground Fault Feeder Protection*, Power Engineering Society General Meeting, junho 2007.
- [14] Atwell, E. A., Shaffer, W., Jerrings, D. I., Linders, J. R., *Performance Testing of The Nordon High Impedance Ground Fault Detector on A Distribution Feeder*, IEEE Rural Electric Power Conference, 1990.
- [15] Jeerings, D. I., Linders, J. R., *Unique aspects of distribution system harmonics due to high impedance ground faults*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, nº. 2, abril 1990.
- [16] Sultan, A. F., Swift, G. W., *Security Testing of High Impedance Fault Detectors*, IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment, maio 1991.
- [17] Buchholz, V. L., Nagpal, M., Neilson, J. B., Parsi-Feraidoonian, R., Zarecki, W., *High Impedance Fault Detection Device Tester*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, nº. 1, janeiro 1996.
- [18] Pongthavornsawad, A., Ungseevijitprapa, W., *Broken Conductor Detection for Overhead Line Distribution System*, Power and Energy Engineering Conference, março 2011.

- [19] Jones, R. H., *Application of High Impedance Fault Detectors*, Rochester Gas & Electric Company, IEEE Transmission and Distribution Conference, setembro 1996.
- [20] Johnson, N. J., *Application Of High Impedance Fault Detectors On A Utility With Long Rural Lines*, PacifiCorp., IEEE Transmission and Distribution Conference, setembro 1996.
- [21] Aucoin, B. M., Jones, R. H., *High Impedance Fault Detection Implementation Issues*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, nº. 1, janeiro 1996.
- [22] Das, R., Bayoumi, D., *Sistema para detecção de faltas de alta impedância*, ABB, Revista Eletricidade Moderna, setembro 2008.
- [23] Tao Cui, Xinzhou Dong, Zhiqian Bo, Richards, S., *Integrated Scheme for High Impedance Fault Detection in MV Distribution System*, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, agosto 2008.
- [24] Russel, B. D., *Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems*, IEEE Tutorial Course, 1989.
- [25] Russel, B. D., *Detection of arcing faults on distribution feeders*, Final Report Texas A&M University / College Station, dezembro 1982.
- [26] Malagodi, C. V. S., *Sistema de Proteção para Faltas de Alta Impedância*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica / Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1997.
- [27] Silva, P. R., Saldanha, J. O., Andrade, J. C. B., *Técnica Alternativa para Detecção de Faltas de Alta Impedância*, Dissertação de Mestrado nº 089, 91 p., Centro de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, março 1992.
- [28] Resende, J. W., *Apostila de Análise de Sistemas Elétricos*, Faculdade de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2005
- [29] Pereira, M. P., Fonseca, C. S., Carvalho, D. S., Dubé, L., *Análise Transitória de Sistemas de Controle e Modelagem de Sistemas não Convencionais no Programa ATP*, XIII Seminário Nacional de Proteção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriú – SC, Brasil, 1995.
- [30] Almeida, M. A. D., *Um algoritmo para Estimação de Estado em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica com Base no Método da Soma de Potências*, Tese de Doutorado, 153 p., Centro de Tecnologia / Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, dezembro 2003.

- [31] Resende, J. W., Yacamini, R., *A generalized approach to harmonic calculations in multiples 6/12 pulse thyristor controlled reactors*, Universities Power Engineering Conference, 1985, Huddersfield, Inglaterra, 20th UPEC, Huddersfield Polytechnic, 1985. v. 1. p. 218-202.
- [32] Senger, E. C., Kaiser, W., Santos, J. C., Burt, P. M. S., Malagodi, C. V. S., *Broken Conductors Protection System using Carrier Communication*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, nº 2, abril 2000.

APÊNDICES

REPRESENTAÇÕES, CÁLCULOS E TABELAS

APÊNDICE A

REPRESENTAÇÕES

A.1 – Introdução

Apresenta-se aqui o diagrama unifilar e os dados de trechos e nós do alimentador-teste utilizado nesta dissertação, o NEO01N4, retirado de [30].

A.2 – Alimentador-teste

a) Diagrama unifilar

O sistema representado pelo diagrama unifilar da figura A.1, conforme se vê a seguir, foi simplificado nesta dissertação a fim de tornar menos trabalhosa a sua simulação no ATP. Assim, os ramos marcados em verde foram descartados e as letras (de A a H), em rosa, correspondem ao diagrama simplificado mostrado no Capítulo IV. Todos os nós e trechos desse alimentador original serão condensados nos pontos onde estão essas letras, usando-se uma sistemática de divisão por 2, como por exemplo: Entre B (6) e D (17), somam-se as cargas dos pontos de 6 a 17 e divide-se o resultado por 2, sendo que cada metade vai compor a carga total representante de cada ponto envolvido (B e D). Dessa maneira proceder-se-á com o restante dos nós e trechos.

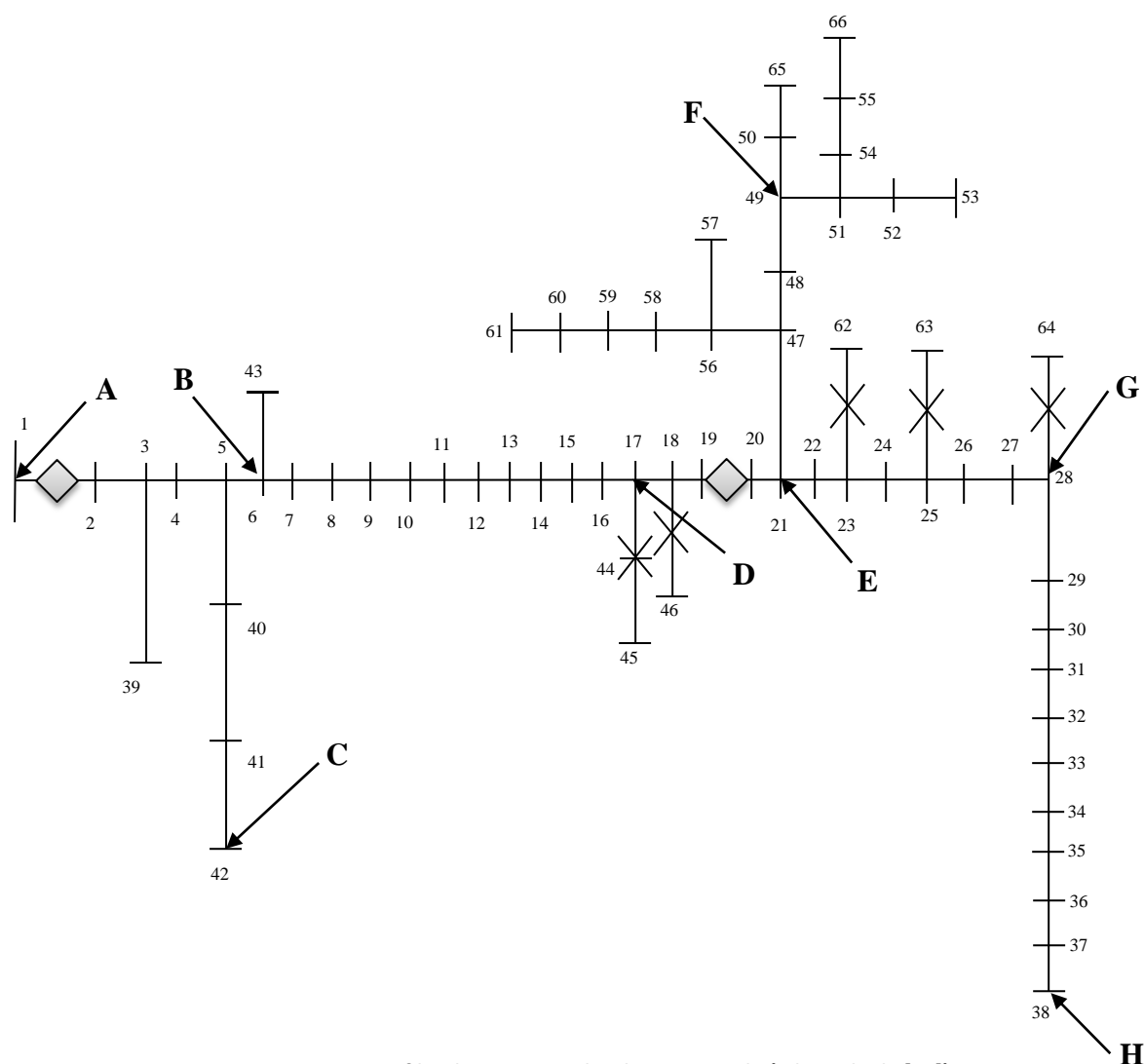


Figura A.1 – Diagrama unifilar do sistema utilizado para estudo (adaptado de [28]).

b) Dados dos nós e dos trechos do alimentador

Nó	S/D/Q (kVA)	fp	Nó	S/D/Q (kVA)	fp	Nó	S/D/Q (kVA)	fp
1	0	0	23	40,59	0,94	45	75	0,92
2	75	0,92	24	45	0,92	46	54,74	0,95
3	150	0,92	25	171,38	0,98	47	0	1
4	225	0,92	26	0	1	48	75	0,92
5	112,5	0,92	27	0	1	49	291,92	0,97
6	112,5	0,92	28	45	0,92	50	75	0,92
7	150	0,92	29	45	0,92	51	112,5	0,92

8	48,89	0,94	30	550,37	0,92	52	50,43	1
9	56,58	0,89	31	45	0,92	53	58,12	0,96
10	112,5	0,92	32	105,06	0,99	54	54,12	0,92
11	112,5	0,92	33	176,99	0,96	55	64,78	0,99
12	75	0,92	34	177,12	0,97	56	75	0,92
13	32,39	1	35	121,36	1	57	71,75	0,96
14	75	0,92	36	45	0,92	58	41,82	0,97
15	91,2	1	37	173,84	0,95	59	66,42	0,96
16	45	0,92	38	75	0,92	60	150	0,92
17	33,21	0,88	39	112,5	0,92	61	112,5	0,92
18	0	1	40	75	0,92	62	158,11	0,99
19	0	1	41	112,5	0,92	63	208,8	0,96
20	75	0,92	42	459,26	0,98	64	389,38	0,98
21	0	1	43	150	0,92	65	25,22	0,98
22	76,26	1	44	75	0,92	66	45	0,92

Tabela A.1 – Dados de nós do NEO01N4 (adaptada de [28]).

Início	Fim	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Comp. (km)	Início	Fim	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Comp. (km)
1	2	0,239	0,3969	0,93	34	35	0,3	0,4059	0,05
2	3	0,239	0,3969	0,21	35	36	0,3	0,4059	0,03
3	4	0,239	0,3969	0,06	36	37	0,3	0,4059	0,06
4	5	0,239	0,3969	0,18	37	38	0,3	0,4059	1,03
5	6	0,3	0,4059	0,14	3	39	0,3	0,3969	0,02
6	7	0,3	0,4059	0,12	5	40	0,239	0,4059	0,03
7	8	0,3	0,4059	0,16	40	41	0,3	0,4059	0,07
8	9	0,3	0,4059	0,08	41	42	0,3	0,4059	0,08
9	10	0,3	0,4059	0,19	6	43	0,3	0,4059	0,12
10	11	0,3	0,4059	0,24	17	44	0,3	0,4059	0,09
11	12	0,3	0,4059	0,28	44	45	0,3	0,4059	0,01
12	13	0,3	0,4059	0,28	18	46	0,3	0,4059	0,14
13	14	0,3	0,4059	0,21	21	47	0,3	0,4059	0,34
14	15	0,3	0,4059	0,23	47	48	12,011	0,485	0,05
15	16	0,3	0,4059	0,16	48	49	12,011	0,485	0,05
16	17	0,3	0,4059	0,07	49	50	12,011	0,485	0,05
17	18	0,3	0,4059	0,42	50	65	12,011	0,485	0,08
18	19	0,3	0,4059	0,22	49	51	12,011	0,485	0,08
19	20	0,3	0,4059	0,3	51	52	12,011	0,485	0,04
20	21	0,3	0,4059	0,04	52	53	12,011	0,485	0,03

21	22	0,3	0,4059	0,23	51	54	12,011	0,485	0,07
22	23	0,3	0,4059	0,05	54	55	12,011	0,485	0,09
23	24	0,3	0,4059	0,05	55	66	12,011	0,485	0,1
24	25	0,3	0,4059	0,11	47	56	0,3	0,4059	0,26
25	26	0,3	0,4059	0,15	56	57	0,3	0,4059	0,06
26	27	0,3	0,4059	0,1	56	58	0,3	0,4059	0,03
27	28	0,3	0,4059	0,2	58	59	0,3	0,4059	0,03
28	29	0,3	0,4059	0,9	59	60	0,3	0,4059	0,03
29	30	0,3	0,4059	1,26	60	61	0,3	0,4059	0,17
30	31	0,3	0,4059	0,04	23	62	0,3	0,4059	0,01
31	32	0,3	0,4059	0,87	25	63	12,011	0,485	0,24
32	33	0,3	0,4059	0,2	28	64	0,3	0,4059	0,02
33	34	0,3	0,4059	0,14					

Tabela A.2 – Dados de trechos do NEO01N4 (adaptada de [28]).

APÊNDICE B

CÁLCULOS

B.1 – Introdução

Aqui se demonstrará um exemplo de como foram aplicados os graus de desequilíbrio às cargas do sistema.

B.2 – Carga em estrela

Tem-se a seguinte carga (aleatoriamente escolhida no ponto B), para nenhum grau de desequilíbrio presente (figura B.1, a seguir):

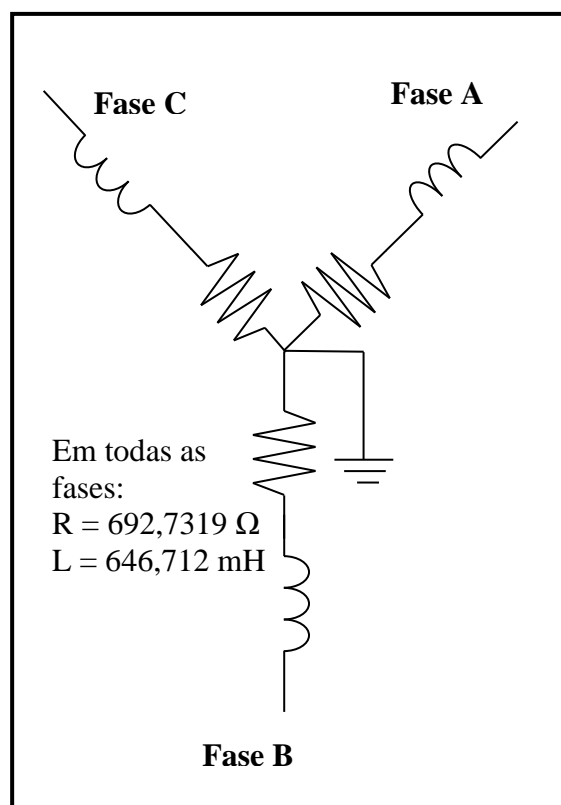


Figura B.1 – Carga em estrela aterrada – grau de desequilíbrio igual a 0,0 pu.

A partir da ideia de graus de desequilíbrio apresentada em [31], pode-se definir o grau de 0,1 pu para a carga da figura B.1 fazendo a fase A constante, a fase B, 10% acima da fase A, e a fase C, 10% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.2 a seguir:

$$R_B = 1,1 \times 692,7319 = 762,00509 \, \Omega$$

$$L_B = 1,1 \times 646,712 = 711,3832 \, mH$$

$$R_C = 0,9 \times 692,7319 = 623,45871 \, \Omega$$

$$L_C = 0,9 \times 646,712 = 582,0408 \, mH$$

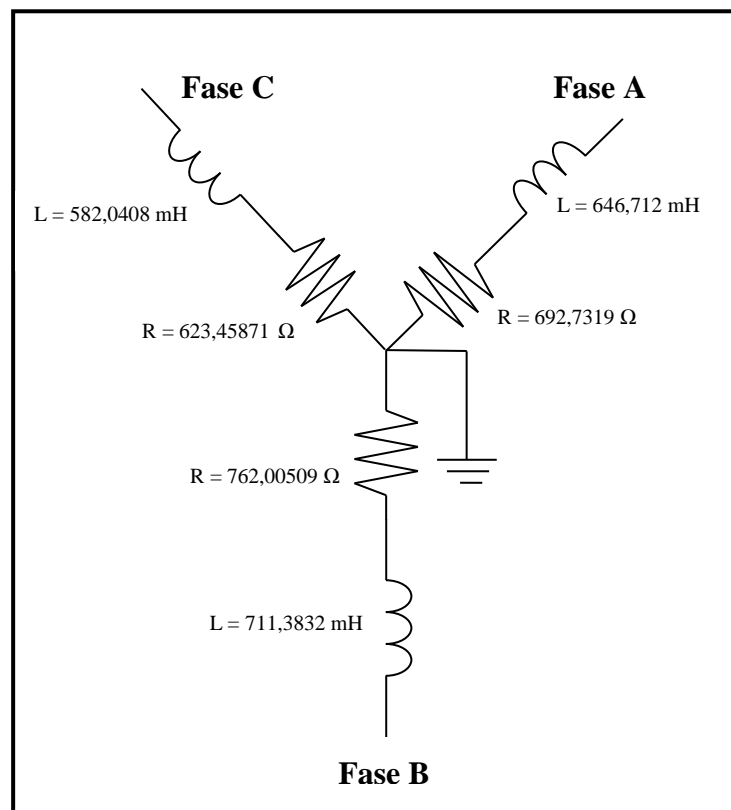


Figura B.2 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,1 pu.

A partir da ideia de graus de desequilíbrio apresentada em [31], pode-se definir o grau de 0,2 pu para a carga da figura B.1 fazendo a fase A constante, a fase B 20% acima da fase A, e a fase C 20% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.3 a seguir:

$$R_B = 1,2 \times 692,7319 = 831,27828 \, \Omega$$

$$L_B = 1,2 \times 646,712 = 776,0544 \, mH$$

$$R_C = 0,8 \times 692,7319 = 554,18552 \, \Omega$$

$$L_C = 0,8 \times 646,712 = 517,3696 \, mH$$

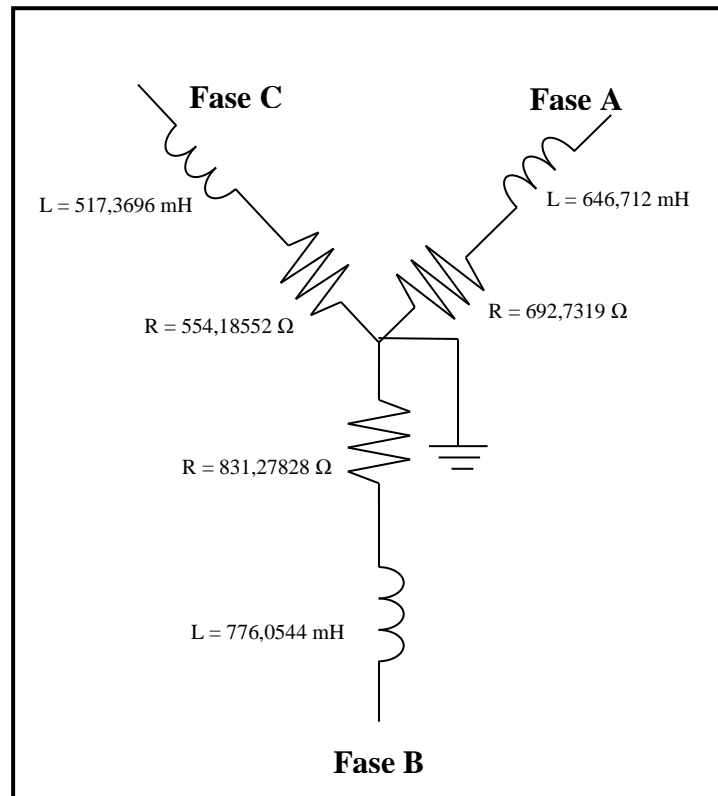


Figura B.3 – Carga em estrela aterrada – grau de desequilíbrio igual a 0,2 pu.

A partir da ideia de graus de desequilíbrio apresentada em [31], pode-se definir, finalmente, o grau de 0,3 pu para a carga da figura B.1 fazendo a fase A constante, a fase B, 30% acima da fase A, e a fase C, 30% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.4 a seguir:

$$R_B = 1,3 \times 692,7319 = 900,55147 \, \Omega$$

$$L_B = 1,3 \times 646,712 = 840,7256 \, mH$$

$$R_C = 0,7 \times 692,7319 = 484,91233 \, \Omega$$

$$L_C = 0,7 \times 646,712 = 452,6984 \, \text{mH}$$

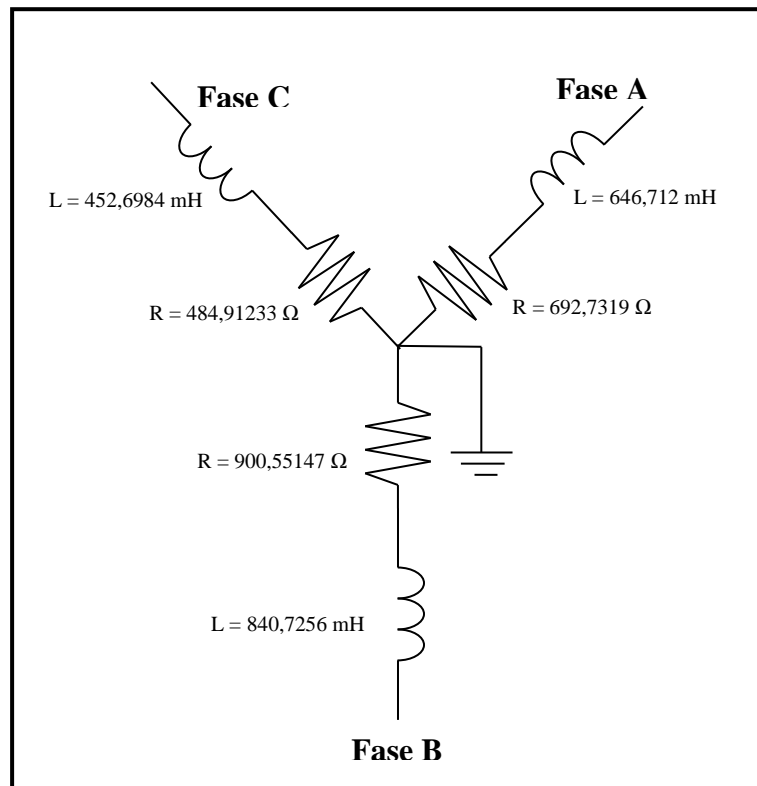


Figura B.4 – Carga em estrela aterrado – grau de desequilíbrio igual a 0,3 pu.

Pode-se perceber que, o grau de desequilíbrio que aqui se chama de 0,3 pu (ou 30%), na verdade, equivale a um desequilíbrio de 60% entre as fases B e C, pois uma é 30% maior que a fase A e a outra é 30% menor que a mesma fase C. Idêntico raciocínio se dá para os outros graus desta dissertação (0,2 pu – 40% de desequilíbrio entre as fases B e C e 0,1 pu – 20% de desequilíbrio entre as fases B e C). Ou seja, tentou-se atingir um nível de desequilíbrio que abarcasse o que se tem realmente nos sistemas de hoje, sendo óbvia a ausência de necessidade de um grau maior que o determinado para 0,3 pu.

B.3 – Carga em delta

Para a transformação Y-Δ, utilizou-se a teoria presente em “Circuitos Elétricos”, conforme se vê na figura B.5 a seguir e nas fórmulas subsequentes.

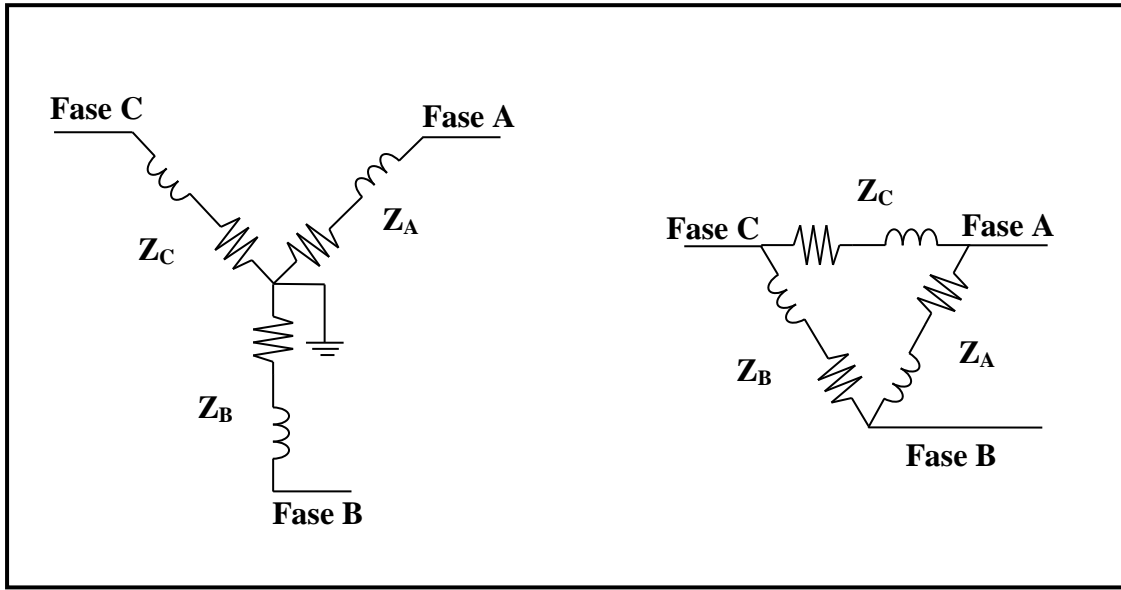


Figura B.5 – Transformação Y-Δ.

$$Z_{AB} = \frac{Z_A \cdot Z_C + Z_C \cdot Z_B + Z_B \cdot Z_A}{Z_C}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_A \cdot Z_C + Z_C \cdot Z_B + Z_B \cdot Z_A}{Z_A}$$

$$Z_{CA} = \frac{Z_A \cdot Z_C + Z_C \cdot Z_B + Z_B \cdot Z_A}{Z_B}$$

Aqui será utilizada a mesma “carga-exemplo” que no ponto B do sistema, ou seja, a mesma utilizada para explicar a carga estrela aterrado na subseção anterior, só

que com seus valores transformados para a configuração delta (aplicadas equações acima).

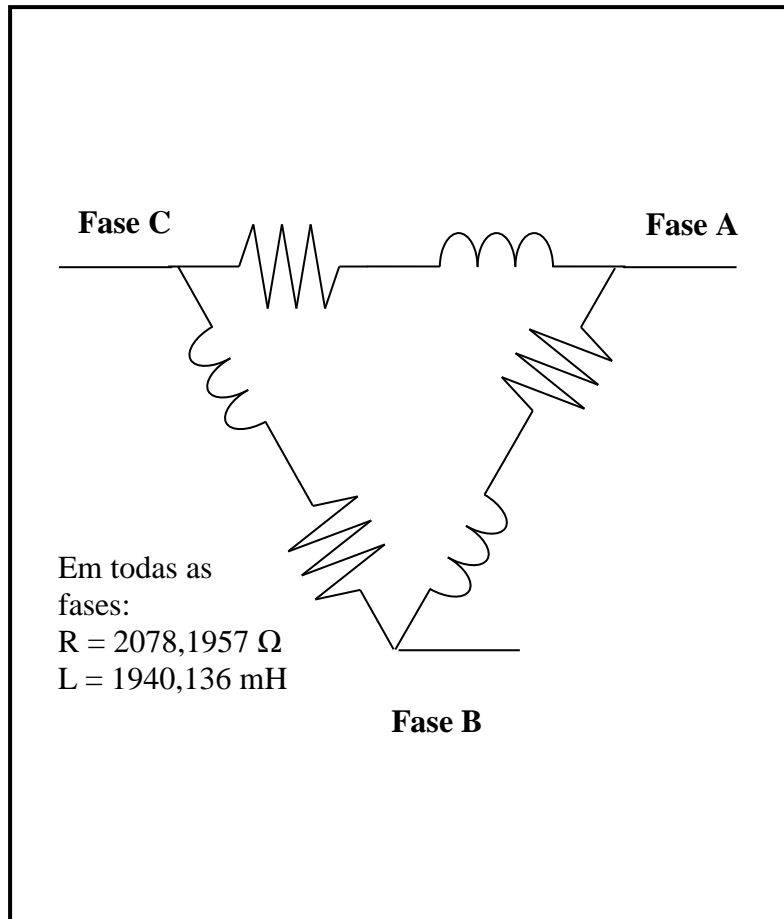


Figura B.6 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,0 pu.

A partir da ideia de graus de desequilíbrio apresentada em [31], pode-se definir o grau de 0,1 pu para a carga da figura B.6 fazendo a impedância Z_{BC} constante, a impedância Z_{CA} 10% acima da impedância Z_{BC} , e a impedância Z_{AB} 10% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.7 a seguir:

$$R_{CA} = 1,1 \times 2078,1957 = 2286,01527 \, \Omega$$

$$L_{CA} = 1,1 \times 1940,136 = 2134,1496 \, mH$$

$$R_{AB} = 0,9 \times 2078,1957 = 1870,37613 \, \Omega$$

$$L_{AB} = 0,9 \times 1940,136 = 1746,1224 \, mH$$

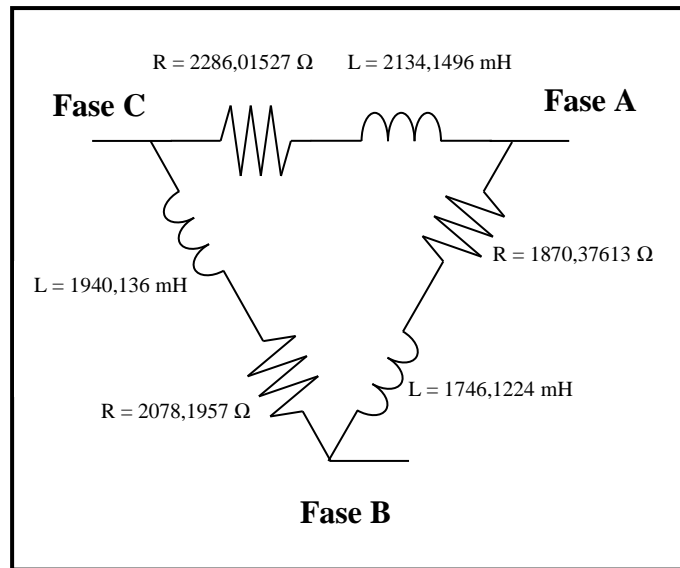


Figura B.7 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,1 pu.

Pode-se definir o grau de 0,2 pu para a carga da figura B.6 fazendo a impedância Z_{BC} constante, a impedância Z_{CA} , 20% acima da impedância Z_{BC} , e a impedância Z_{AB} , 20% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.8 a seguir:

$$R_{CA} = 1,2 \times 2078,1957 = 2493,83484 \, \Omega$$

$$L_{CA} = 1,2 \times 1940,136 = 2328,1632 \, \text{mH}$$

$$R_{AB} = 0,8 \times 2078,1957 = 1662,55656 \, \Omega$$

$$L_{AB} = 0,8 \times 1940,136 = 1552,1088 \, \text{mH}$$

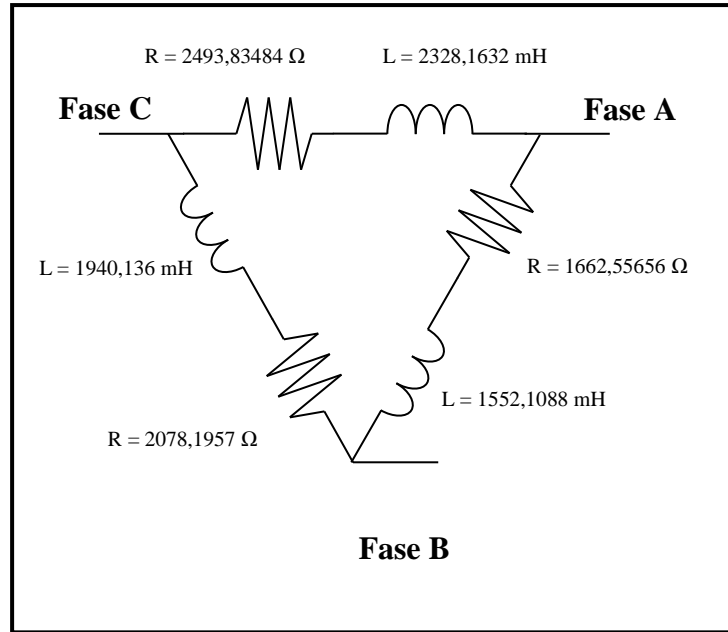


Figura B.8 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,2 pu.

Pode-se definir o grau de 0,3 pu para a carga da figura B.6 fazendo a impedância Z_{BC} constante, a impedância Z_{CA} , 30% acima da impedância Z_{BC} , e a impedância Z_{AB} , 30% abaixo.

Assim, têm-se, conforme pode ser visto na figura B.9 a seguir:

$$R_{CA} = 1,3 \times 2078,1957 = 2701,65441 \, \Omega$$

$$L_{CA} = 1,3 \times 1940,136 = 2522,1768 \, mH$$

$$R_{AB} = 0,7 \times 2078,1957 = 1454,73699 \, \Omega$$

$$L_{AB} = 0,7 \times 1940,136 = 1358,0952 \, mH$$

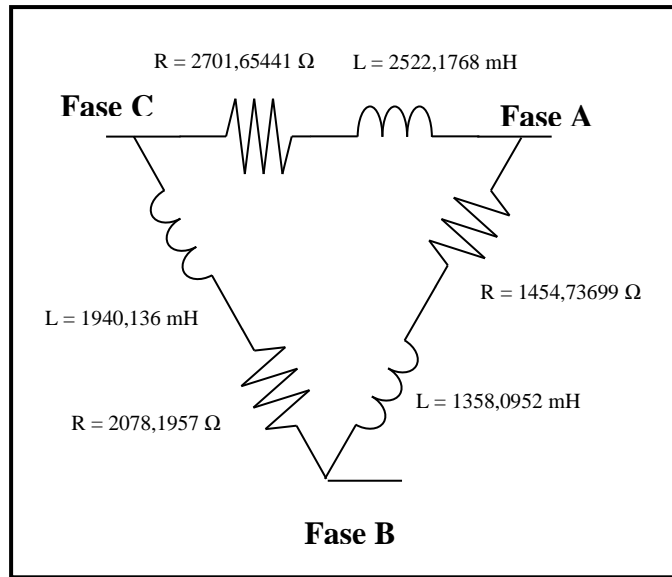


Figura B.9 – Carga em delta – grau de desequilíbrio igual a 0,3 pu.

B.4 – Capacitores

O que se fez nesses casos foi adicionar dois bancos de capacitores de 600 kVA cada, um no ponto D e outro no ponto H do sistema, conforme figura B.10, a seguir:

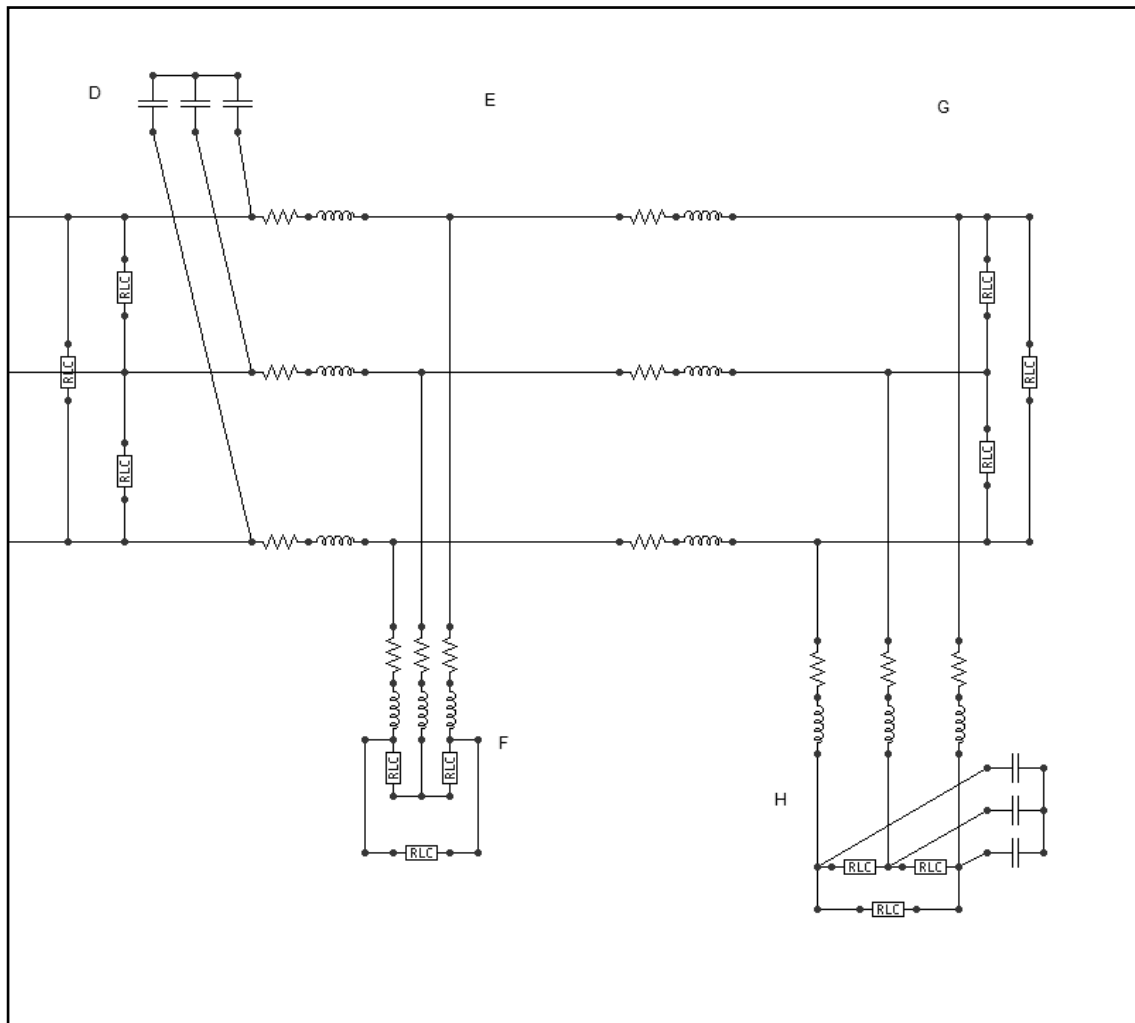


Figura B.10 – Localização dos bancos de capacitores no sistema no ATP.

Mas existe uma peculiaridade nesses bancos: a fase C dos mesmos está aberta. Esse fenômeno ocorre na realidade dos sistemas elétricos, uma vez que as fases podem, com o passar do tempo, perder unidades de capacitância.

Assim, prosseguiu-se com os seguintes cálculos:

$$X_c = \frac{V_L^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{13,8^2}{0,6}$$

$$X_c = 317,4 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c}$$
$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 317,4} = 8,358 \mu F$$

E encontrou-se o valor de $8,358 \mu F$ para a capacitância por fase do banco, usada nas simulações no programa ATP.

Para a fase aberta do banco de capacitores, utilizou-se a aproximação de que um circuito aberto pode ser representado por uma impedância infinita. Assim, no caso em questão, X_c seria infinito. Sendo X_c infinito, a capacitância C é igual a zero. Nas simulações do ATP, foi utilizado o valor de 1.10^{-12} para essa capacitância nula (devido a requisitos do próprio programa).

A configuração escolhida para os bancos é de estrela isolado. Essa configuração é a mais típica nos sistemas elétricos, dado que ela evita a circulação de correntes harmônicas múltiplas da 3ª ordem.

APÊNDICE C

TABELAS

C.1 – Introdução

Encontram-se aqui as tabelas montadas com os resultados de todas as simulações realizadas pelo programa computacional criado em ambiente ATP, implementado no trabalho.

C.2 – Falta Fase-Terra

a) Subcaso B-1

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	1588,4	81,7	81,7
	15		44,0	44,1
	30		24,2	24,3
	50	159,4	11,1	11,2
	75	112,3	10,3	10,3
	100	88,0	15,2	15,1
	150		22,5	22,4
	200		26,9	26,8
	250		29,8	29,7
	300		31,8	31,8
	500		36,2	36,1
	1000		39,6	39,6
	2000		41,5	41,4
	10000	13,0	43,0	42,9
0,1	0	1588,4	80,9	82,2
	15		44,6	43,2
	30		26,2	22,2
	50	159,4	15,7	6,8
	75	112,3	15,2	7,2
	100	88,0	18,7	14,0
	150		24,7	22,3
	200		28,6	27,1

	250		31,2	30,2
	300		33,1	32,3
	500		37,0	36,8
	1000		40,3	40,5
	2000		42,0	42,4
	10000	13,0	43,4	43,9
0,2	0	1588,4	79,8	82,5
	15		44,7	41,8
	30		28,3	20,2
	50	159,4	20,4	3,7
	75	112,3	20,7	8,6
	100	88,0	23,5	15,9
	150		28,6	24,5
	200		32,0	29,4
	250		34,3	32,5
	300		35,9	34,6
	500		39,5	39,2
	1000		42,4	42,9
	2000		44,0	44,8
	10000	13,0	45,3	46,3
0,3	0	1588,4	78,3	82,4
	15		44,6	40,0
	30		30,5	18,2
	50	159,4	25,3	6,2
	75	112,3	26,5	13,4
	100	88,0	29,2	20,3
	150		33,7	28,6
	200		36,6	33,4
	250		38,6	36,4
	300		40,1	38,5
	500		43,2	43,0
	1000		45,8	46,6
	2000		47,2	48,4
	10000	13,0	48,4	49,9

Tabela C.1 – Resultados tabelados para o Subcaso B-1.

b) Subcaso B-2

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	1586,11	90,0	81,4
	15		66,7	39,0
	30		52,7	16,7
	50		41,1	15,4
	75		32,1	28,3
	100		26,4	37,8
	150		19,4	49,7
	200		15,3	56,7
	250	43,03	12,7	61,2
	300	37,94	10,8	64,5
	500	27,69	6,8	71,4
	1000	19,98	3,5	77,0
	2000	16,13	1,8	79,9
	10000	13,05	0,4	82,4
0,1	0	1586,60	90,0	81,4
	15		66,7	39,1
	30		52,7	17,0
	50		41,1	15,8
	75		32,1	28,5
	100		26,4	37,9
	150		19,4	49,8
	200		15,3	56,7
	250	43,29	12,7	61,3
	300	38,19	10,8	64,5
	500	27,94	6,8	71,4
	1000	20,20	3,5	77,0
	2000	16,32	1,8	79,9
	10000	13,22	0,4	82,3
0,2	0	1586	90,0	81,4
	15		66,7	39,2
	30		52,6	17,3
	50		41,0	16,0
	75		32,1	28,5
	100		26,3	37,9
	150		19,3	49,6
	200		15,3	56,5
	250	43,81	12,6	61,0
	300	38,71	10,8	64,2
	500	28,44	6,8	71,1
	1000	20,69	3,5	76,6
	2000	16,81	1,8	79,6
	10000	13,69	0,4	82,0
0,3	0	1586	90,0	81,3
	15		66,6	39,3
	30		52,5	17,7
	50		40,9	16,3
	75		31,9	28,5
	100		26,2	37,7
	150		19,2	49,3
	200		15,2	56,1
	250	44,65	12,6	60,6
	300	39,55	10,7	63,8
	500	29,28	6,7	70,5
	1000	21,53	3,5	76,0
	2000	17,32	1,8	78,9
	10000	14,51	0,4	81,3

Tabela C.2 – Resultados tabelados para o Subcaso B-2.

c) Subcaso B-3

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	90,3	82,0
	15	66,8	39,1
	30	52,8	15,8
	50	41,2	13,5
	75	32,2	27,0
	100	26,5	36,8
	150	19,5	48,9
	200	15,4	56,0
	250	12,7	60,6
	300	10,8	63,9
	500	6,8	70,9
	1000	3,5	76,7
	2000	1,8	79,7
	10000	0,4	82,2
0,1	0	90,2	81,9
	15	66,8	39,2
	30	52,8	16,3
	50	41,2	14,2
	75	32,2	27,3
	100	26,5	37,0
	150	19,5	49,0
	200	15,4	56,1
	250	12,7	60,7
	300	10,8	64,0
	500	6,8	70,9
	1000	3,5	76,6
	2000	1,8	79,6
	10000	0,4	82,1
0,2	0	90,2	81,8
	15	66,8	39,4
	30	52,8	16,8
	50	41,1	14,8
	75	32,2	27,6
	100	26,4	37,1
	150	19,4	49,0
	200	15,4	56,0
	250	12,7	60,5
	300	10,8	63,8
	500	6,8	70,7
	1000	3,5	76,3
	2000	1,8	79,3
	10000	0,4	81,8
0,3	0	90,2	81,6
	15	66,7	39,5
	30	52,6	17,4
	50	41,0	15,3
	75	32,0	27,7
	100	26,3	37,0
	150	19,3	48,7
	200	15,3	55,6
	250	12,6	60,1
	300	10,8	63,3
	500	6,8	70,2
	1000	3,5	75,7
	2000	1,8	78,6
	10000	0,4	81,1

Tabela C.3 – Resultados tabelados para o Subcaso B-3.

d) Subcaso C-1

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	12,29	43,4	43,3
	15	12,29	43,4	43,3
	30	12,29	43,4	43,3
	50	12,29	43,4	43,3
	75	12,29	43,4	43,3
	100	12,29	43,4	43,3
	150	12,29	43,4	43,3
	200	12,29	43,4	43,3
	250	12,29	43,4	43,3
	300	12,29	43,4	43,3
	500	12,29	43,4	43,3
	1000	12,29	43,4	43,3
	2000	12,29	43,4	43,3
	10000	12,29	43,4	43,3
0,1	0	12,29	43,8	44,3
	15	12,29	43,8	44,3
	30	12,29	43,8	44,3
	50	12,29	43,8	44,3
	75	12,29	43,8	44,3
	100	12,29	43,8	44,3
	150	12,29	43,8	44,3
	200	12,29	43,8	44,3
	250	12,29	43,8	44,3
	300	12,29	43,8	44,3
	500	12,29	43,8	44,3
	1000	12,29	43,8	44,3
	2000	12,29	43,8	44,3
	10000	12,29	43,8	44,3
0,2	0	12,29	45,6	46,7
	15	12,29	45,6	46,7
	30	12,29	45,6	46,7
	50	12,29	45,6	46,7
	75	12,29	45,6	46,7
	100	12,29	45,6	46,7
	150	12,29	45,6	46,7
	200	12,29	45,6	46,7
	250	12,29	45,6	46,7
	300	12,29	45,6	46,7
	500	12,29	45,6	46,7
	1000	12,29	45,6	46,7
	2000	12,29	45,6	46,7
	10000	12,29	45,6	46,7
0,3	0	12,29	48,7	50,3
	15	12,29	48,7	50,3
	30	12,29	48,7	50,3
	50	12,29	48,7	50,3
	75	12,29	48,7	50,3
	100	12,29	48,7	50,3
	150	12,29	48,7	50,3
	200	12,29	48,7	50,3
	250	12,29	48,7	50,3
	300	12,29	48,7	50,3
	500	12,29	48,7	50,3
	1000	12,29	48,7	50,3
	2000	12,29	48,7	50,3
	10000	12,29	48,7	50,3

Tabela C.4 – Resultados tabelados para o Subcaso C-1.

e) Subcaso C-2

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	12,22	17,6	66,9
	15		15,5	68,9
	30		13,8	70,5
	50		12,0	72,1
	75		10,3	73,7
	100		9,1	74,9
	150		7,3	76,5
	200	12,27	6,1	77,6
	250		5,2	78,4
	300		4,6	79,0
	500		3,0	80,4
	1000		1,7	81,6
	2000		0,9	82,3
	10000	12,27	0,2	82,9
0,1	0	12,45	18,1	66,9
	15		15,9	69,0
	30		14,1	70,6
	50		12,3	72,3
	75		10,6	73,9
	100		9,3	75,1
	150		7,4	76,7
	200	12,45	6,2	77,8
	250		5,3	78,6
	300		4,7	79,2
	500		3,1	80,5
	1000		1,7	81,6
	2000		0,9	82,3
	10000	12,45	0,2	82,8
0,2	0	12,87	19,2	66,7
	15		16,8	68,9
	30		14,9	70,6
	50		13,0	72,4
	75		11,1	74,0
	100		9,8	75,1
	150		7,8	76,7
	200	12,92	6,5	77,8
	250		5,6	78,5
	300		4,9	79,0
	500		3,2	80,3
	1000		1,8	81,4
	2000		0,9	82,0
	10000	12,92	0,2	82,5
0,3	0	13,68	21,0	66,4
	15		18,3	68,7
	30		16,2	70,5
	50		14,0	72,2
	75		12,0	73,8
	100		10,5	74,9
	150		8,4	76,5
	200	13,73	6,9	77,5
	250		5,9	78,2
	300		5,2	78,7
	500		3,4	79,8
	1000		1,9	80,8
	2000		1,0	81,4
	10000	13,73	0,2	81,8

Tabela C.5 – Resultados tabelados para o Subcaso C-2.

f) Subcaso C-3

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0		13,1	71,1
	15		11,5	72,6
	30		10,3	73,7
	50		9,0	74,9
	75		7,7	76,0
	100		6,8	76,8
	150		5,5	78,0
	200		4,6	78,8
	250		3,9	79,4
	300		3,4	79,8
	500		2,3	80,8
	1000		1,3	81,7
	2000		0,7	82,2
	10000		0,1	82,7
0,1	0		14,0	70,8
	15		12,3	72,4
	30		10,9	73,6
	50		9,5	74,8
	75		8,2	76,0
	100		7,2	76,8
	150		5,8	78,0
	200		4,8	78,8
	250		4,2	79,4
	300		3,7	79,8
	500		2,4	80,8
	1000		1,3	81,7
	2000		0,7	82,2
	10000		0,2	82,6
0,2	0		15,6	70,4
	15		13,7	72,0
	30		12,2	73,3
	50		10,6	74,6
	75		9,1	75,7
	100		8,0	76,6
	150		6,4	77,8
	200		5,4	78,6
	250		4,6	79,2
	300		4,0	79,6
	500		2,7	80,5
	1000		1,5	81,4
	2000		0,8	81,9
	10000		0,2	82,3
0,3	0		18,0	69,7
	15		15,7	71,4
	30		13,9	72,8
	50		12,0	74,1
	75		10,3	75,3
	100		9,0	76,1
	150		7,2	77,3
	200		6,0	78,1
	250		5,1	78,6
	300		4,5	79,0
	500		3,0	80,0
	1000		1,6	80,8
	2000		0,8	81,2
	10000		0,2	81,6

Tabela C.6 – Resultados tabelados para o Subcaso C-3.

g) Subcaso D-1

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	1588,37	81,7	81,7
	15		44,0	44,1
	30		24,2	24,3
	50	159,37	11,1	11,2
	75	112,27	10,3	10,3
	100		15,2	15,1
	150		22,5	22,4
	200		26,9	26,8
	250		29,8	29,7
	300		31,8	31,8
	500		36,2	36,1
	1000		39,6	39,6
	2000		41,5	41,4
	10000		43,0	42,9
0,1	0	1588,37	80,9	82,2
	15		44,6	43,2
	30		26,2	22,2
	50	159,37	15,7	6,8
	75	112,27	15,2	7,2
	100		18,7	14,0
	150		24,7	22,3
	200		28,6	27,1
	250		31,2	30,2
	300		33,1	32,3
	500		37,0	36,8
	1000		40,3	40,5
	2000		42,0	42,4
	10000		43,4	43,9
0,2	0	1588,37	79,8	82,5
	15		44,7	41,8
	30		28,3	20,2
	50	159,37	20,4	3,7
	75	112,27	20,7	8,6
	100		23,5	15,9
	150		28,6	24,5
	200		32,0	29,4
	250		34,3	32,5
	300		35,9	34,6
	500		39,5	39,2
	1000		42,4	42,9
	2000		44,0	44,8
	10000		45,3	46,3
0,3	0	1588,37	78,3	82,4
	15		44,6	40,0
	30		30,5	18,2
	50	159,37	25,3	6,2
	75	112,27	26,5	13,4
	100		29,2	20,3
	150		33,7	28,6
	200		36,6	33,4
	250		38,6	36,4
	300		40,1	38,5
	500		43,2	43,0
	1000		45,8	46,6
	2000		47,2	48,4
	10000		48,4	49,9

Tabela C.7 – Resultados tabelados para o Subcaso D-1.

h) Subcaso D-2

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0		87,2	81,5
	15		59,4	40,7
	30		44,1	18,8
	50		32,3	13,2
	75		23,8	24,2
	100		18,7	33,5
	150		12,9	45,5
	200		9,8	52,8
	250		7,8	57,7
	300		6,5	61,3
	500		3,8	69,0
	1000		1,9	75,6
	2000		0,9	79,2
	10000		0,2	82,2
0,1	0		87,4	81,2
	15		59,2	40,9
	30		43,8	19,7
	50		32,0	14,7
	75		23,5	25,1
	100		18,4	34,1
	150		12,7	45,9
	200		9,6	53,1
	250		7,7	58,0
	300		6,4	61,5
	500		3,8	69,2
	1000		1,9	75,7
	2000		0,9	79,2
	10000		0,2	82,2
0,2	0		87,4	80,8
	15		58,8	40,9
	30		43,3	20,6
	50		34,5	16,3
	75		23,1	26,1
	100		18,1	34,8
	150		12,5	46,3
	200		9,5	53,3
	250		7,6	58,1
	300		6,4	61,5
	500		3,8	69,1
	1000		1,9	75,5
	2000		1,0	79,0
	10000		0,2	81,9
0,3	0		87,4	80,2
	15		58,1	40,8
	30		42,5	21,5
	50		30,8	18,0
	75		22,6	27,2
	100		17,8	35,5
	150		12,3	46,6
	200		9,4	53,5
	250		7,6	58,1
	300		6,4	61,4
	500		3,9	68,8
	1000		2,0	75,0
	2000		1,0	78,4
	10000		0,2	81,2

Tabela C.8 – Resultados tabelados para o Subcaso D-2.

i) Subcaso D-3

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0		88,2	81,8
	15		61,1	39,7
	30		46,1	16,9
	50		34,4	11,9
	75		25,8	24,3
	100		20,6	33,8
	150		14,5	45,9
	200		11,1	53,2
	250		9,0	58,1
	300		7,6	61,6
	500		4,6	69,2
	1000		2,3	75,6
	2000		1,1	79,1
	10000		0,2	82,0
0,1	0		88,4	81,5
	15		60,9	39,9
	30		45,8	17,9
	50		34,0	13,4
	75		25,4	25,0
	100		20,2	34,3
	150		14,2	46,2
	200		10,9	53,4
	250		8,8	58,2
	300		7,4	61,7
	500		4,5	69,3
	1000		2,2	75,6
	2000		1,1	79,1
	10000		0,2	82,0
0,2	0		88,4	81,1
	15		60,4	39,9
	30		45,2	18,8
	50		33,4	15,0
	75		24,9	25,9
	100		19,8	34,8
	150		13,9	46,5
	200		10,7	53,5
	250		8,6	58,3
	300		7,2	61,7
	500		4,4	69,1
	1000		2,2	75,4
	2000		1,1	78,8
	10000		0,2	81,6
0,3	0		88,4	80,5
	15		59,6	39,9
	30		44,3	19,9
	50		32,6	16,8
	75		24,3	26,9
	100		19,3	35,4
	150		13,6	46,7
	200		10,4	53,5
	250		8,5	58,2
	300		7,1	61,5
	500		4,3	68,8
	1000		2,2	74,9
	2000		1,1	78,2
	10000		0,2	81,0

Tabela C.9 – Resultados tabelados para o Subcaso D-3.

C.3 – Falta Fase-Fase-Terra

a) Subcaso B-1

Na tabela C.10, observar-se-ão alguns pontos em destaque no que se diz respeito à detecção da falta, devido ao fato do defeito ser mais complexo do que o defeito de falta fase-terra (no presente caso, duas fases vão ao solo – ou a uma outra superfície que proporcione as mesmas baixas correntes, típicas de faltas de alta impedância).

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	1588,37	1588,37	45,1	45,1
	15			30,6	30,7
	30			19,7	19,7
	50	159,38	159,38	10,4	10,4
	75	112,27	112,27	10,9	10,8
	100	87,97	87,97	17,4	17,3
	150			28,5	28,5
	200			36,4	36,4
	250			42,1	42,0
	300			46,4	46,4
	500			56,4	56,4
	1000			65,6	65,6
	2000			70,8	70,8
	10000	13,05	13,05	75,4	75,3
0,1	0	1588,37	1589,36	44,6	44,6
	15			29,0	29,0
	30			17,6	17,4
	50	159,38	158,55	9,4	9,1
	75	112,27	111,35	13,5	13,1
	100			20,9	20,6
	150			32,4	32,2
	200			40,4	40,2
	250			46,0	45,8
	300			50,3	50,1
	500			60,1	59,9
	1000			68,9	68,7
	2000			73,9	73,7
	10000	13,05	11,95	78,2	78,0
0,2	0	1588,37	1590,14	44,0	44,0
	15			27,0	26,9
	30			15,2	14,9
	50	159,38	157,85	9,5	8,9
	75	112,27	110,60	16,8	16,3
	100			24,8	24,5
	150			36,7	36,4
	200			44,5	44,2
	250			50,1	49,8
	300			54,2	54,0
	500			63,7	63,4
	1000			72,1	71,8
	2000			76,8	76,5
	10000	13,05	11,04	80,8	80,5
0,3	0	1588,37	1590,78	43,2	43,2
	15			24,7	24,5
	30	247,81	246,08	12,6	12,2

	50	159,38	157,27	11,1	10,4
	75	112,27	109,95	20,8	20,4
	100			29,3	28,9
	150			41,2	40,9
	200			49,0	48,6
	250			54,4	54,0
	300			58,4	58,0
	500			67,4	67,0
	1000			75,3	74,9
	2000			79,6	79,3
	10000	13,05	10,26	83,4	83,0

Tabela C.10 – Resultados tabelados para o Subcaso B-1.

A partir da análise desses resultados, chega-se à seguinte conclusão: Os valores de impedância críticos são sempre os mesmos – 50 e 75 Ω , com o acréscimo, para a análise atual, da impedância de 30 Ω para o grau de desequilíbrio de 0,3 pu.

Observa-se aqui que nos pontos destacados (valores sublinhados) ambos os índices não poderiam indicar a presença da falta, uma vez que foi estipulado o valor limite de 15% e ambos se encontram abaixo desse valor.

Um resultado interessante se mostra através dessa tabela. Até o valor de impedância de 30 Ω , os índices de desequilíbrio curiosamente diminuem com o aumento do grau de desequilíbrio do sistema. A partir do valor de impedância de 100 Ω , os valores retornam ao esperado (crescem juntamente com o aumento do grau de desequilíbrio). Entre 30 e 100 Ω , os valores oscilam, sem uma ordem definida.

Faz-se necessário lembrar, no entanto, que as faltas Fase Fase Terra representam uma pequena porcentagem do total das faltas que ocorrem num sistema. Sendo assim, a metodologia dos desequilíbrios de corrente deixou de detectar, no caso em questão, 14,3% de todos os pontos medidos, o que representa muito pouco em face a todos os tipos de defeitos que podem ocorrer num sistema elétrico.

b) Subcaso B-2

Conforme visto para o caso B-1, alguns pontos não serão detectados. Os mesmos estão sublinhados na tabela C.11:

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0		49,5	49,8
	15		48,1	48,0
	30		46,5	46,4
	50		44,6	44,5
	75		42,4	42,4
	100		40,4	40,4
	150		37,0	36,9
	200		34,0	34,0

	250			31,5	31,5
	300			29,4	29,4
	500			23,0	23,0
	1000	19,99	19,99	15,0	15,0
	2000	16,12	16,12	8,8	8,8
	10000	13,05	13,05	2,0	2,1
0,1	0			49,6	49,8
	15			48,1	48,2
	30			46,6	46,8
	50			44,6	45,1
	75			42,4	43,1
	100			40,4	41,4
	150			36,9	38,3
	200			34,0	35,7
	250			31,5	33,5
	300			29,3	31,6
	500			23,0	26,0
	1000	20,19	20,60	14,9	18,8
	2000	16,31	16,77	8,7	13,4
	10000	13,21	13,72	2,0	7,5
0,2	0			49,6	49,8
	15			48,1	48,3
	30			46,5	47,1
	50			44,6	45,6
	75			42,3	43,9
	100			40,3	42,3
	150			36,8	39,6
	200			33,8	37,4
	250			31,3	35,4
	300			29,1	33,8
	500			22,8	28,9
	1000	20,67	21,39	14,7	22,8
	2000	16,78	17,60	8,6	18,1
	10000	13,67	14,56	2,0	13,1
0,3	0			49,6	49,8
	15			48,1	48,44
	30			46,5	47,4
	50			44,5	46,1
	75			42,2	44,7
	100			40,1	43,4
	150			36,5	41,1
	200			33,4	39,2
	250			30,9	37,5
	300			28,7	36,1
	500			22,3	32,1
	1000	21,50	22,42	14,3	27,0
	2000	17,60	18,65	8,4	23,2
	10000	14,48	15,66	1,9	19,1

Tabela C.11 – Resultados tabelados para o Subcaso B-2.

Pode-se observar que, diferentemente do caso B-1, onde tinham-se os pontos problemáticos sempre para as impedâncias de falta de 50 e 75 Ω , no caso atual, esses mesmos pontos ocorrem para impedâncias de falta mais altas, ou seja, para faltas com mais baixas correntes (entre 10 e 20 A). Sabe-se que é exatamente aí onde mora o perigo. Pois faltas de alta impedância podem causar correntes, por vezes, até menores que 1 A. No caso do sistema estudado, até faltas com impedâncias em torno de $10^4 \Omega$, as correntes ficam em torno da ordem de grandeza de 10.

Portanto, especial atenção deve ser dada para um sistema onde o desequilíbrio das cargas não seja tão significativo (como acontece para o grau de 0,1 pu) ou até para um sistema ausente de cargas desequilibradas (grau de 0,0 pu), nos casos de falta de alta impedância (com altíssima impedância de falta – para o sistema estudado, acima de 1000 Ω).

c) Subcaso B-3

Os resultados se encontram na tabela C.12.

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0			49,4	49,9
	15			47,9	48,2
	30			46,4	46,6
	50			44,5	44,7
	75			42,3	42,5
	100			40,3	40,6
	150			36,9	37,1
	200			34,0	34,2
	250			31,5	31,7
	300			29,3	29,5
	500			23,0	23,2
	1000	20,1	20,0	14,9	15,2
	2000	16,2	16,2	8,8	9,0
	10000	13,1	13,1	2,0	2,3
0,1	0			49,5	49,9
	15			48,0	48,3
	30			46,4	47,0
	50			44,5	45,2
	75			42,3	43,3
	100			40,3	41,6
	150			36,8	38,5
	200			33,9	35,9
	250			31,4	33,7
	300			29,2	31,8
	500			22,9	26,1
	1000	20,4	20,64	14,9	19,0
	2000	16,4	16,80	8,7	13,6
	10000	13,3	13,74	2,0	7,6
0,2	0			49,5	49,9
	15			48,0	48,5
	30			46,4	47,2
	50			44,4	45,8
	75			42,2	44,1
	100			40,2	42,5
	150			36,7	39,8
	200			33,7	37,6
	250			31,2	35,6
	300			29,0	34,0
	500			22,7	29,1
	1000	20,8	21,43	14,7	23,0
	2000	16,9	17,62	8,6	18,3
	10000	13,7	14,59	2,0	13,3
0,3	0			49,5	49,9
	15			48,0	48,6
	30			46,4	47,6
	50			44,3	46,3
	75			42,0	44,8

	100			40,0	43,5
	150			36,4	41,2
	200			33,4	39,3
	250			30,8	37,7
	300			28,6	36,3
	500			22,3	32,2
	1000	21,6	22,47	14,3	27,2
	2000	17,7	18,69	8,3	23,3
	10000	14,6	15,70	1,9	19,2

Tabela C.12 – Resultados tabelados para o Subcaso B-3.

Neste subcaso, alguns poucos pontos se apresentaram problemáticos, ou seja, incapazes de detectar a falta. Todos eles se deram para faltas de impedância acima de 1000 Ω , ou seja, correntes de falta de 20 A e abaixo desse valor. Este representa aproximadamente 16% da corrente nominal quando do caso ideal, ausente de defeitos.

d) Subcaso C-1

Análise parecida pode ser feita para o caso de falta bifásica à terra. Neste subcaso, os dois condutores rompidos do lado carga vão de encontro ao solo, resultando nos valores de α_0 e α_2 que se seguem na tabela C.13.

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	12,29	12,29	76,5	76,5
	15	12,29	12,29	76,5	76,5
	30	12,29	12,29	76,5	76,5
	50	12,29	12,29	76,5	76,5
	75	12,29	12,29	76,5	76,5
	100	12,29	12,29	76,5	76,5
	150	12,29	12,29	76,5	76,5
	200	12,29	12,29	76,5	76,5
	250	12,29	12,29	76,5	76,5
	300	12,29	12,29	76,5	76,5
	500	12,29	12,29	76,5	76,5
	1000	12,29	12,29	76,5	76,5
	2000	12,29	12,29	76,5	76,5
	10000	12,29	12,29	76,5	76,5
0,1	0	12,29		79,3	79,1
	15	12,29		79,3	79,1
	30	12,29		79,3	79,1
	50	12,29		79,3	79,1
	75	12,29		79,3	79,1
	100	12,29		79,3	79,1
	150	12,29		79,3	79,1
	200	12,29		79,3	79,1
	250	12,29		79,3	79,1
	300	12,29		79,3	79,1
	500	12,29		79,3	79,1
	1000	12,29		79,3	79,1
	2000	12,29		79,3	79,1
	10000	12,29		79,3	79,1
0,2	0	12,29		81,9	81,6
	15	12,29		81,9	81,6
	30	12,29		81,9	81,6
	50	12,29		81,9	81,6
	75	12,29		81,9	81,6

	100	12,29		81,9	81,6
	150	12,29		81,9	81,6
	200	12,29		81,9	81,6
	250	12,29		81,9	81,6
	300	12,29		81,9	81,6
	500	12,29		81,9	81,6
	1000	12,29		81,9	81,6
	2000	12,29		81,9	81,6
	10000	12,29		81,9	81,6
0,3	0	12,29		84,3	83,9
	15	12,29		84,3	83,9
	30	12,29		84,3	83,9
	50	12,29		84,3	83,9
	75	12,29		84,3	83,9
	100	12,29		84,3	83,9
	150	12,29		84,3	83,9
	200	12,29		84,3	83,9
	250	12,29		84,3	83,9
	300	12,29		84,3	83,9
	500	12,29		84,3	83,9
	1000	12,29		84,3	83,9
	2000	12,29		84,3	83,9
	10000	12,29		84,3	83,9

Tabela C.13 – Resultados tabelados para o Subcaso C-1.

Observa-se que os valores dos índices de desequilíbrio independem da impedância de falta, relacionando-se apenas com o grau de desequilíbrio (da mesma forma, aumentam conforme crescem as cargas desequilibradas do sistema).

Observa-se também que a corrente de falta é muito baixa, representando aproximadamente 10% da corrente nominal, tipicamente um valor de corrente para faltas de alta impedância.

Outro ponto interessante é justamente o valor médio encontrado para os resultados dos índices de desequilíbrio, ou seja, tipicamente, para esse defeito, pode-se esperar um valor em torno de 80%.

e) Subcaso C-2

Para a situação específica de duas fases apresentando o defeito (no estudo realizado, serão estas as fases A e B), têm-se os resultados na tabela C.14:

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0		69,1	68,9
	15		67,5	67,3
	30		66,0	65,8
	50		64,1	63,8
	75		61,8	61,6
	100		59,7	59,5
	150		55,8	55,6
	200		52,5	52,3
	250		49,5	49,3
	300		46,8	46,6
	500		38,4	38,3
	1000		26,5	26,4
	2000		16,4	16,3
	10000	<u>12,28</u>	<u>12,28</u>	<u>4,0</u>
0,1	0		68,0	66,2
	15		66,4	64,6
	30		65,0	63,0
	50		63,1	61,0
	75		60,9	58,7
	100		58,8	56,5
	150		55,0	52,6
	200		51,7	49,0
	250		48,8	45,9
	300		46,2	43,2
	500		38,0	34,5
	1000		26,3	22,1
	2000	<u>12,44</u>	<u>12,96</u>	<u>11,6</u>
	10000	<u>12,44</u>	<u>12,96</u>	<u>4,0</u>
0,2	0		66,7	63,1
	15		65,2	61,4
	30		63,7	59,8
	50		61,8	57,7
	75		59,7	55,2
	100		57,6	53,0
	150		54,0	48,9
	200		50,7	45,2
	250		47,8	42,0
	300		45,3	39,1
	500		37,2	30,1
	1000		25,7	17,4
	2000	<u>12,89</u>	<u>13,81</u>	<u>6,6</u>
	10000	<u>12,89</u>	<u>13,81</u>	<u>3,9</u>
0,3	0		65,1	59,3
	15		63,6	57,5
	30		62,1	55,8
	50		60,3	53,6
	75		58,2	51,1
	100		56,2	48,7
	150		52,6	44,4
	200		49,4	40,7
	250		46,6	37,3
	300		44,0	34,3
	500		36,2	25,0
	1000	<u>13,69</u>	<u>14,92</u>	<u>11,9</u>
	2000	<u>13,69</u>	<u>14,92</u>	<u>2,4</u>
	10000	<u>13,69</u>	<u>14,92</u>	<u>3,8</u>

Tabela C.14 – Resultados tabelados para o Subcaso C-2.

Segundo os resultados, tem-se que os pontos em destaque (sublinhados) estão sempre localizados na linha de impedância de falta igual a $10^4 \Omega$, independente do grau de desequilíbrio do sistema. Para esse valor de impedância, ambos os índices resultam em valores abaixo de 15%, ficando α_0 sempre em torno de 4%.

f) Subcaso C-3

As fases A e B vão de encontro ao solo neste subcaso. Eis os resultados:

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0			69,1	68,8
	15			67,5	67,2
	30			65,9	65,6
	50			64,0	63,7
	75			61,7	61,4
	100			59,6	59,3
	150			55,8	55,5
	200			52,4	52,1
	250			49,4	49,1
	300			46,7	46,4
	500			38,4	38,1
	1000			26,5	26,2
	2000			16,3	16,1
	10000	<u>12,34</u>	<u>12,31</u>	<u>4,0</u>	<u>3,8</u>
0,1	0			68,0	66,1
	15			66,4	64,4
	30			64,9	62,9
	50			63,0	60,9
	75			60,8	58,5
	100			58,7	56,3
	150			55,0	52,4
	200			51,7	48,9
	250			48,7	45,8
	300			46,1	43,0
	500			37,9	34,3
	1000			26,2	21,9
	2000			16,2	<u>11,4</u>
	10000			<u>4,0</u>	<u>1,9</u>
0,2	0			66,6	63,0
	15			65,1	61,2
	30			63,6	59,6
	50			61,8	57,5
	75			59,6	55,1
	100			57,6	52,8
	150			53,9	48,7
	200			50,7	45,0
	250			47,8	41,8
	300			45,2	38,9
	500			37,2	30,0
	1000			25,7	17,2
	2000	<u>12,94</u>	<u>13,85</u>	15,9	<u>6,4</u>
	10000	<u>12,95</u>	<u>13,84</u>	<u>3,9</u>	<u>7,5</u>
0,3	0			65,0	59,2
	15			63,5	57,4
	30			62,1	55,6
	50			60,2	53,5
	75			58,1	50,9
	100			56,1	48,5
	150			52,5	44,2

	200			49,3	40,5
	250			46,5	37,1
	300			44,0	34,1
	500			36,1	24,8
	1000			24,9	11,7
	2000	13,75	14,96	15,4	2,2
	10000	<u>13,76</u>	<u>14,96</u>	<u>3,8</u>	<u>13,6</u>

Tabela C.15 – Resultados tabelados para o Subcaso C-3.

Observam-se poucos pontos destacados na tabela C.15, ou seja, aqueles que não conseguem representar o defeito. Estão eles sempre na linha de impedância de falta igual a 10.000 Ω , ou seja, para corrente de falta em torno de 13 A (valor tomado a partir da média), o que representa aproximadamente 10% do valor da corrente nominal para o caso ideal (sem faltas).

Ou seja, se a falta ocasionar queda de condutores de duas fases, levando-os ao solo do lado carga do sistema, ela pode não ser detectada se a corrente originada por ela for muito baixa (da ordem de 0,1 pu ou menor) quando comparada à corrente nominal de 127,6 A (caso ideal).

g) Subcaso D-1

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	1588,37	1588,37	45,1	45,1
	15			30,6	30,7
	30			19,7	19,7
	50	159,38	159,38	10,4	10,4
	75	112,27	112,27	10,4	10,4
	100			17,4	17,3
	150			28,5	28,5
	200			36,4	36,4
	250			42,1	42,0
	300			46,4	46,4
	500			56,4	56,4
	1000			65,6	65,6
	2000			70,8	70,8
	10000			75,4	75,3
0,1	0	1588,37	1588,37	44,6	44,6
	15			29,0	29,0
	30			17,6	17,4
	50	159,37	158,55	9,4	9,1
	75	112,26	111,36	13,5	13,1
	100			20,9	20,6
	150			32,4	32,2
	200			40,4	40,2
	250			46,0	45,8
	300			50,3	50,1
	500			60,1	59,9
	1000			68,9	68,7

0,2	2000			73,9	73,7
	10000			78,2	78,0
	0	1588,37	1588,37	44,0	44,0
	15			27,0	26,9
	30			15,2	14,9
	50	159,36	157,85	9,5	8,8
	75			16,8	16,3
	100			24,8	24,5
	150			36,7	36,4
	200			44,5	44,2
	250			50,1	49,8
	300			54,2	54,0
	500			63,7	63,4
	1000			72,1	71,8
	2000			76,8	76,5
	10000			80,8	80,5
0,3	0	1588,37	1588,37	43,2	43,2
	15			24,7	24,5
	30	247,80	246,09	12,6	12,2
	50	159,36	157,27	11,1	10,4
	75			20,8	20,4
	100			29,3	28,9
	150			41,2	40,9
	200			49,0	48,6
	250			54,4	54,0
	300			58,4	58,0
	500			67,4	67,0
	1000			75,3	74,9
	2000			79,6	79,3
	10000			83,4	83,0

Tabela C.16 – Resultados tabelados para o Subcaso D-1.

Ao analisar a tabela C.16, encontram-se mais pontos em destaque, o que, conforme explicado em 3.4.2.2, se dá porque a falta bifásica à terra é mais complexa, envolvendo análises mais aprofundadas. Assim, novamente para a faixa de impedâncias de falta entre 30 e 75 Ω , ambos os índices de desequilíbrio resultam em valores abaixo do valor designado como limite de detecção.

h) Subcaso D-2

Como será visto através dos resultados da tabela C.17, neste subcaso aparecerá uma novidade. Esta se trata do surgimento de dois novos índices-teste, os quais foram denominados Dese₀ e Dese₂. Esses índices, segunda a mesma metodologia matemática adotada para os índices de desequilíbrio de corrente, calculam o desequilíbrio de **tensão** do sistema, no mesmo ponto onde foram calculados os desequilíbrios de corrente.

Conforme se poderá perceber, o pior caso, em termos de resultados de detecção, foi o caso D, ou seja, os índices de desequilíbrio de corrente não conseguiram detectar o defeito, pois os resultados se confundiram com um suposto caso ideal (sem faltas e com cargas desequilibradas). Por isso foi feito um teste com este pior subcaso para descobrir se os índices de desequilíbrio de tensão poderiam resolver esse problema. Os resultados se encontram na tabela abaixo.

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]	α_0 [%]	α_2 [%]	Dese ₀ [%]	Dese ₂ [%]
0,0	0		46,5	46,7	40,1	39,6
	15		36,5	36,5	9,0	8,7
	30		28,9	28,9	4,2	4,1
	50		21,4	21,4	2,1	2,1
	75		<u>14,9</u>	<u>14,9</u>	<u>1,1</u>	<u>1,1</u>
	100		<u>10,3</u>	<u>10,3</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>
	150		<u>5,1</u>	<u>5,1</u>	<u>0,2</u>	<u>0,3</u>
	200		<u>4,0</u>	<u>4,0</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	250		<u>5,0</u>	<u>4,9</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	300		<u>6,1</u>	<u>6,0</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	500		<u>8,3</u>	<u>8,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	1000		<u>8,4</u>	<u>8,3</u>	<u>0,1</u>	<u>0,1</u>
0,1	0		46,6	46,8	40,3	39,7
	15		37,0	37,0	9,1	9,1
	30		29,5	29,8	4,3	4,5
	50		22,1	22,5	2,2	2,5
	75		15,6	16,2	1,2	1,5
	100		<u>11,0</u>	<u>11,7</u>	<u>0,7</u>	<u>1,0</u>
	150		<u>5,5</u>	<u>6,4</u>	<u>0,3</u>	<u>0,6</u>
	200		<u>3,9</u>	<u>4,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,4</u>
	250		<u>4,6</u>	<u>4,1</u>	<u>0,2</u>	<u>0,3</u>
	300		<u>5,7</u>	<u>4,6</u>	<u>0,2</u>	<u>0,3</u>
	500		<u>8,0</u>	<u>6,0</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	1000		<u>8,2</u>	<u>5,2</u>	<u>0,1</u>	<u>0,3</u>
0,2	0		46,8	47,0		
	15		37,3	37,5		
	30		30,0	30,5		
	50		22,7	23,6		
	75		16,2	17,4		
	100		<u>11,5</u>	<u>13,1</u>		
	150		<u>5,9</u>	<u>7,8</u>		
	200		<u>3,9</u>	<u>5,1</u>		
	250		<u>4,4</u>	<u>4,1</u>		
	300		<u>5,4</u>	<u>3,8</u>		
	500		<u>7,7</u>	<u>4,0</u>		
	1000		<u>8,0</u>	<u>2,6</u>		
0,3	0		46,9	47,0		
	15		37,7	38,0		
	30		30,4	31,3		
	50		23,2	24,6		
	75		16,6	18,7		
	100		<u>12,0</u>	<u>14,5</u>		
	150		<u>6,2</u>	<u>9,3</u>		
	200		<u>4,0</u>	<u>6,5</u>		

	250			<u>4.1</u>	<u>5.0</u>		
	300			<u>5.0</u>	<u>4.2</u>		
	500			<u>7.4</u>	<u>3.1</u>		
	1000			<u>7.7</u>	<u>3.4</u>		
	2000			<u>5.9</u>	<u>7.2</u>		
	10000			<u>1.8</u>	<u>14.8</u>		

Tabela C.17 – Resultados tabelados para o Subcaso D-2.

Conforme visto, esses índices não contribuíram para a detecção das faltas, pois quando se passa de uma falta com ausência de impedância para outra com impedância igual a 15 Ω , os índices caem abruptamente, passando da ordem de 40 para 9%.

Portanto, comprovou-se a ineficácia dos índices de desequilíbrio de tensão para o subcaso em questão e, conseqüentemente para o sistema proposto nessa dissertação. Pode ser que em outro sistema eles sejam eficazes.

i) Subcaso D-3

Na tabela C.18, os resultados:

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	I_f [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0			46,4	46,8
	15			36,4	36,6
	30			28,8	29,0
	50			21,4	21,6
	75	<u>112.83</u>	<u>112.44</u>	<u>14.8</u>	<u>15.0</u>
	100			<u>10.3</u>	<u>10.4</u>
	150			<u>5.1</u>	<u>5.1</u>
	200			<u>4.0</u>	<u>3.7</u>
	250			<u>5.0</u>	<u>4.6</u>
	300			<u>6.1</u>	<u>5.7</u>
	500			<u>8.3</u>	<u>8.0</u>
	1000	<u>20.06</u>	<u>20.02</u>	<u>8.3</u>	<u>8.1</u>
	2000	<u>16.19</u>	<u>16.16</u>	<u>6.3</u>	<u>6.1</u>
	10000	<u>13.11</u>	<u>13.08</u>	<u>1.9</u>	<u>1.7</u>
0,1	0			47,0	47,2
	15			37,2	37,3
	30			29,7	30,0
	50			22,2	22,7
	75			15,5	16,2
	100			<u>10.6</u>	<u>11.6</u>
	150			<u>4.5</u>	<u>5.7</u>
	200			<u>2.0</u>	<u>2.9</u>
	250			<u>3.2</u>	<u>2.6</u>
	300			<u>4.7</u>	<u>3.4</u>
	500			<u>7.5</u>	<u>5.4</u>
	1000			<u>8.0</u>	<u>5.0</u>
	2000			<u>6.2</u>	<u>2.5</u>
	10000			<u>1.9</u>	<u>3.7</u>
0,2	0			46,7	47,1
	15			37,2	37,7
	30			29,9	30,7
	50			22,6	23,8
	75			16,1	17,6
	100	<u>89.22</u>	<u>89.22</u>	<u>11.5</u>	<u>13.2</u>
	150			<u>5.9</u>	<u>7.9</u>
	200			<u>3.9</u>	<u>5.1</u>

	250			<u>4.4</u>	<u>4.0</u>
	300			<u>5.3</u>	<u>3.6</u>
	500			<u>7.7</u>	<u>3.7</u>
	1000			<u>8.0</u>	<u>2.3</u>
	2000	<u>16.86</u>	<u>17.63</u>	<u>6.1</u>	<u>2.8</u>
	10000	<u>13.73</u>	<u>14.59</u>	<u>1.8</u>	<u>9.1</u>
0,3	0			46,8	47,2
	15			37,6	38,1
	30			30,4	31,4
	50			23,1	24,8
	75			16,6	18,8
	100	<u>90.04</u>	<u>90.04</u>	<u>12.0</u>	<u>14.7</u>
	150			<u>6.2</u>	<u>9.4</u>
	200			<u>3.9</u>	<u>6.6</u>
	250			<u>4.1</u>	<u>5.0</u>
	300			<u>5.0</u>	<u>4.1</u>
	500			<u>7.4</u>	<u>2.9</u>
	1000			<u>7.7</u>	<u>3.5</u>
	2000	<u>17.68</u>	<u>18.70</u>	<u>5.9</u>	<u>7.3</u>
	10000	<u>14.54</u>	<u>15.70</u>	<u>1.8</u>	<u>15.0</u>

Tabela C.18 – Resultados tabelados para o Subcaso D-3.

Como sempre ocorreu para os casos anteriores, neste, onde as fases vão ao solo em ambos os lado do sistema, são demonstrados os piores resultados em termos de detecção. Com a adição dos bancos de capacitores, os índices continuam resultando em valores abaixo do valor limite de 15%, antes designado.

j) Subcaso E-1

Nesta abertura, as fases A e B do sistema serão abertas. A outra fase continuará provendo energia se nenhum dispositivo detectar esse tipo de defeito.

ΔZ [pu]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	76,6	76,5
0,1	79,3	79,1
0,2	81,9	81,6
0,3	84,3	83,9

Tabela C.19 – Resultados tabelados para o Subcaso E-1.

Conforme tabela C.19, todos os índices no subcaso E-1 acusam a presença de um defeito, pois os resultados foram muito maiores que o valor limite selecionado de 15%.

Também aqui existe um valor fixo de 80% acerca do qual se encontram os outros.

Portanto, nenhum problema foi encontrado em se detectar os defeitos do tipo aberturas indesejadas (seja monopolar ou bipolar).

k) Subcaso E-2

Nesta abertura, as fases A e B do sistema serão abertas. A outra fase continuará provendo energia se nenhum dispositivo detectar esse tipo de defeito.

Este subcaso, por apresentar muitos pontos problemáticos, também foi escolhido para a realização dos testes com os índices de desequilíbrio baseados nas tensões do sistema. Os resultados se encontram na tabela C.20.

ΔZ [pu]	I [A]		α_0 [%]	α_2 [%]	Dese ₀ [%]	Dese ₂ [%]
0,0	12,29	12,29	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>
0,1	12,44	12,96	<u>0,0</u>	<u>5,7</u>	<u>0,0</u>	<u>0,4</u>
0,2	12,89	13,81	<u>0,0</u>	<u>11,6</u>	<u>0,0</u>	<u>0,7</u>
0,3	13,70	14,92	<u>0,0</u>	17,9	<u>0,0</u>	<u>1,1</u>

Tabela C.20 – Resultados tabelados para o Subcaso E-2.

É importante observar na tabela C.20 que, mais uma vez, os índices de desequilíbrio de tensão Dese₀ e Dese₂ foram ineficazes na detecção desse tipo de defeito no sistema ora estudado. E também o foram os índices de desequilíbrio de corrente, uma vez que, apenas para o caso de grau de desequilíbrio igual a 0,3, ele conseguiu detectar o defeito através de α_2 (α_0 também não detectou).

Ao se analisar os valores iguais a zero tanto para a abertura monopolar quanto para a bipolar, pode-se chegar à conclusão de que, sem caminho para a terra (as cargas se encontram em configuração delta e o próprio defeito não provê esse caminho de retorno), as correntes de sequência zero não existem. Por isso os valores nulos para os índices que delas dependem.

l) Subcaso E-3

ΔZ [pu]	I [A]		α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	12,34	12,31	<u>0,0</u>	<u>0,3</u>
0,1	12,50	12,99	<u>0,0</u>	<u>5,9</u>
0,2	12,95	13,84	<u>0,0</u>	<u>11,8</u>
0,3	13,70	13,55	0,0	18,0

Tabela C.21 – Resultados tabelados para o Subcaso E-3.

Aqui se verificam “pontos-problema”. Observa-se que α_2 não é capaz de detectar as aberturas, resultando em valores, na maioria das vezes, menores que 15%. Mas não há nenhuma novidade nisso, uma vez que para o caso E-2, o mesmo ocorre.

Assim, o dispositivo baseado, mesmo que na metodologia dos dois indicadores de desequilíbrio (α_0 e α_2), não será eficaz, deixando a desejar em casos de cargas equilibradas e levemente desequilibradas (só funcionou neste subcaso para cargas muito desequilibradas, ou seja, um grau de desequilíbrio de 0,3 pu, que é considerado alto).

C.4 – Análise da influência do nível de curto-circuito (S_{cc}) nos índices de desequilíbrio

Adicionalmente, utilizando o subcaso D-2, foi feito um estudo da influência do nível de curto do sistema nos índices de desequilíbrio, e o que foi encontrado pode ser visto na tabela C.22.

ΔZ [pu]	Z_f [Ω]	$S_{cc} = \infty$		$S_{cc} = 50$ MVA		$S_{cc} = 5$ MVA	
		α_0 [%]	α_2 [%]	α_0 [%]	α_2 [%]	α_0 [%]	α_2 [%]
0,0	0	46,5	46,7	44,7	45,4	30,0	35,7
	15	36,5	36,5	35,6	35,4	26,3	28,0
	50	21,4	21,4	21,1	21,0	17,7	17,0
	100	<u>10,3</u>	<u>10,3</u>	<u>10,2</u>	<u>10,2</u>	<u>9,1</u>	<u>8,6</u>
	300	<u>6,1</u>	<u>6,0</u>	<u>6,0</u>	<u>6,0</u>	<u>5,8</u>	<u>5,4</u>
	500	<u>8,3</u>	<u>8,2</u>	<u>8,3</u>	<u>8,2</u>	<u>8,1</u>	<u>7,7</u>
	1000	<u>8,4</u>	<u>8,3</u>	<u>8,3</u>	<u>8,2</u>	<u>8,2</u>	<u>7,9</u>
	2000	<u>6,3</u>	<u>6,3</u>	<u>6,3</u>	<u>6,2</u>	<u>6,3</u>	<u>6,0</u>
	10000	<u>1,9</u>	<u>1,8</u>	<u>1,9</u>	<u>1,8</u>	<u>1,9</u>	<u>1,8</u>
0,1	0	46,6	46,8	44,9	45,6	30,6	36,3
	15	37,0	37,0	36,1	35,9	27,2	28,4
	50	22,1	22,5	21,8	22,0	18,5	17,3
	100	<u>11,0</u>	<u>11,7</u>	<u>10,8</u>	<u>11,5</u>	<u>9,8</u>	<u>8,9</u>
	300	<u>5,7</u>	<u>4,6</u>	<u>5,7</u>	<u>4,5</u>	<u>5,5</u>	<u>3,7</u>
	500	<u>8,0</u>	<u>6,0</u>	<u>8,0</u>	<u>5,9</u>	<u>7,8</u>	<u>5,7</u>
	1000	<u>8,2</u>	<u>5,2</u>	<u>8,2</u>	<u>5,2</u>	<u>8,1</u>	<u>5,3</u>
	2000	<u>6,3</u>	<u>2,6</u>	<u>6,3</u>	<u>2,5</u>	<u>6,3</u>	<u>2,8</u>

	10000	1.9	3.5	1.9	3.4	1.9	2.5
0,2	0	46,8	47,0	45,1	45,8	31,2	36,8
	15	37,3	37,5	36,6	36,4	27,9	28,6
	50	22,7	23,6	22,4	23,0	19,3	17,5
	100	11.5	13.1	11.4	12.7	10.5	9.2
	300	5.4	3.8	5.3	3.5	5.2	2.0
	500	7.7	4.0	7.7	3.8	7.6	3.8
	1000	8.0	2.6	8.0	2.3	8.0	2.8
	2000	6.1	2.8	6.1	2.5	6.2	1.1
0,3	10000	1.8	9.0	1.8	8.7	1.9	6.7
	0	46,9	47,0	45,3	45,9	31,7	37,2
	15	37,7	38,0	37,0	36,8	28,7	28,7
	50	23,2	24,6	22,9	23,9	20,1	17,5
	100	12.0	14.5	11.9	14.0	11.1	9.5
	300	5.0	4.2	5.0	3.6	5.0	0.9
	500	7.4	3.1	7.4	2.4	7.4	2.3
	1000	7.7	3.4	7.7	2.9	7.8	2.0
	2000	5.9	7.2	5.9	6.8	6.1	4.6
	10000	1.8	14.8	1.8	14.5	1.8	11.5

Tabela C.22 – Influência do nível de curto do sistema nos índices de desequilíbrio (Subcaso D-2 utilizado).

É importantíssimo apontar que, assim como nas tabelas já apresentadas, quando a impedância de falta passa a ser de 100Ω e a partir desse valor, os resultados para os índices não ultrapassam o valor limite designado de 15%. Assim, o defeito não pode ser detectado. E, a partir da tabela atual, também é importante observar que tal apontamento se faz para todos os casos de níveis de curto do sistema estudados (5 MVA, 50 MVA e barra infinita). Lembrando que o nível de curto infinito implica numa impedância de entrada do sistema igual a zero, ou seja, num sistema ideal, o que não existe na realidade. Assim, um valor razoável seria o de 50 MVA, porém, mesmo assim, observa-se que os resultados dos índices se aproximaram muito entre esse nível de curto e o de nível infinito, variando apenas de uma ordem de 2%.