



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Estudo e Implementação de modelo  
de Falta de Alta Impedância**

**Pedro Carvalho Mendes de Menezes Cobelo**

Brasília - DF  
Julho de 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

## **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

### **Estudo e Implementação de modelo de Falta de Alta Impedância**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

#### **Banca Examinadora**

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, UnB/ ENE (Orientador) \_\_\_\_\_

Prof. Kleber Melo e Silva, UnB/ ENE \_\_\_\_\_

Prof. Alcides Leandro da Silva, UnB/ ENE \_\_\_\_\_

Brasília - DF  
Julho de 2019

## Ficha Catalográfica

COBELO, PEDRO CARVALHO MENDES DE MENEZES

Estudo e Implementação de modelo de Falta de Alta Impedância [Distrito Federal] 2019.

xii, 65p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2019).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Proteção de sistemas elétricos

2. Redes de distribuição de energia elétrica

3. Falta de alta impedância

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COBELO, P. C. M. M. (2019). Estudo e Implementação de modelo de Falta de Alta Impedância. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Publicação 2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65p.

### CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pedro Carvalho Mendes de Menezes Cobelo.

TÍTULO: Estudo e Implementação de modelo de Falta de Alta Impedância.

GRAU: Graduação em Engenharia Elétrica. ANO: 2019.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Pedro Carvalho Mendes de Menezes Cobelo

Brasília – DF – Brasil.

## Agradecimentos

Agradeço a minha família em especial a minha mãe Rossele e minha namorada Iri, pelo suporte incondicional durante esses anos que estive na UnB.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, em especial Carlão, Cordeiro, Lucas e Josué pelas parcerias nos estudos, nos laboratórios e pelos momentos de descontração que tornaram esse período mais fácil.

Agradeço ao Prof. Felipe que, através de suas ideias e comentários, ajudou muito na elaboração deste trabalho.

Agradeço a toda equipe da Gerencia de Planejamento e Qualidade do Serviço (GPQS) da CEB-D bem como a equipe do Departamento de Manutenção Eletroeletrônica Brasília (DMLB) de Furnas pelos ensinamentos e inspiração para essa seguir carreira na Engenharia Elétrica, em especial, trabalhando com Sistemas Elétricos de Potência.

Ao meu pai, Sergio Cobelo (*in memoriam*).

## Resumo

O Sistema de Distribuição Elétrica é composto de um conjunto de instalações e equipamentos elétricos, que tem como objetivo fornecer energia aos consumidores finais. Os alimentadores primários em média tensão percorrem as ruas da cidade e estão sujeitos a falhas, como curto-circuito. Um tipo específico de curto-circuito que causa grande preocupação para a sociedade é a Falta de Alta Impedância (FAI).

A FAI ocorre quando o alimentador primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade produzindo correntes de baixa intensidade, que dificilmente é detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente. A FAI apresenta grande risco de incêndios e eletrocussão seguida de morte. Para a distribuidora de energia a ocorrência de FAI pode acarretar em indisponibilidade no fornecimento de energia para clientes a montante do ponto de falta, além das consequências judiciais quando há mortes ou danos ao patrimônio.

O desenvolvimento de modelos representativos do fenômeno é fundamental para que seja possível o desenvolvimento de técnicas de detecção da FAI. O presente trabalho se propôs a desenvolver um modelo realístico, porém simplificado, da FAI e analisar o impacto da falta sobre os harmônicos de corrente. O modelo proposto poderá ser utilizado, em trabalhos futuros, para testar esquemas de proteção contra faltas de alta impedância devido a rompimento de condutor primário e seu contato com o solo, bem como auxiliar no desenvolvimento de novas técnicas de detecção deste tipo de falta.

## Abstract

The Electric Distribution System is a set of electrical installations and equipment, which provides energy to end consumers. The primary feeders cross the city and are under the risk of failures such as short circuit. A specific type of short circuit that causes great concern is the High Impedance Fault (HiZ).

High Impedance Fault occurs when an energized primary feeder comes into contact with a low conductivity surface producing currents of low intensity, which is hard to be detected by conventional overcurrent-based protection systems. High Impedance Fault presents a high risk of fires and electrocution followed by death. For Electric utilities, the occurrence of HiZ can interrupt the energy supply for customers upstream of the point of failure, as well as cause judicial consequences when there are deaths or damages to assets.

The development of representative models of the phenomenon is fundamental for the development of HiZ detection techniques. The present work developed a realistic, but simplified model, of HiZ and analyzed the impact of the fault on current harmonics. The proposed model may be used in future work to test HiZ protection schemes, as well as assist in the development of new techniques for detecting this type of fault.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Configuração típica de sistema de distribuição .....	2
Figura 2 - Incidência de curto-circuito segmentado por seu tipo. Fonte: KINDERMANN, 2010.....	7
Figura 3 - Transformação de sistema trifásico desequilibrado em componentes simétricas.....	8
Figura 4 - Sistema trifásico a 4 fios.....	9
Figura 5 - Diagrama de curto-circuito monofásico .....	10
Figura 6 - Circuito equivalente do curto-circuito monofásico .....	11
Figura 7 - Contato do condutor energizado com árvore. Fonte: IURINIC, 2016.....	12
Figura 8 - Rompimento do condutor no lado da carga. Fonte: IURINIC, 2016.....	13
Figura 9 – Rompimento do condutor no lado da fonte. Fonte: IURINIC, 2016 .....	14
Figura 10 - Arco elétrico gerado por FAI. Fonte: SANTOS, 2016.....	15
Figura 11 - Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão do alimentador sem alterações significativas na forma de onda; (b) corrente de uma FAI com a presença das suas principais características. Fonte: SANTOS, 2016.....	16
Figura 12- Registro oscilográfico real de Intermitência da corrente de FAI. Fonte: SANTOS, 2011 .....	17
Figura 13 - Influência da umidade na tensão do arco elétrico. Fonte: EMANUEL <i>et al.</i> , 1990 .....	18
Figura 14 - Modelo de diodos em antiparalelo.....	20
Figura 15 - Modelo das Resistências Variáveis .....	20
Figura 16 - Curva característica da tensão <i>versus</i> corrente de um ciclo em.....	21
Figura 17 - Curvas de $R(t)$ , $R_1(t)$ , $R_2(t)$ calculado e $R_2(t)$ estimado. Fonte: NAM et al., 2001.....	22
Figura 18 - Modelo de diodos em antiparalelo com intermitência.....	22
Figura 19 - Modelo das Resistências Variáveis com Controladores .....	23
Figura 20 - Arranjo experimental que simula FAI. Fonte: Emanuel et al., 1990.....	26
Figura 21 - Influência de $\Delta V$ e $XL/R$ no segundo harmônico da corrente de falta. Fonte: Emanuel et al., 1990.....	27



Figura 22 - Influência de $\Delta V$ e $XL/R$ no terceiro harmônico da corrente de falta. Fonte: Emanuel et al., 1990.....	27
Figura 23 - Decomposição <i>wavelet</i> de $c_o(k)$ . Fonte: SANTOS, 2016.....	29
Figura 24 - Sistema elétrico proposto.....	33
Figura 25 - Primeiro modelo desenvolvido.....	33
Figura 26 - Segundo modelo desenvolvido.....	34
Figura 27 - Terceiro modelo desenvolvido.....	35
Figura 28 - Corrente de falta gerada pelo terceiro modelo.....	36
Figura 29 - Parametrização do tempo de início da FAI e dos momentos de intermitência.....	37
Figura 30 - Parâmetros do modelo de FAI.....	38
Figura 31 - Modelo final proposto.....	39
Figura 32 - Configurações de tempo da simulação.....	40
Figura 33 - Corrente de Falta.....	43
Figura 34 - Corrente Fase C.....	43
Figura 35 - Instante do rompimento do condutor.....	44
Figura 36 - Início da FAI.....	44
Figura 37 - Intermitência na corrente de falta.....	45
Figura 38 - Reignição do arco elétrico e 1º <i>buildup</i> .....	45
Figura 39 - 2º <i>buildup</i> .....	46
Figura 40 - Corrente de Falta do Caso 2.....	48
Figura 41 - Harmônicos dos casos 1 e 2.....	48
Figura 42 - Corrente de Falta do Caso 3.....	49
Figura 43 - Harmônicos dos casos 1 e 3.....	49
Figura 44 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 4).....	51
Figura 45 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 5).....	51
Figura 46 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 6).....	51
Figura 47 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 7).....	52
Figura 48 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 8).....	52
Figura 49 - Amplitude da componente DC da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8.....	53
Figura 50 - Amplitude da componente fundamental da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8.....	53

Figura 51 - Amplitude da componente de segunda ordem da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8.....	54
Figura 52 - Amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8.....	54
Figura 53 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando $\Delta V$ (Caso 9) .....	55
Figura 54 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando $\Delta V$ (Caso 10) .....	55
Figura 55 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando $\Delta V$ (Caso 11) .....	56
Figura 56 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando $\Delta V$ (Caso 12) .....	56
Figura 57 - Amplitude da componente DC da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12.....	57
Figura 58 - Amplitude da componente fundamental da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12.....	57
Figura 59 - Amplitude da componente de segunda ordem da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12.....	58
Figura 60 - Amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12.....	58

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Correntes de FAI reais. Fonte: SANTOS, 2011 .....	41
Tabela 2 - Configuração do Casos 1.....	47
Tabela 3 - Configurações dos Casos 2 e 3.....	47
Tabela 4 - Variação de $\Delta V$ e $X/R$ .....	50

## Glossário

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica.

ATP - *Alternative Transients Program*.

CSCT - Chave simples controlada por TACS.

DC - *Direct Current* ou Corrente Contínua.

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

EMTP - *Electromagnetic Transients Program*.

FAI - Falta de Alta Impedância.

FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

$interm1_{início}$  - Instante do início da 1ª intermitência na corrente de falta.

$interm1_{fim}$  - Instante do fim da 1ª intermitência na corrente de falta.

$interm2_{início}$  - Instante do início da 2ª intermitência na corrente de falta.

$interm2_{fim}$  - Instante do fim da 2ª intermitência na corrente de falta.

PRODIST - Procedimentos de Distribuição.

R1 - Resistência do 1º *buildup*.

R2 - Resistência do 2º *buildup*.

Req - Resistência equivalente entre Rf, R1 e R2.

Rf - Resistência de falta.

SDEE - Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

SE - Subestação de Energia.

SIN - Sistema Interligado Nacional.

t1 - Instante do rompimento do condutor.

$t_2$  - Instante do início da Falta de Alta Impedância.

$t_3$  - Instante do início do 1º *buildup*.

$t_4$  - Instante do início do 2º *buildup*.

TACS - *Transient Analysis of Control Systems*.

TDF - Transformada Discreta de Fourier.

tqueda - Tempo entre o instante de ruptura e o contato do condutor com o solo.

TW - Transformadas *Wavelet*.

UCs - Unidades Consumidoras.

$V_{\text{fase}_{\text{máx}}}$  - Tensão pico da fase.

$V_n$  - Tensão contínua presente no semiciclo negativo de falta.

$V_p$  - Tensão contínua presente no semiciclo positivo de falta.

$\Delta V$  - Diferença entre  $V_n$  e  $V_p$ .

$X_{LF}$  - Reatância Indutiva de falta.

$Z_{\text{carga}}$  - Impedância da carga.

$Z_{\text{falta}}$  - Impedância da falta.

## Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 - O Curto-Circuito Monofásico e a Falta de Alta Impedância (FAI).....	6
Capítulo 3 - Modelos de Falta de Alta Impedância.....	19
Capítulo 4 - Métodos para avaliar ocorrência da Falta de Alta Impedância.....	25
Capítulo 5 - Modelo de Falta de Alta Impedância desenvolvido.....	31
Capítulo 6 - Simulações e resultados.....	40
Capítulo 7 - Conclusões.....	59
Referências Bibliográficas.....	61
APÊNDICE A.....	64

# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos 50 anos foi observada uma forte urbanização no Brasil. Em 1970, pouco mais da metade da população brasileira vivia em cidades, mas, atualmente, este contingente ultrapassa os 80% (IBGE, 2016). Com intuito de promover qualidade de vida e condições para o desenvolvimento socioeconômico é necessário construir, operar e manter infraestruturas viárias, redes de fornecimento de água, redes de esgoto e, em especial, redes de energia elétrica, conhecidas como Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE).

O SDEE é composto de um conjunto de instalações e equipamentos elétricos, que visa atender Unidades Consumidoras conectadas em Baixa, Média ou Alta Tensão, a depender da demanda solicitada. As distribuidoras de energia obtêm junto ao poder público o direito de operar o SDEE em determinada área de concessão.

A configuração típica de um SDEE, ilustrada na Figura 1, pode ser assim descrita:

- O fornecimento de energia elétrica para a distribuidora é feita através de Subestações de transmissão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). As subestações interligadas ao SIN que fornecem energia ao Distrito Federal são: SE Samambaia (500/345/138 kV), SE Brasília Sul (345/230/138 kV) e SE Brasília Geral (230/34, 5 kV);
- A partir das subestações fontes, são construídas redes de subtransmissão de alta tensão (138 kV, 69 kV), para alimentar as subestações de distribuição (mais próximas aos centros de carga);
- Nas subestações de distribuição a tensão é transformada, na maioria dos casos, para 13,8 kV, conhecida como tensão primária de distribuição;

- A partir do barramento de 13,8 kV, são derivados circuitos, denominados alimentadores primários, que percorrerão as ruas da cidade. O nível de tensão e de corrente dos alimentadores primários são constantemente monitorados. Clientes com alta demanda são atendidos em 13,8 kV, já clientes com baixa demanda são atendidos em baixa tensão, com rebaixamento de tensão sendo feito nos transformadores de distribuição (instalados em postes ou cabines de transformação).

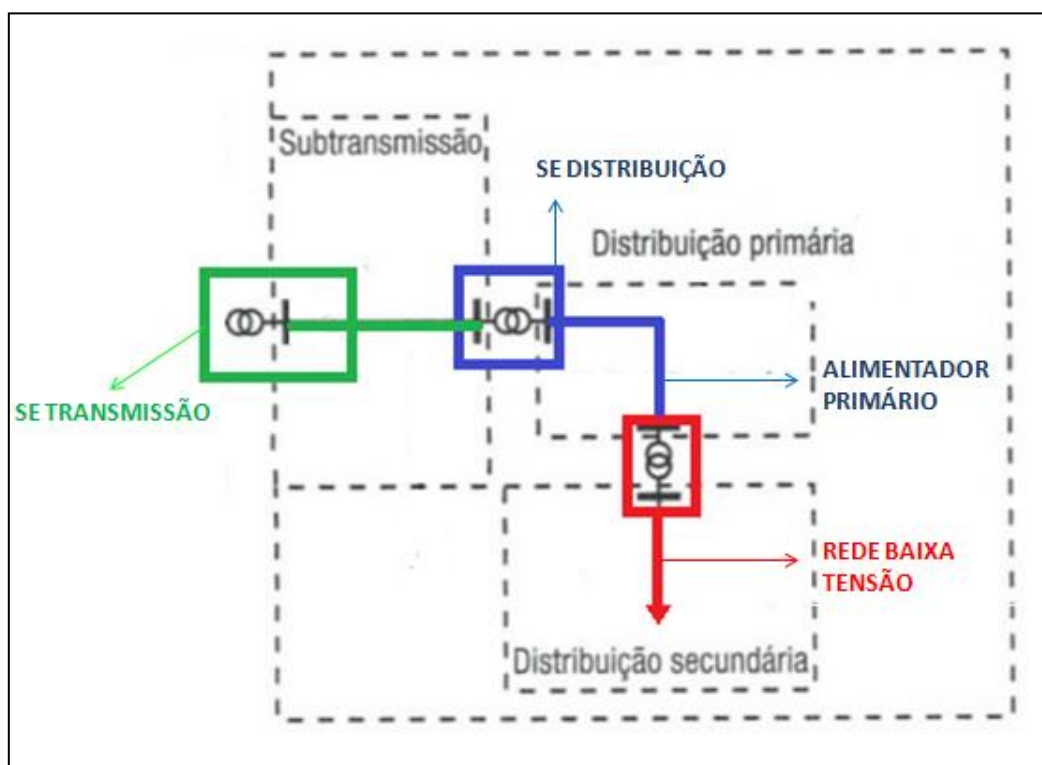


Figura 1 - Configuração típica de sistema de distribuição

Os alimentadores primários podem ser aéreos ou subterrâneos. O principal benefício dos alimentadores aéreos é o menor custo de implantação e de manutenção. Entretanto, estes estão mais sujeitos a falhas, principalmente a curtos circuitos e rompimento de condutores, uma vez que estão expostos ao tempo.

O curto-circuito pode ser definido como uma conexão acidental entre dois potenciais diferentes e é a causa mais frequente de desligamentos não programados em SDEE. A ocorrência de um curto-circuito produz tipicamente correntes elevadas, geralmente muito superiores aos valores nominais do sistema, que podem ocasionar sérios danos aos equipamentos do sistema, expor pessoas a graves riscos e provocar instabilidade no

sistema. Nesse caso, quando da elevação de corrente, as proteções são normalmente capazes de atuar, isolando o defeito.

Um tipo específico de curto-circuito, que apresenta grande preocupação para as distribuidoras de energia e interesse da comunidade científica é a Falta de Alta Impedância (FAI). A FAI ocorre quando uma fase ou mais do alimentador primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade (alta impedância). A corrente produzida por uma FAI é da mesma ordem de grandeza da corrente de carga do sistema e de outros distúrbios comuns nos SDEE, como energização de cargas e chaveamento de banco de capacitores (ADAMIAK *et al.*, 2006). Logo, a FAI dificilmente é detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente. Durante a ocorrência de FAI não são observadas variações significativas no nível de tensão do alimentador, como os afundamentos de tensão e sobrecorrentes típicas de curtos circuitos de baixa impedância.

Exemplos típicos de ocorrência de FAI são: o contato de um condutor energizado com uma árvore ou o rompimento de um condutor energizado e seu contato com solo, asfalto, grama, areia, etc. Os equipamentos expostos à corrente de falta não são afetados de forma significativa. Entretanto do ponto de vista da sociedade, a grande preocupação quando da ocorrência de FAI são os danos à vida, pelo risco de eletrocussão, seguida de morte, e de incêndios.

Do ponto de vista da distribuidora de energia, a ocorrência de FAI acarreta um aumento nas ações judiciais, quando ocorre morte ou danos ao patrimônio. Outro problema para a distribuidora, quando ocorre o rompimento do condutor primário, é a interrupção do fornecimento de energia elétrica para os consumidores localizados a jusante do ponto de rompimento, que só será verificada pela distribuidora por meio de reclamações dos clientes. O tempo que leva entre o momento da interrupção do fornecimento de energia elétrica e o reestabelecimento da energia para os consumidores afetados traduz-se em um elevado DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora).

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição), elaborado e atualizado regularmente pela ANEEL, é um conjunto de normas que visam regulamentar o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e os demais agentes conectados aos sistemas de distribuição bem como estabelecer os requisitos mínimos de operação, planejamento,



manutenção e qualidade da energia e do serviço prestado por parte das distribuidoras de energia.

No Módulo 8 do PRODIST são estabelecidos os indicadores de qualidade do produto e do serviço prestado. Dentre os indicadores do serviço prestado, destacam-se o DEC e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), que mensuram as interrupções no fornecimento de energia elétrica às Unidades Consumidoras (UCs) conectadas ao sistema de distribuição.

As UCs são agrupadas em conjuntos, definidos pela ANEEL com base em critérios de similaridade entre regiões de diferentes distribuidoras. A cada renovação do contrato de concessão são definidos limites máximos de DEC e FEC por conjunto e para o sistema da distribuidora como um todo. O descumprimento dos limites de DEC e FEC dos conjuntos implica em pagamentos de compensações aos clientes afetados. Ainda, o descumprimento dos limites de DEC e FEC do sistema da distribuidora por dois anos consecutivos durante o período de avaliação ou no ano anterior à renovação do contrato acarreta a extinção da concessão.

Portanto, com o objetivo de reduzir o DEC e o FEC, visando a diminuição nos valores de compensações pagas, a manutenção da concessão, bem como a melhoria no atendimento aos consumidores, tem-se investido em modernização dos sistemas de proteção e automação da rede através da instalação de Religadores, Sensores e Chaves Telecomandadas.

As proteções do SDEE devem ser projetadas para identificar e isolar o mais rápido possível os defeitos, protegendo vidas, equipamentos, garantindo a estabilidade do sistema e mantendo o menor número possível de clientes sem energia elétrica. Portanto, a modelagem das faltas a que SDEE estão expostos é de grande interesse da comunidade científica, em especial a FAI, já que esta apresenta grandes dificuldades de ser detectada, por dispositivos convencionais, e isolada de forma a causar o mínimo possível de danos.

#### **Objetivo geral do trabalho:**

- Apresentar as principais características da corrente de FAI e alguns dos principais modelos e métodos de identificação de FAI, presentes na literatura.

**Objetivos específicos do trabalho:**

- Elaborar um modelo que simule as correntes produzidas por uma FAI, no Software *ATPDraw*. Baseando-se em modelos reportados na literatura;
- Analisar como a FAI influencia corrente de fase de um alimentador primário de distribuição, com base no espectro de frequência produzido, o que permitirá, em trabalhos futuros, o desenvolvimento de lógicas de proteção que garantam o reconhecimento e a isolação da FAI.

**Estrutura do texto:**

O Capítulo 2 apresenta a teoria de curto-circuito monofásico e as principais características da FAI.

O Capítulo 3 traz alguns modelos de FAI, baseado na literatura existente.

No Capítulo 4, os principais métodos de identificação de FAI são explicitados.

O Capítulo 5 apresenta os modelos de FAI desenvolvidos neste trabalho.

No Capítulo 6 os resultados das simulações que foram realizadas no Software *ATPDraw* são detalhados.

O Capítulo 7 apresenta as considerações finais sobre o trabalho e propostas de trabalhos futuros.

No Apêndice A é apresentado o código para a implementação de um indutor no *ATPDraw*, de forma a eliminar problemas de oscilação numérica associados ao modelo de FAI considerado neste trabalho.

## Capítulo 2

### O Curto-Circuito Monofásico e a Falta de Alta Impedância (FAI)

Normalmente, diz-se que a FAI é mais preocupante pelos possíveis danos à vida, que pelos danos aos equipamentos do SDEE. Dados apontam que, entre 1991 a 1994 e de 2001 a 2003, as FAI causaram, em média, 53,6 mortes ao ano (OLIVEIRA JÚNIOR, 2006). O rompimento de um condutor energizado e seu contato com solo é o tipo de FAI que oferece os maiores riscos à vida. Tal risco é aumentado quando os alimentadores primários atravessam regiões densamente povoadas, como é o caso das grandes cidades brasileiras.

Nas zonas rurais a ocorrência de FAI, devido ao rompimento de um condutor energizado e seu contato com solo é mais comum, dado que a manutenção da rede é menos frequente e que os cabos são mais finos (maior o risco de ruptura por sobrecarga ou esforços). Uma vez que nas zonas rurais existe uma menor concentração de pessoas, os incêndios são os maiores riscos associados à ruptura de condutores, principalmente em regiões secas como o Distrito Federal.

Na maioria dos estudos sobre FAI encontrados na literatura, a falta ocorre em apenas uma das fases do sistema. Os motivos são: o curto-circuito monofásico é o tipo mais comum em sistemas elétricos de potência (Figura 2) e caso haja o rompimento de mais de um condutor, é grande a chance das fases entrarem em contato e ocorrer um curto-circuito, não de alta impedância, mas sim de baixa impedância.

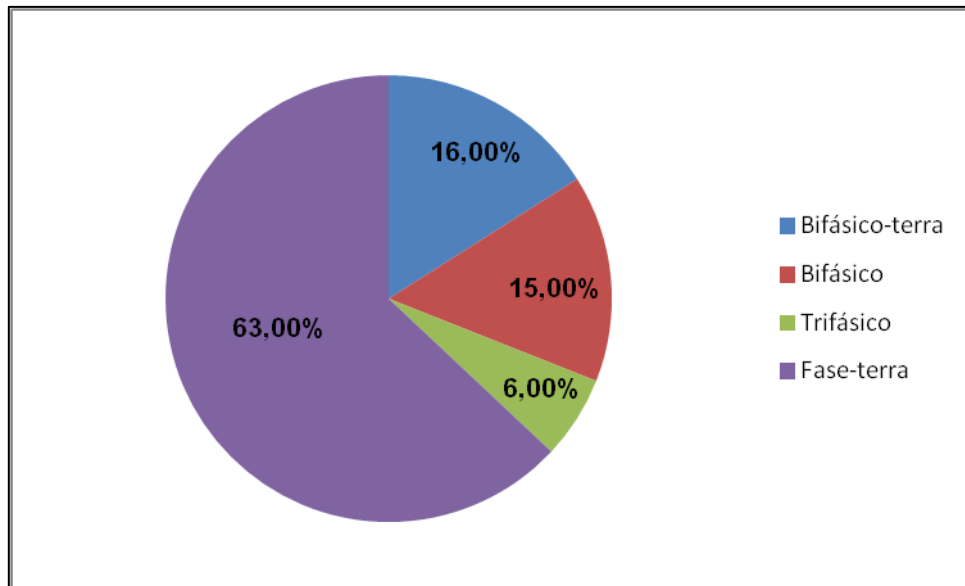


Figura 2 - Incidência de curto-circuito segmentado por seu tipo. Fonte: KINDERMANN, 2010

Por envolver apenas uma das fases do sistema, o curto-circuito monofásico gera a circulação de correntes desequilibradas nas fases, característica das faltas assimétricas, cuja análise pode ser feita com o Método das Componentes Simétricas (Teorema de *Fortescue*).

#### **Teorema de *Fortescue*:**

O Método das Componentes Simétricas se baseia nos estudos de Charles Legeyt Fortescue, divulgados no anuário de 1918 do American Institute of Electrical Engineers (AIEE). O teorema de *Fortescue* diz que:

"Qualquer grupo desequilibrado de  $n$  fasores associados, do mesmo tipo, pode ser resolvido em  $n$  grupos de fasores simétricos, denominados *componentes simétricas dos fasores originais*".

Através do uso do Método das Componentes Simétricas é possível transformar um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas simétricos, um de sequência direta ou positiva (equilibrado com mesma sequência de fases do sistema original), um de sequência inversa ou negativa (equilibrado com sequência de fases oposta ao sistema original) e um de sequência zero (fasores com mesmo módulo e sem defasagem entre eles). Na Figura 3 é apresentado o diagrama fasorial de componentes simétricas de correntes trifásicas.

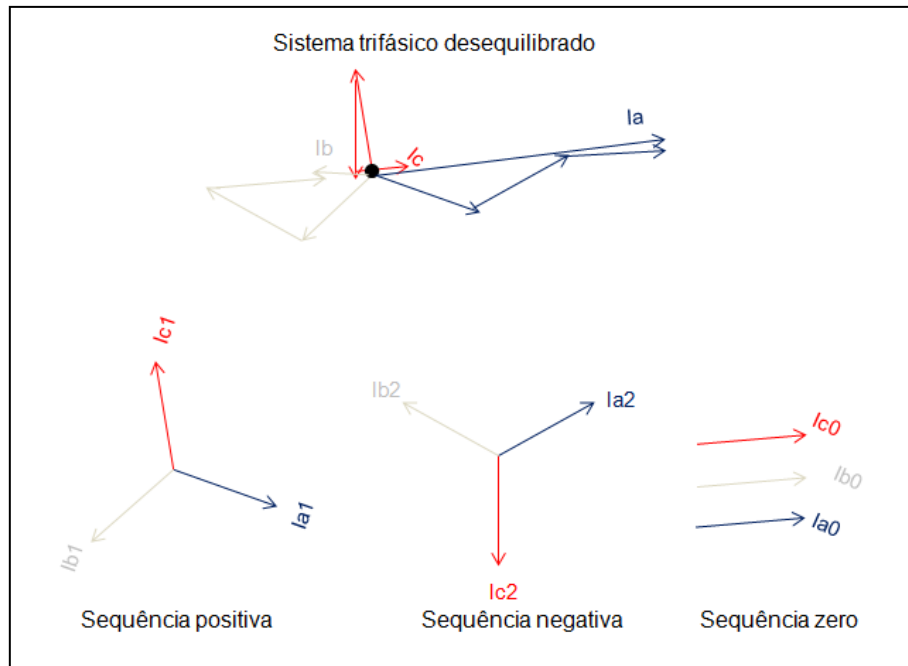


Figura 3 - Transformação de sistema trifásico desequilibrado em componentes simétricas

Para determinar as correntes do sistema trifásico desequilibrado a partir de suas componentes simétricas utiliza-se a Matriz de Fortsue. A seguir, exemplo para um sistema com sequência de fase ABC.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para determinar as componentes simétricas a partir das correntes do sistema trifásico desequilibrado utiliza-se a Matriz Inversa de Fortsue, conforme demonstrado a seguir para o sistema ABC.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

As transformações apresentadas se referem aos fasores de corrente, mas o teorema é igualmente válido para fasores de tensão.

A corrente de sequência zero só existe se houver um caminho fechado para circular e a soma dos fasores do sistema trifásico original for não nula, sendo calculada por:

$$\bar{I}_{a0} = \frac{1}{3} * (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (3)$$

Nos sistemas trifásicos a 4 fios, como o apresentado na Figura 4, a corrente de neutro é dada por:

$$\bar{I}_n = (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) = 3 * \bar{I}_{a0} \quad (4)$$

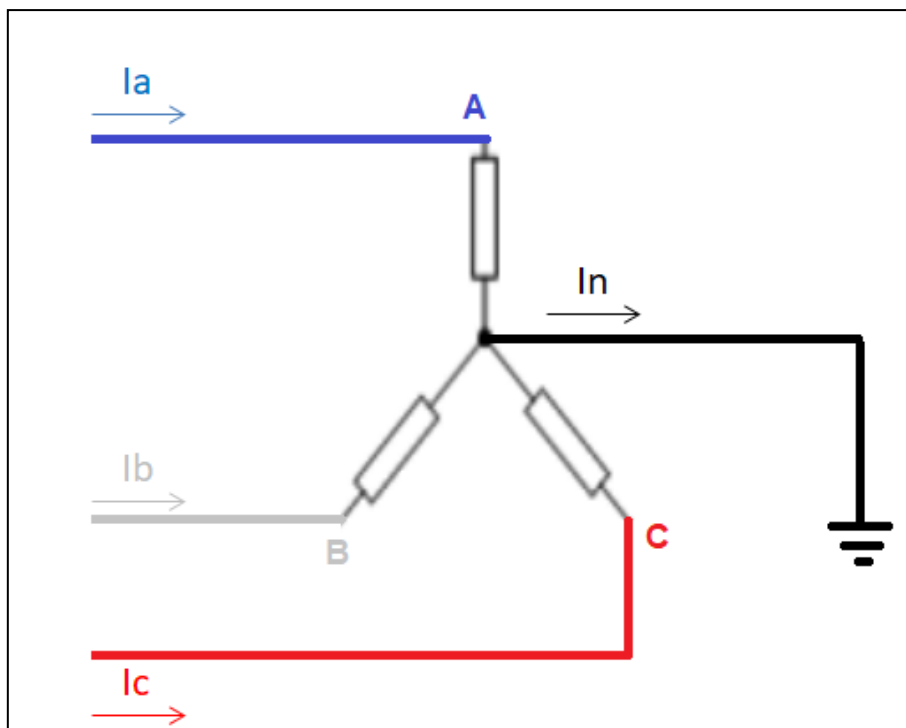


Figura 4 - Sistema trifásico a 4 fios

### Curto-Circuito Monofásico:

O curto-circuito monofásico ocorre quando há o contato sem resistência de falta (franco) ou por meio de impedância ( $Z_{falta}$ ), entre uma fase e a terra. Em faltas francas, a corrente de carga é tipicamente desprezada, por ser bem menor que a corrente de curto-circuito. Assim, a tensão no ponto de falta é igual à tensão nominal no ponto antes da falta. As correntes de linha durante a falta são então determinadas pelas Equações (5) e (6).

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a}{Z_{falta}} \text{ (A)} \quad (5)$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \text{ A} \quad (6)$$

A Figura 5 apresenta o diagrama de um curto-circuito monofásico.

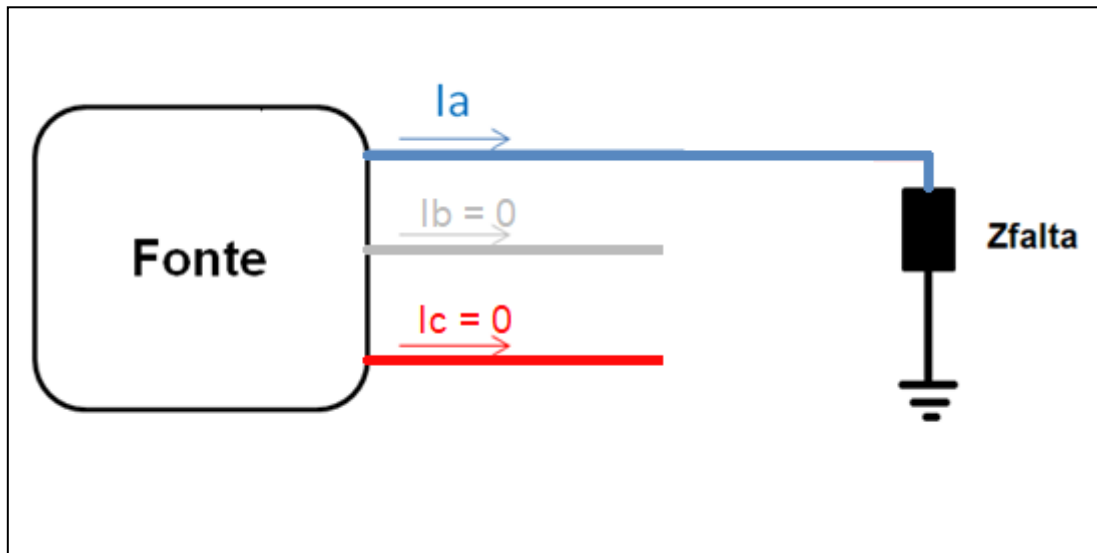


Figura 5 - Diagrama de curto-circuito monofásico

Utilizando o Método das Componentes Simétricas tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\bar{I}_{a0} = \bar{I}_{a1} = \bar{I}_{a2} = \frac{1}{3} * \bar{I}_a \quad (8)$$

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} = Z_{falta} * \bar{I}_a = Z_{falta} * 3 * \bar{I}_{a0} \quad (9)$$

O circuito equivalente do curto-circuito monofásico, utilizando a representação de componentes simétricas, é apresentado na Figura 6, onde  $Z_0$ ,  $Z_1$  e  $Z_2$  representam os equivalentes de *Thevenin* em relação ao ponto de falta.

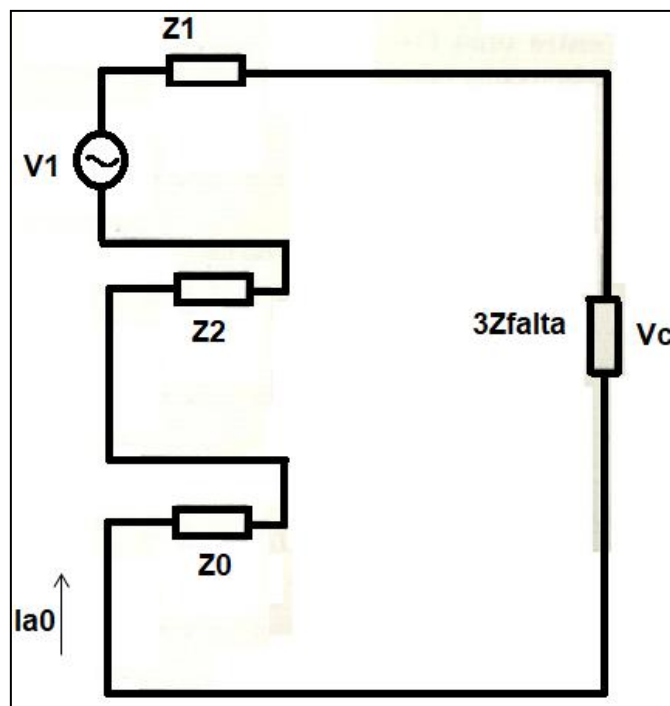


Figura 6 - Circuito equivalente do curto-circuito monofásico

### Falta de Alta Impedância:

A Falta de Alta Impedância (FAI) é um distúrbio elétrico que ocorre quando um condutor energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade (alta impedância). O contato de um condutor energizado com uma árvore ou o rompimento de um condutor energizado e seu contato com solo são situações que podem gerar uma FAI. A corrente produzida por uma FAI é baixa e dificilmente será detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente. O nível de tensão da fase defeituosa é pouco afetado durante a ocorrência da FAI.

### Contato de condutor energizado com árvores:

O contato de um condutor energizado com uma árvore ocorre com certa frequência em SDEE, uma vez que os circuitos atravessam zonas arborizadas e podem entrar em contato direto com folhas em crescimento, galhos ou troncos de árvores inclinadas (IURINIC, 2016). Geralmente esse contato ocorre sem que o cabo se rompa (sem interrupção no fornecimento de energia às cargas a jusante do ponto de falta).

Durante a FAI, a corrente de falta circula pelo tronco da árvore, estabelecendo uma distribuição de potencial elétrico, gerando risco de eletrocussão para os seres vivos e



retornam à terra por meio de suas raízes (BULTER, 1999). Elkalashy et al. (2007) verificou que o tronco de uma árvore possui resistividade uniforme e, portanto, pode ser considerada uma resistência linear com valores entre 200 k $\Omega$  (temperatura ambiente) a 800 k $\Omega$  (-15 °C). A Figura 7 ilustra esse caso.

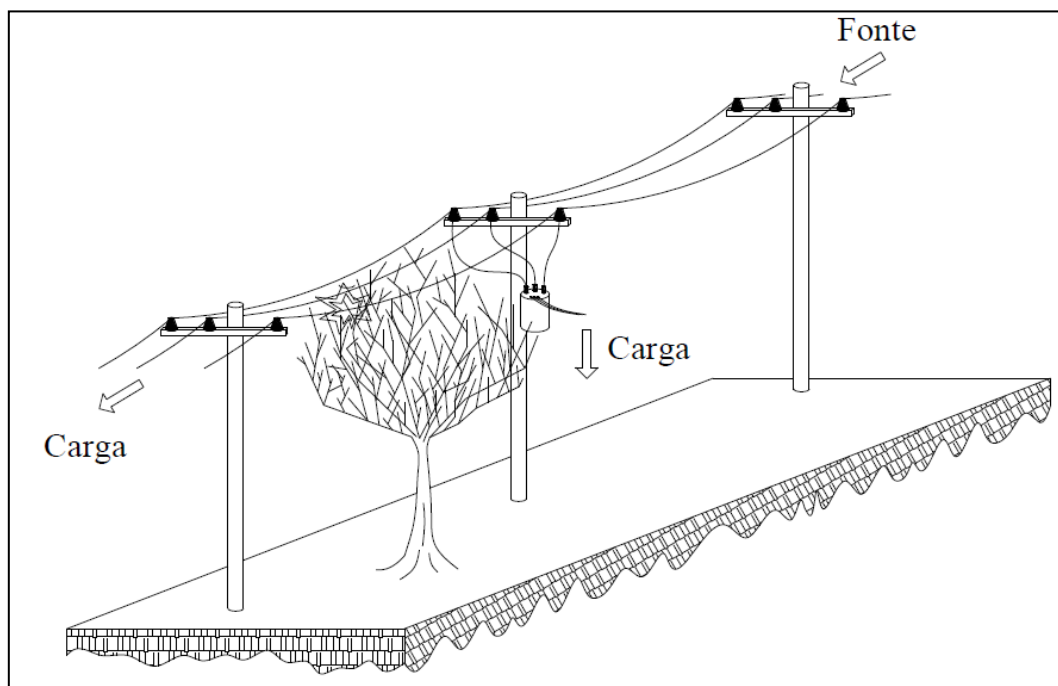


Figura 7 - Contato do condutor energizado com árvore. Fonte: IURINIC, 2016

### **Rompimento de condutores:**

O rompimento de um condutor energizado e seu contato com solo é a principal preocupação das distribuidoras e da sociedade quando se trata de FAI. O risco de morte é bastante elevado, já que a tensão primária de distribuição é de alguns milhares de volts; o contato com um condutor energizado sobre este potencial é fatal. O rompimento dos condutores e contato destes com o solo pode ocorrer no lado da fonte quanto do lado da carga.

### **Rompimento do lado da Carga:**

Este tipo de ocorrência é menos danosa que o rompimento do lado da fonte. A corrente de falta gerada pelo rompimento do condutor e contato deste com o solo no lado da carga depende da indução entre a fase defeituosa e as outras fases e do efeito capacitivo da linha (IURINIC, 2016). Após o rompimento do condutor, as cargas a montante do ponto de rompimento (sentido oposto da fonte), sofrem a interrupção no fornecimento

de energia. Nesse cenário surge a necessidade de reforçar que as Gerações Distribuídas conectadas ao alimentador primário devem desconectar a geração (função anti-ilhamento) a fim de se interromper o fornecimento de energia à falta e evitar níveis de tensão prejudiciais às cargas conectadas ao sistema. A Figura 8 ilustra este caso.

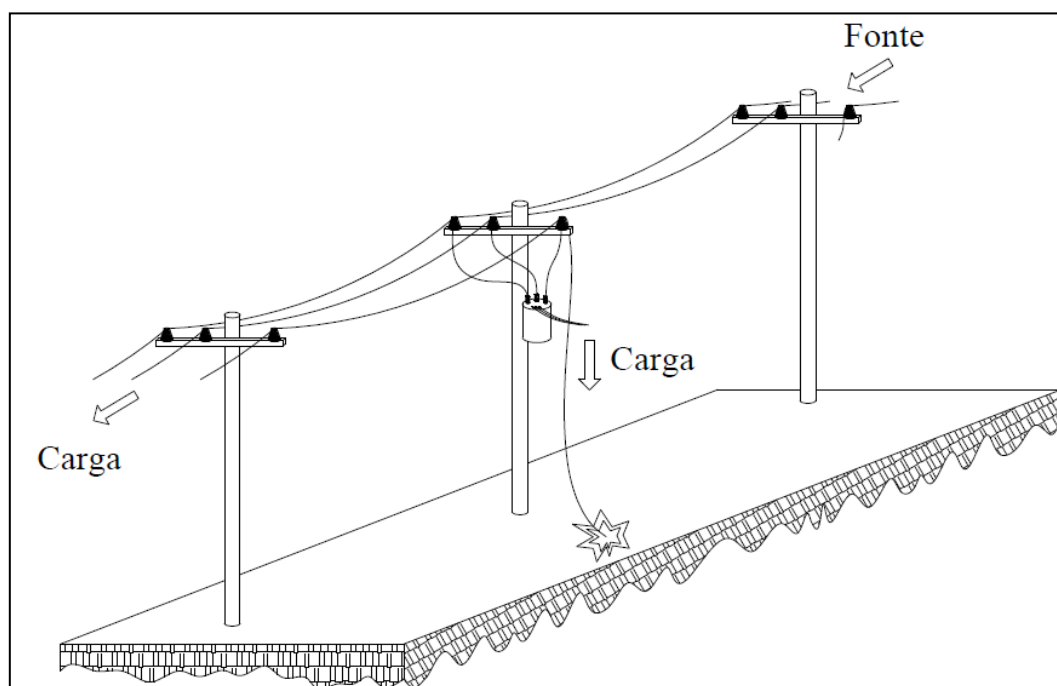


Figura 8 - Rompimento do condutor no lado da carga. Fonte: IURINIC, 2016

### **Rompimento do lado da Fonte:**

O caso do rompimento dos condutores e contato destes com o solo no lado da fonte de energia é o tipo mais perigoso de FAI e é, por isso, o principal objeto de análise deste trabalho. Neste caso ocorrem as seguintes situações:

- As cargas a jusante de ponto de rompimento (sentido oposto da fonte) tem o seu fornecimento de energia interrompido;
- O cabo entra em contato com o solo e a fonte alimenta a falta de forma direta. A corrente é limitada pela impedância da falta. Caso a superfície de contato tenha uma baixa impedância (alta condutividade), surgirá uma corrente de alta intensidade que será extinta pela atuação das proteções convencionais de sobrecorrente do alimentador. Entretanto, caso o solo tenha uma alta impedância (baixa condutividade), surgirá uma corrente de falta da mesma ordem de grandeza da corrente provocada por outros fenômenos, tais como energização de

cargas e chaveamento de banco de capacitores. Portanto, a corrente do circuito sobre falta confunde-se com o carregamento normal e a falta dificilmente é detectada pelos sistemas de proteção convencionais. A Figura 9 ilustra este caso.

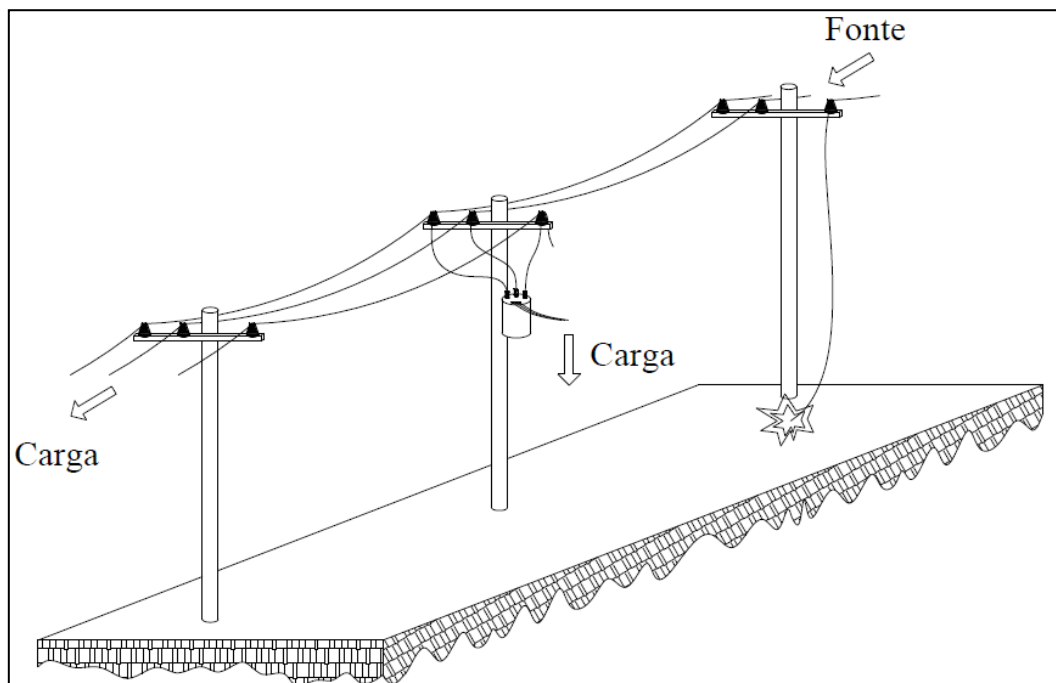


Figura 9 – Rompimento do condutor no lado da fonte. Fonte: IURINIC, 2016

### Arco elétrico:

Assim que o condutor rompido entra em contato com uma superfície de alta impedância, o contato elétrico é fraco (NAKAGOMI, 2006). Devido ao campo elétrico formado entre o condutor e a superfície, os elétrons livres do ar são acelerados. As colisões dos elétrons com moléculas neutras do ar, em um curto espaço de tempo (denominada de avalanche), faz com que sejam liberados novos elétrons, tornando o ar um condutor elétrico e originando os arcos elétricos.

O arco elétrico consiste na circulação de elétrons entre eletrodos, através de um meio dielétrico. O arco elétrico produzido por FAI tem poucos centímetros, produzem correntes com baixa magnitude e são fortemente resistivos (tensão em fase com a corrente) (NAKAGOMI, 2006). Em contraste com os arcos em linhas de transmissão, que podem alcançar alguns metros de comprimento e produzir correntes indutivas. O arco elétrico produzido por uma FAI (Figura 10) torna-se mais significativo se o condutor rompido é levantado do chão. O arco elétrico é o responsável pela deformação

da onda e o surgimento de harmônicos na corrente de falta (JEERINGS & LINDERS, 1989).

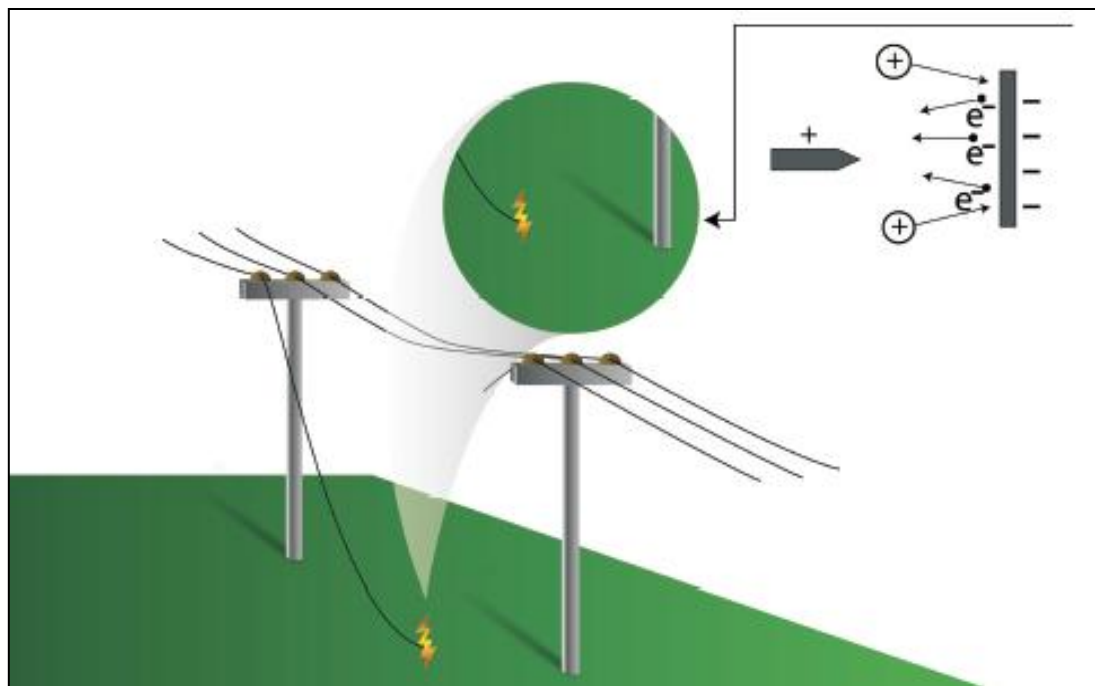


Figura 10 - Arco elétrico gerado por FAI. Fonte: SANTOS, 2016

### Corrente de FAI:

A forma de onda da corrente gerada por uma FAI tem características próprias que foram analisadas nos estudos de JERRINGS & LINDERS em 1989 e EPRI Report em 1982. As principais características são:

- **Intermitência:** há momentos que a corrente de falta se anula;
- **Não linearidade e assimetria entre os semiciclos:** a amplitude do semiciclo positivo da corrente de falta é maior que do semiciclo negativo;
- **Buildup seguido de Shoulder:** nos ciclos iniciais de falta ocorre um crescimento gradativo da corrente de falta, seguido de intervalos de constância.

A Figura 11 apresenta a Oscilografia da tensão no ponto de falta e da corrente gerada por FAI com suas características.

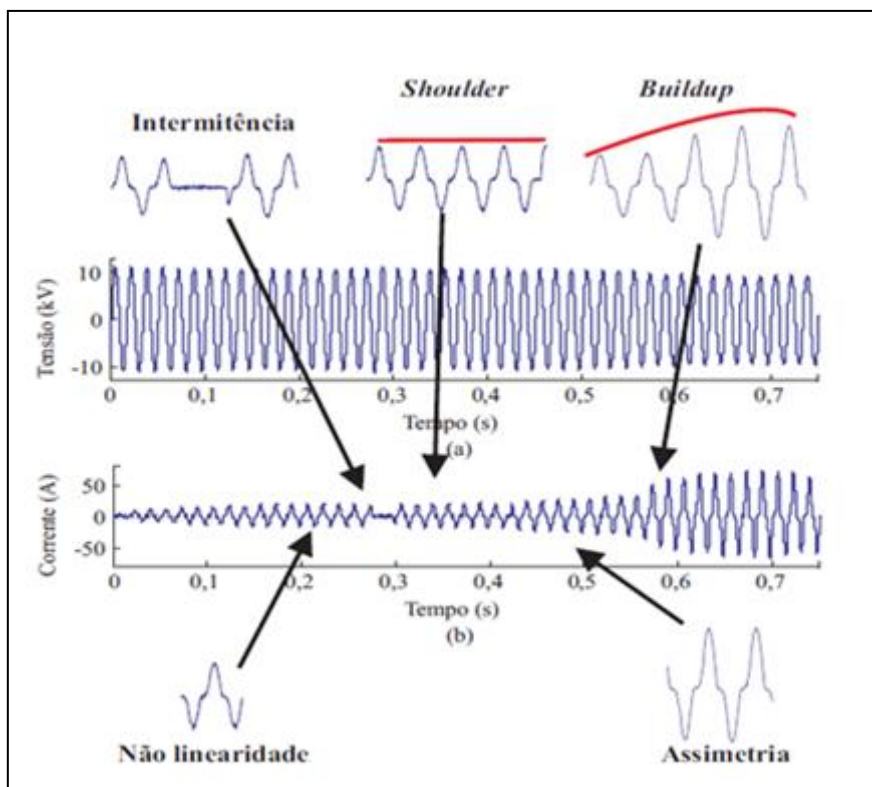


Figura 11 - Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão do alimentador sem alterações significativas na forma de onda; (b) corrente de uma FAI com a presença das suas principais características. Fonte: SANTOS, 2016

Observa-se que durante a FAI, os níveis de tensão ao longo do alimentador não são afetados de forma pronunciada.

As explicações para cada característica da corrente de FAI são apresentadas abaixo:

- **Intermitência:** NAKAGOMI em 2006 afirmou que a intermitência é mais comum na fase inicial da falta, os baixos valores de correntes não conseguem vaporizar o metal do condutor de forma a manter o arco elétrico e ao penetrar o solo, o arco elétrico provoca uma desumidificação da área ao seu redor, provocando sua extinção e a intermitência da corrente. A intermitência provoca o surgimento de componentes de alta frequência na corrente de falta. O arco pode ser restabelecido caso a umidade de outras camadas seja difundida. SANTOS em 2011 verificou que a corrente costumava cessar quando a tensão se anulava e sua reignição ocorria após alguns ciclos, quando tensão era máxima. Além disso, observou-se que a ocorrência de intermitência foi predominante nos tipos de solo: terra local e brita. SANTOS atribui essa predominância à presença de partículas sólidas maiores nessas superfícies.

A Figura 12 apresenta um registro oscilográfico, colhido durante os ensaios de FAI realizados por SANTOS em 2011, no qual é possível observar que o arco se estabelece durante a passagem por um pico de tensão e depois se extingue na passagem pelo zero de tensão.

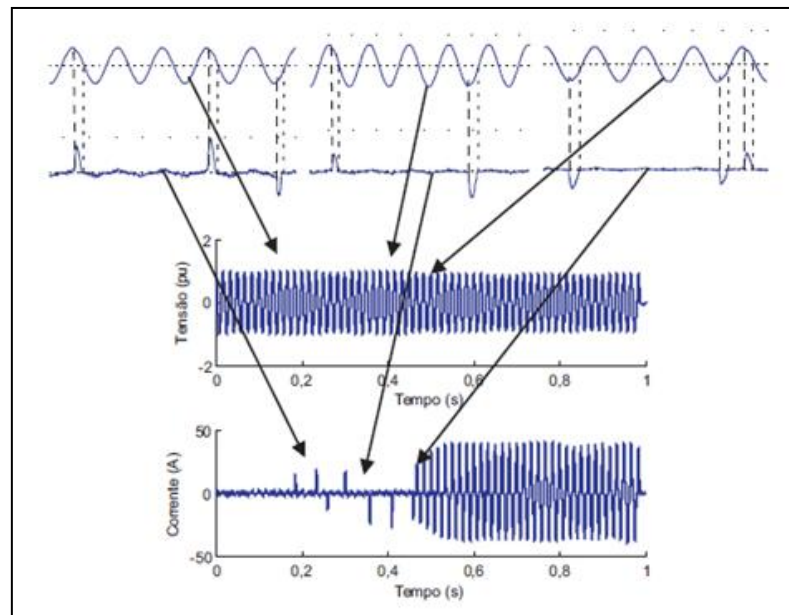


Figura 12- Registro oscilográfico real de Intermitência da corrente de FAI. Fonte: SANTOS, 2011

- Não linearidade e assimetria entre os semiciclos: no trabalho de EMANUEL *et al.* em 1990 observou-se que a corrente de falta não é simétrica, sendo a amplitude do semiciclo positivo maior que a amplitude do semiciclo negativo. A assimetria é influenciada diretamente pela porosidade e inversamente pela umidade da superfície, sendo independente do formato e material dos eletrodos. A Figura 13 apresenta o efeito que a umidade do solo tem na tensão do arco. A assimetria pode ser atribuída à sílica, geralmente presente nas superfícies de contato, que quando aquecida forma uma espécie de “mancha catódica” que emite elétrons, facilitando assim o rompimento do dielétrico quando o condutor está submetido a uma tensão positiva.

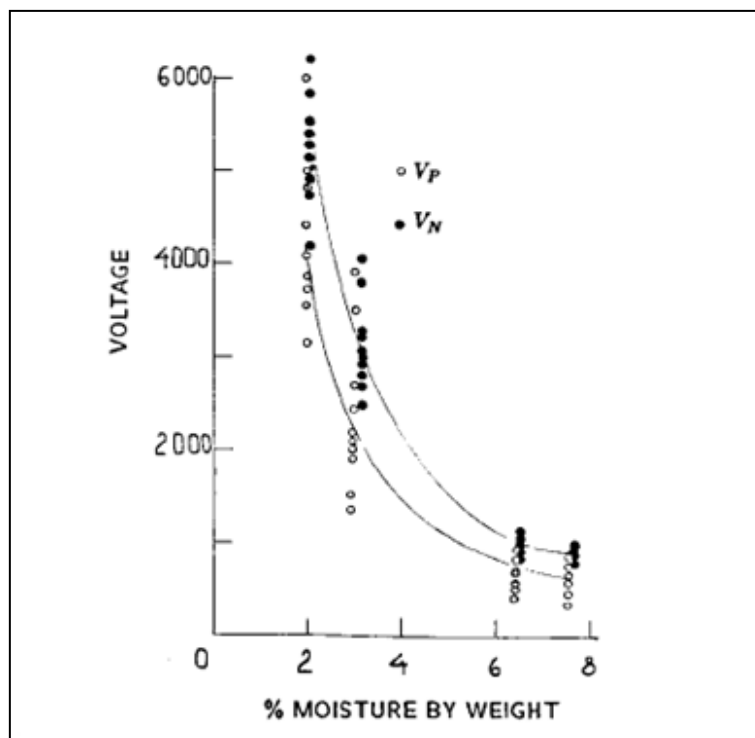


Figura 13 - Influência da umidade na tensão do arco elétrico. Fonte: EMANUEL *et al.*, 1990

- *Buildup* seguido de *Shoulder*: NAM *et al.* em 2001 observou que o condutor demora um tempo para assentar-se completamente ao solo e estabelecer a resistência de contato final da FAI, o que explica o crescimento da corrente de falta durante esse período (*buildup*). Após o estabelecimento da resistência final de contato a corrente se estabiliza (*shoulder*). A duração e a quantidade de repetições de *buildup* e *shoulder* dependem da superfície de contato. A corrente atinge seu valor final, regime permanente de falta, após alguns ciclos (15 a 40 ciclos).

A corrente de FAI possui uma grande componente aleatória, pois suas características variam a depender da superfície de contato, das condições elétricas e espaciais do sistema (KAUFMANN & PAGE, 1960).

## Capítulo 3

### Modelos de Falta de Alta Impedância

Para que os equipamentos de proteção cumpram sua função com rapidez e seletividade é necessário parametriza-los corretamente garantindo que tenham a capacidade de distinguir as diferentes condições do sistema. A realização de testes em campo para a obtenção das formas de onda que representam o distúrbio, especificamente a FAI, seria a principio, uma alternativa para a parametrização dos dispositivos de proteção, no entanto, estes testes poderiam provocar danos a equipamentos do SDEE e interrupções indesejáveis no fornecimento de energia elétrica. Para contornar esse problema, são desenvolvidos modelos representativos dos distúrbios e esses modelos são simulados nos programas de análise de fenômenos transitórios. Quanto mais próximo o modelo do fenômeno real, mais confiável será o diagnóstico.

Com o objetivo de simular a FAI diversos modelos foram desenvolvidos. A seguir são apresentados alguns dos principais modelos da FAI encontrados na literatura.

#### **Modelo 1: Diodos Antiparalelo (EMANUEL *et al.*, 1990):**

Este foi um dos primeiros modelos de Falta de Alta Impedância a ser desenvolvido. O modelo é composto de um Resistor em série com um Indutor, dois diodos conectados em antiparalelo, conforme ilustrado na Figura 14. Em série com cada um dos diodos foi inserida uma fonte de tensão contínua. Durante o semiciclo positivo a corrente de falta circula por  $V_P$  e durante o semiciclo negativo por  $V_N$ . Com  $V_N$  maior que  $V_P$ , a corrente de falta no semiciclo positivo é maior que a corrente de falta no semiciclo negativo, simulando a não linearidade e a assimetria da corrente de FAI.

Este modelo é de fácil implementação, pois não necessita de conhecimento prévio dos pontos de operação da tensão e corrente de falta. O modelo simula as características de não linearidade e assimetria, porém as características de *buildup*, *shoulder* e intermitência não são consideradas.



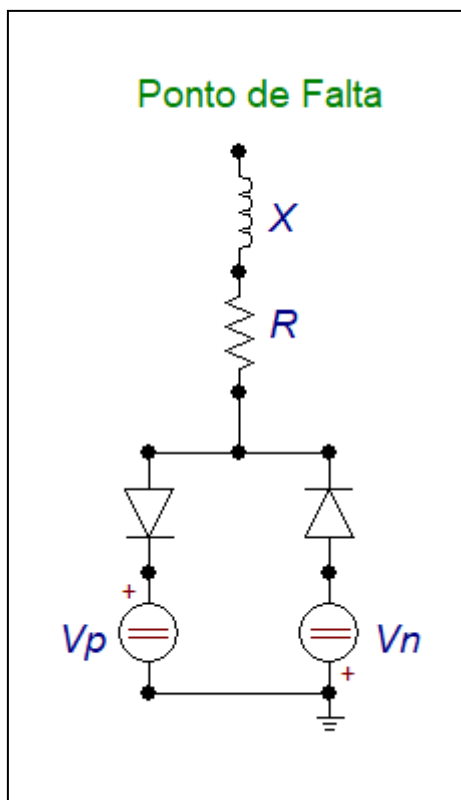


Figura 14 - Modelo de diodos em antiparalelo

### Modelo 2: Resistências Variáveis (NAM *et al.*, 2001):

NAM *et al.* em 2001 realizaram testes em um sistema de distribuição real com tensão primária de 22,9 kV e desenvolveram o modelo apresentado na Figura 15. O modelo utiliza duas resistências em série, variantes no tempo, controladas pela rotina *Transient Analysis of Control Systems (TACS)* do Software *ATP*.

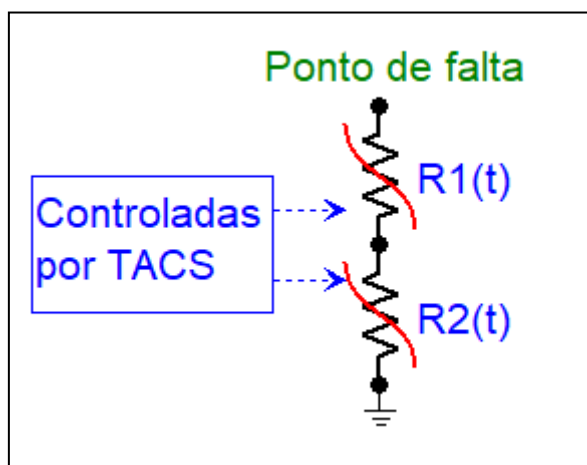


Figura 15 - Modelo das Resistências Variáveis

A resistência  $R_1(t)$  simula as características de não linearidade e assimetria da corrente de FAI, presente tanto no regime transitório quanto no regime permanente da falta. O valor de  $R_1(t)$  é calculado com base na razão entre tensão e corrente do regime permanente de falta, isto é, quando não existam modificações significativas de amplitude entre ciclos subsequentes. A Figura 16 apresenta valores de tensão e corrente no regime permanente de falta. Observa-se que para cada valor de tensão existem dois valores correspondentes de corrente. A distinção da curva correta a ser usada é obtida por meio do cálculo da derivada da tensão no ponto de aplicação da falta. No caso da derivada ser positiva, por exemplo, a curva a ser usada será a ascendente.

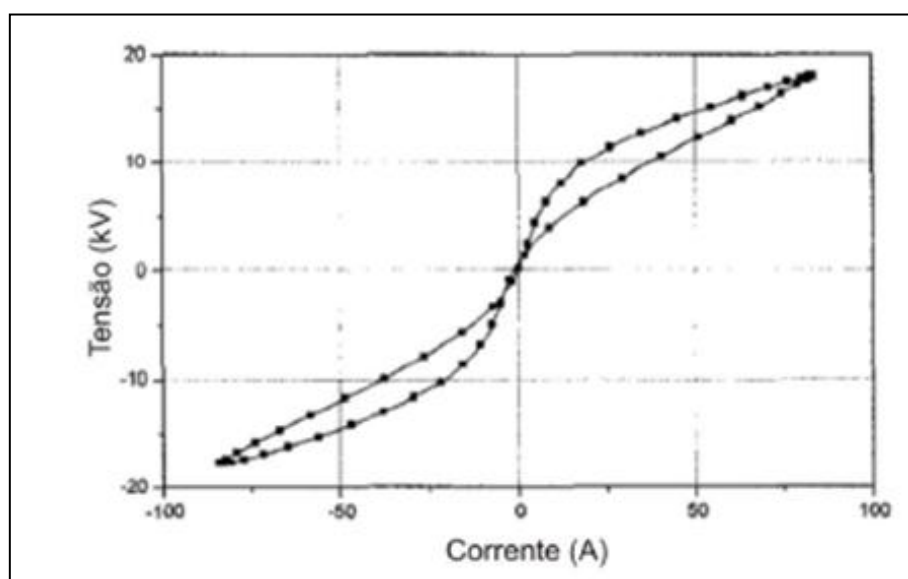


Figura 16 - Curva característica da tensão *versus* corrente de um ciclo em regime permanente de FAI. Fonte: NAM et al., 2001

A resistência  $R_2(t)$  simula as características de *buildup* e *shoulder* da corrente de FAI, presente apenas no regime transitório de falta.

A soma de  $R_1(t)$  e  $R_2(t)$  pode ser obtida dividindo-se os módulos máximos dos semiciclos das tensões e correntes no regime transitório de falta. Subtraindo do resultado desta divisão o valor de  $R_1(t)$ , que já fora calculado no regime permanente de falta, é possível aproximar  $R_2(t)$  por uma equação que é função do tempo, conforme apresenta a Figura 17. Verifica-se que após alguns ciclos (correspondente ao regime transitório de falta), a resistência  $R_2(t)$  é substituída por um valor constante próximo a zero. Neste modelo a intermitência da corrente de FAI não é considerada.

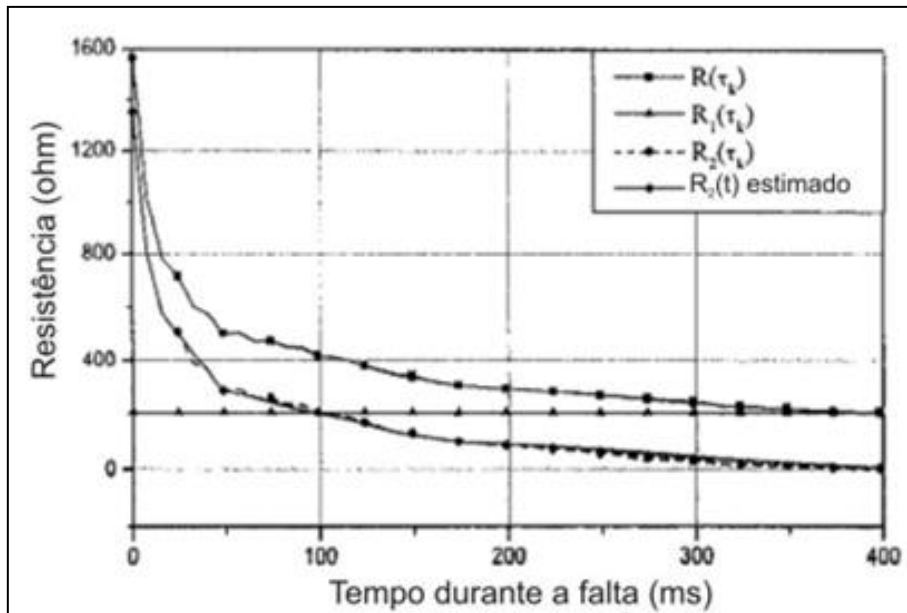


Figura 17 - Curvas de  $R(t)$ ,  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$  calculado e  $R_2(t)$  estimado. Fonte: NAM et al., 2001

### Modelo 3: Diodos Antiparalelo com Intermitência (CHAD & YIBIN, 1998):

Este modelo é uma adaptação do Modelo 1. A Figura 18 apresenta o referido modelo.

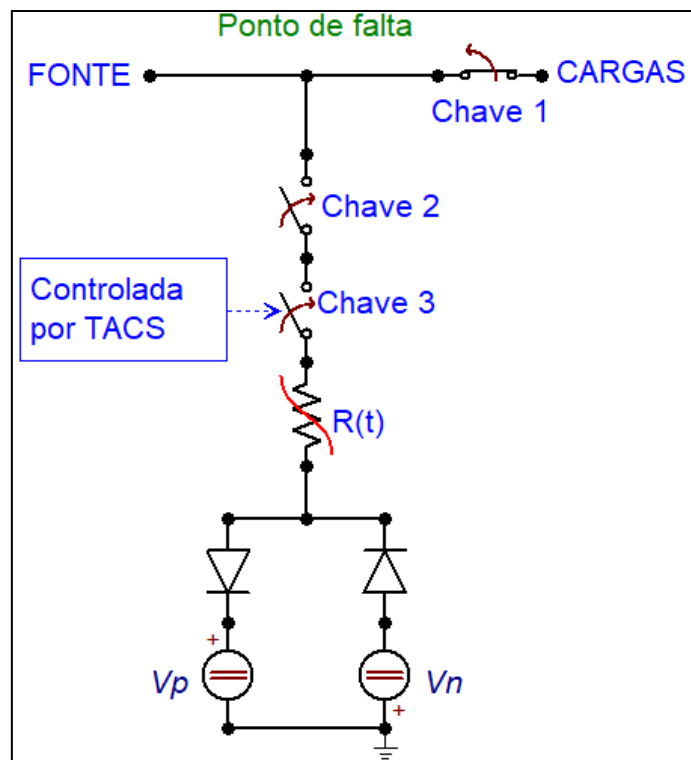


Figura 18 - Modelo de diodos em antiparalelo com intermitência

Ao modelo original foram acrescentadas uma chave convencional controlada por tempo que possibilita a interrupção no fornecimento de energia às cargas conectadas a jusante do ponto de falta (Chave 1), uma chave convencional controlada por tempo que conecta a falta ao alimentador (Chave 2) e uma chave controlada pela rotina *TACS* do Software *ATP*, que simula a ocorrência de intermitências da corrente de FAI (Chave 3).

Este modelo permite a representação das características de não linearidade, assimetria e intermitência, porém o *buildup* e *shoulder* da corrente de FAI não são representados.

#### Modelo 4: Resistências Variáveis com Controladores (SANTOS, 2011):

Este modelo é baseado nos Modelos de 2 e 3. A Figura 19 apresenta o modelo.

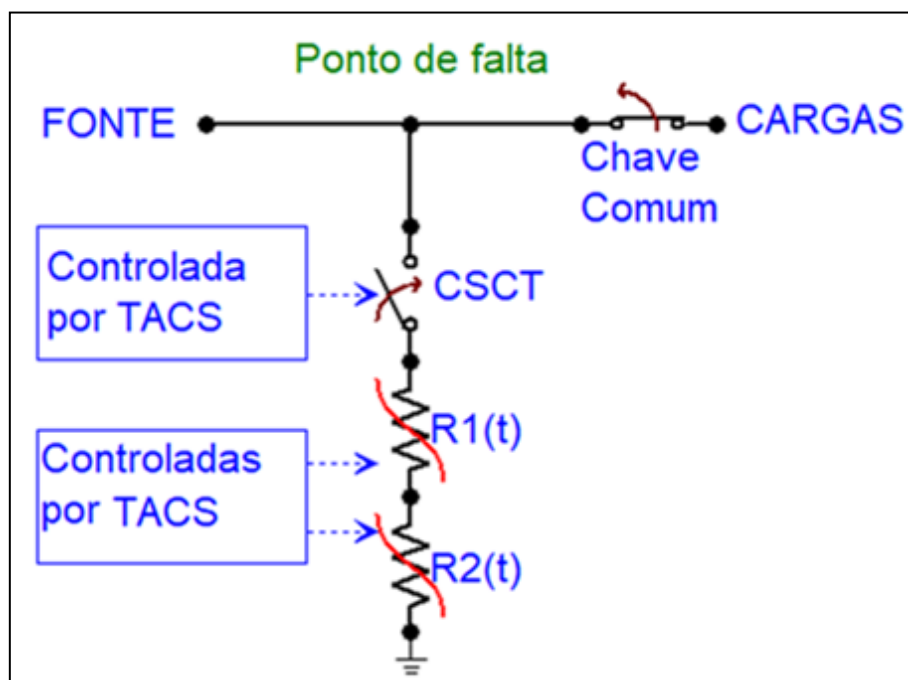


Figura 19 - Modelo das Resistências Variáveis com Controladores

O modelo utiliza duas resistências variantes no tempo em série  $R_1(t)$  e  $R_2(t)$ , controladas pela rotina *TACS* do Software *ATP*. A resistência  $R_1(t)$  simula a características de não linearidade, assimetria. O valor de  $R_1(t)$  foi calculado com base na razão entre tensão e corrente do regime permanente de falta, da mesma forma como descrito no Modelo 2, utilizando uma rotina na linguagem *MODELS*, que distingue a curva correta a ser usada por meio do cálculo da derivada da tensão no ponto de aplicação da falta.

A resistência  $R_2(t)$  simula o *buildup* e *shoulder* da corrente de FAI. O valor de  $R_2(t)$  foi aproximado por uma regressão polinomial da mesma forma como descrito por NAM *et al.* (2001). Porém, em SANTOS (2016),  $R_2(t)$  foi aproximada por uma função exponencial, visando tornar possível a inserção de pequenos instantes de constância no *buildup*, que não haviam sido consideradas pelo modelo inicial de SANTOS (2011).

O tempo de decaimento de  $R_2(t)$  foi dividido em tempo de espera, período em que ocorre o decaimento exponencial (*buildup*) e tempo de constância, período em que o valor de  $R_2(t)$  permanece constante (*shoulder*).

A chave comum simula o rompimento do condutor e a interrupção no fornecimento de energia às cargas conectadas a jusante do ponto de falta. A chave simples controlada por TACS (CSCT), dá início à falta e simula a intermitência da corrente de FAI. O instante de abertura, o número de ciclos até a reigitação do arco (instante de fechamento da CSCT) foi modelado através de uma rotina na linguagem MODELS.

Este modelo permite a representação das características de não linearidade, assimetria e intermitência, *buildup* e *shoulder*. O ajuste dos parâmetros do modelo baseou-se em oscilografias reais, obtidas através de uma série de ensaios em um alimentador real da distribuidora Energisa Paraíba. Um condutor primário energizado foi posto em contato com sete tipos de superfícies: grama, calçamento, brita, asfalto, areia, solo local e arbusto, nas condições secas e molhadas. As medidas de tensão e corrente foram realizadas por Registradores Digitais de Perturbação (taxa de amostragem de 15360 Hz), instalados em três pontos distintos do alimentador.

Diante do exposto, esse foi o modelo mais completo encontrado na literatura. Porém, sua implementação se torna complicada e difícil de reproduzir devido à necessidade de busca dos pontos de operação do modelo em vetores de medições de tensão e corrente. Tal fato demonstra a necessidade por modelos realísticos, porém de simples reprodução para estudos na área.

## Capítulo 4

### Métodos para avaliar ocorrência da Falta de Alta Impedância

A proteção de sistema elétricos de potência deve garantir a máxima continuidade no fornecimento de energia, salvaguardando os equipamentos do sistema e minimizando os riscos aos seres vivos. Os requisitos mínimos para um sistema de proteção são:

- Sensibilidade: capacidade de identificar faltas para as quais ele foi projetado;
- Confiabilidade: habilidade de atuar corretamente quando necessário;
- Segurança: evitar operação desnecessária;
- Seletividade: promover a máxima continuidade de serviço, com um mínimo de desconexões para isolar a falta;
- Coordenação: ter ajustes apropriados para obter a seletividade;
- Velocidade: tempo de atuação deve ser ajustado para diminuir a duração da falta, minimizando os danos;
- Simplicidade: utilização mínima de equipamentos e circuitos.

O surgimento de correntes elevadas durante curtos circuitos é a principal forma de detectar e isolar a área com defeito. Porém, durante a FAI a corrente gerada é da mesma ordem de grandeza da corrente de carga e não é detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente. Devido a esse fato, vários estudos têm sido realizados no sentido de desenvolver um método de identificação da ocorrência de FAI. Neste capítulo serão apresentados alguns dos principais métodos de avaliar a ocorrência de FAI, reportados na literatura, dentre os quais alguns serão utilizados.

#### **Componentes Harmônicas na Corrente de Falta:**

Emanuel et al. em 1990 realizou medidas em campo e posteriormente em um sistema, montado em laboratório, que simula uma FAI. Um eletrodo de 7900 V foi inserido em um vaso metálico contendo solo arenoso. Uma resistência variável conectada em série simulou a variação de resistência do solo. A Figura 20 apresenta o arranjo experimental.

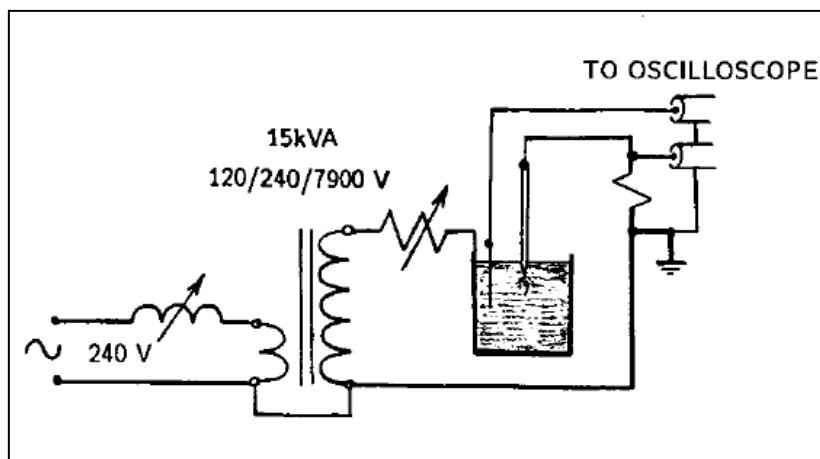


Figura 20 - Arranjo experimental que simula FAI. Fonte: Emanuel et al., 1990

As medidas revelaram que a corrente de FAI é assimétrica e a amplitude do semiciclo positivo é maior que a amplitude do semiciclo negativo, como já exposto no Capítulo 2. A distorção na forma de onda promove o aparecimento de harmônicos da baixa ordem. Para correntes de falta maiores do que 10 A, a amplitude do terceiro harmônico variou entre 5 % e 15 % do valor de amplitude da fundamental e a amplitude do segundo harmônico variou entre 3,7 % e 6,7 % do valor de amplitude da fundamental. Não foram constatados harmônicos acima de 180 Hz nas medidas realizadas. Harmônicos de ordem superior estão relacionados à ocorrência de intermitência, fenômeno não observado nas medidas realizadas.

Constatou-se que a amplitude do segundo harmônico da corrente de falta é diretamente proporcional a  $\Delta V$  ( $\Delta V = V_N - V_P$ ). O terceiro harmônico é inversamente proporcional à relação  $X/R$  da impedância de falta, porém não é afetado de forma significativa por  $\Delta V$ . A Figura 21 apresenta um gráfico que ilustra a influência de  $\Delta V$  e da relação  $X/R$  da impedância de falta no segundo harmônico da corrente de falta e a Figura 22 apresenta um gráfico que ilustra a influência de  $\Delta V$  e da relação  $X/R$  da impedância de falta no terceiro harmônico da corrente de falta.

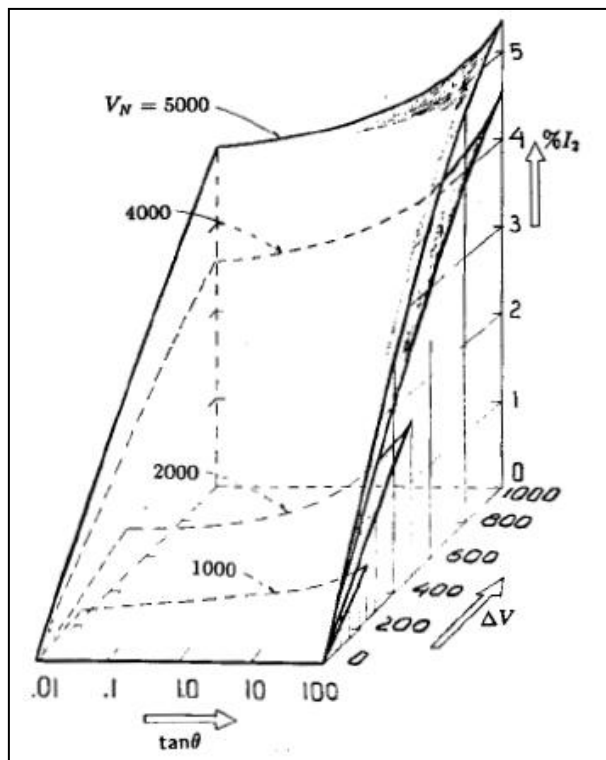


Figura 21 - Influência de  $\Delta V$  e  $XL/R$  no segundo harmônico da corrente de falta. Fonte: Emanuel et al., 1990

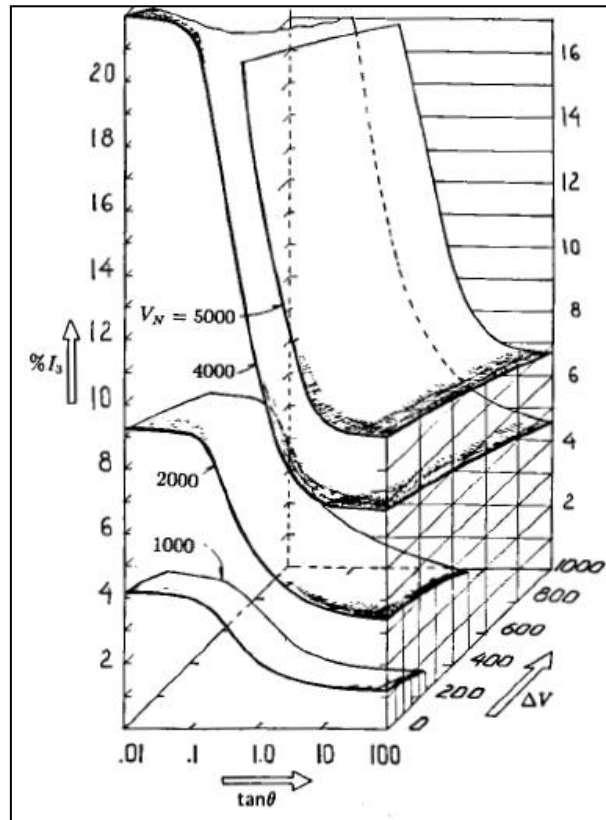


Figura 22 - Influência de  $\Delta V$  e  $XL/R$  no terceiro harmônico da corrente de falta. Fonte: Emanuel et al., 1990



Nas medições realizadas por NAM et al. (2001) foram verificados correntes de falta três a quatro vezes maiores do que as apresentadas por EMANUEL et al. (1990). Para correntes de falta de 76 A, a amplitude do terceiro harmônico foi de 11,8% do valor de amplitude da fundamental e a amplitude do segundo harmônico foi de 0,42 % do valor de amplitude da fundamental. Como não foram observados valores de  $\Delta V$  consideráveis, era de se esperar que o harmônico de segunda ordem fosse praticamente nulo.

As medição dos harmônicos na subestação é a melhor alternativa do ponto de vista econômico, devido ao custo da instalação de sensores em pontos ao longo da rede. Entretanto, ressalta-se que os valores de harmônico, registrados na subestação, não são os mesmos registrados no ponto da falta. A razão entre as componentes harmônicas e a componente fundamental é menor na subestação quando em comparação com o ponto de falta. Além disso, durante o funcionamento normal do SDEE existem outras fontes de harmônicos, como por exemplo: fornos a arco, fontes chaveadas, operação de chaveamento na rede com religadores ou banco de capacitores. Os religadores instalados ao longo da rede podem ajudar a monitorar as grandezas da rede e permitir a identificação da FAI.

#### **Deteção de condutor aberto através do desequilíbrio das tensões:**

Instalando sensores de tensão, nas extremidades do alimentador primário, é possível, através da comparação das tensões em cada fase, determinar se há um condutor rompido. As tensões a jusante do ponto de falta apresentam desequilíbrio significativo (exceto para o caso de FAI devido o contato de condutor energizado com árvores), que pode ser mensurado pelas componentes de sequência negativa ou zero. Este método, no entanto, demanda a aquisição, instalação e manutenção de muitos sensores e de uma rede comunicação para transmitir a informação dos sensores até o equipamento de proteção a montante, o que torna este método inviável economicamente (SENGER *et al.*, 2000).

#### **Neutro sensível:**

A FAI decorrente do rompimento do condutor e seu contato com o solo envolve, necessariamente, um caminho da corrente de falta para a terra. A análise da corrente residual de neutro possibilita avaliar a ocorrência de FAI. O neutro sensível consiste na parametrização de baixas correntes de partida das unidades de sobrecorrente de neutro,

além de baixos tempos definidos das temporizações destas unidades (SILVA & SOUZA, 2008).

Este método apresenta a dificuldade de se definir a corrente de *pick-up* do neutro sensível, de forma que não haja má atuação da proteção devido a desequilíbrios das correntes de carga da rede.

### Transformadas Wavelets:

SANTOS em 2016 utilizou as Transformadas Wavelets (TW) para se avaliar a ocorrência de FAI utilizando a função base Dabauchies 4 (db4).

A TW decompõe um sinal em diferentes faixas de frequências, através de operações de escalonamentos e translações em uma função base. Utilizando filtros passa-baixa ( $g(k)$ ) obtêm-se os coeficientes *wavelet* de aproximação ( $c_i(k)$ ) e utilizando filtros passa-alta ( $h(k)$ ) os coeficientes *wavelet* de detalhe ( $d_i(k)$ ). A Figura 23 apresenta a decomposição *wavelet* de um sinal  $c_o(k)$ .

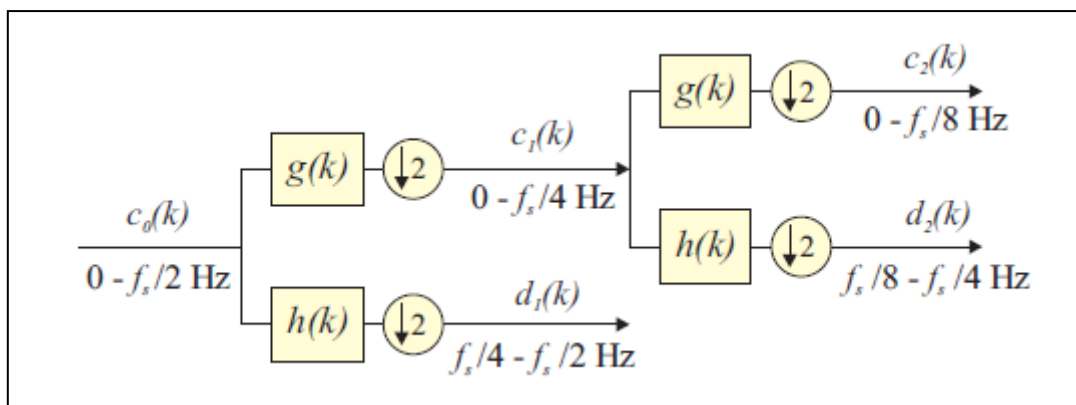


Figura 23 - Decomposição *wavelet* de  $c_o(k)$ . Fonte: SANTOS, 2016

Para a identificação corrente da FAI é preferível trabalhar com a energia dos coeficientes *wavelet* a trabalhar com a amplitude dos coeficientes.

A FAI não afeta significativamente a energia dos coeficientes de aproximação, mas sim a energia dos coeficientes de detalhe. Estes aumentam bruscamente após o início da FAI. A energia do coeficiente de detalhe permanecerá elevada até que a proteção atue cessando a falta.

O método propõe:

- Monitoramento contínuo do alimentado (registros oscilográficos);

- Cálculo das energias dos coeficientes *wavelet* de detalhe e de aproximação da tensão;
- Comparação da energia do coeficiente *wavelet* de detalhe com valor limite auto adaptativo;

Caso o valor da energia do coeficiente *wavelet* de detalhe ultrapasse o limite estabelecido:

- Verificação de que não se trata de um fenômeno transitório, monitorando o tempo que a energia do coeficiente *wavelet* de detalhe é maior que tempo de referência (150 ms);

Caso o tempo em que o valor da energia do coeficiente *wavelet* de detalhe ultrapasse o tempo de referência:

- Verificação da energia do coeficiente *wavelet* de aproximação. Se este superar um limiar, existem afundamentos de tensão, o diagnóstico é uma falta de baixa impedância, caso o contrário trata-se de uma FAI.

Além das técnicas citadas acima, há estudos que avaliaram a ocorrência de FAI através de reconhecimento de padrões, redes neurais e lógica *Fuzzy*. A detecção e localização das faltas permitirá a reconfiguração da rede (*self-healing*) no contexto de redes inteligentes. Independentemente da técnica adotada para avaliar a ocorrência de FAI, é necessário que o sistema de proteção seja ajustado de forma a minimizar operações indevidas, consistindo no *trade off* entre sensibilidade e segurança. A segurança na atuação da proteção pode ser aumentada através da implementação de lógica que dependa de múltiplas detecções para comandar a abertura do disjuntor.

No próximo capítulo, apresenta-se a proposta de um modelo realístico, porém simplificado, cujas análises são realizadas por meio do estudo de harmônicas.

## Capítulo 5

### Modelo de Falta de Alta Impedância desenvolvido

O produto deste trabalho é um modelo desenvolvido no Software *ATPDraw*, que simula as principais características da corrente de FAI produzidas após o rompimento de um condutor (uma fase de alimentação primária) e o contato deste com o solo no lado da fonte.

#### ***ATP e ATPDraw:***

O *ATP* (*Alternative Transient Program*) é um programa que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas. O início do seu desenvolvimento se deu na década de 60 com o programa *EMTP* (*Eletromagnetic Transient Program*) por Herman W. Dommel, para a *Bonneville Power Administration* (*BPA*). Através da colaboração dos usuários do *EMTP*, o programa se tornou uma excelente ferramenta para a execução de estudos de fenômenos transitórios. Atualmente o programa denominado *ATP* é distribuído pelo instituto belga *Leuven EMTP Center* (*LEC*).

O *ATP* realiza cálculos baseado no método de integração trapezoidal para parâmetros concentrados e distribuídos, constantes e variantes na frequência.

O *ATPDraw*, desenvolvido por Dr. Hans Kr. Høidalen no instituto *SINTEF Energy Reseach* em parceria com a *Norwegian University of Science and Technology*, é uma interface gráfica do *ATP*. O usuário elabora sistemas elétricos, de forma gráfica, utilizando componentes disponíveis na biblioteca e o *ATPDraw* gera um arquivo do tipo *.atp*.

### Modelos desenvolvidos:

A intenção do trabalho é desenvolver um modelo de FAI, no *ATPDraw*, que represente as principais características da corrente de FAI: Intermitência, não linearidade e assimetria entre os semiciclos e *Buildup* seguido de *Shoulder*. Este modelo será disponibilizado aos alunos do Laboratório de Proteções de Sistemas Elétricos (pLAB) para que possam ser desenvolvidos novos trabalhos de identificação, localização de FAI, bem como testar lógicas de proteção para a extinção deste tipo de falta.

O modelo escolhido para servir de referência para o trabalho foi o de EMANUEL et al. (1990), devido à simplicidade de implementação e a facilidade de encontrar parâmetros para o modelo na literatura.

Para testar o funcionamento do modelo desenvolvido foi elaborado um sistema elétrico simples composto de uma fonte trifásica, uma rede sem perdas ôhmicas, sem capacitância shunt e cargas RL conectadas a cada uma das fases. A Equação (10) apresenta o cálculo da tensão de pico por fase deste sistema.

$$V_{fase_{m\acute{a}x}} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 11,267 \text{ kV} \quad (10)$$

Definiu-se que a corrente de carga seria de 100 A com fator de potencia de 0,95 indutivo. Logo a impedância de carga, dada pela Equação (11), é de:

$$Z_{carga} = \frac{11,267}{100 \angle -18,2^\circ} = 112,68 \angle 18,2^\circ = 107,04 + j35,19 \Omega \quad (11)$$

Optou-se por aplicar a FAI sempre na Fase C. Através da variação da impedância de carga conectada a montante e a jusante do ponto de falta, é possível simular em que ponto do alimentador a falta ocorreu e qual a porcentagem da carga que teve o fornecimento de energia interrompido. A Figura 24 apresenta o sistema elétrico modelado.

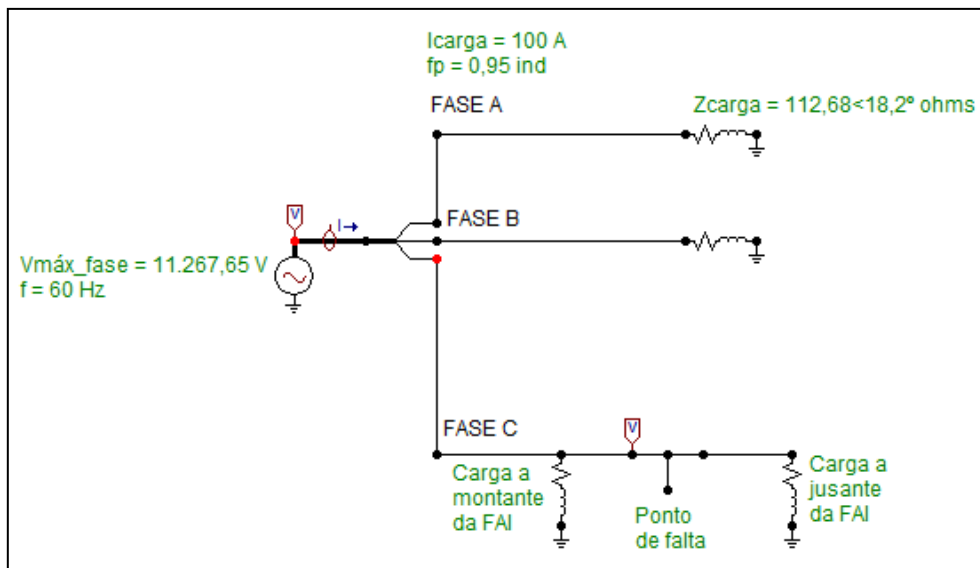


Figura 24 - Sistema elétrico proposto

O primeiro modelo desenvolvido é apresentado na Figura 25. O *ATPDraw* não rodou a simulação, devido ao fato das fontes DC estarem em curto com a terra. Portanto, foi inserida uma resistência de valor  $R = 10^{-10} \Omega$  entre cada fonte DC e a terra.

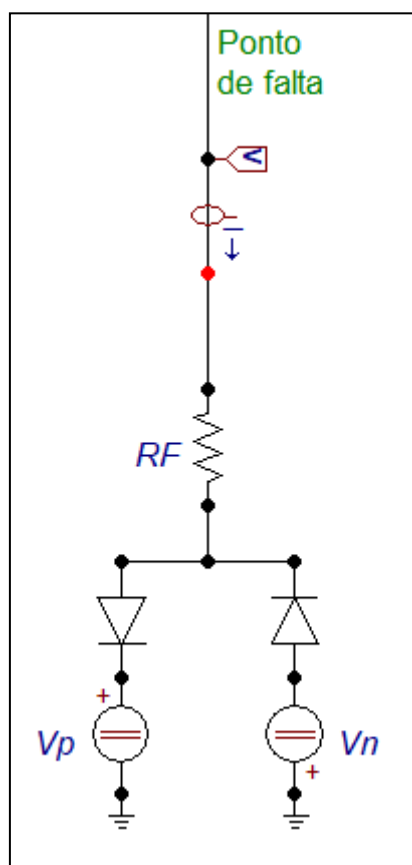


Figura 25 - Primeiro modelo desenvolvido

No segundo modelo (Figura 26) desenvolvido foi inserido o indutor em série com a resistência, como proposto no modelo original de EMANUEL et al. Entretanto, o indutor introduzia oscilações numéricas no cálculo da corrente de falta. Segundo IURINIC (2016), a tensão do indutor, oscila, quando a corrente de falta se anula mediante a ação dos diodos antiparalelos.

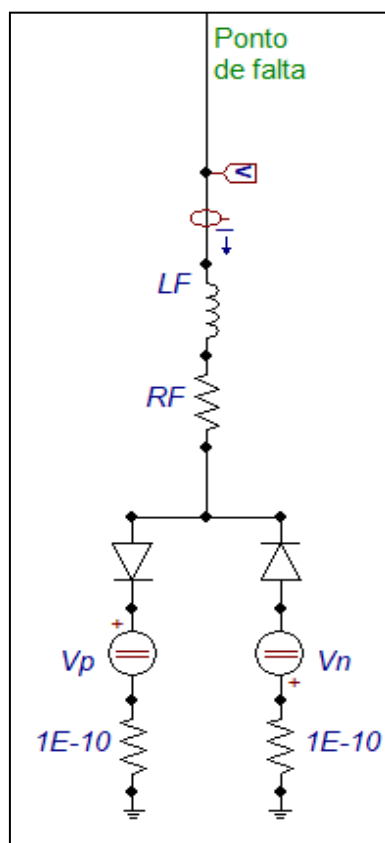


Figura 26 - Segundo modelo desenvolvido

A fim de se evitar as oscilações numéricas, inerentes ao método de integração trapezoidal (utilizada pelo *ATP* no cálculo de parâmetros concentrados), os indutores devem ser modelados como dois blocos *Norton Type-94* do *ATPDraw*. Os blocos foram programados, na linguagem *MODELS*, mediante o método de integração numérica de segunda ordem de Gear (WATSON & ARRILLAGA, 2003). O código escrito para programar os blocos é apresentado no Apêndice A.

O terceiro modelo desenvolvido, com a inserção dos blocos *Norton Type-94*, é apresentado na Figura 27.

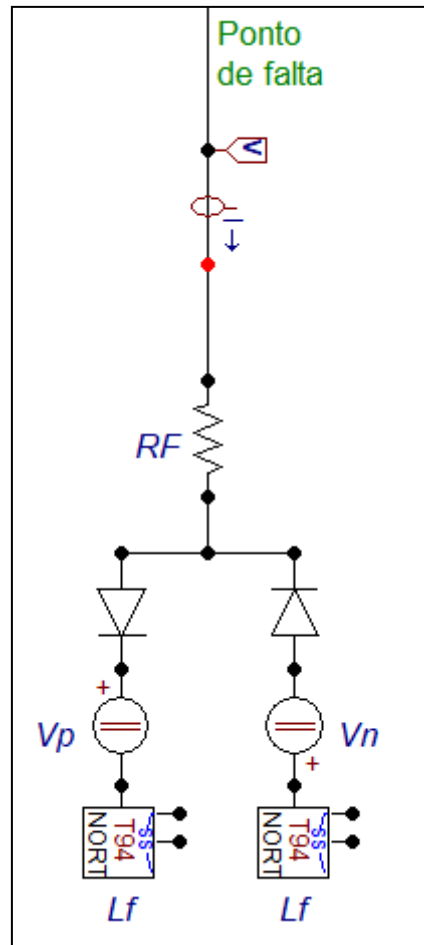


Figura 27 - Terceiro modelo desenvolvido

A Figura 28 apresenta a curva da corrente de falta obtida com o terceiro modelo. Observa-se que este modelo representa duas das características da corrente de FAI: a não linearidade e a assimetria entre semiciclos (corrente no semiciclo positivo: 90 A, corrente no semiciclo negativo: -61,28 A).

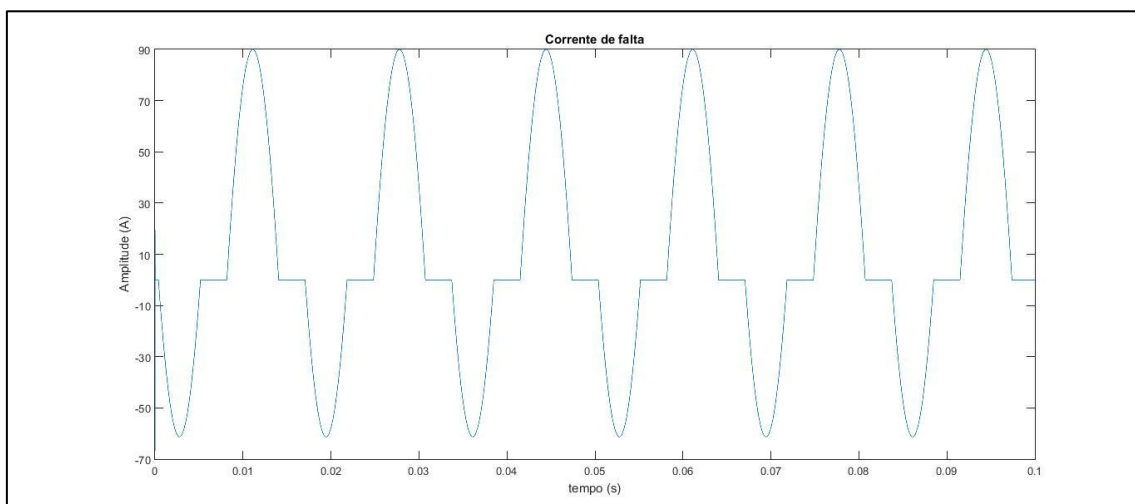




Figura 28 - Corrente de falta gerada pelo terceiro modelo

No quarto modelo foi acrescentada uma chave convencional controlada por tempo, Chave 1 (t1), para possibilitar a interrupção no fornecimento de energia às cargas conectadas a jusante do ponto de falta.

No instante em que ocorre o rompimento do condutor, ocorre a interrupção no fornecimento de energia às cargas conectadas a jusante do ponto de falta, porém o ramo de falta só será conectado ao alimentador, quando o cabo encostar o solo.

Em NAKAGOMI (2006), o tempo de queda do cabo é definido pela equação abaixo.

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (12)$$

*h: altura da rede primária ao solo, g: aceleração da gravidade*

Considerando uma altura de 8 metros entre a rede primária ao solo, o tempo de queda considerado foi de 1,28 s.

No quinto modelo foi acrescentada uma chave convencional controlada por tempo, Chave 2 (t2), para dar início à falta e simular a intermitência da corrente de FAI. A intermitência é controlada pela configuração de '*Reclosing switch*', que permite sucessivas aberturas e fechamento da mesma. A Figura 29 apresenta uma configuração do instante de início da FAI e dos instantes de intermitência.

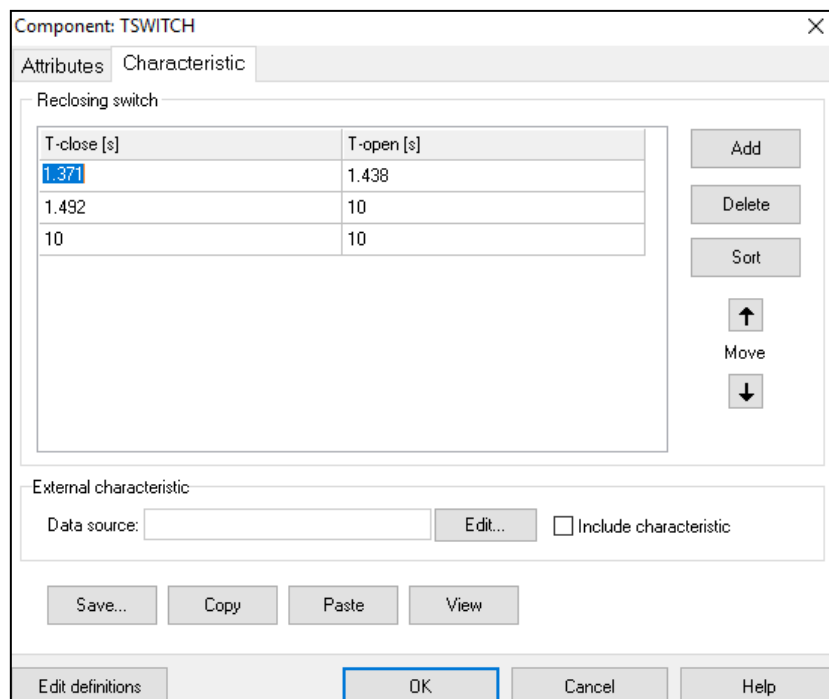


Figura 29 - Parametrização do tempo de início da FAI e dos momentos de intermitência

No sexto modelo foram acrescentados dois resistores,  $R_1$  e  $R_2$ , em paralelo com o resistor  $R_F$ , que permitem uma redução da resistência de falta e conseqüentemente o crescimento no módulo da corrente de FAI, simulando o *buildup*. É importante ressaltar que, no modelo proposto, o crescimento no módulo da corrente de FAI ocorre de forma abrupta, como um degrau, e não gradualmente. A Chave 3 controla o instante ( $t_3$ ) em que  $R_1$  é conectado ao ramo de falta, a Chave 4 controla o instante ( $t_4$ ) em que  $R_2$  é conectado ao ramo de falta. Atribuindo tempos distintos para cada chave ( $t_3 < t_4$ ) é possível simular o característica de *shoulder* (constância do módulo da corrente de FAI).

Com essas simples adaptações o modelo é capaz de simular as características de intermitência, não linearidade e assimetria e *buildup* seguido do *shoulder*.

Por fim, o modelo foi agrupado em um bloco, chamado 'Bloco FAI'. A Figura 30 apresenta os parâmetros que são passíveis de alterações no modelo. Os únicos parâmetro que não podem ser alterado diretamente no bloco de falta são o instante de início da falta e os momentos de intermitência, que devem ser parametrizados na aba '*Reclosing switch*' da Chave 2, conforme apresentado na Figura 29.

Group: BLOCO FAI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Vp	Volts	5000	From	C	CARGA
Vn	Volts	7000	To	1	XX0016
Rf	Ohm	278.5623			
R1	Ohm	278.5623			
t3	s	1.471			
R2	Ohm	139.2812			
t4	s	1.538			
t1	s	0.091			
L1	H	1E-10			
L2	H	1E-10			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Hide  
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 30 - Parâmetros do modelo de FAI

O modelo final proposto é apresentado na Figura 31.

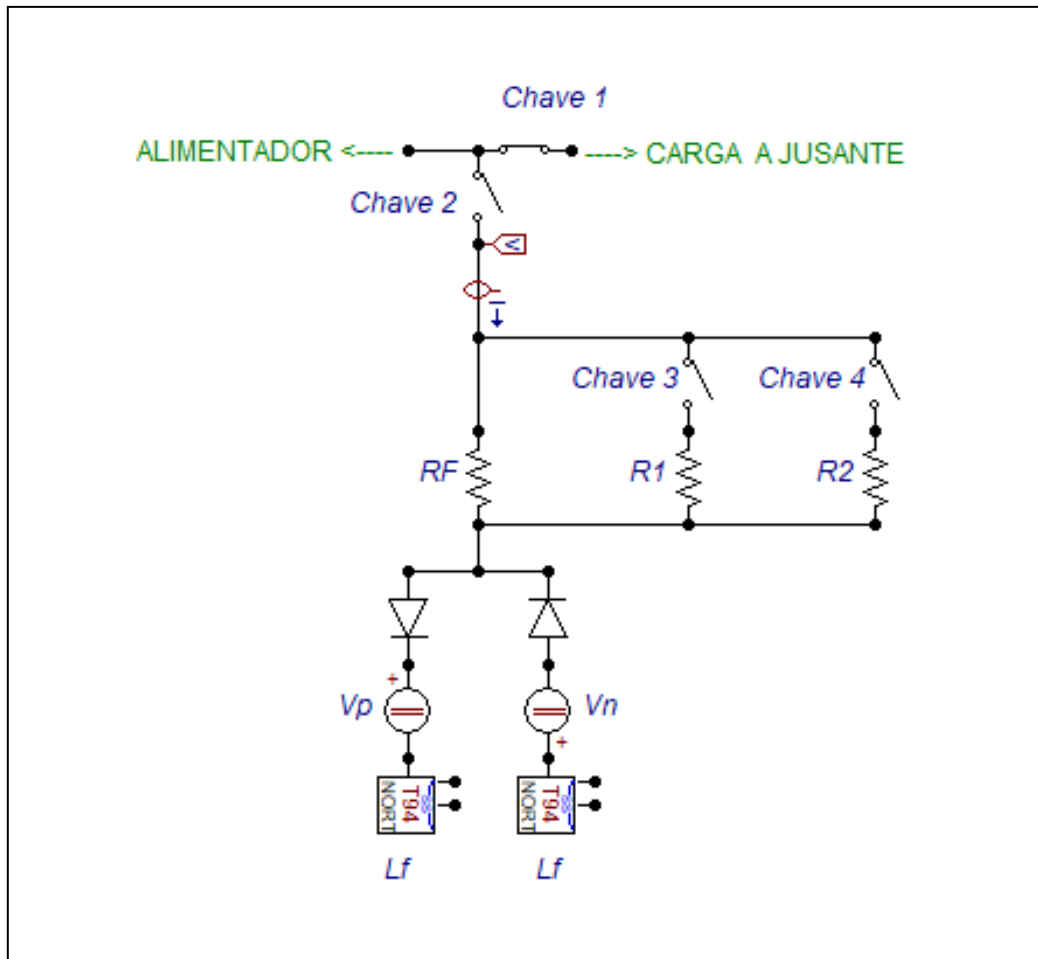


Figura 31 - Modelo final proposto

## Capítulo 6

### Simulações e resultados

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias para se definir cada parâmetro do modelo. Em seguida, serão apresentadas as curvas das correntes de falta e fase em que ocorreu a FAI. Por fim serão variados a relação X/R da impedância de falta,  $\Delta V$  e analisado o impacto dessas variações sobre os harmônicos da corrente de FAI.

#### Tempo de simulação:

O tempo de simulação e o passo de integração utilizados nas simulações são apresentados na Figura 32. O tempo de simulação deveria ser suficiente para que ocorresse o início da FAI, o tempo de queda do condutor (1,28s) e alguns ciclos da corrente de FAI.

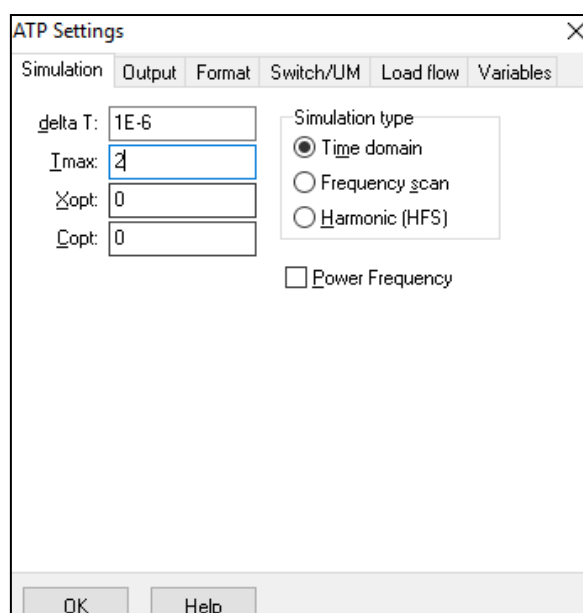


Figura 32 - Configurações de tempo da simulação

### Instante do rompimento do condutor e início da FAI:

O rompimento do condutor ocorre em  $t = t_1 = 0,091s$ , que corresponde ao instante em que a tensão da fase C se anula, por ser a situação que introduz menos oscilações no sistema.

O início da FAI ocorrerá em:

$$t_2 = t_1 + t_{queda} = 0,091 + 1,28 = 1,371 s \quad (13)$$

### Impedância de falta:

A FAI gera diferentes níveis de corrente, a depender da superfície de contato. A Tabela 1 apresenta os valores de corrente de para diferentes superfícies, obtidas por SANTOS (2011) através de ensaios de campo. A impedância de falta modelo de FAI é ajustada para obter tais níveis de corrente de FAI.

Tabela 1 - Correntes de FAI reais. Fonte: SANTOS, 2011

Superfície de Contato	Condição da Superfície	Corrente (A)
Grama	Seca	< 60
	Molhada	< 90
Calçamento	Seco	< 10
	Molhado	< 20
Brita	Seca	-
	Molhada	< 50
Asfalto	Seco	-
	Molhado	< 20
Areia	Seca	< 10
	Molhada	< 50
Solo local	Seco	-
	Molhado	< 60

O nível de corrente apresentado na Tabela 1 representa a pico de corrente do semiciclo positivo. A Impedância de falta é dada por:

$$Z_{falta} = \frac{(V_{fase_{m\acute{a}x}} - V_p)}{I_{fai}} \quad (14)$$

### **Intermit\ecencia:**

Os instantes de intermit\ecencia foram escolhidos aleatoriamente. A primeira intermit\ecencia ocorre 4 ciclos ap\os o in\ecio da FAI e dura 3,25 ciclos.

$$inter1_{in\ecio} = t2 + 4 * \frac{1}{60} = 1,438 \text{ s} \quad (15)$$

$$inter1_{fim} = inter1_{in\ecio} + 3,25 * \frac{1}{60} = 1,492 \text{ s} \quad (16)$$

A segunda intermit\ecencia ocorre 8 ciclos ap\os o in\ecio da FAI e dura 3,25 ciclos.

$$inter2_{in\ecio} = t2 + 8 * \frac{1}{60} = 1,504 \text{ s} \quad (17)$$

$$inter2_{fim} = inter2_{in\ecio} + 3,25 * \frac{1}{60} = 1,559 \text{ s} \quad (18)$$

### **Buildup e Shoulder:**

No modelo final, s\o \e poss\ivel simular o *buildup* e *shoulder* se a imped\ancia de falta for puramente resistiva. Foi definido que caso a simula\cao tenha apenas 1 *buildup*, no primeiro momento a corrente de FAI ser\a metade da corrente final, ap\os o crescimento da corrente, esta atinge seu valor pico. Caso a simula\cao tenha 2 *buildup*, no primeiro momento a corrente de FAI ser\a um quarto da corrente final, ent\ao metade e finalmente esta atinge seu valor pico.

Os instantes de *buildup* foram escolhidos aleatoriamente. O primeiro *buildup* ocorre 6 ciclos ap\os o in\ecio da FAI e o segundo *buildup* ocorre 10 ciclos ap\os o in\ecio da FAI

$$t3 = t2 + 6 * \frac{1}{60} = 1,471 \text{ s} \quad (19)$$

$$t4 = t2 + 6 * \frac{1}{60} = 1,538 \text{ s} \quad (20)$$

Foi elaborada uma planilha no Software Microsoft Excel, que através da escolha da superfície, ocorrência de rompimento do condutor, quantidade de intermitências, quantidade de *buildups*, a planilha calcula os parâmetros do modelo automaticamente. O Apêndice B apresenta a planilha.

A seguir serão apresentadas as curvas da corrente de falta (Figura 33) e da corrente da Fase C (Figura 34), para um caso de FAI em grama molhada ( $I_{fai} = 90 \text{ A}$ ), na metade do alimentador (50% das cargas isoladas), com uma intermitência e dois *buildups*. Os parâmetros utilizados nesta simulação são os apresentados nas Figuras 26 e 27.

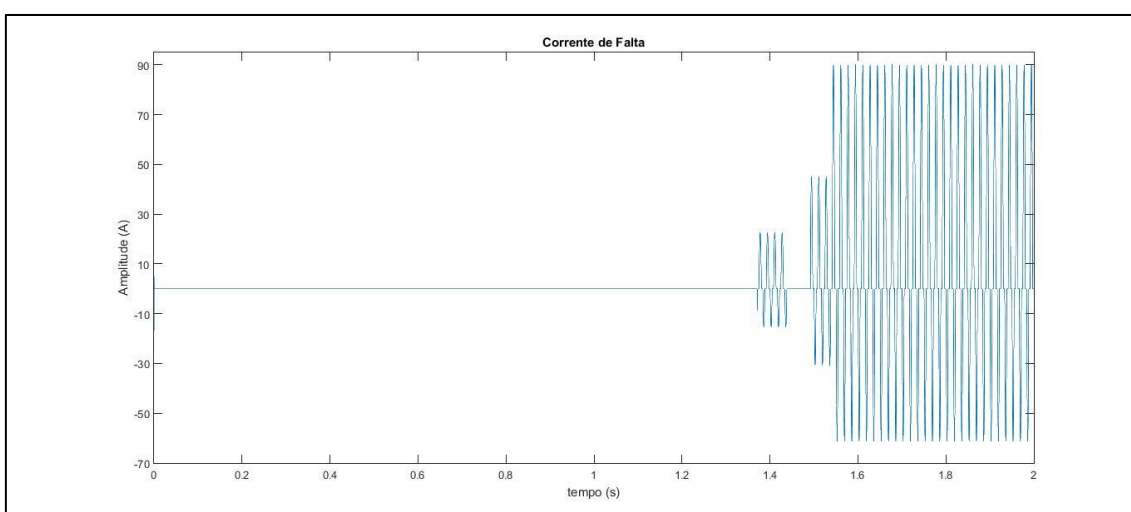


Figura 33 - Corrente de Falta

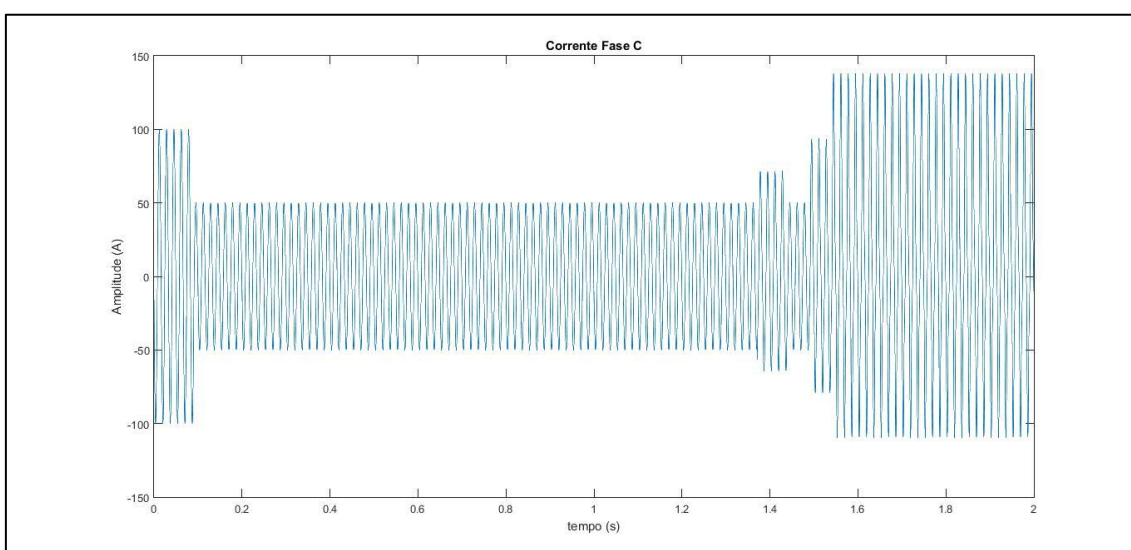


Figura 34 - Corrente Fase C



Analisando a Figura 33 e Figura 34 observa-se que:

- Em  $t=0,091s$  (Figura 35) ocorre o rompimento do condutor, Chave 1 se abre, desconectando 50% da carga conectada a Fase C, a corrente de fase passa de 100 para 50 A. O ramo de falta ainda não é conectado a Fase C, corrente de falta igual a 0 A.

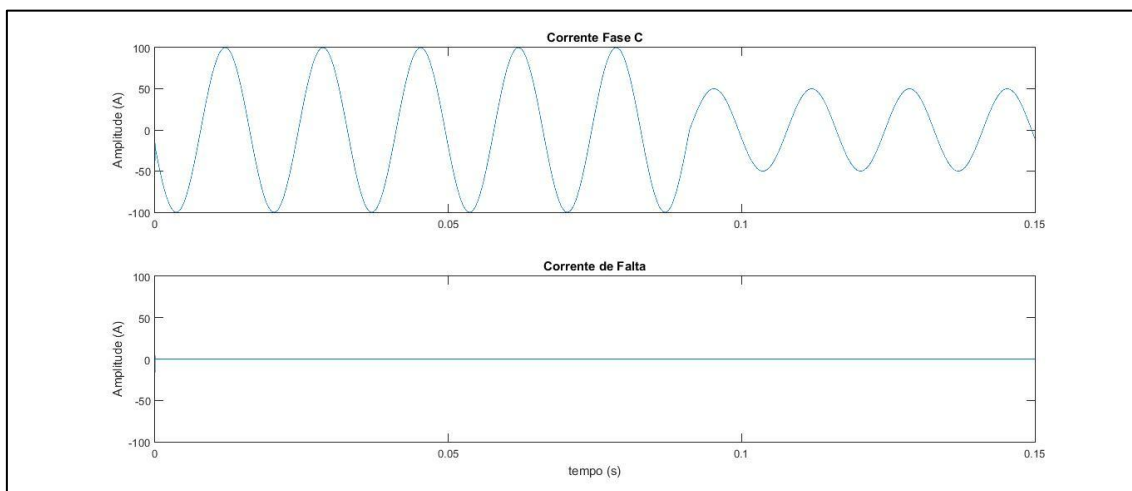


Figura 35 - Instante do rompimento do condutor

- Em  $t=1,371s$  (Figura 36) o ramo de falta é conectado à Fase C, Chave 2 se fecha. Inicialmente a impedância de falta é igual a  $Z_{falta} = 278,6 + j*0 \Omega$ , gerando uma corrente de falta igual 22,5 A no semiciclo positivo e de -15,3 A no semiciclo negativo (assimetria no formato de onda).

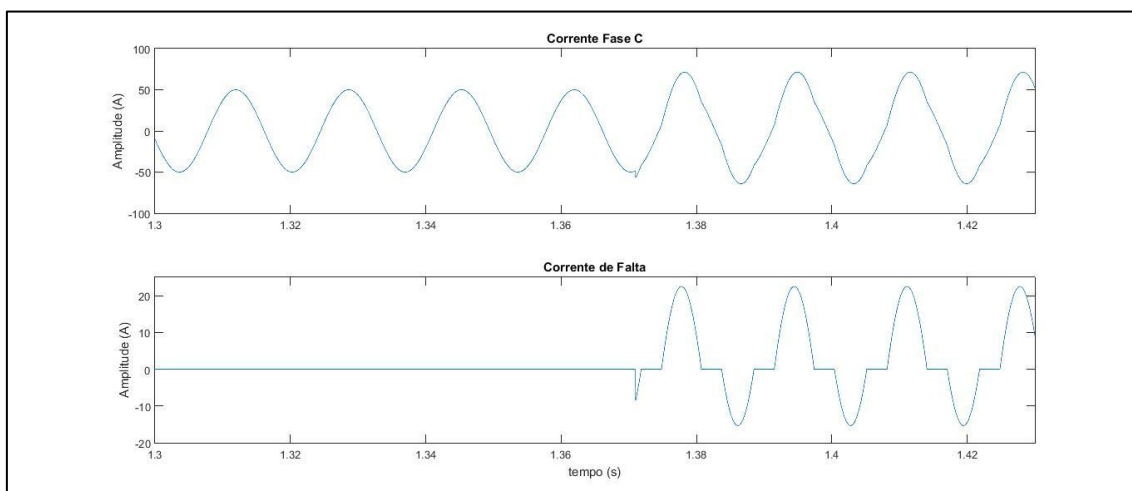


Figura 36 - Início da FAI

- Em  $t=1,438s$  (Figura 37) ocorre uma intermitência na corrente de falta. A corrente de falta se anula, a Fase C volta a alimentar somente às cargas conectadas a montante da falta ( $I_{FaseC} = 50A$ ).

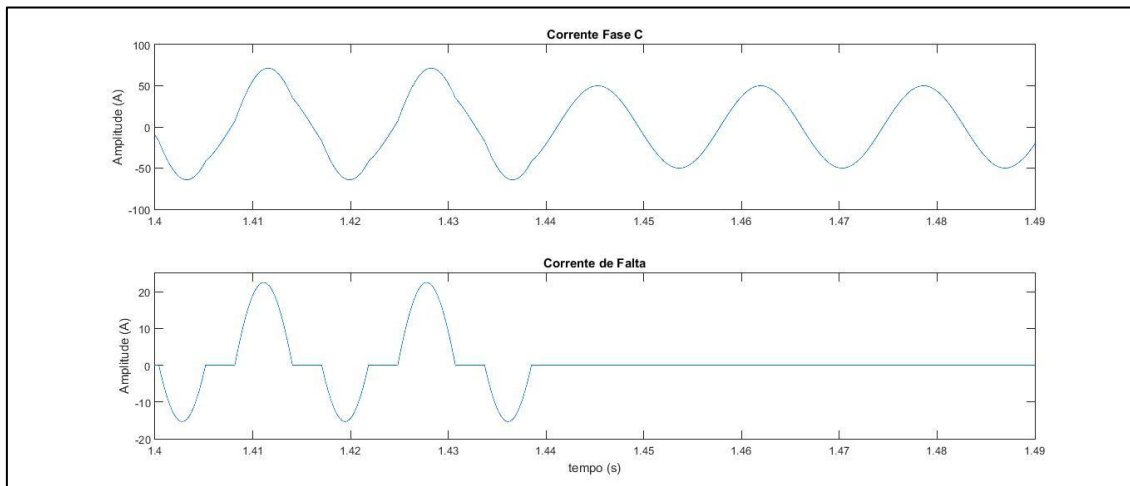


Figura 37 - Intermitência na corrente de falta

- Em  $t=1,492s$  ocorre a reignição do arco elétrico e a falta volta a ser alimentada pela Fase C. Neste instante, considerando que o condutor estabeleceu um contato mais firme com o solo (1º *buildup*), a impedância de falta cai para  $Z_{falta} = 139,3 + j*0 \Omega$ , gerando uma corrente de falta igual 45 A no semiciclo positivo e de -30,6 A no semiciclo negativo.

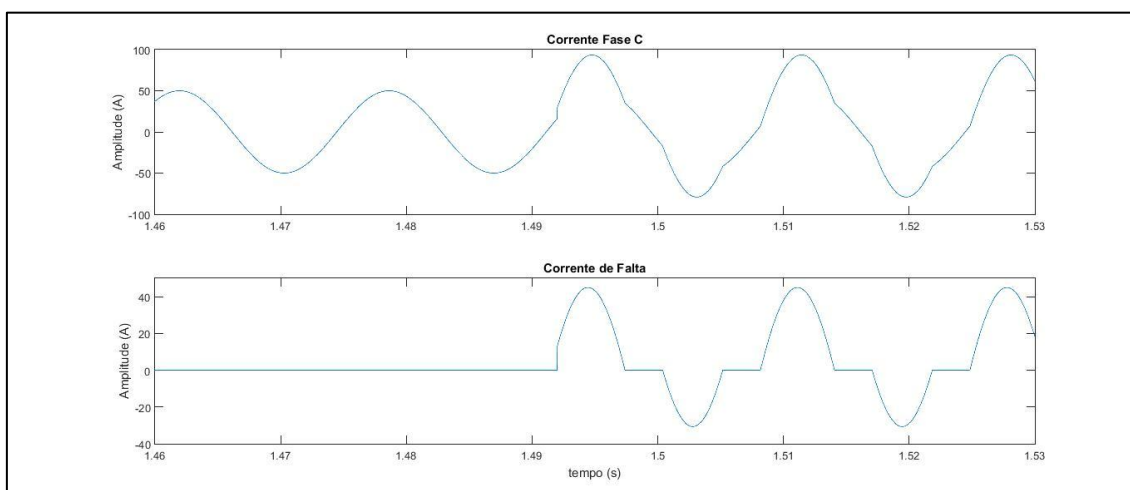


Figura 38 - Reignição do arco elétrico e 1º *buildup*

- Até o instante  $t=1,538s$  a corrente de falta permanece constante (*shoulder*), neste instante, o contato elétrico é melhorado (2º *buildup*) e a impedância de falta cai

para  $Z_{falta} = 69,6 + j*0 \Omega$ , gerando uma corrente de falta igual 90 A no semiciclo positivo (corrente máxima da FAI em grama molhada) e de -61,3 A no semiciclo negativo. A partir deste instante não há mais variações na corrente de falta, assume-se que a falta está em regime permanente.

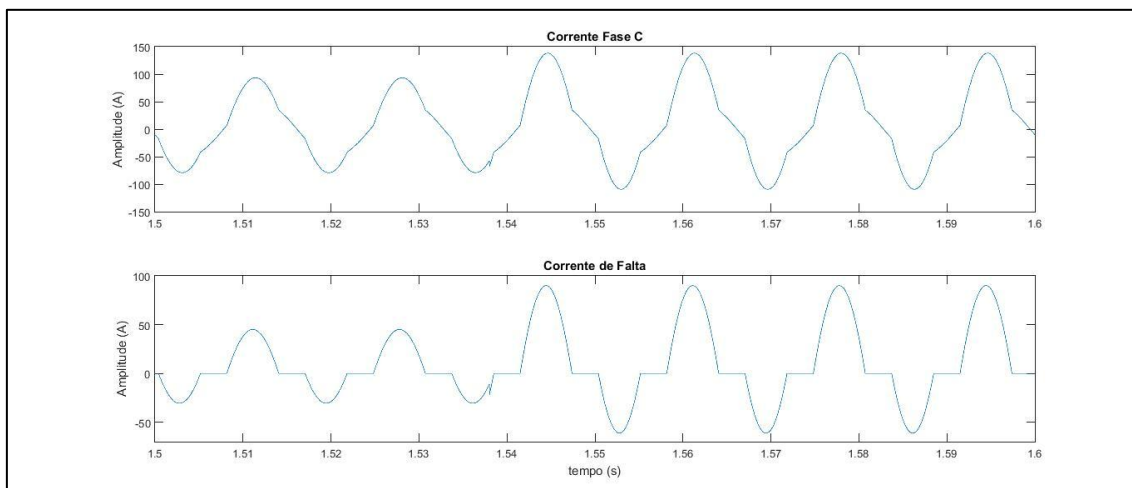


Figura 39 - 2º buildup

Uma das formas de se analisar a ocorrência de uma FAI é analisando o espectro harmônico de corrente da fase defeituosa, conforme apresentado no Capítulo 4,

#### **Análise de harmônicos:**

Para analisar espectro harmônico das correntes medidas é necessário converter o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, utilizando a Transformada de Fourier. O sinal de corrente é analógico, porém para que este possa ser interpretado pelos relés de proteção, é feita uma conversão do sinal analógico para um sinal digital. Portanto, a análise do espectro harmônico das correntes é obtida através da conversão do sinal no domínio do tempo digitalizado para o domínio da frequência, utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF). Neste trabalho foi aplicado o algoritmo *Fast Fourier Transform* no software *Matlab* que calcula de forma rápida a TDF.

A Equação (21) apresenta a TDF de um sinal  $x[n]$  com tamanho  $N$ :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}, 0 \leq k \leq N - 1 \quad (21)$$

A seguir serão apresentadas as análises do espectro harmônico de alguns Casos.

A configuração do Caso 1 é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Configuração do Casos 1

Caso	Vn (V)	Vp (V)	$\Delta V$ (V)	X ( $\Omega$ )	R <sub>EQ</sub> ( $\Omega$ )	X/R	Intermitência	Buildup
Caso 1	7000	5000	2000	0	69,6	0	0	0

### Intermitência e *Buildup* seguido de *Shoulder*:

Os Casos 2 e 3 irão avaliar o impacto das características de intermitência e *buildup* seguido de *shoulder*. As configurações de ambos os casos será praticamente igual ao Caso 1, com as seguintes modificações:

- Ao Caso 2 serão adicionadas duas intermitências. A primeira intermitência terá início no 4º ciclo após o início da falta e durará 5 ciclos. A segunda intermitência terá início no 12º ciclo após o início da falta e durará 5 ciclos.
- Ao Caso 3 será adicionado 2 *buildups*. O primeiro *buildup* ocorrerá no 6º ciclo após o início da falta e o segundo *buildup* ocorrerá no 10º ciclo após o início da falta.

A Tabela 3 apresenta a configuração para esses casos.

Tabela 3 - Configurações dos Casos 2 e 3

Caso	Vn (V)	Vp (V)	$\Delta V$ (V)	X ( $\Omega$ )	R <sub>EQ</sub> ( $\Omega$ )	X/R	Intermitência	Buildup
Caso 2	7000	5000	2000	0	69,6	0	2	0
Caso 3	7000	5000	2000	0	69,6	0	0	2

A Figura 40 apresenta a corrente de falta do Caso 2. Analisando o espectro harmônico da corrente de falta do Caso 1 e do Caso 2 percebe-se que os harmônicos de ordem inferior (especialmente até o 3º) tem uma redução significativa, entretanto a intermitência introduz harmônicos de ordem superior (a partir do 15º harmônico). A Figura 41 apresenta um gráfico comparativo entre os harmônicos de ordem superior da corrente de falta dos Casos 1 e 2. A utilização do surgimento de harmônicos de ordem superior para identificação de FAI pode não ser adequado, dado que nem sempre ocorre

intermitência na corrente de falta e que como as amplitudes dos harmônicos de ordem superior são pequenas, estas podem ser contaminadas por ruídos.

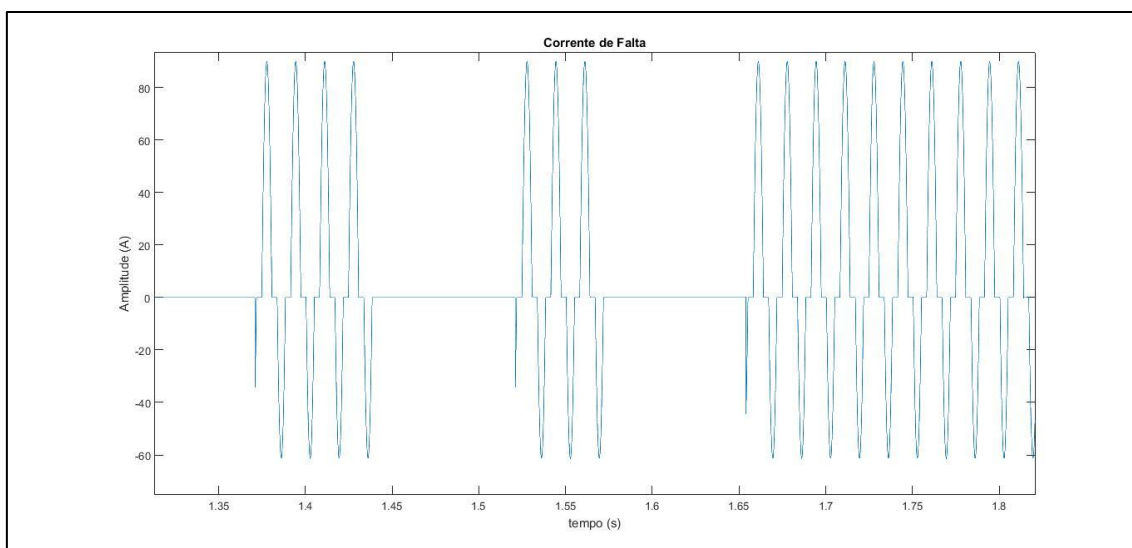


Figura 40 - Corrente de Falta do Caso 2

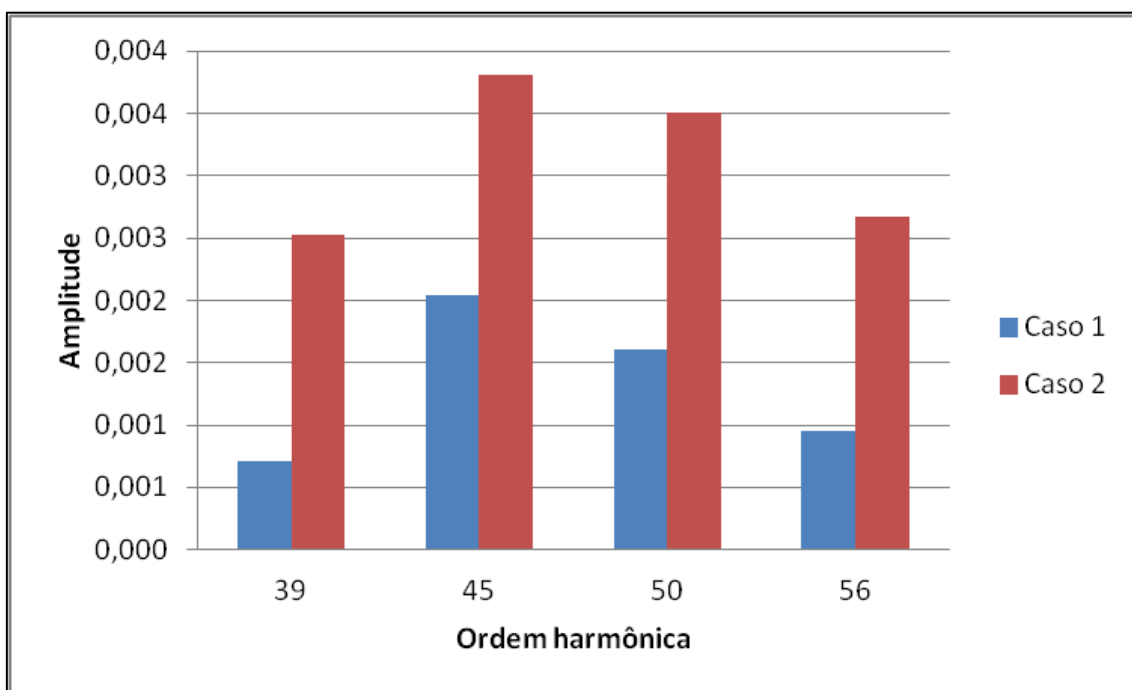


Figura 41 - Harmônicos dos casos 1 e 2

A Figura 42 apresenta a corrente de falta do Caso 3. Analisando o espectro harmônico da corrente de falta do Caso 1 e do Caso 3 percebe-se que os harmônicos de ordem inferior (especialmente até o 3º) têm uma redução significativa e a ocorrência de *buildup* não introduz harmônicos de ordem superior. A Figura 40 apresenta um gráfico

comparativo entre os harmônicos de ordem inferior da corrente de falta dos Casos 1 e 3.

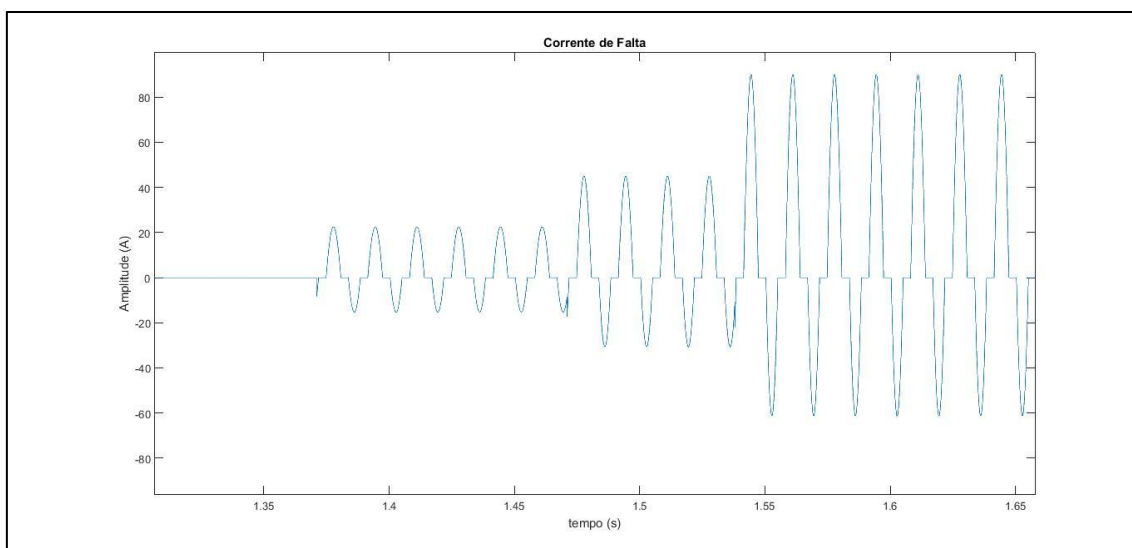


Figura 42 - Corrente de Falta do Caso 3

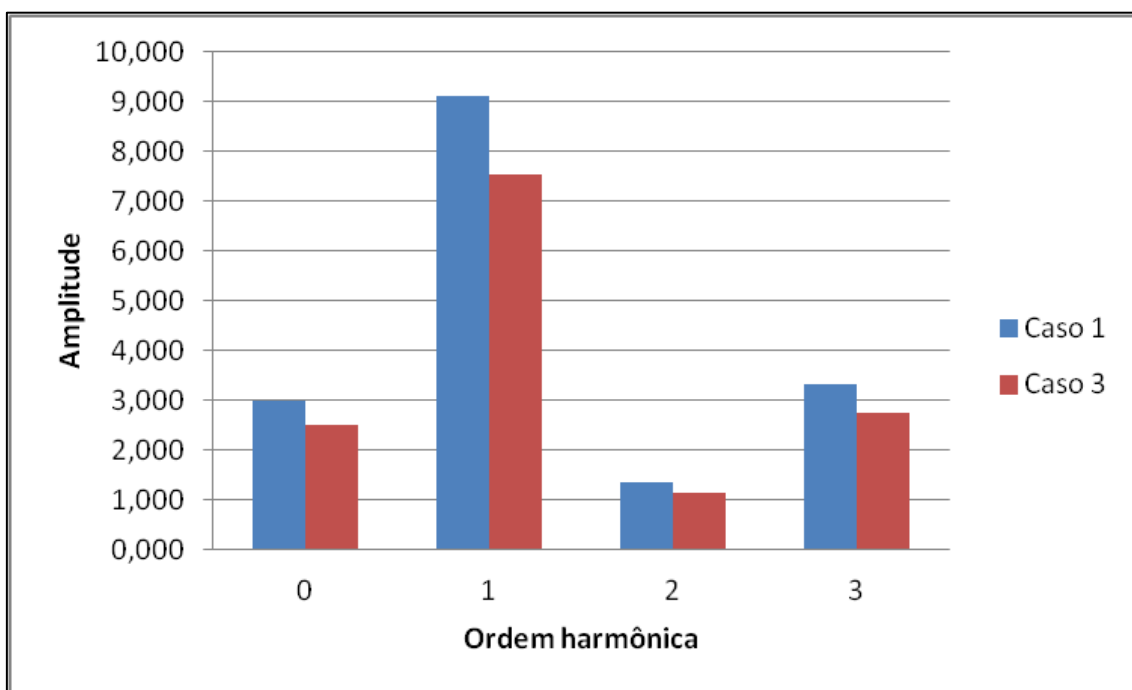


Figura 43 - Harmônicos dos casos 1 e 3

### Variação da relação X/R e de $\Delta V$ :

EMANUEL et al. em 1990 constatou que a amplitude do segundo harmônico é diretamente proporcional à variação de  $\Delta V$  e a amplitude do terceiro harmônico é inversamente proporcional à variação da relação X/R da impedância de falta.

Serão simulados alguns casos nos quais os parâmetros  $V_p$ ,  $V_n$ ,  $R_{EQ}$  e X do modelo apresentado na Figura 31 serão variados e o espectro harmônico correspondente será analisado. A Tabela 4 apresenta a configuração de cada Caso.

Tabela 4 - Variação de  $\Delta V$  e X/R

Caso	$V_n$ (V)	$V_p$ (V)	$\Delta V$ (V)	X ( $\Omega$ )	$R_{EQ}$ ( $\Omega$ )	X/R
Caso 4	7000	5000	2000	0	69,6	0
Caso 5	7000	5000	2000	49,2	49,2	1
Caso 6	7000	5000	2000	62,3	31,1	2
Caso 7	7000	5000	2000	68,3	13,7	5
Caso 8	7000	5000	2000	69,3	6,9	10
Caso 9	5000	5000	0	0	69,6	0
Caso 10	7000	5000	2000	0	69,6	0
Caso 11	9000	5000	4000	0	69,6	0
Caso 12	11000	5000	6000	0	69,6	0

As Figuras 44, 45, 46, 47 e 48 apresentam os espectros harmônicos da corrente de falta para os Casos 4, 5, 6, 7 e 8 respectivamente.

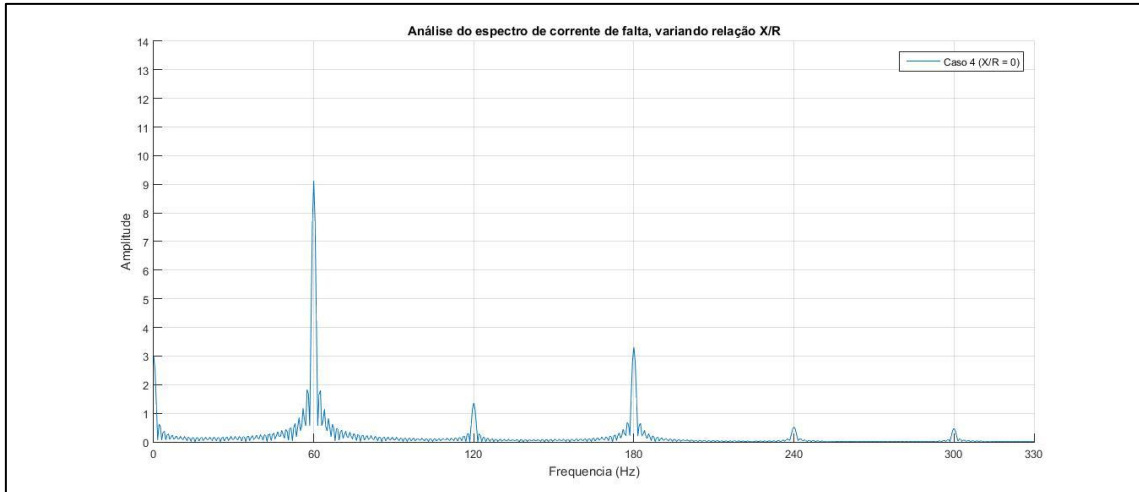


Figura 44 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 4)

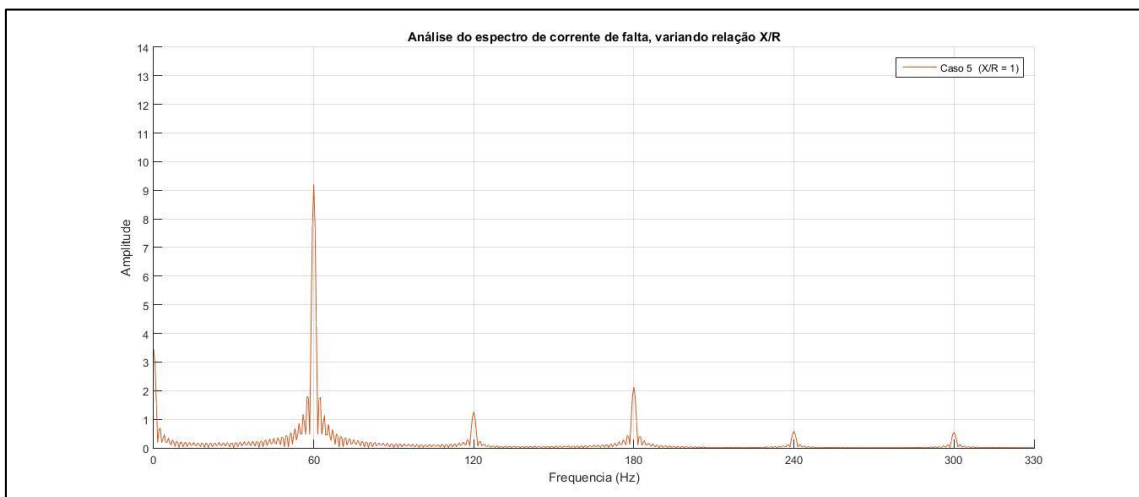


Figura 45 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 5)

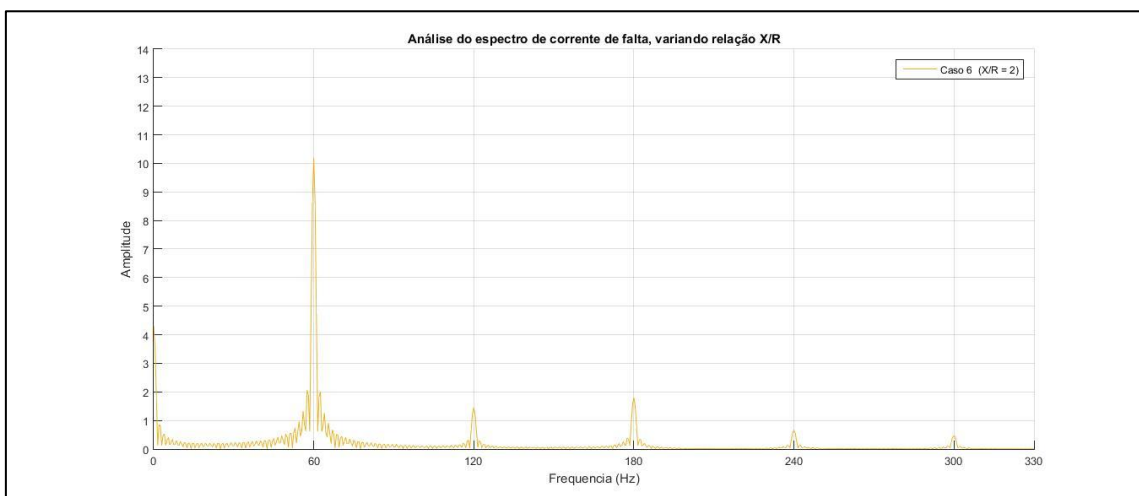


Figura 46 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 6)



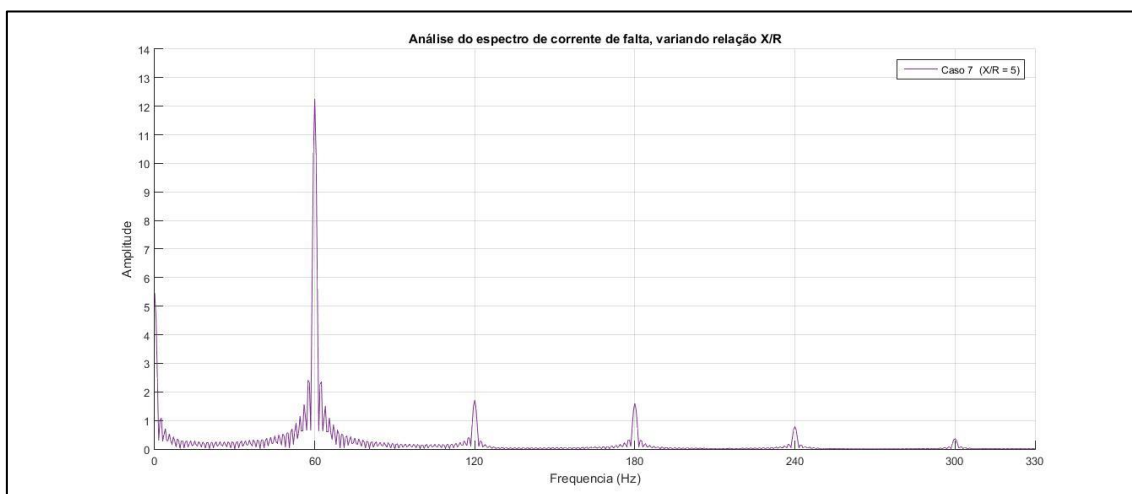


Figura 47 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 7)

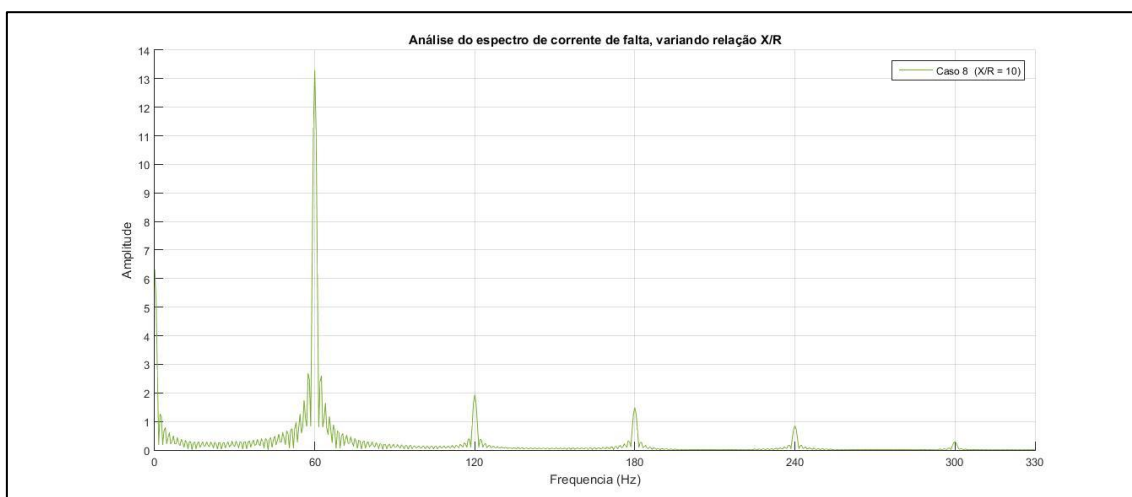


Figura 48 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando X/R (Caso 8)

As Figuras 49, 50, 51 e 52 apresentam, respectivamente, as amplitudes dos harmônicos de ordem 0, 1, 2, 3 da corrente de falta para os Casos 4, 5, 6, 7 e 8.

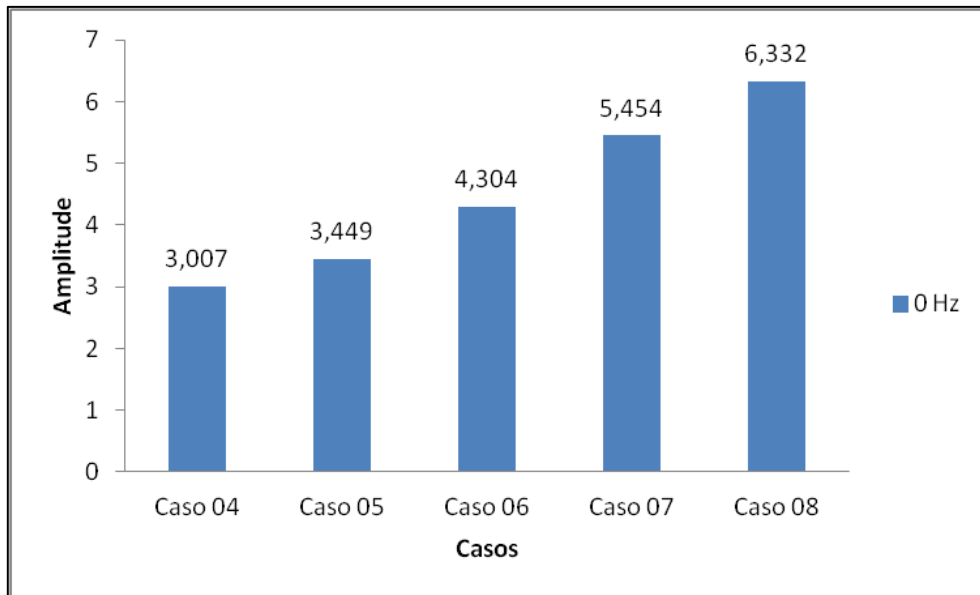


Figura 49 - Amplitude da componente DC da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8

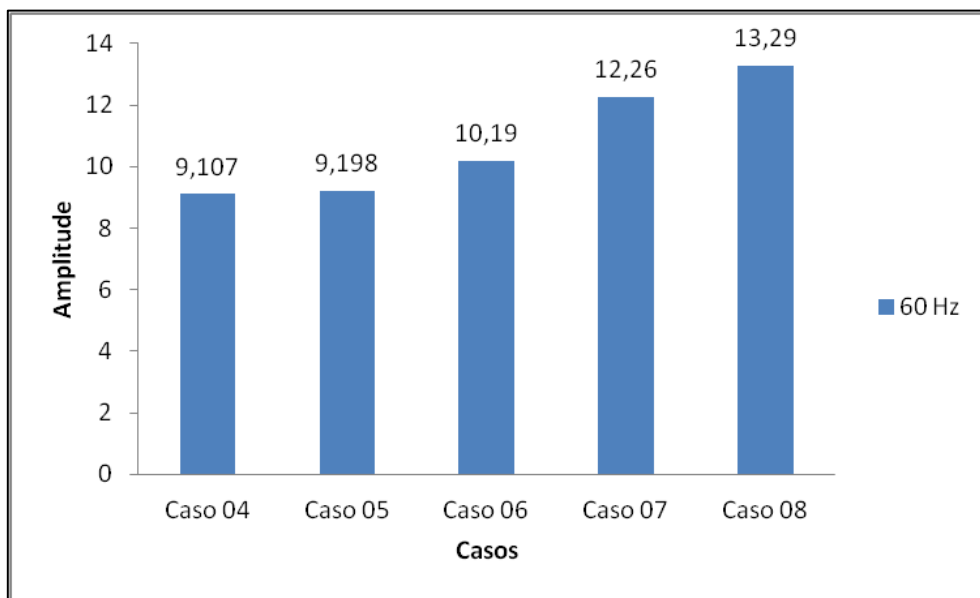


Figura 50 - Amplitude da componente fundamental da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8

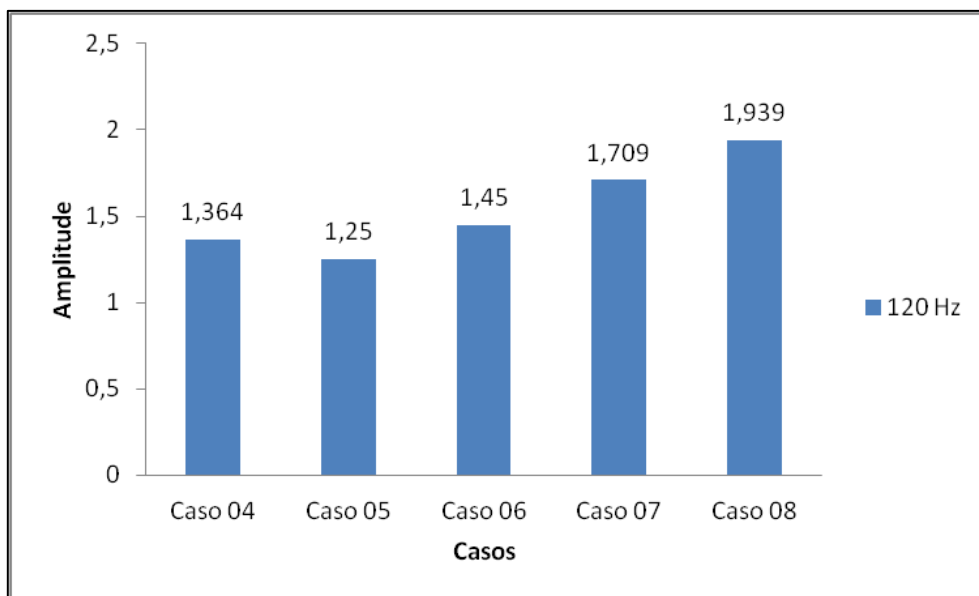


Figura 51 - Amplitude da componente de segunda ordem da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8

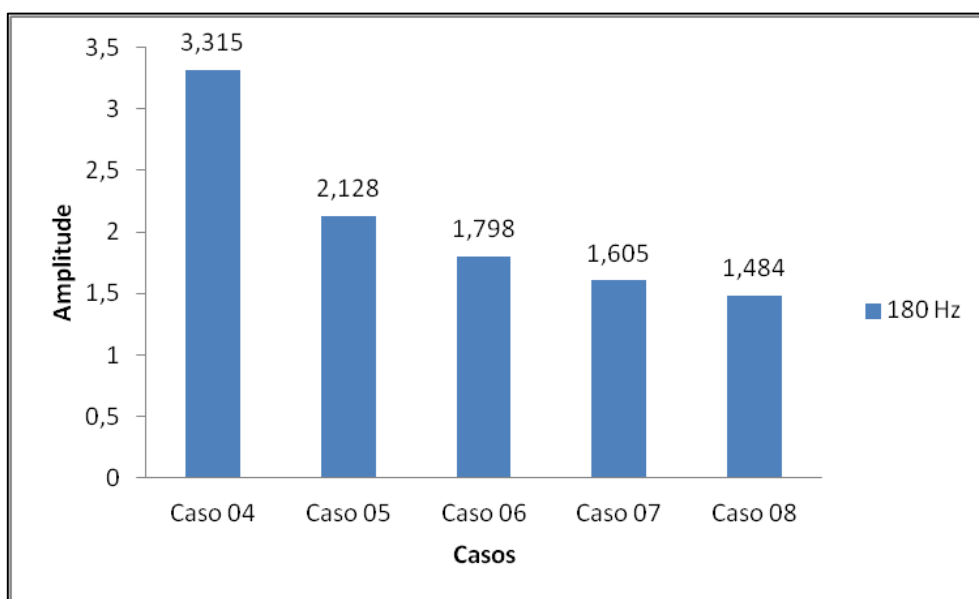


Figura 52 - Amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta nos Casos 4, 5, 6, 7 e 8

Analisando as Figuras acima, nota-se que com o aumento da relação X/R da impedância de falta ocorre:

- Aumento na amplitude da componente DC da corrente de falta;
- Aumento na amplitude da componente fundamental da corrente de falta;
- Diminuição na amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta, como relatado no Capítulo 4.

O aumento da relação X/R da impedância de falta não afeta, consideravelmente, a amplitude da componente de segunda ordem da corrente de falta. Além das componentes de ordem 0, 1, 2 e 3, pode ser observado que o aumento da relação X/R da impedância de falta implica no aumento das componentes de 4ª e 6ª ordem e na redução das componentes de 7ª e 14ª ordem.

As Figuras 53, 54, 55 e 56 apresentam os espectros harmônicos da corrente de para os Casos 9, 10, 11 e 12 respectivamente.

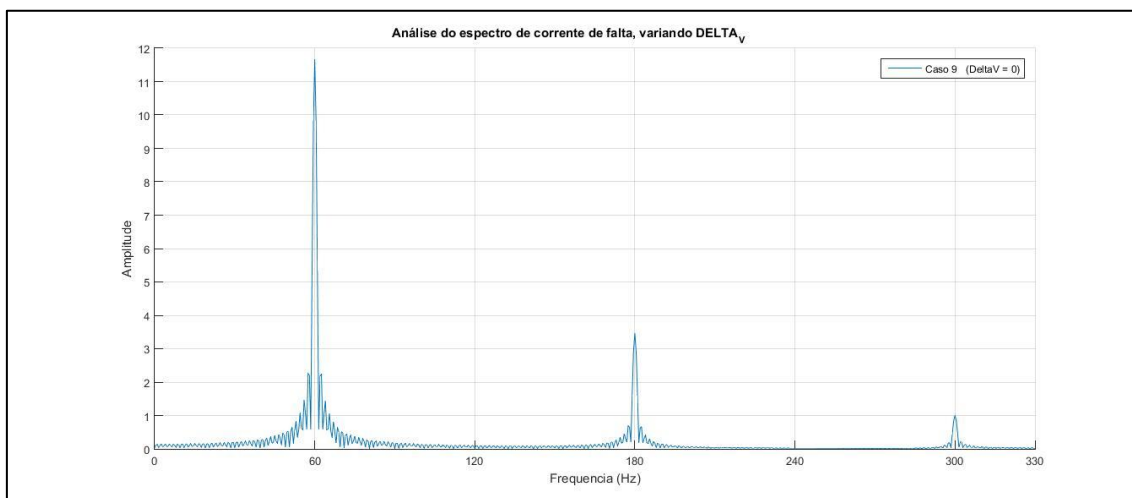


Figura 53 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando  $\Delta V$  (Caso 9)

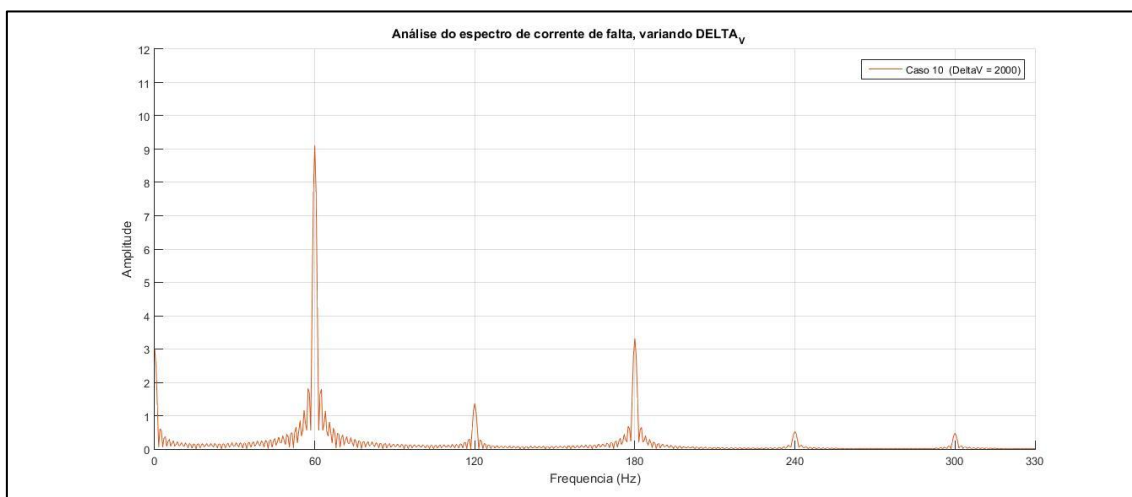
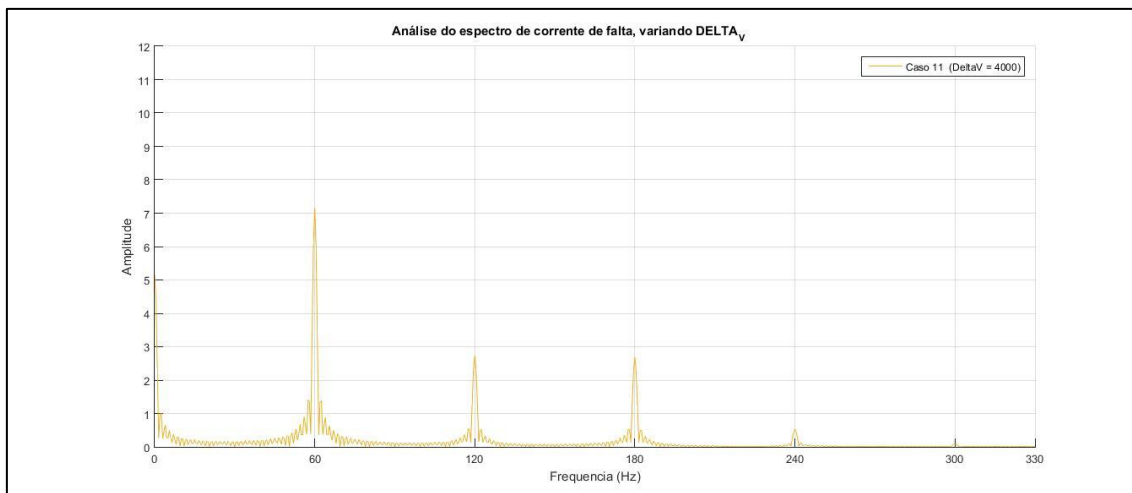
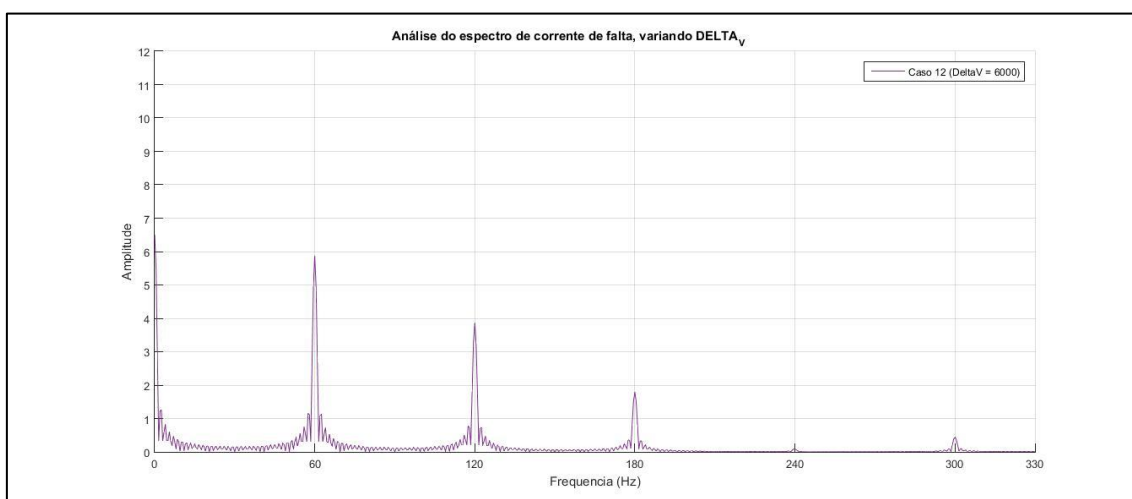


Figura 54 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando  $\Delta V$  (Caso 10)

Figura 55 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando  $\Delta V$  (Caso 11)Figura 56 - Espectro harmônico da corrente de falta, variando  $\Delta V$  (Caso 12)

As Figuras 54, 55, 56 e 57 apresentam, respectivamente, as amplitudes dos harmônicos de ordem 0, 1, 2, 3 da corrente de falta para os Casos 9, 10, 11 e 12.

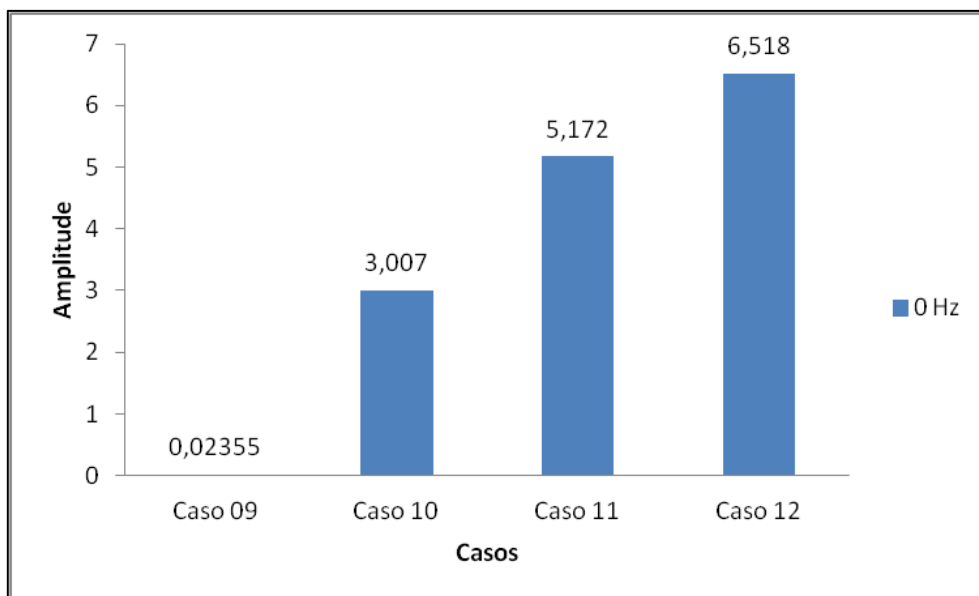


Figura 57 - Amplitude da componente DC da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12

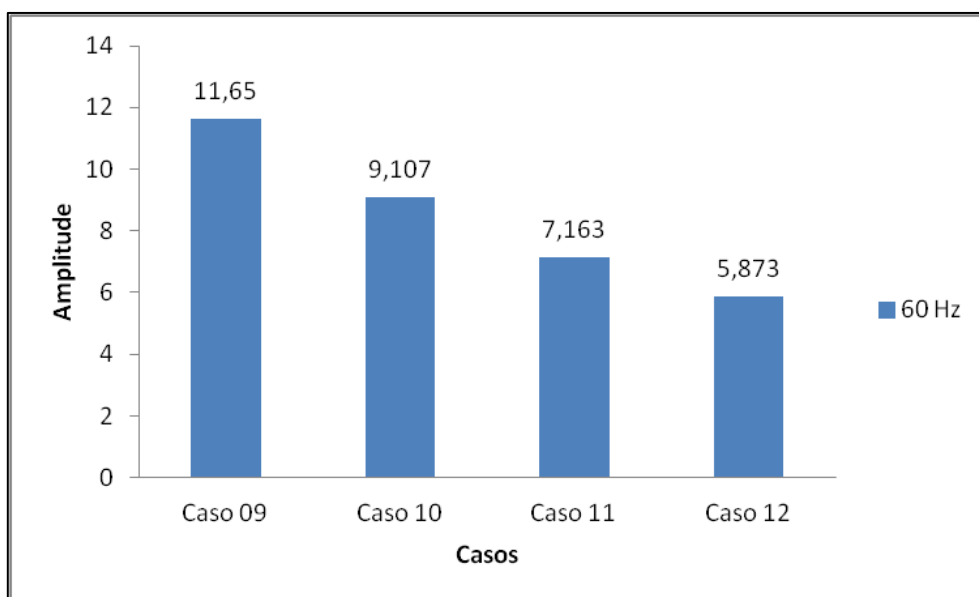


Figura 58 - Amplitude da componente fundamental da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12

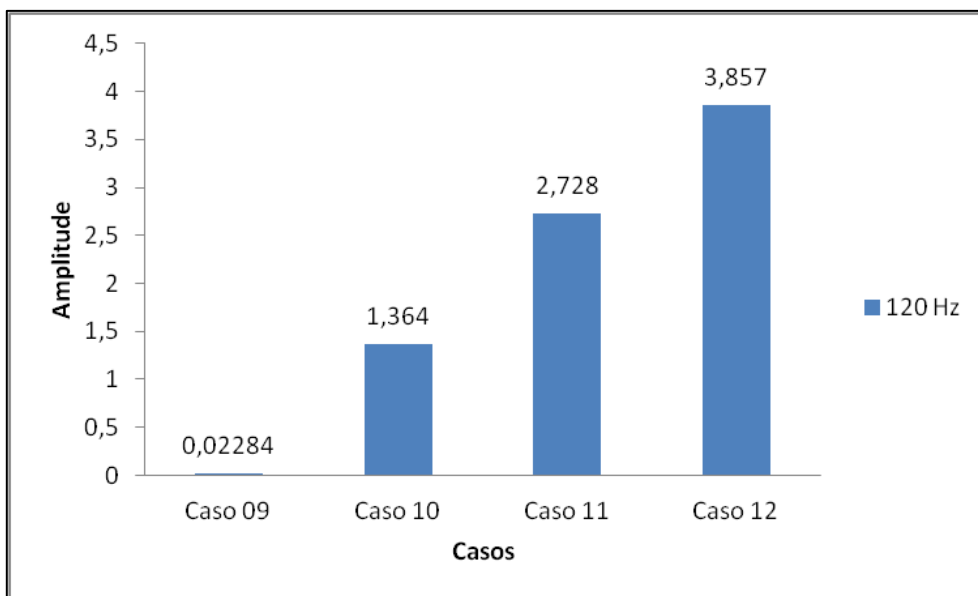


Figura 59 - Amplitude da componente de segunda ordem da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12

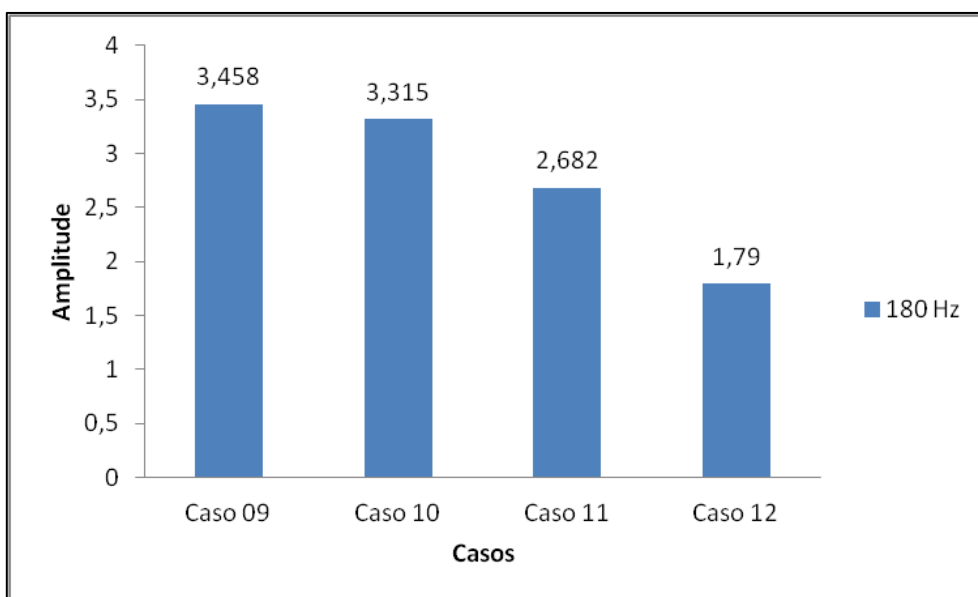


Figura 60 - Amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta nos Casos 9, 10, 11 e 12

Analisando as Figuras acima, nota-se que com o aumento de  $\Delta V$  ocorre:

- Aumento considerável na amplitude da componente DC da corrente de falta;
- Diminuição na amplitude da componente fundamental da corrente de falta;
- Aumento considerável na amplitude da componente segunda ordem da corrente de falta, como relatado no Capítulo 4. Com  $\Delta V = 0$  a componente de segundo harmônico é praticamente nula.
- Diminuição na amplitude da componente de terceira ordem da corrente de falta.

## Capítulo 7

### Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas as principais características, modelos e métodos de identificação da Falta de Alta Impedância.

É evidente que os esforços para identificar e eliminar a FAI são de grande importância para a sociedade, pois evitará mortes e incêndios, e para a distribuidora, pois evitará elevadas interrupções de energia, que podem acarretar em último estágio, na extinção da concessão para operar o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Através de manutenções preventivas, recondutoramento da rede primária e poda planejada de árvores, a distribuidora minimiza as chances de ocorrência de FAI. A identificação da FAI, entretanto, não é trivial, dado que os relés convencionais baseados em sobrecorrente não são sensibilizados pelas correntes de FAI.

A modelagem do fenômeno consiste em uma das etapas mais importantes nos estudos de FAI. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo baseado no trabalho de EMANUEL et al. (1990), que permitiu a inserção de características não tratadas no modelo original. São elas: *buildup*, *shoulder* e intermitências.

Através da análise dos harmônicos de corrente, verificou-se, também, que a ocorrência de intermitência na corrente de falta introduz harmônicos de ordem superior, ainda que esse aumento não seja muito expressivo. A utilização do surgimento de harmônicos de ordem superior para identificação de FAI pode não ser adequado, dado que nem sempre ocorre intermitência na corrente de falta e que como as amplitudes dos harmônicos de ordem superior são pequenas, estas podem ser contaminadas por ruídos. Também, confirmou-se as análises de EMANUEL et al. (1990) de que a componente harmônica de segunda ordem da corrente de FAI é diretamente proporcional à variação de  $\Delta V$  e a componente harmônica de terceira ordem da corrente de FAI é inversamente proporcional à variação de relação X/R da impedância de falta.



Os valores de harmônico, registrados no ponto da falta, não são os mesmos registrados na subestação. Já que a razão entre as componentes harmônicas e a componente fundamental é menor na subestação quando em comparação com o ponto de falta. Além disso, durante o funcionamento normal do SDEE existem outras fontes de harmônicos que podem interferir nas medições. Os religadores instalados ao longo da rede podem ajudar a monitorar as grandezas da rede e permitir a identificação da FAI.

O modelo atende os requisitos esperados, pois retrata de forma realística as características da corrente de falta, apresenta harmônicos que variam de acordo com o reportado na literatura e é simples, isto é, de fácil parametrização.

Diante do exposto, indica-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Aprimorar o modelo proposto, de forma que seja possível simular o *buildup* gradual e os momentos de intermitência de forma mais precisa.
- Testar o modelo em sistemas de distribuição mais realísticos no *ATP*, verificando os níveis de harmônicos medidos na saída do alimentador primário.
- Analisar o espectro harmônico da corrente de fase, quando ocorre, concomitantemente, uma FAI e outros fenômenos como chaveamento dos bancos de capacitores ou ocorrência de faltas de baixa impedância.
- Desenvolver técnicas de identificação de FAI, utilizando Transformadas Wavelet ou outros métodos reportados na literatura.
- Elaborar modelo que simule FAI sem rompimento do condutor (contato com árvore).

## Referências Bibliográficas

- [1] IBGE. *"Síntese de indicadores sociais : uma análise das condições de vida da população brasileira"*. Estudos e pesquisas. Informação demográfica e socioeconômica n. 36, Rio de Janeiro, 2016.
- [2] ANEEL. *"Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulos 1 ao 11"*, 2017.
- [3] SATO, F. *"Análise de curto-circuito em Sistemas Elétricos de Potência"*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 1979.
- [4] ADAMIAK, M.; WESTER, C.; THAKUR, M. & JENSEN, C. *"High Impedance Fault Detection on Distribution Feeders"*. Protection and Control Journal, 2006.
- [5] IURINIC, L. U. *"Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo"*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- [6] OLIVEIRA JÚNIOR, D. A. D. *"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. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [7] KINDERMANN, G. *"Curto-Circuito"*. UFSC – EEL - LABPLAN, 5 a Ed., Florianópolis, 2010.
- [8] ALMEIDA, W. G. & FREITAS, F. D. *"Circuitos Polifásicos, Teoria e Ensaio"*. FINATEC, Brasília, 1995.
- [9] BULTER, K. L. et al. *"Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders"*. POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, Edmonton. Proceedings... Piscataway: IEEE, 1999. p.408-413
- [10] ELKALASHY, N. I. et al. *"Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v.14, n.2, p.375-383. Abril, 2007.

- [11] NAKAGOMI, R. M. "*Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição*". Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2006.
- [12] JEERINGS, D. I. & LINDERS, J. R. "*Ground resistance-revisited*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, n. 2, p. 949–956, Abril 1989.
- [13] EPRI. "*Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders*". EPRI REPORT, Palo Alto, 1982.
- [14] NAM, S. R.; PARK, J. K.; KANG, Y. C. & KIM T. H. "*A modeling method of a high impedance fault a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP*", in IEEE PES Summer Meeting 2001, vol. 2, p. 1175-1180.
- [15] SANTOS, W. C. "*Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento*". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- [16] EMANUEL, A. E.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S. & GULACHENSKI, E. M. "*High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum*". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990.
- [17] KAUFMANN, R. H. & PAGE, J. C. "*Arcing fault protection for low-voltage power distribution system - nature of the problem*". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 79, n. 3, p. 160–165, 1960.
- [18] CHAN, D. T. W. & YIBIN, X. "*A novel technique for high impedance fault identification*". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, n. 3, Julho de 1998.
- [19] SANTOS, W. C. "*Identificação de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição*". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- [20] SENGER, E. C.; KAISER, W.; SANTOS, J. C. dos; BURT, P. M. S. & MALAGODI, C. V. S. "*Broken conductors protections system using Carrier communication*". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 2, p. 525-530, Abril 2000.

- [21] DA SILVA, E. F. & DE SOUZA D. A. "*Aplicação de unidades de sobrecorrente de neutro sensível em redes de distribuição – a experiência da Cosern*". XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Olinda, 2008.
- [22] AMON FILHO, J. & PEREIRA, M. P. "*Curso Básico sobre a utilização do ATP*". CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do *EMTP/ATP*.
- [23] <<https://www.atpdraw.net/news.php>>. Último acesso em 11 de junho de 2019.
- [24] WATSON, N.; ARRILLAGA, J. "*Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*". Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2003.
- [25] VILLANUEVA, J. M. M. "*Transformada de Fourier Discreta (DFT)*". Disponível em: <<http://www.cear.ufpb.br/juan/wp-content/uploads/2016/08/Transformada-Discreta-de-Fourier.pdf>>. Último acesso em 21 de junho de 2019.

## APÊNDICE A

A fim de se evitar as oscilações numéricas, na tensão do indutor quando a corrente de falta se anula mediante a ação dos diodos antiparalelos, os indutores foram modelados como dois blocos *Norton Type-94* do *ATPDraw*. Os blocos foram programados, na linguagem *MODELS*, mediante o método de integração numérica de segunda ordem de Gear<sup>[25]</sup>. código é exibido no Quadro 1.

Quadro 1 – Código de implementação dos blocos *Norton Type-94* do *ATPDraw* que modelam o indutor (Fonte: IURINIC, 2016)

```

DATA n -- number of phases
ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side
INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
i0[1..n] -- current(t=0) into each left node
VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
g[1..ng] -- conductance(t+timestep) at each left node
-- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
flag -- set to 1 whenever conductance value is modified
OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag
comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment
-- End header.
DATA L1 --[H] Indutância
comment-----
| Next, declarations provate to this model |
-----endcomment
VAR st --utilizado para converter de Laplace (s) para o dom. do tempo
L --[H] valor variável da indutância
INIT
st := 3/(2*timestep) --Para converter desde Laplace usando a regra Gear2
L := L1 --Valor inicial da indutância
g := 1/(st*L) --Valor inicial da condutância
ENDINIT
EXEC
IF t=0 THEN
flag := 1 --O valor da condutância mudou
i := i0 --Corrente a través de L quando t=0
is := -((4/3)*i0-(1/3)*0) --Termo histórico para o seguinte passo de
tempo
ELSE
flag := 0 --Reset flag
i := g*v-is --Aplicando a regra Gear2, calculada desde v(t)
is := -((4/3)*i-(1/3)*prevval(i)) --Termo histórico para o seguinte passo
de tempo
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

## APÊNDICE B

Para determinar os parâmetros do modelo foi elaborada uma planilha no Software Microsoft Excel. A planilha permite escolher a superfície de contato, que define a corrente de falta, os valores de  $V_p$  e  $V_n$ , que influenciam diretamente na amplitude do segundo harmônico, a ocorrência de rompimento do condutor, que isola as cargas a jusante do ponto de falta, o instante do início de falta, a quantidade de *buildups* e quantidade de intermitências. Realizada as escolhas, que na planilha são as células amarelas, deve-se utilizar os valores de  $R_f$ ,  $R_1$ ,  $t_3$ ,  $R_2$ ,  $t_4$ ,  $t_1$ ,  $L_1$  e  $L_2$  no modelo. O instante de início da FAI e os instantes de intermitência devem ser configurados diretamente na campo '*Reclosing switch*' da Chave 2, conforme apresentado na Figura 29. Importante ressaltar que no modelo desenvolvido, quando opta-se por simular o *buildup* a impedância de falta é puramente resistiva e os indutores devem ter valor próximo de zero.

Quadro 2 – Planilha de parâmetros do Bloco FAI

Superfície da FAI	Gramma Molhada	
Corrente de FAI	90	A
$V_p$	5000	V
$V_n$	7000	V
Com rompimento rompimento do condutor?	sim	
Instante do rompimento do condutor (ou início da FAI, caso não haja rompimento)	0,0910	s
Quantidade de Build ups	2	
Instante do 1º buildup:	15	ciclos após início da FAI
Instante do 2º buildup:	20	ciclos após início da FAI
$R_f$	278,56	ohms
$R_1$	278,56	ohms
$t_3$	1,6210	s
$R_2$	139,28	ohms
$t_4$	1,7043	s
$t_1$	0,0910	
$L_1$	1,00E-10	H
$L_2$	1,00E-10	H
Quantidade de Intermitências	2	
Início da 1ª intermitência:	2	ciclos após início da FAI
Duração da 1ª intermitência:	4	ciclos
Início da 2ª intermitência:	8	ciclos após início da FAI
Duração da 2ª intermitência:	5	ciclos
Configuração da ' <i>reclosing switch</i> '	1,3710	1,4043
	1,4710	1,5043
	1,5877	10,0000