

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Dissertação de Mestrado

# Uma Revisão de Modelos Clássicos de Falhas de Alta Impedância para Efeito de Melhoramento

Wellinsílvio Costa dos Santos

Campina Grande – Paraíba – Brasil

©Wellinsílvio Costa dos Santos, Setembro de 2011

Wellinsílvio Costa dos Santos

Uma Revisão de Modelos Clássicos de Falhas de Alta  
Impedância para Efeito de Melhoramento

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D. Sc.

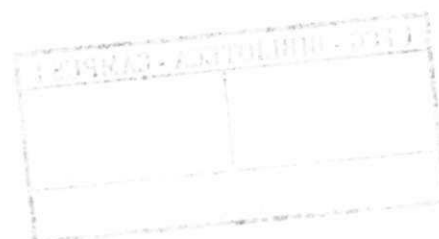
Orientador

Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Orientadora

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Setembro de 2011





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S237r Santos, Wellinsílvia Costa dos.

Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento / Wellinsílvia Costa dos Santos. — Campina Grande, 2011.

59 f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. D. Sc. Benemar Alencar de Souza, Prof. D. Sc. Núbia Silva Dantas Brito.

1. Faltas de Alta Impedância. 2. Banco de Dados. 3. Ensaio de Campo. 4. Modelagem de Falta. 5. Transitórios Eletromagnéticos. I. Título.

CDU – 621.316:004.65(043)

UMA REVISÃO DE MODELOS CLÁSSICOS DE FALTAS DE ALTA  
IMPEDÂNCIA PARA EFEITO DE MELHORAMENTO

WELLINSÍLVIO COSTA DOS SANTOS

Dissertação Aprovada em 09.09.2011

  
BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG  
Orientador

  
NÚBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG  
Orientadora

  
WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG  
Componente da Banca

  
FLÁVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., UFRN  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
SETEMBRO - 2011

*A toda minha família e em especial aos meus pais, José Wellington e Silvia que pelos ensinamentos transmitidos contribuíram para a formação do meu caráter e para o despertar pela busca do conhecimento, tanto técnico quanto pessoal.*

*Wellington Costa dos Santos*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e oportunidades a mim dadas durante todo esse tempo.

Além de dedicar, agradeço a toda minha família que sempre se mostrou disposta a ajudar e sempre acreditou em mim. Obrigado por toda paciência, incentivo e confiança.

A Jani Cleide que durante boa parte da graduação e todo o mestrado esteve ao meu lado mostrando-se uma grande companheira.

Aos professores Benemar Alencar e Núbia Brito pela orientação e pelos ensinamentos passados desde os tempos de graduação.

A Flávio Bezerra pela amizade e pelas profundas contribuições neste trabalho.

Aos amigos que fiz na universidade Rodrigo, Elias, Marcos, Felipe, Lilian, Ana Júlia, Francisco, Ana Vitória, Alana, Roniere e Sonaldo pelas inúmeras contribuições diretas ou indiretas. Peço desculpas aos que não foram citados, mas saibam que todos vocês fizeram parte desta conquista.

À concessionária de energia elétrica Energisa Paraíba, pela disponibilização do seu sistema para a realização dos ensaios de campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

*Wellington Costa dos Santos*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>Glossário</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xii</b>
<b>Resumo</b>	<b>xiv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação da Dissertação.....	2
1.2 Objetivos da Dissertação.....	4
1.3 Contribuições.....	5
1.4 Metodologia Adotada.....	6
1.5 Organização da Dissertação.....	6
<b>2. Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1 Principais características de FAI.....	7
2.2 Análise dos principais modelos de FAI.....	11
2.3 Síntese Bibliográfica e Modelo Proposto.....	18
<b>3. Adaptação do Modelo de FAI</b>	<b>19</b>
3.1 Ensaios de FAI.....	19
3.2 Modelagem do sistema de distribuição.....	29
3.3 Modelagem da FAI.....	30
<b>4. Construção da Base de Dados</b>	<b>43</b>
<b>5. Considerações Finais</b>	<b>48</b>
5.1 Conclusões.....	48
5.2 Trabalhos Futuros.....	49

<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>50</b>
<b>Apêndice A – Configuração do alimentador de Boa Vista para efeito de simulação</b>	<b>53</b>
<b>Apêndice B – Padrão IEEE COMTRADE</b>	<b>57</b>



# Lista de Figuras

1.1	Indicadores de continuidade de serviço: DEC e FEC (Fonte: ANEEL, 2011)..	3
2.1	Formação de uma FAI.....	8
2.2	Desenvolvimento do arco elétrico (EMANUEL <i>et al.</i> ,1990).....	9
2.3	Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão; (b) corrente.....	10
2.4	Modelo $R_f$ e $L_f$ .....	12
2.5	Modelo do Circuito Elétrico.....	12
2.6	Componente harmônico da corrente versus ângulo de fase $\theta$ e tensão $\Delta V$ ; (a) segundo componente harmônico; (b) terceiro componente harmônico.....	13
2.7	Modelo de resistências variáveis.....	14
2.8	Curva característica da tensão <i>versus</i> corrente de um ciclo em regime permanente de FAI (NAM <i>et al.</i> , 2001).....	14
2.9	Valor das resistências em função do tempo (NAM <i>et al.</i> , 2001).....	15
2.10	Modelo de NAKAGOMI (2006).....	16
2.11	Modelo de CHAN & YIBIN (1996).....	17
3.1	Alimentador escolhido de Boa Vista.....	20
3.2	<i>Layout</i> do último ensaio.....	20
3.3	<i>Layout</i> da estrutura montada.....	21
3.4	Estrutura montada para realização dos ensaios.....	22
3.5	Eletricista de linha viva manobrando o condutor.....	22
3.6	RDP utilizado.....	23
3.7	Diagrama de conexão do RDP no local do ensaio.....	24
3.8	FAI ensaiada na grama seca.....	26
3.9	Correntes de FAI em terrenos secos: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.....	27

3.10	Correntes de FAI em terrenos molhados: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.....	28
3.11	FAI ensaiada na grama molhada.....	29
3.12	Modelo utilizado para simular a FAI.....	30
3.13	Detalhamento da intermitência observada em correntes de FAI.....	32
3.14	Curva $v \times i$ correspondente a um ciclo do regime permanente de uma FAI: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.....	33
3.15	Resistência $R_2$ em função do tempo: (a) considerando-se <i>shoulder</i> ; (b) desconsiderando-se <i>shoulder</i> .....	35
3.16	Processo de cálculo de $R_2$ no calçamento: (a) Valor absoluto da tensão referente à FAI; (b) Valor absoluto da corrente referente à FAI; (c) Valor da resistência em relação ao tempo.....	35
3.17	Curva correspondente à função polinomial estimada para a resistência $R_2$ : (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.....	38
3.18	Simulação de uma FAI em terra local: (a) tensão; (b) corrente.....	39
3.19	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na areia.....	40
3.20	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na asfalto.....	40
3.21	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na brita.....	40
3.22	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida no calçamento.....	41
3.23	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na grama.....	41
3.24	Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na terra local.....	41
4.1	RDP(S)_FAT_BAR10_ARE_C25_a0; (a) tensão; (b) corrente.....	45
4.2	Processo de construção da base de dados.....	46
A.1	Diagrama unifilar do modelo do alimentador escolhido.....	53
A.2	Configuração das cruzetas.....	54
A.3	Estrutura dos postes.....	54

# Lista de Tabelas

1.1	Artigos publicados em anais de congressos.....	5
2.1	Síntese das características dos modelos de FAI.....	18
3.1	Número de testes de FAI realizados.....	25
3.2	Níveis das correntes de falta.....	29
3.3	Parâmetros das funções polinomiais de $R_2$ e a qualidade de sua aproximação.....	37
3.4	Qualidade da aproximação do modelo de FAI em relação a valores reais medidos.....	42
4.1	Variáveis de simulação.....	44
4.2	Grandezas das bases de dados.....	46
A.1	Comprimentos dos trechos do alimentador escolhido.....	55
A.2	Cargas distribuídas ao longo do alimentador escolhido.....	56
B.1	Tipos de arquivos do padrão COMTRADE.....	57
B.2	Registros e campos dos arquivos de configuração.....	59

# Glossário

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica.
<b>ASCII</b>	<i>American Standard Code for Information Interchange.</i>
<b>ATP</b>	<i>Alternative Transients Program.</i>
<b>AWG</b>	<i>American Wire Gauge.</i>
<b>CAPES</b>	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
<b>COMTRADE</b>	<i>Standard Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems.</i>
<b>CSCT</b>	Chave Simples Controlada por TACS.
<b>DEC</b>	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
<b>EMTP</b>	<i>Electromagnetic Transients Program.</i>
<b>FAI</b>	Falta de Alta Impedância.
<b>FEC</b>	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
<b>MATLAB®</b>	<i>Matrix Laboratory.</i>
<b>PRODIST</b>	Procedimentos de Distribuição.
<b>RDP</b>	Registrador Digital de Perturbações.
<b>RPF</b>	Regime Permanente de Falta.
<b>RTDS™</b>	<i>Real Time Digital Simulator.</i>
<b>RVT</b>	Resistências Variantes no Tempo.
<b>SDEE</b>	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.
<b>SE</b>	Subestação.
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência.
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional.
<b>SSE</b>	<i>Total Sum of Squares.</i>
<b>SST</b>	<i>Sum of Squares Error.</i>
<b>TACS</b>	<i>Transient Analysis of Control Systems.</i>
<b>TC</b>	Transformador de Corrente.
<b>TP</b>	Transformador de Potencial.

# Lista de Símbolos

## Capítulo 2:

### Modelos de FAI

$R_f$	Modelo 3: Resistência variável de falta.
$L_f$	Modelo 3: Indutância constante de falta.
$R_{f0}$	Modelo 3: Resistência inicial de falta.
$\alpha$	Modelo 3: Parâmetro $\alpha$ .
$\beta$	Modelo 3: Parâmetro $\beta$ .
$i_f$	Modelo 3: Corrente de falta atual.
$i_{f0}$	Modelo 3: Corrente de falta inicial.
$V_P$	Modelo 4: Fonte de tensão positiva.
$V_N$	Modelo 4: Fonte de tensão negativa.
$X_L$	Modelo 4: Reatância.
$R$	Modelo 4: Resistência.
$R_1$	Modelo 5: Resistência responsável pelas características de não-linearidade e assimetria.
$R_2$	Modelo 5: Resistência responsável pelas características de <i>buildup</i> e <i>shoulder</i> .
HZR1	Modelo 6: Resistência responsável pelas características de não-linearidade e assimetria.
HZR2	Modelo 6: Resistência responsável pelas características de <i>buildup</i> e <i>shoulder</i> .
$T_a$	Modelo 7: Tempo de permanência de extinção da falta após uma passagem por zero.
$\Delta t$	Modelo 7: Tempo de condução do arco num semiciclo.
$V_r$	Modelo 7: Tensão de reigitação do arco.
$v$	Modelo 7: Tensão aplicada.

### Capítulo 3:

#### Adaptação do Modelo de FAI

$i(t)$	Corrente correspondente a uma tensão no intervalo de falta.
$v(t)$	Tensão no alimentador no ponto de falta.
$v_n$	Tensão da curva característica na amostra $n$ .
$i_n$	Corrente da curva característica na amostra $n$ .
$v(\tau_k)$	Tensão de pico no semiciclo $k$ .
$i(\tau_k)$	Corrente de pico no semiciclo $k$ .
$\tau_k$	Instante em que a tensão e a corrente alcançam seus valores máximos, no $k$ -ésimo semiciclo.
$R^2$	Coefficiente de determinação.
$r_{med}(j)$	Valor medido das resistências.
$r_{est}(j)$	Valor estimado das resistências.
$m$	Número de amostras.
$\bar{r}_{med}$	Valor média das resistências medidas.

# Resumo

Faltas de alta impedância (FAI) são distúrbios graves e preocupantes nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Devido aos baixos níveis de corrente de falta, os principais dispositivos de proteção desses sistemas não são capazes de diagnosticá-las com precisão. Neste sentido, métodos de detecção e localização de FAI vêm sendo foco de interesse de muitas pesquisas. Tais métodos são, muitas vezes, validados com auxílio de simulações computacionais. Quanto mais próximo estes modelos consigam chegar das características encontradas no fenômeno real, mais confiáveis serão os algoritmos de diagnóstico neles baseados. Desta forma, neste trabalho é apresentado um modelo de FAI que apresenta as principais características das correntes de falta deste distúrbio, tais como: baixos níveis de sobrecorrente, assimetria entre os semiciclos, não-linearidade, *buildup*, *shoulder* e intermitência. O modelo se baseia em oscilografias reais de FAI obtidas em ensaios de campo. As simulações foram realizadas no *software* ATP e o modelo foi implementado usando a linguagem MODELS. O modelo leva em consideração o tipo de superfície de contato, e contempla um número maior de características do que os modelos estudados. Com uma modelagem específica para cada tipo de superfície, uma base de dados foi criada, na qual os arquivos finais foram convertidos para o padrão IEEE COMTRADE. Esse padrão é utilizado pela maioria dos RDP, qualímetros e relés oscilográficos do sistema elétrico, permitindo assim, que dados reais sejam inseridos à base de dados simulados sem a necessidade de nenhum tipo de conversão de formato.

**Palavras-Chave:** Base de dados; ensaios de campo; faltas de alta impedância; modelagem de falta; transitórios eletromagnéticos.

# Abstract

High impedance faults (HIF) are serious and troubling disturbances in distribution systems of electric power. Due to their fault current low levels, the main power system protection devices are not able to diagnose them accurately. In this sense, HIF detection and location methods have been the focus of many researches. Such methods are often validated with the aid of computer simulations. The closer these models can reach the characteristics found in real phenomenon, the more reliable will be the diagnostic algorithms based on them. Thus, this paper presents a model of HIF which takes into account the main fault currents characteristics of the disturbance, such as: low levels of overcurrent, asymmetry between the half-cycles, nonlinearity, buildup, shoulder, and intermittence. The model is based on actual HIF oscillographic data obtained in field tests. Simulations were performed in ATP software and the model was implemented by using MODELS. At the end, it was obtained a model that takes into account the type of contact surface, and simulates a larger number of features than the evaluated models. With a specific model for each type of surface, it was created a database composed of records with IEEE COMTRADE standard. This pattern is used for most digital fault recorders (DFRs), qualimeters, and relays of the electrical system, allowing, in this way, actual data to be inserted to the simulated database without needing any kind of format conversion.

**Keywords:** Database; electromagnetic transients; fault modeling; field tests; high impedance fault.



# Capítulo 1

## Introdução

Um sistema de potência típico é dividido em três subsistemas: geração, transmissão e distribuição. Conceitualmente, um sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) é o conjunto de instalações e equipamentos elétricos pertencentes a uma distribuidora em sua área de concessão, inclusive as demais instalações de distribuição e as demais instalações de transmissão, contratualmente disponibilizadas à distribuidora, não integrantes da rede básica (ANEEL, 2011).

O sistema de distribuição radial, mais comum no Brasil, se caracteriza por ter um tronco trifásico estendido e ramais sendo trifásicos ou monofásicos (SOUZA, 1997). Por esse fato, a falha em um determinado ponto pode deixar um grande número de clientes sem energia elétrica, além de deixar a vida de pessoas em risco. Desta forma, um diagnóstico rápido do defeito é de extrema importância para isolar a área afetada e enviar equipes de manutenção com maior rapidez e precisão.

Dentre os defeitos nos SDEE, a falta de alta impedância (FAI) se destaca por dificilmente ser detectada pelos sistemas de proteção convencionais baseados em sobrecorrente. Esse tipo de falta ocorre quando um condutor primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade, resultando em correntes de falta da mesma ordem de grandeza da corrente de carga e de outros distúrbios comuns nos SDEE.

Como a ocorrência de FAI está presente no cotidiano das concessionárias distribuidoras de energia elétrica, muitas pesquisas envolvendo o diagnóstico dessas faltas vêm sendo realizadas (LAZKANO *et al.*, 2001; MORETO, 2005; YANG *et al.*, 2007). Para o desenvolvimento e validação desses métodos é imprescindível o desenvolvimento de um modelo de FAI que seja o mais representativo possível.

Com o modelo de FAI é possível a construção de um conjunto de padrões, simulados computacionalmente, que represente as situações de falhas nas linhas, o qual é comumente denominado de base de dados (SOUZA *et al.*, 2005).

A obtenção de uma base de dados via testes de campo se mostra inviável devido ao número de experimentos que seriam necessários para se abranger todas as diferentes variáveis escolhidas, tais como: local de falta, tipo de solo, carregamento do sistema e umidade. Para tanto, programas de simulação de sistemas elétricos se mostram mais práticos e eficazes.

Modelos computacionais que tentam melhor representar as FAI estão em constante avanço (NAKAGOMI, 2006). Quanto mais próximo estes modelos consigam chegar das características encontradas no fenômeno real, mais confiáveis serão os algoritmos de diagnóstico neles baseados. Portanto, a modelagem de FAI consiste em um tema atual e importante para o setor elétrico.

## **1.1 Motivação da Dissertação**

Os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) são normas que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradoras) conectados aos sistemas de distribuição, que incluem redes e linhas em tensão inferior a 230 kV. Tratam, também, do relacionamento entre as distribuidoras e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no que diz respeito ao intercâmbio de informações.

Dentre seus módulos, o oitavo (ANEEL, 2011) trata especificamente de procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Nele são estabelecidos indicadores para avaliar a qualidade da energia elétrica que está sendo disponibilizada. Esses indicadores podem ser

classificados quanto à duração e à frequência da interrupção no fornecimento de energia elétrica e devem ser calculados e enviados à ANEEL mensal, trimestral e anualmente.

Dentre os índices de continuidade coletivos estão o de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e o de Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). O DEC tem relação com o intervalo de tempo em que ocorreu descontinuidade na distribuição de energia, enquanto o FEC tem relação com o número de interrupções ocorridas no conjunto considerado em dado período.

No estabelecimento dos limites de continuidade para os conjuntos de unidades consumidoras é aplicada uma análise comparativa de desempenho da distribuidora, tendo como referência os atributos físico-elétricos e dados históricos de DEC e FEC encaminhados à ANEEL.

Os valores dos limites anuais dos indicadores de continuidade são disponibilizados por meio de audiência pública de acordo com a periodicidade da revisão tarifária periódica da distribuidora. Na Figura 1.1 são apresentados os limites anuais de 2010 a 2013 de três conjuntos de unidades consumidoras da Paraíba.

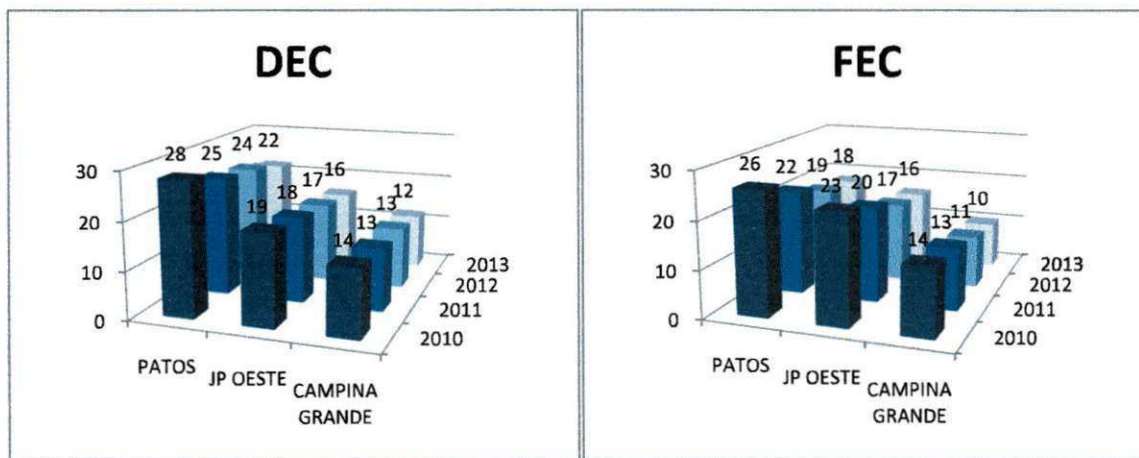


Figura 1.1 - Indicadores de continuidade de serviço: DEC e FEC (Fonte: ANEEL, 2011).

Ao longo dos anos, o aprimoramento de técnicas de proteção de sistemas elétricos tem proporcionado uma considerável melhoria nas taxas de continuidade de serviço do sistema elétrico brasileiro. Pode-se observar na Figura 1.1 que os limites de DEC e FEC impostos pela ANEEL tendem a cair no decorrer dos anos, induzindo as concessionárias a investirem no aprimoramento da prestação dos seus serviços.

Como a FAI é um defeito de difícil detecção por meio dos sistemas de proteção convencionais, a principal forma que as empresas concessionárias têm de saber de sua ocorrência é por meio da reclamação de clientes. Esse processo pode ser demorado, dependendo do tempo de espera até algum consumidor fazer a reclamação e da agilidade com que essa informação é repassada para as equipes de manutenção.

A fim de permitir a diminuição do tempo de atendimento nessas ocorrências e, conseqüentemente, do risco que as FAI causam à população, métodos para sua detecção automática vêm sendo propostos. Neste contexto, destaca-se a importância da criação de uma base de dados com diversos cenários de falta a fim de auxiliar o desenvolvimento e validação desses métodos.

No caso particular das FAI, a qualidade da solução adotada tem forte dependência, dentre outros fatores, do modelo utilizado na representação do fenômeno. As correntes resultantes de FAI têm características próprias, tais como: assimetria entre os semiciclos, não-linearidade, crescimento gradativo seguido de intervalos de constância e descontinuidades (JERRINGS & LINDERS, 1989; EPRI Report, 1982). A fim de realizar simulações desse fenômeno em programas do tipo EMTP, vários modelos vêm sendo propostos (EMANUEL *et al.*, 1990; YU *et al.*, 1994; CHAN & YIBIN, 1996; NAM *et al.*, 2001; SHARAF & WANG, 2003). Neste sentido, além de ser apresentada uma revisão referente aos modelos de FAI, propõe-se nesta dissertação uma adaptação de um desses modelos para efeito de melhoramento da representação da FAI para a criação de uma base de dados simulada.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliar o estado da arte da modelagem de FAI;
- Desenvolver adaptações no modelo de FAI que usa duas resistências variáveis (NAM *et al.*, 2001) a fim de permitir uma melhor representação dos fenômenos inerentes a essas faltas;
- Criar uma base de dados de FAI contemplando vários cenários de falta com o modelo adaptado, levando-se em consideração dados reais obtidos no sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica Energisa.

### 1.3 Contribuições

A principal contribuição desta dissertação é a criação de um novo modelo de FAI, baseado em oscilografias reais obtidas em ensaios de campo, no qual se destacam os seguintes pontos:

1. Consideração das principais características da falta, tais como: distorções da forma de onda da corrente de falta, variações no crescimento da corrente até seu regime permanente e descontinuidade da corrente de falta;
2. Consideração de diferentes parâmetros do modelo em relação a diferentes superfícies de contato;
3. Implementação de um algoritmo de construção automática de base de dados simulados de FAI.

A avaliação do modelo proposto, assim como dos seus parâmetros, foi feita comparando-se as qualidades de aproximação dos dados simulados com dados reais. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade da utilização do modelo proposto em aplicações práticas de validação de métodos de diagnóstico de FAI.

No que diz respeito à divulgação dos resultados preliminares da dissertação, apresentam-se na Tabela 1.1 as publicações em anais de congressos.

**Tabela 1.1 – Artigos publicados em anais de congressos.**

<i>Evento</i>	<i>Título</i>	<i>Autores</i>
17th Internacional Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Alemanha, 2011.	Staged-Fault Testing For High Impedance Fault Data Collection and Simulation Support	W. C. Santos; G. R. S. Lira; F. B. Costa; J. A. C. B. Silva; B. A. Souza; N. S. D. Brito; M. R. C. Paes Jr
VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Fortaleza, Brasil, 2011	Um sistema de detecção e localização de faltas de alta impedância	B. A. Souza; N. S. D. Brito; G. R. S. Lira; W. C. Santos; J. A. C. B. Silva; F. B. Costa; J. P. P. Andrade; M. R. C. Paes Jr
21st Internacional Conference On Electricity Distribution, Frankfurt, Alemanha, 2011.	High Impedance Fault Location Case Study With Developed Models From Field Experiments	J. A. C. B. Silva; F. B. Costa; W. C. Santos; G. R. S. Lira; B. A. Souza; N. S. D. Brito; M. R. C. Paes Jr; W. A. Neves
2010 IEEE/PES Transmission & Distribution Latin America, São Paulo, Brasil, 2010.	Automatic Building of a Simulated High Impedance Fault Database	W. C. Santos; F. B. Costa; J. A. C. B. Silva; G. R. S. Lira; B. A. Souza; N. S. D. Brito; M. R. C. Paes Jr

## 1.4 Metodologia Adotada

As correntes resultantes de FAI não só se caracterizam por apresentarem baixos níveis, mas também por possuírem características próprias dificilmente encontradas em outros distúrbios (COSTA *et al.*, 2011). Para o entendimento dessas características foram realizados ensaios de FAI em um distribuidor rural, considerando-se diferentes tipos de solos e níveis de umidade. Com os dados oscilográficos obtidos, um estudo aprofundado sobre o fenômeno e suas características pôde ser realizado.

Para a elaboração do modelo proposto, os principais modelos de FAI foram estudados a fim de se encontrar um que aliasse uma boa representação do fenômeno, com características como facilidade de implementação e de adaptação. O modelo de falta escolhido é baseado em duas resistências variáveis com o tempo e permite a representação de boa parte das características encontradas numa FAI (NAM *et al.*, 2001). Uma chave controlada foi adicionada ao modelo a fim de simular umas das características não abrangidas por ele. Foram utilizadas técnicas de programação na linguagem MODELS para incorporação do modelo escolhido às simulações computacionais via ATP - *Alternative Transient Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

## 1.5 Organização da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, a dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das principais características das FAI e das publicações mais significativas do tema a ser desenvolvido, no qual são abordados os principais métodos de modelagem computacional de FAI.

Ensaio de campo e uma adaptação do modelo de FAI escolhido são apresentados no Capítulo 3. Neste capítulo são detalhados os mecanismos usados que fizeram com que o novo modelo abrangesse mais uma característica desse tipo de distúrbio.

No Capítulo 4 é apresentado o processo de construção automática de uma base de dados. Um sistema de distribuição piloto e o modelo propostos foram implementados.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho e propostas de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Principais características de FAI

A principal característica de uma FAI é a baixa amplitude da corrente de falta. Esse nível de corrente é da mesma ordem de grandeza da causada por outros fenômenos encontrados no sistema elétrico, tais como energização de cargas e chaveamento de banco de capacitores, tornando os ajustes do sistema de proteção por sobrecorrente, muitas vezes, ineficazes (ADAMIAK *et al.*, 2004).

Além dos baixos níveis de corrente, outras características são observadas durante o processo de formação de uma FAI. Conforme NAKAGOMI (2006), um condutor elétrico ao se romper não mantém, inicialmente, um contato elétrico firme ao tocar uma superfície de alto valor resistivo. Esse contato, entretanto, se intensifica à medida que os elétrons livres do ar são acelerados pelo campo elétrico formado entre o condutor e a superfície. Quando um certo limiar de energia cinética é alcançado, as moléculas neutras do ar são ionizadas, liberando novos elétrons livres.

A repetição do processo de colisões sucessivas de elétrons com moléculas neutras, num curto espaço de tempo, é denominada de avalanche e, como consequência, o ar comporta-se como um condutor originando os arcos elétricos (Figura 2.1). Durante o

estabelecimento do arco é comum que ocorra um centelhamento, que é uma sequência rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico.

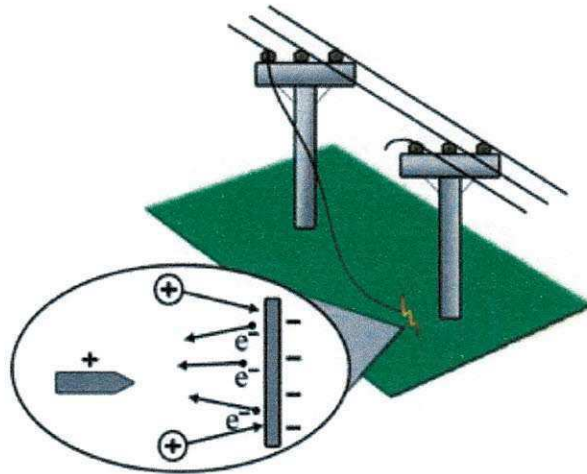


Figura 2.1 - Formação de uma FAI.

Segundo JEERINGS & LINDERS (1989), arcos elétricos vêm sendo largamente estudados, entretanto a maioria desses estudos trata de arcos com altas correntes e de mecanismos de extinção de arco presentes em dispositivos de proteção. Tal conceito de arco deve ser modificado quando este está relacionado com FAI. A impedância deste tipo de falta é predominantemente resistiva, enquanto que a maioria dos arcos ocorridos em outras circunstâncias são fortemente indutivos. Ainda em relação a sua impedância, as superfícies de contato não devem ser consideradas homogêneas, sendo representadas por resistências únicas, mas sim em camadas com diferentes resistividades. Essa consideração afeta diretamente na característica não-linear da falta.

Arcos em linhas de transmissão podem chegar a alguns metros de comprimento e sua corrente inicial, de alguns milhares de ampères, pode vaporizar o condutor e contribuir para a manutenção da baixa resistência de arco. Por outro lado, FAI podem gerar arcos de poucos centímetros e com correntes que, geralmente, não passam de uma centena de ampères. Nesses casos, as pequenas correntes envolvidas podem fazer com que não haja vaporização metálica suficiente para manter o arco elétrico de forma sustentada, causando muitas vezes uma descontinuidade na corrente (JEERINGS & LINDERS, 1989).

A presença de arcos elétricos em FAI leva ao surgimento de certas peculiaridades na forma de onda da corrente, tais como: assimetria entre os semiciclos, distorção na forma



de onda, um crescimento progressivo seguido de momentos de constância em sua amplitude, além de intermitência.

De acordo com experimentos realizados por EMANUEL *et al.* (1990), a corrente de falta não é simétrica, sendo o semiciclo positivo maior em amplitude que o negativo. Tal comportamento é indiferente a grandes ou pequenas correntes de falta. Segundo os autores, esta característica da corrente de uma FAI não depende do formato dos eletrodos e nem do material utilizado em sua fabricação. Os fatores mais influentes estão relacionados com a porosidade e a umidade da superfície de contato em questão. A assimetria pode ser atribuída também 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.

O desenvolvimento do arco é ilustrado de forma esquemática na Figura 2.2. Quando o arco é iniciado, a distribuição do campo elétrico no solo é fortemente modificada, causando um crescimento acentuado do campo entre o condutor e a superfície de contato. Fatores como emissão termiônica, altos gradientes de campo e o fato da camada condutora do solo ficar mais profunda no decorrer do tempo, fazem com que o arco avance solo adentro. A condução de corrente elétrica através da superfície de contato acaba criando fulguritos, que são estruturas tubulares rochosas decorrentes da vitrificação da sílica presente do solo.

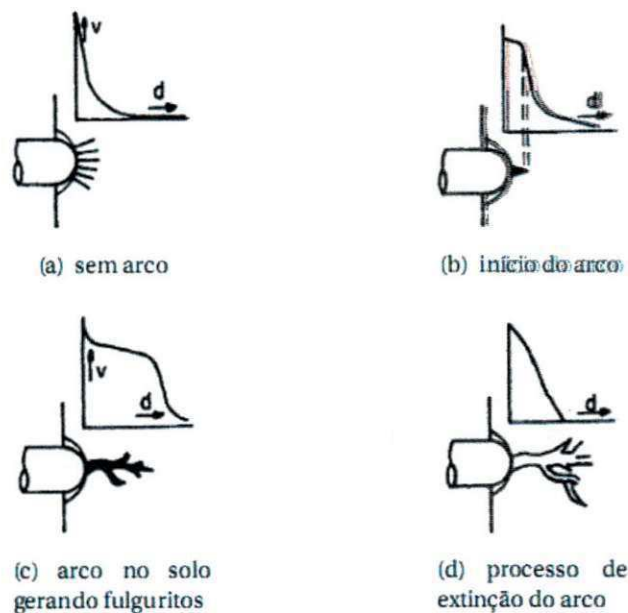


Figura 2.2 – Desenvolvimento do arco elétrico (EMANUEL *et al.*,1990).

Com a penetração do arco na superfície de contato, a área ao seu redor começa a perder umidade, forçando sua extinção. A partir desse estágio, a umidade de outra área do solo pode difundir-se, provocando uma reignição do arco ou outro ponto de contato do condutor com o solo, podendo dar início à formação de um novo arco. Esse processo ocorre na fase inicial da falta sendo conhecido como intermitência, provocando o surgimento de componentes de altas frequências nas tensões e correntes do ponto de falta (NAKAGOMI, 2006).

Em registros oscilográficos de FAI é comum se observar um aspecto do crescimento da envoltória da corrente de falta. Esse comportamento é conhecido como *buildup* e deve-se, principalmente, à acomodação física do cabo, ou seja, ao tempo que este leva para assentar-se completamente ao solo estabelecendo a resistência de contato final da FAI. Normalmente, esse crescimento é cessado por alguns ciclos, dando origem à característica conhecida por *shoulder* (NAM *et al.*, 2001).

Todas essas características são função das condições geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema (KAUFMANN & PAGE, 1960). Como consequência, o comportamento das grandezas elétricas envolvidas em FAI apresenta uma forte componente estocástica, tornando assim indispensável uma melhor compreensão do fenômeno que leve ao desenvolvimento de modelos computacionais mais realistas. Na Figura 2.3 é apresentada a oscilografia de uma FAI real com suas principais características destacadas.

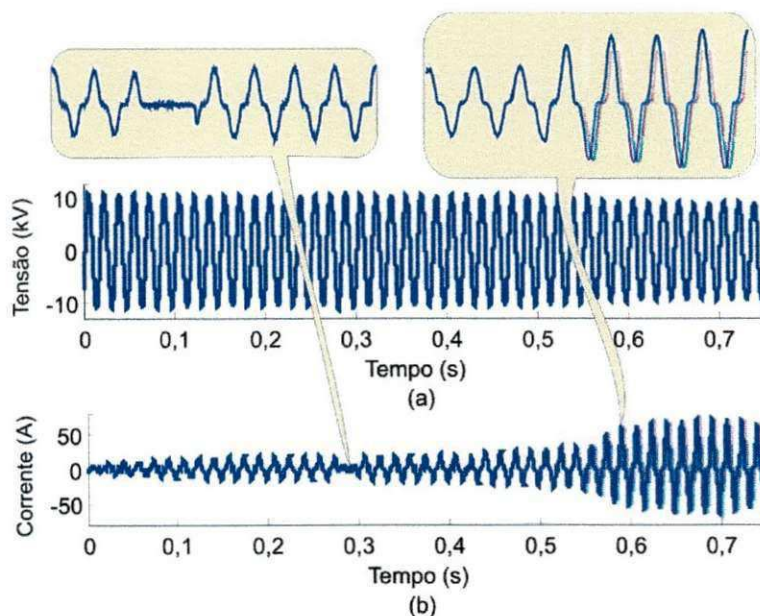


Figura 2.3 – Oscilografia real de uma FAI: (a) tensão; (b) corrente.

## 2.2 Análise dos principais modelos de FAI

O estudo das FAI não é uma tarefa fácil, haja vista a dificuldade de obtenção de dados oscilográficos reais. Portanto, o uso de modelos constitui-se numa etapa importante em tarefas de diagnóstico de eventos dessa natureza. Apresenta-se a seguir uma análise dos principais modelos de FAI encontrados na literatura.

### **Modelo 1: Resistência fixa**

O modelo da resistência fixa é o modelo mais simples de FAI. Trata-se de uma resistência fixa de valor elevado conectada entre o ponto de falta e a terra. Este modelo não representa bem a falta, pois os arcos elétricos normalmente geram distorções nas formas de onda das correntes de falta.

### **Modelo 2: Combinação de impedâncias não-lineares (YU & KHAN, 1994)**

Este modelo utiliza uma combinação de impedâncias não-lineares e baseia-se na variação da amplitude da impedância durante o ciclo de tensão. Por exemplo, enquanto a tensão aumenta durante o semiciclo positivo, a impedância diminui. A implementação desse modelo não é trivial, visto que são necessárias várias tentativas e estudos para modelar as não-linearidades das impedâncias e combiná-las. Então, esse modelo pode ser considerado de alto grau de empirismo.

### **Modelo 3: R<sub>f</sub> e L<sub>f</sub> (SHARAF & WANG, 2003)**

Este modelo é muito utilizado, principalmente em conjunto com técnicas de inteligência computacional. Ele é composto de uma resistência variável de falta  $R_f$  e uma indutância constante de falta  $L_f$  (Figura 2.4). Os valores de  $R_f$  são calculados a partir da seguinte equação recorrente

$$R_f = R_{f0} \cdot \left( 1 + \alpha \cdot \left( \frac{i_f}{i_{f0}} \right)^\beta \right), \quad (2.1)$$

sendo:  $\alpha$  e  $\beta$  parâmetros definidos pelo usuário;  $i_f$  e  $i_{f0}$  as correntes de falta atual e inicial, respectivamente.

As características de não-linearidade e assimetria da corrente são abrangidas por este modelo. Já características relacionadas com o crescimento do módulo da corrente e com sua intermitência não são consideradas.

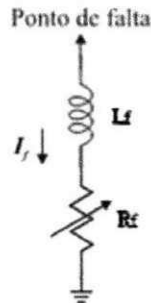


Figura 2.4 - Modelo  $R_f$  e  $L_f$ .

**Modelo 4: Circuito Elétrico (EMANUEL *et al.*, 1990)**

Este modelo é composto de dois diodos conectados em antiparalelo, sendo cada diodo em série com uma fonte de tensão contínua (Figura 2.5). Nesta configuração, a corrente de falta circula por meio de  $V_p$  durante o semiciclo positivo e durante o semiciclo negativo, por meio de  $V_N$ .

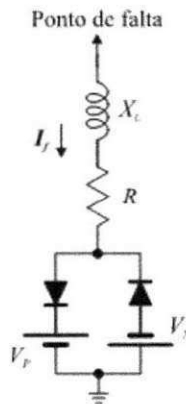
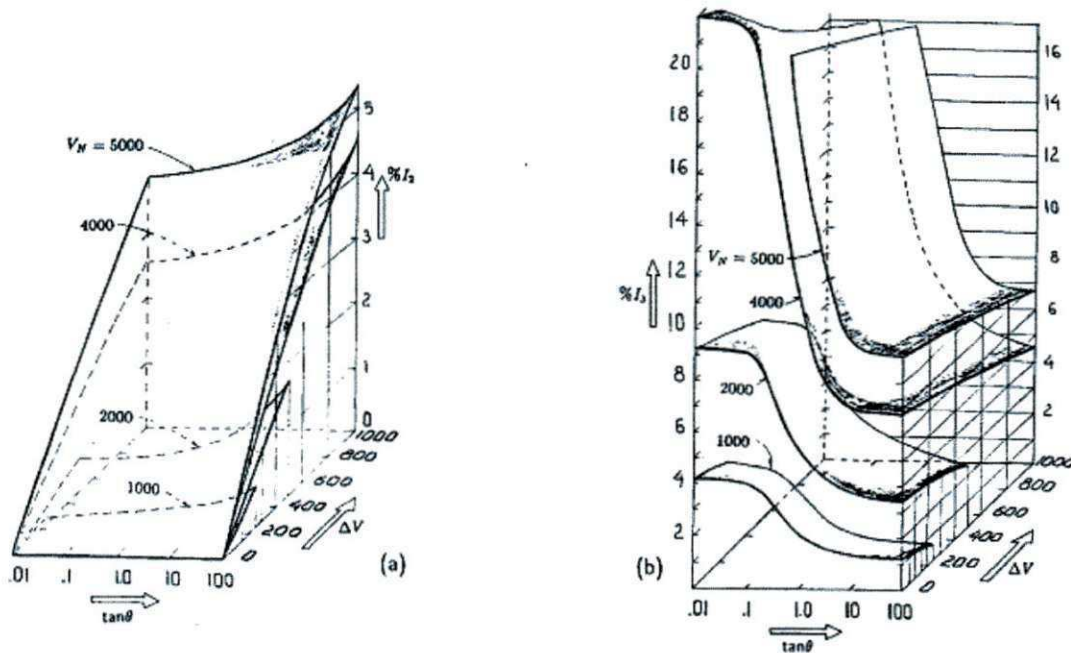


Figura 2.5 - Modelo do Circuito Elétrico.

Devido ao fato do semiciclo positivo da corrente de falta ser maior que o negativo, utiliza-se  $V_N > V_p$ . A ocorrência do aparecimento de conteúdos harmônicos é controlada pela diferença entre as fontes ( $\Delta V = V_N - V_p$ ) e pela razão entre a reatância  $X_L$  e a resistência  $R$  ( $\tan \theta = X_L/R$ ). Na Figura 2.6 estão apresentadas as relações entre essas grandezas com o componente harmônico da corrente.



**Figura 2.6 – Componente harmônico da corrente versus ângulo de fase  $\theta$  e tensão  $\Delta V$ ; (a) segundo componente harmônico; (b) terceiro componente harmônico (EMANUEL *et al.*, 1990).**

Este modelo permite uma fácil implementação das características de não-linearidade e assimetria decorrentes do arco elétrico em ambiente de simulação. No entanto, as características de *buildup*, *shoulder* e intermitência não são consideradas.

**Modelo 5: Resistências Variáveis (NAM *et al.*, 2001)**

Este modelo utiliza duas resistências em série, variantes no tempo, controladas pela rotina *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) do ATP (Figura 2.7):

- $R_1$ : simula as características de não-linearidade e assimetria da FAI, atuando nos regimes transitório e permanente.
- $R_2$ : simula os fenômenos de *buildup* (período de elevação da corrente de falta) e *shoulder* (períodos que a corrente de falta permanece constante antes de voltar a crescer).

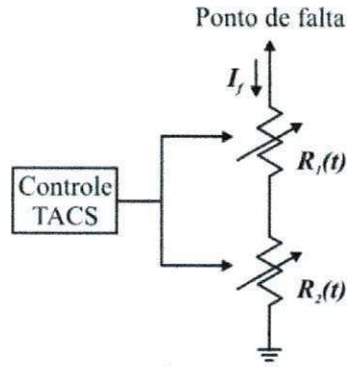


Figura 2.7 - Modelo de resistências variáveis.

$R_1$  é calculado usando-se a curva tensão *versus* corrente de um ciclo no qual não existam modificações significativas de amplitude com os ciclos subsequentes (Figura 2.8). Neste ciclo não há mais influência de *buildup* e *shoulder*, permitindo que a divisão entre a tensão no ponto de falta e a corrente correspondente a ela na curva resulte numa resistência que simule as características de assimetria e não-linearidade da corrente de FAI.

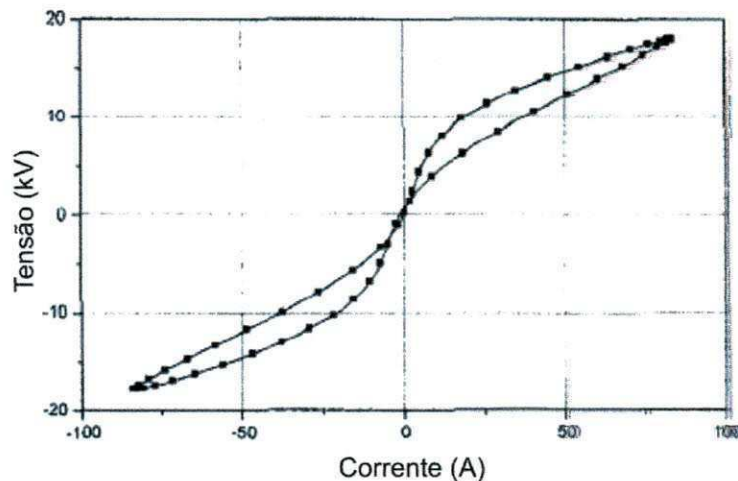


Figura 2.8 – Curva característica da tensão *versus* corrente de um ciclo em regime permanente de FAI (NAM *et al.*, 2001).

$R_2$  é obtido considerando-se os valores de módulo máximos dos semiciclos das tensões e correntes. Dividindo-se esses módulos obtém-se o comportamento total das duas resistências consideradas no modelo. Como em regime permanente só se tem a influência de  $R_1$ , subtrai-se da curva obtida anteriormente o valor no qual ela se estabilizou ( $R_1$ ), obtendo-se o comportamento relacionado com as características de *buildup* e *shoulder* ( $R_2$ ). Após isso é realizada uma regressão para se aproximar os pontos de  $R_2$  por uma equação em função do tempo (Figura 2.9).

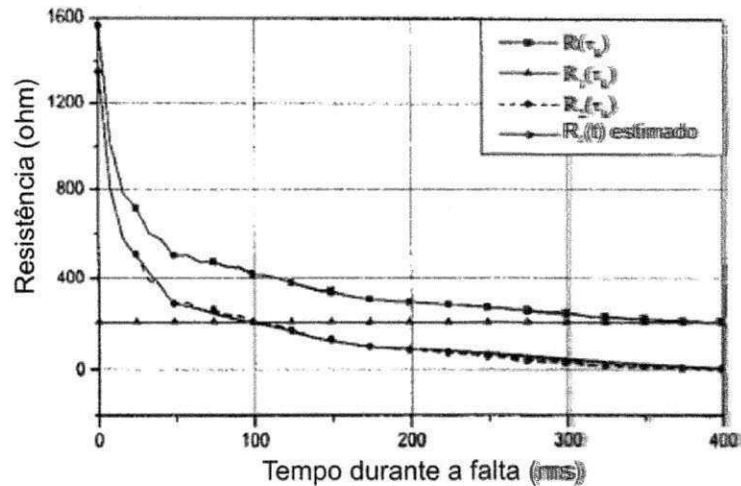


Figura 2.9 – Valor das resistências em função do tempo (NAM *et al.*, 2001).

Apesar de representar bem as características supracitadas, as componentes de frequências mais altas não serão consideradas, pois a característica de intermitência da corrente de falta não foi modelada. A implementação desse modelo tem um forte entrave, principalmente no que se diz respeito à necessidade da obtenção de dados reais de tensão e corrente do arco.

#### **Modelo 6: Modelo proposto por NAKAGOMI (2006)**

O modelo proposto por NAKAGOMI (2006) é uma combinação do modelo de resistências variáveis em série (Modelo 5), com controladores (Figura 2.10). Ao final, se obtém um modelo que considera o tempo de queda do condutor ao solo, o lado em que houve a queda do cabo (fonte ou carga), além das características já mencionadas no Modelo 5. Apresentam-se a seguir as principais características desse modelo.

- A representação da queda do condutor é feita utilizando um conjunto de chaves, simulando desde o momento anterior ao rompimento do condutor até o seu contato com o solo e a formação do arco elétrico.
- A resistência HZR1 mantém uma variação constante em todos os ciclos, a fim de gerar o sinal de corrente com distorção e assimetria típicas.
- A resistência HZR2 assume valores não nulos somente durante a etapa transitória da corrente. Essa resistência é elevada e seu valor diminui ao longo do tempo,

representando assim o crescimento típico da corrente na etapa de acomodação do condutor rompido no solo.

- O modelo é constituído de dois controles: o controlador das chaves, que comanda o fechamento e abertura das três chaves e o controlador das resistências, que comanda as mudanças, em cada instante de tempo, das resistências HZR1 e HZR2.

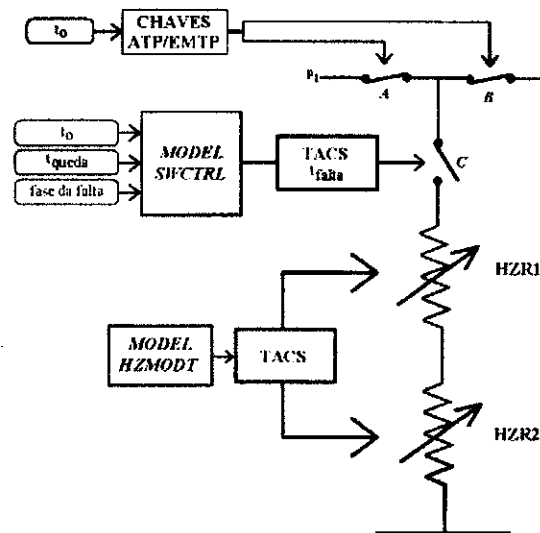


Figura 2.10 - Modelo de NAKAGOMI (2006).

### Modelo 7: Modelo proposto por CHAN & YIBIN (1996)

O modelo proposto é uma adaptação do modelo que utiliza diodos conectados em antiparalelo (Modelo 4). Neste modelo foram acrescentadas chaves que permitem o isolamento das cargas a jusante do ponto de falta, além de considerar a existência de intermitência na corrente de defeito.

Na Figura 2.11 está mostrado o esquema do modelo. As chaves 1 e 2 são convencionais do tipo controladas por tempo e servem para isolar o alimentador da carga a jusante e para conectá-lo ao ramo de falta, respectivamente. A chave 3 é controlada pela rotina TACS do ATP, sendo responsável pelo controle da **extinção e reignição do arco**. Sua operação depende da comparação do tempo de simulação **com os tempos de permanência de extinção da falta após uma passagem por zero ( $T_a$ ) e o de condução do arco num semiciclo ( $\Delta t$ )**. As equações que descrevem o comportamento do modelo são:



$$T\alpha = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{V_r}{V_m}, \quad (2.2)$$

$$\Delta t = \frac{\pi V_r + 2\sqrt{V_m^2 - V_r^2}}{\omega(V_a + V_r)}, \quad (2.3)$$

sendo  $V_r$  a tensão de reignição do arco e considerando-se a tensão aplicada, como

$$v = V_m \sin \omega t. \quad (2.4)$$

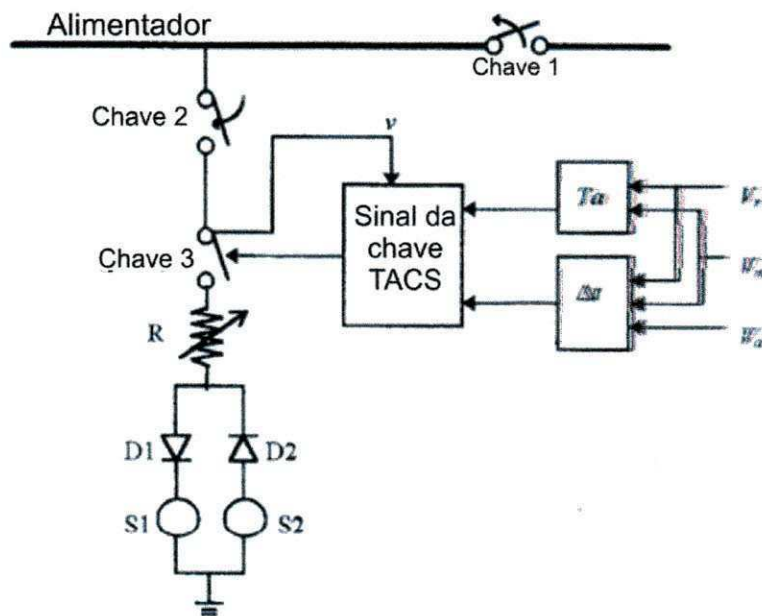


Figura 2.11 - Modelo de CHAN & YIBIN (1996).

Como já dito anteriormente, o modelo dos diodos em antiparalelo simula as características de não-linearidade e assimetria de uma FAI. Com a adaptação feita com o acréscimo da chave 3 foi possível associar o efeito da intermitência à corrente de falta, o que nenhum dos modelos estudados fizera, mas características como o *buildup* e *shoulder* ainda não são satisfeitas.

### 2.3 Síntese Bibliográfica e Modelo Proposto

De acordo com os modelos apresentados, percebe-se que os métodos de modelagem ainda não apresentam de forma satisfatória todas as peculiaridades de uma FAI. Nos modelos 6 e 7 observou-se que adaptações em modelos já existentes foram realizadas e uma maior abrangência de características foi alcançada.

Neste trabalho, é proposto um método para modelagem de FAI baseado nos modelos de NAM *et al.* (2001) e CHAN & YIBIN (1996). O modelo de NAM *et al.* (2001) foi escolhido como base por ter a capacidade de simular características como não-linearidade, assimetria, *buildup* e *shoulder*. A intermitência é uma das principais causadoras do aparecimento de transitórios de altas frequências nas correntes de falta. Como vários métodos de diagnóstico de FAI são baseados em transitórios (LAZKANO *et al.*, 2001; SEDIGUI *et al.*, 2005; YANG *et al.*, 2007), simulações que validem com mais confiabilidade tais métodos precisam levar em consideração a ocorrência de descontinuidades na sua corrente de falta. Para tanto, uma chave baseada no modelo de CHAN & YIBIN (1996) foi acrescida ao modelo das duas resistências variáveis. Desta forma, o modelo proposto abrange as características de não-linearidade, assimetria, *buildup*, *shoulder* e intermitência, permitindo assim uma melhor representação do fenômeno real. Na Tabela 2.1 é feita uma síntese da abrangência de características dos modelos estudados e do proposto.

**Tabela 2.1 – Síntese das características dos modelos de FAI.**

<i>Modelos</i>	<i>Características</i>			
	Baixa amplitude de corrente de falta	Não-linearidade e assimetria da corrente de falta	<i>Buildup</i> e <i>shoulder</i> no período inicial da falta	Intermitência
<b>Modelo 1</b>	√	-	-	-
<b>Modelo 2</b>	√	√	-	-
<b>Modelo 3</b>	√	√	-	-
<b>Modelo 4</b>	√	√	-	-
<b>Modelo 5</b>	√	√	√	-
<b>Modelo 6</b>	√	√	√	-
<b>Modelo 7</b>	√	√	-	√
<b>Modelo Proposto</b>	√	√	√	√

## Capítulo 3

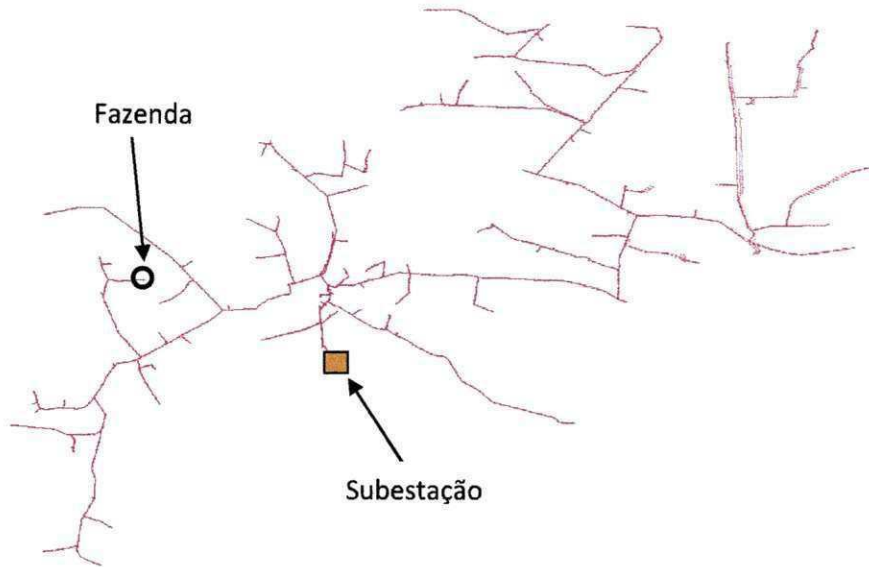
# Adaptação do Modelo de FAI

### 3.1 Ensaios de FAI

Ensaios de FAI foram realizados para se obter dados para servirem como base das simulações. Essa etapa foi da maior importância, contribuindo de forma decisiva no entendimento do fenômeno e no ajuste dos parâmetros do modelo de FAI escolhido.

Os ensaios foram realizados em uma fazenda localizada cerca de 15 km da subestação da cidade de Boa Vista, PB (Figura 3.1). Esse alimentador foi escolhido com o objetivo de diminuir a possibilidade de algum imprevisto deixar um alto número de consumidores desenergizados, além do fato da fazenda ter espaço suficiente para a montagem do experimento e para abrigar a equipe com segurança.

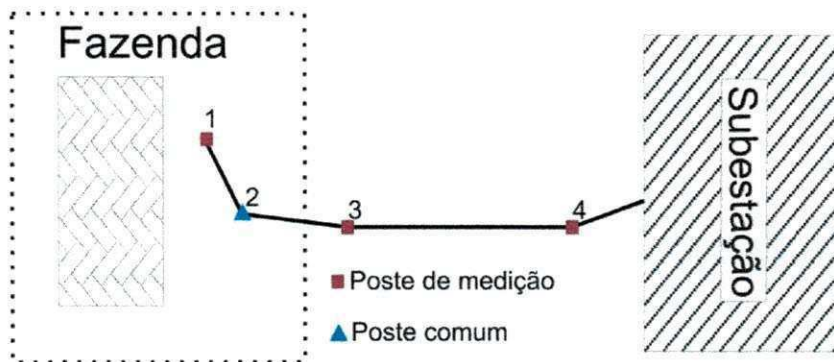
Com o auxílio de um programa de gerenciamento pertencente à concessionária de energia Energisa foi possível obter os níveis de curtos-circuitos sólidos na região onde o ensaio seria realizado. As correntes chegariam em torno de 475, 410 e 404 ampères para curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos, respectivamente.



**Figura 3.1 – Alimentador escolhido de Boa Vista.**

Três pontos de medição foram escolhidos entre o local do ensaio e a subestação. Esta escolha foi feita para avaliar o quanto as perturbações causadas pelas FAI seriam atenuadas ao longo do alimentador. Para tanto, tensões e correntes no local de aplicação das FAI e em um ponto a montante mais distante foram medidas. A estrutura para medição foi montada inicialmente a uma distância de 1 km da fazenda. Os primeiros ensaios foram realizados e posteriormente a mesma estrutura foi montada a 11 km do local de aplicação das faltas.

Esta pesquisa usou exclusivamente informações das oscilografias obtidas no ponto de aplicação de faltas. Isso devido ao fato de haver interesse dessas informações para uma melhor representação da resistência de falta. Os *layouts* do ensaio e da estrutura montada para os testes são mostrados nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.



**Figura 3.2 - Layout do último ensaio.**

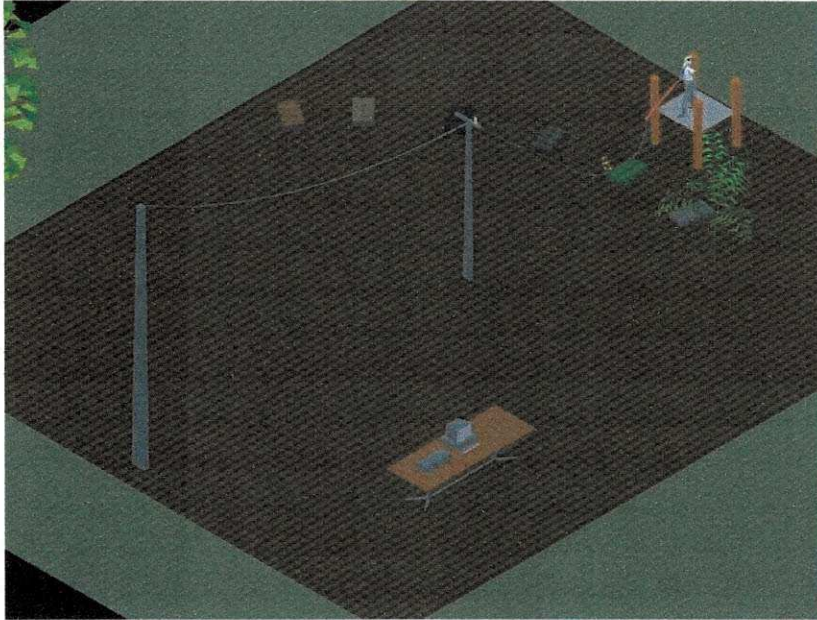


Figura 3.3 - *Layout da estrutura montada.*

Os testes foram realizados em sete tipos de superfícies. Pequenas áreas dispostas paralelamente e revestidas de grama, calçamento, brita, asfalto, areia, terra local e arbusto foram empregadas levando em consideração superfícies secas e molhadas.

Um poste de transição de dois metros foi implantado **próximo às superfícies de contato**. Nele foram instalados um transformador de potencial (TP) e um transformador de corrente (TC) para captura dos sinais de tensão e corrente **produzidos pela FAI**. Este poste também teve função de diminuir os esforços mecânicos no condutor vindo do poste convencional já existente na propriedade.

Escada e vara de manobra foram colocadas próximas ao poste comum para instalação e substituição de possíveis elos fusíveis danificados durante os ensaios.

Um cabo energizado com  $13,8/\sqrt{3}$  kV vindo de um poste comum foi conectado a um dos isoladores fixados no poste de transição. A extremidade do cabo foi conectada a um isolador em série com uma vara de manobra, a qual foi manipulada por um técnico de linha viva. Uma plataforma isolante (andaime) foi instalada de forma a possibilitar que o técnico manipulasse com mais segurança o cabo energizado.

A estrutura montada para a realização dos testes e a manipulação da vara de manobra feita pelo eletricitista são apresentadas nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.



**Figura 3.4 - Estrutura montada para realização dos ensaios.**



**Figura 3.5 - Eletricista de linha viva manobrando o condutor.**

Para a aquisição dos dados foram usados registradores digitais de perturbação (RDP) (Figura 3.6). Esses equipamentos destinam-se à aquisição, monitoração e registro de grandezas elétricas normalmente associadas a instalações de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica.



Figura 3.6 – RDP utilizado.

O modelo é constituído de um gabinete com capacidade para dois módulos de aquisição e dois módulos de condicionamento de sinais. O **módulo de comunicação** permite conectar o equipamento a redes *Ethernet* (sinais **elétricos ou ópticos**), *modems* (convencionais ou celulares), linhas seriais diretas ou equipamentos de radiofrequência.

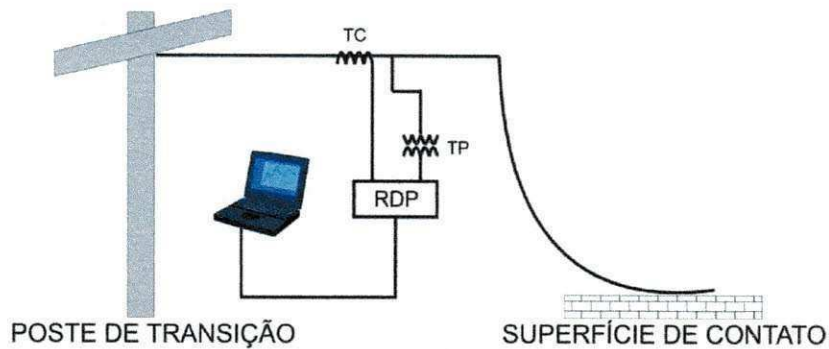
O RDP pode ser operado a partir de tensões auxiliares AC ou DC e conta com uma bateria interna para garantir operação e registro confiáveis, mesmo em situações que comprometam a qualidade da tensão auxiliar disponível.

A aquisição dos sinais de tensão e corrente é feita com uma taxa de amostragem de 15360 Hz. Para realizar a captura de registros oscilográficos, esse modelo dispõe de:

- *Trigger* manual;
- *Trigger* automático por:
  - ✓ Sobre e sub-corrente;
  - ✓ Sobre e sub-tensão;
  - ✓ Taxa de Distorção Harmônica;
  - ✓ Entrada digital.

Como FAI não costumam afetar suficientemente as características monitoradas pelos disparos automáticos, a forma encontrada para disparar as gravações dos RDP foi o disparo manual com 30 segundos de monitoração. O sincronismo entre as equipes no local de aplicação das faltas e no ponto remoto de monitoramento foi realizado por comunicação via rádio.

No total, dois RDP foram utilizados, sendo um fixo no local dos testes e outro que inicialmente ficou no ponto 3 e depois no ponto 4 da Figura 3.2. Desta forma, cada ensaio foi medido simultaneamente em dois locais diferentes. Na Figura 3.7 é ilustrada a forma com a qual o registrador que ficou na fazenda foi instalado.



**Figura 3.7 – Diagrama de conexão do RDP no local do ensaio.**

Após a instalação dos RDP, realizaram-se suas configurações de forma a possibilitar a medição, gravação e visualização dos eventos a serem gerados nos ensaios.

A isolamento e sinalização da área do ensaio com fitas e cones foram de extrema importância, visando evitar o trânsito de pessoas e animais no momento da FAI, conseqüentemente, evitando acidentes.

Como a equipe não tinha certeza dos níveis de corrente que cada superfície demandaria, algumas medidas conservadoras foram tomadas. Um elo fusível de 1H foi instalado no poste comum, de onde se derivou a fase submetida ao curto. Como o fusível de 1H possui um tempo de atuação bastante curto, mesmo para correntes relativamente pequenas, esperava-se evitar níveis elevados de corrente de curto-circuito e assim proteger o resto do sistema elétrico conectado aquele ramal.

A primeira superfície a ser submetida aos testes foi o asfalto devido a sua maior resistência. Em seguida, posicionou-se o andaime e o electricista em frente à superfície de asfalto para que o contato do cabo se desse da forma mais uniforme possível. Uma vez que o electricista estava devidamente posicionado e com cabo suspenso por meio do bastão isolante, foi dado o comando para fechamento do elo fusível e, com isso, energizar o cabo de alta tensão.

Os testes foram realizados de 27 a 29 de Maio de 2010. O procedimento experimental foi o seguinte:

1. Escolha da superfície de contato;
2. Preparação do andaime e do técnico de linha viva;
3. Comunicação entre as equipes do início do teste;
4. Fechamento do elo fusível de proteção;



5. Disparo no RDP local e no remoto;
6. Aproximação e contato do condutor energizado com a superfície;
7. Permanência de 20 segundos da FAI;
8. Elevação do condutor;
9. Comunicação entre as equipes do final do teste;
10. Rápida análise do registro oscilográfico;
11. Troca do elo fusível, se necessário;
12. Repetição de pelo menos 4 vezes dos passos anteriores para cada superfície;
13. Escolha da próxima superfície.

Cada superfície foi testada em condições de baixa e alta umidade com um total de 129 testes sendo realizados. Os ensaios que seriam feitos na árvore acabaram sendo abortados por dificuldades operacionais no momento da realização dos testes. Na Tabela 3.1 está apresentado o detalhamento do número de ensaios realizados durante o teste.

**Tabela 3.1 – Número de testes de FAI realizados.**

<i>Superfície de contato</i>		<i>Número de ensaios</i>	
		Ponto remoto (1 km)	Ponto remoto (11 km)
<b>Gramma</b>	<b>Seca</b>	5	5
	<b>Molhada</b>	5	5
<b>Calçamento</b>	<b>Seco</b>	5	5
	<b>Molhado</b>	5	8
<b>Brita</b>	<b>Seca</b>	5	5
	<b>Molhada</b>	5	5
<b>Asfalto</b>	<b>Seco</b>	5	5
	<b>Molhado</b>	5	7
<b>Areia</b>	<b>Seca</b>	4	6
	<b>Molhada</b>	5	4
<b>Terra local</b>	<b>Seca</b>	5	9
	<b>Molhada</b>	5	6

Como esperado, as superfícies secas sustentaram o condutor energizado por muitos segundos sem que o elo fusível atuasse. Dentre essas superfícies, a exceção foi com a grama que alcançou correntes máximas de 60 A, produzindo a ocorrência perceptível de arcos elétricos e fumaça, além de abrir o elo fusível de proteção em alguns segundos (Figura 3.8). FAI no asfalto, brita e no solo local secos não produziram arcos perceptíveis que indicassem a presença de uma falta, sendo encerrados após o tempo limite de gravação

do RDP sem que o elo fusível fosse rompido. Na areia e no calçamento as correntes chegaram a 10 A e produziram fracos sinais da presença do arco.



**Figura 3.8 – FAI ensaiada na grama seca.**

As FAI ensaiadas em superfícies molhadas foram muito mais severas. Na terra local e na grama molhadas o elo fusível atuou quase que imediatamente, permitindo só alguns ciclos de gravação das correntes e tensões de falta. As correntes nessas superfícies chegaram em torno de 60 e 90 A, respectivamente, e produziram perceptíveis arcos elétricos. Na areia e na brita molhadas as correntes alcançaram valores em torno de 50 A e, em alguns casos, o elo de proteção se fundiu. Por fim, as correntes de menor amplitude em solos molhados foram encontradas no asfalto e no calçamento, onde as correntes alcançaram um máximo de 20 A. Nesses últimos casos houve um arco visível, mas sem o rompimento do elemento fusível. Nas Figuras 3.9 e 3.10 estão apresentados registros oscilográficos das correntes de FAI nas superfícies de contato secas e molhadas, respectivamente. Na Figura 3.11 está ilustrado um dos ensaios feitos na grama molhada com um forte aparecimento do arco elétrico.

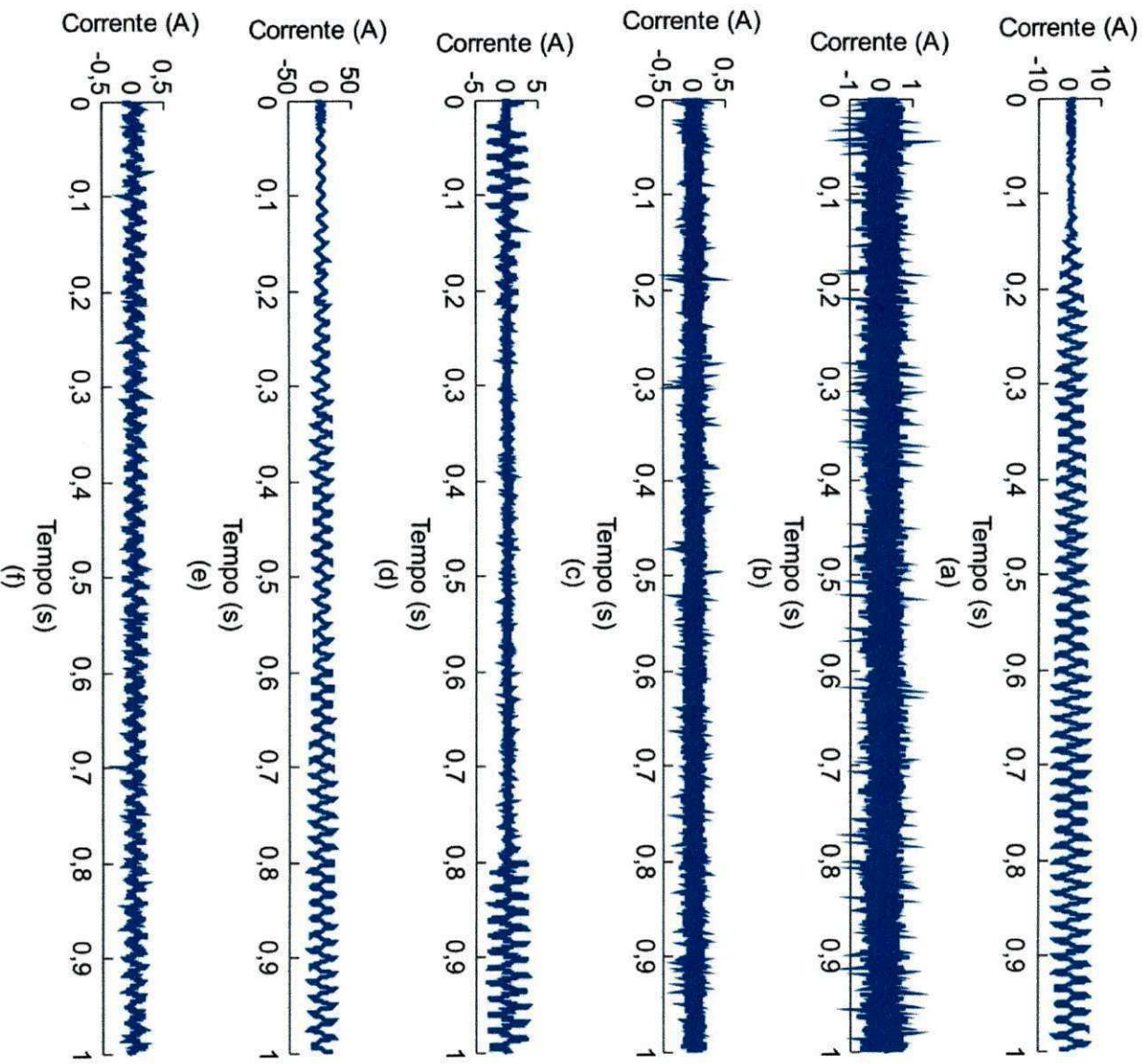
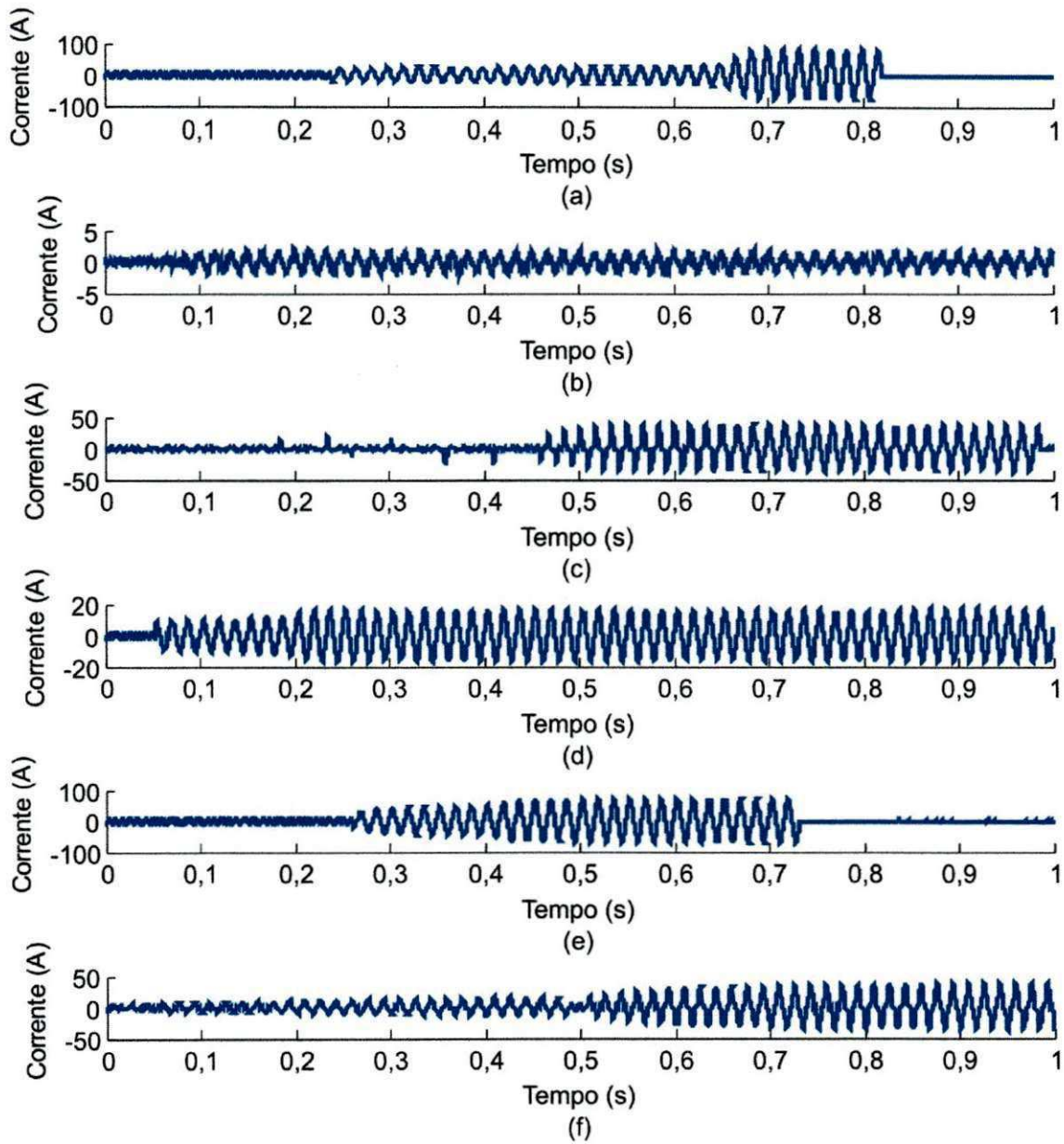


Figura 3.9 – Correntes de FAI em terrenos secos

(a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calcamento; (e) grama; (f) terra local.



**Figura 3.10 – Correntes de FAI em terrenos molhados:**

**(a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.**



Figura 3.11 – FAI ensaiada na grama molhada.

Os testes realizados foram muito importantes visto que se puderam constatar as modificações que a umidade e as diferentes superfícies de contato provocam nas correntes de FAI. Na Tabela 3.2 estão descritos os níveis de corrente de falta em cada tipo de superfície de contato ensaiada.

Tabela 3.2 – Níveis das correntes de falta.

<i>Superfície de contato</i>		<i>Corrente (A)</i>
<b>Grama</b>	<b>Seca</b>	< 60
	<b>Molhada</b>	< 90
<b>Calçamento</b>	<b>Seco</b>	< 10
	<b>Molhado</b>	< 20
<b>Brita</b>	<b>Seca</b>	-
	<b>Molhada</b>	< 50
<b>Asfalto</b>	<b>Seco</b>	-
	<b>Molhado</b>	< 20
<b>Areia</b>	<b>Seca</b>	< 10
	<b>Molhada</b>	< 50
<b>Solo local</b>	<b>Seca</b>	-
	<b>Molhada</b>	< 60

### 3.2 Modelagem do sistema de distribuição

Um alimentador de distribuição foi modelado para simulação das faltas. Foram necessárias informações sobre as características elétricas e espaciais do alimentador. A empresa forneceu o alimentador geo-referenciado, assim como, as cargas distribuídas ao longo dos transformadores. A modelagem do sistema foi feita, considerando:

- Linhas trifásicas não transpostas a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência;
- Trechos compostos por um único tipo de cabo: cabo 4 AWG;
- Cargas de pontos próximos ao longo do alimentador, agrupadas em uma única barra, resultando em um alimentador com 90 barras (Apêndice A - Figura A.1);
- Fator *skin* para os cabos de 0,33;
- Resistividade da terra de 350  $\Omega\text{m}$ ;
- Modelo de impedância constante para as cargas;
- Cargas modeladas como circuitos RL paralelos conectados entre cada fase de cada barra e a terra;
- Fator de potência médio de 0,955;
- Configuração do alimentador para obtenção dos parâmetros, conforme Apêndice A.

### 3.3 Modelagem da FAI

O modelo proposto simula as características de não-linearidade, assimetria, *buildup*, *shoulder* e intermitência. Baseado nos modelos propostos por NAM *et al.* (2001) e CHAN & YIBIN (1996), o modelo proposto faz o uso de duas resistências variantes no tempo (RVT), em série e controladas por TACS no ATP, além de uma chave simples controlada por TACS (CSCT), que foi acrescida de forma a dar início à falta e simular a descontinuidade da corrente de falta. Uma chave comum foi ligada a jusante do ponto de falta para simular o rompimento do condutor. Na Figura 3.12 é ilustrado o esquema do modelo proposto.

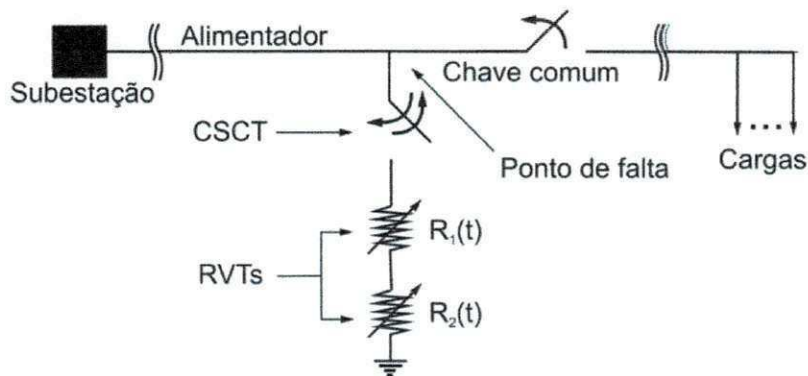


Figura 3.12 – Modelo utilizado para simular a FAI.

Para ajustar os parâmetros do modelo, formas de onda reais das tensões e correntes obtidas no local de aplicação de falta dos ensaios de campo foram usadas. Dentre as oscilografias obtidas nos ensaios em cada solo, apenas uma foi escolhida como referência para ser usada na parametrização do modelo computacional daquela superfície de contato.

O funcionamento da CSCT baseou-se em observações das oscilografias dos ensaios de FAI. Observou-se que nos casos em que ocorria intermitência da corrente de falta, o arco elétrico costumava cessar no zero da tensão e após alguns ciclos havia sua reignição próxima a um pico de tensão. Uma rotina na linguagem MODELS foi feita no sentido de simular esse comportamento, sendo possível configurar o número de ciclos até a reignição do arco elétrico.

Durante os ensaios de FAI, a ocorrência de intermitência foi predominante em dois tipos de solo: terra local e brita. Esse fato se explica pela característica própria da constituição de ambas as superfícies. A presença de partículas sólidas maiores, quando comparadas às encontradas nos outros solos, faz com que haja uma menor densidade dessas superfícies. O arco se forma por meio da umidade existente na dada superfície, se extinguindo por alguns ciclos devido às altas temperaturas que secam a área de contato, eliminando o caminho condutor com a terra. A reignição é dada quando o condutor encontra outro ponto de contato suficientemente úmido para a formação do arco, ou quando a umidade em volta do primeiro ponto de contato do condutor se difunde, voltando a umedecer a região. Na Figura 3.13 está apresentado um registro oscilográfico, colhido durante os ensaios de FAI realizados, no qual é possível observar que o arco se estabelece durante a passagem por um pico de tensão e depois volta a se extinguir na passagem pelo zero de tensão.

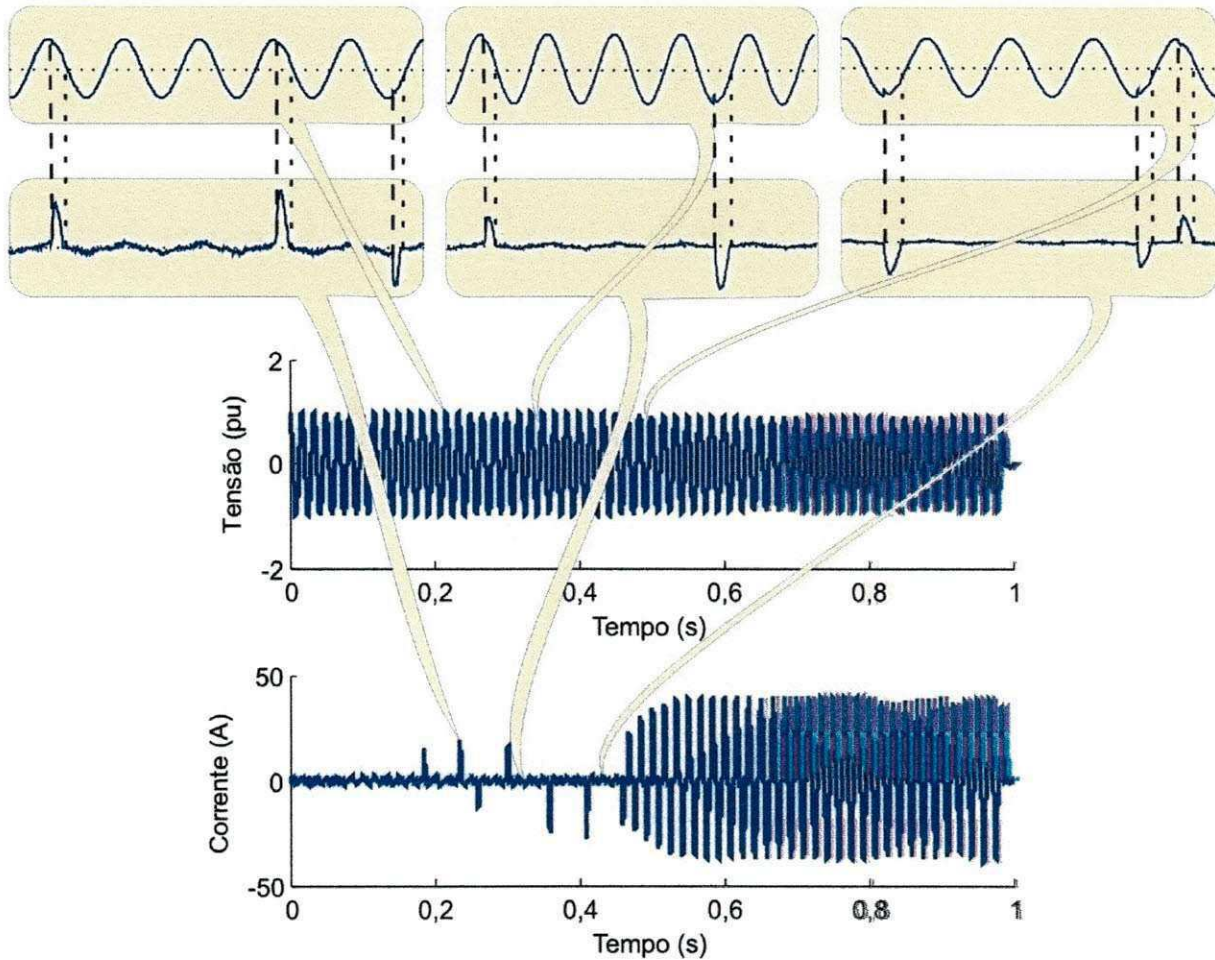
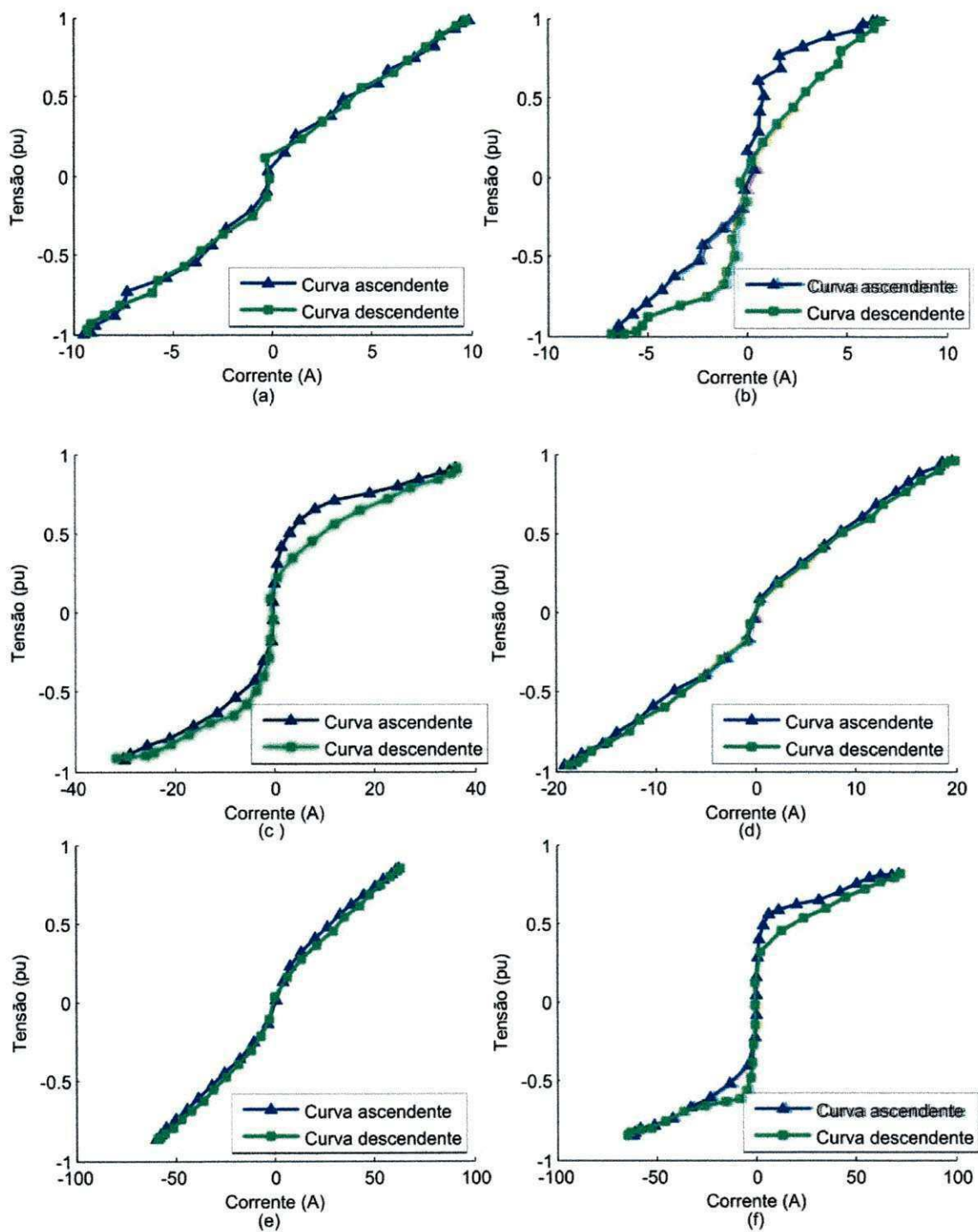


Figura 3.13 – Detalhamento da intermitência observada em correntes de FAI.

Os valores de  $R_1$  foram ajustados considerando apenas valores correspondentes a um ciclo do regime permanente na condição de FAI. A escolha do ciclo foi feita a partir do momento que não houve mais variações consideráveis das amplitudes dos ciclos subsequentes (NAM *et al.*, 2001), ou seja, no regime permanente de falta (RPF). Além disso, para simplificar a implementação do modelo no ATP, apenas 32 amostras do ciclo selecionado foram consideradas (Figura 3.14). Essa resistência simula as características de não-linearidade e assimetria entre os semiciclos da corrente de falta. Essas características ocorrem durante todo o período de falta.





**Figura 3.14 – Curva  $v \times i$  correspondente a um ciclo do regime permanente de uma FAI:  
 (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.**

A corrente correspondente a uma tensão no intervalo de falta foi calculada da seguinte forma (NAM *et al.*, 2001)

$$i(t) = \begin{cases} i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times \Delta v, & \text{se } v_n < v(t) < v_{n+1}, \\ i_n, & \text{se } v(t) = v_n \end{cases} \quad (3.1)$$

sendo:  $v(t)$  a tensão no alimentador no ponto de falta;  $\Delta v = v(t) - v_n$ ;  $v_n$  e  $i_n$  tensão e corrente da curva característica na amostra  $n$ , respectivamente.

Como para as curvas da Figura 3.14 cada valor de tensão tem dois valores correspondentes de corrente, um artifício teve que ser usado para que houvesse uma correta distinção na escolha dos valores a serem usados na Equação 3.1. A curva total foi dividida na porção correspondente ao crescimento da tensão e corrente (ascendente) e na porção destinada à sua diminuição (descendente). O algoritmo implementado em linguagem MODELS distingue a curva correta a ser usada 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.

A resistência  $R_1$  (razão entre a tensão e a corrente em um ciclo do regime permanente na condição de uma FAI) foi estimada como segue (NAM *et al.*, 2001)

$$R_1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} \times (v(t) - v_n)} \quad (3.2)$$

Como os fenômenos de *buildup* e *shoulder* estão relacionados com a variação da amplitude da corrente de falta, a resistência  $R_2$  foi calculada considerando apenas os máximos valores absolutos da tensão e corrente. Segundo URIARTE (2003), podem-se considerar duas curvas para simular as características relacionadas com a amplitude da corrente de FAI em seus primeiros ciclos (Figura 3.15). A primeira curva, além de considerar o *buildup*, também leva em consideração intervalos de constância no crescimento da corrente (*shoulder*). Neste trabalho foi utilizada uma função polinomial para aproximação dos pontos obtidos nos ensaios, simulando, conseqüentemente, a característica de *shoulder*.

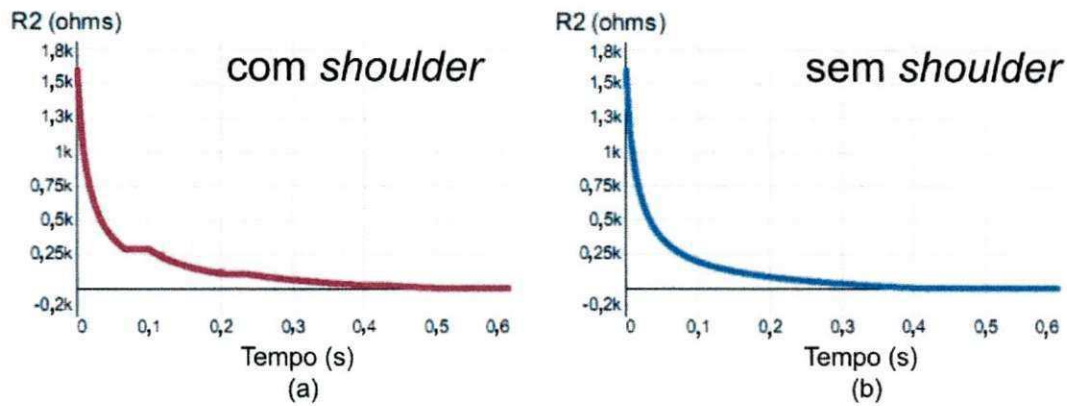


Figura 3.15 – Resistência  $R_2$  em função do tempo:

(a) considerando-se *shoulder*; (b) desconsiderando-se *shoulder* (URIARTE, 2003).

Considerando-se  $\tau_k$  o instante em que a tensão e a corrente alcançam seus valores máximos, no  $k$ -ésimo semiciclo, o processo de cálculo de  $R_2$  no calçamento é ilustrado na Figura 3.16 e descrito a seguir.

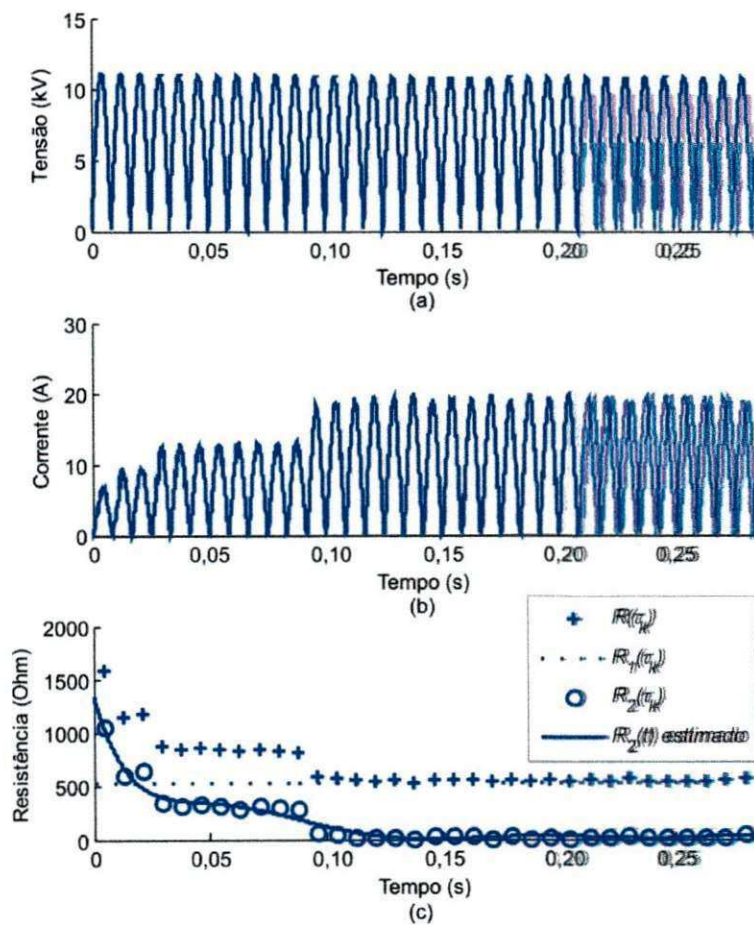


Figura 3.16 – Processo de cálculo de  $R_2$  no calçamento: (a) Valor absoluto da tensão referente à FAI; (b) Valor absoluto da corrente referente à FAI; (c) Valor da resistência em relação ao tempo.

Dividindo-se os valores de  $v(\tau_k)$  por  $i(\tau_k)$  obtém-se o comportamento da resistência total  $R(\tau_k)$ , que é a soma de  $R_1(\tau_k)$  e  $R_2(\tau_k)$ . Nas FAI, as correntes têm características predominantemente resistivas, podendo ser consideradas em fase com as tensões (NAM *et al.*, 2001).

Assumindo que as características de não-linearidade e assimetria da corrente de falta são as mesmas em todos os ciclos, pode-se considerar  $R_1(\tau_k)$  aproximadamente constante para todo o restante dos ciclos no período de falta. Subtraindo-se  $R_1(\tau_k)$  de  $R(\tau_k)$ , obtém-se  $R_2(\tau_k)$ .

Para se considerar os efeitos de *buildup* e *shoulder* na resistência  $R_2(\tau_k)$ , escolheu-se fazer uma regressão polinomial de acordo com o seguinte modelo

$$R_2(t) = \begin{cases} a_n \cdot t^n + a_{n-1} \cdot t^{n-1} + \dots + a_1 \cdot t + a_0, & \text{se } t < RPF \\ 10^{-5}, & \text{se } t \geq RPF \end{cases} \quad (3.3)$$

no qual  $n$  é o grau da função e os parâmetros  $a_k$  são determinados levando-se em consideração o método dos mínimos quadrados.

Durante as simulações, após o período que a corrente tem variações significativas em sua amplitude, a equação que rege o comportamento da resistência  $R_2$  é substituída por um valor constante próximo a zero, permitindo, desse modo, que apenas  $R_1$  tenha influência no RPF.

Para se ter um parâmetro da aproximação proporcionada pelas equações de  $R_2(t)$  frente aos pontos medidos  $R_2(\tau_k)$  foi escolhido o coeficiente de determinação  $R^2$ . Esse coeficiente é normalmente empregado em situações práticas como as apresentadas neste caso, uma vez que possibilita análises mais confiáveis que possíveis inspeções visuais realizadas nos gráficos de resistência (THE MATHWORKS, INC., 2007).

O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida da capacidade que um modelo ajustado para um conjunto de parâmetros possui em representar um determinado conjunto de dados (LIRA, 2008). Ele é definido como sendo 1 (um) menos a razão entre a soma quadrática dos erros entre sinais medidos e calculados (SSE) e a soma dos erros quadráticos com relação à média do sinal medido (SST), de acordo com as seguintes equações (THE MATHWORKS, INC., 2007; SPIEGEL *et al.*, 2001):

$$SSE = \sum_{j=1}^m [r_{med}(j) - r_{est}(j)]^2, \quad (3.4)$$

$$SST = \sum_{j=1}^m [r_{med}(j) - \bar{r}_{med}]^2, \quad (3.5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (3.6)$$

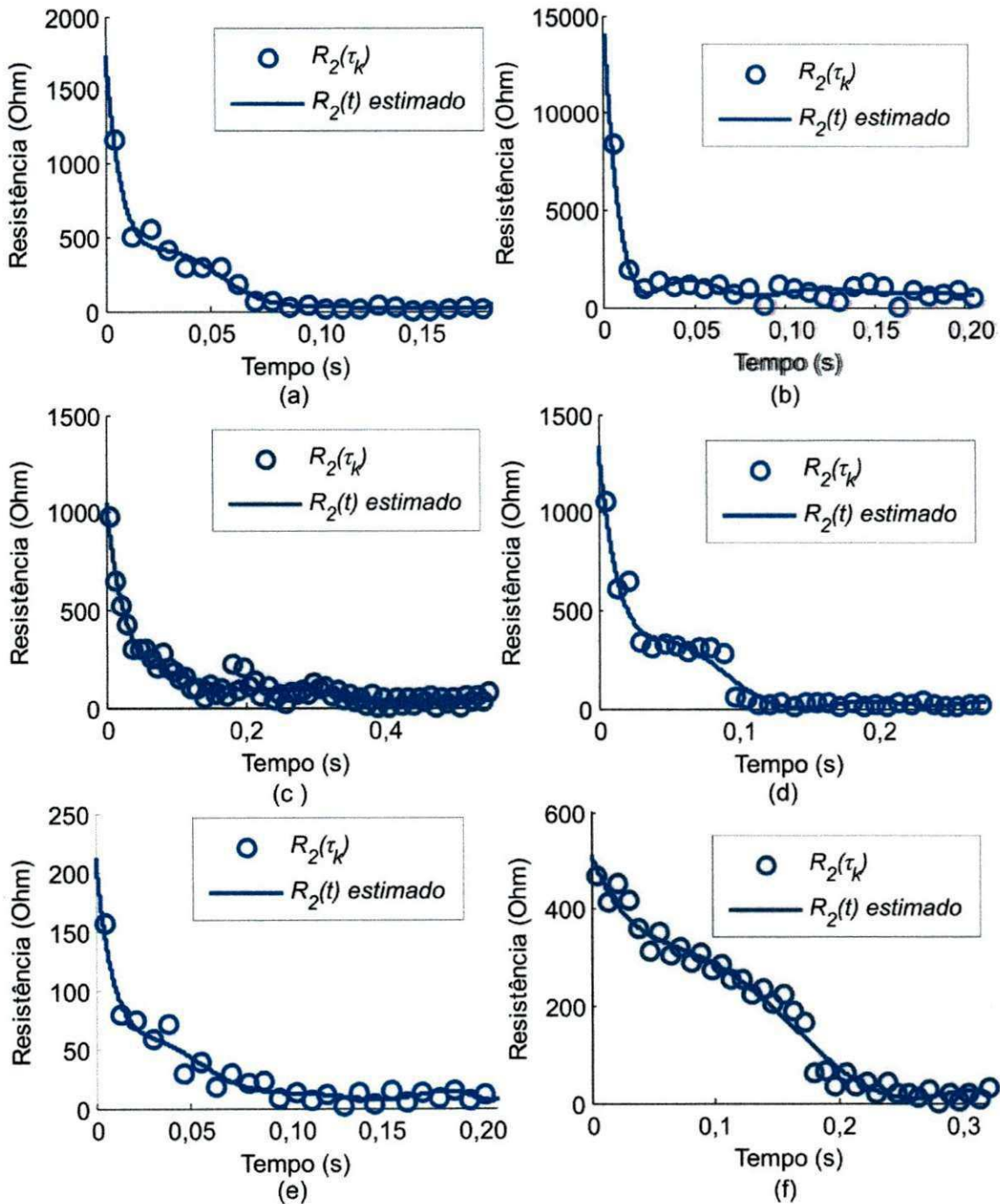
em que,  $r_{med}(j)$  e  $r_{est}(j)$  são os valores medidos e estimados das resistências, respectivamente;  $m$  é o número de amostras; e  $\bar{r}_{med}$  é o valor médio das resistências medidas.

Se  $SSE$  for pequeno, ou seja, os valores da resistência estimados pela função polinomial forem próximos dos valores de resistência medidos, o coeficiente de determinação  $R^2$  se aproximará de 1 (um), indicando, portanto, uma boa concordância entre as formas de onda dos sinais de resistência estimados e medidos (LIRA, 2008).

Na Tabela 3.3 são apresentados os parâmetros das funções polinomiais que devem estimar os valores das resistências medidos para cada tipo de solo. Foram utilizadas funções de até oitavo grau. Além dos parâmetros, o coeficiente de determinação  $R^2$  é apresentado para possibilitar a verificação da qualidade dos ajustes realizados. Na Figura 3.17 são apresentadas as formas de onda das funções polinomiais encontradas para cada tipo de superfície de contato.

**Tabela 3.3 – Parâmetros das funções polinomiais de  $R_2$  e a qualidade de sua aproximação.**

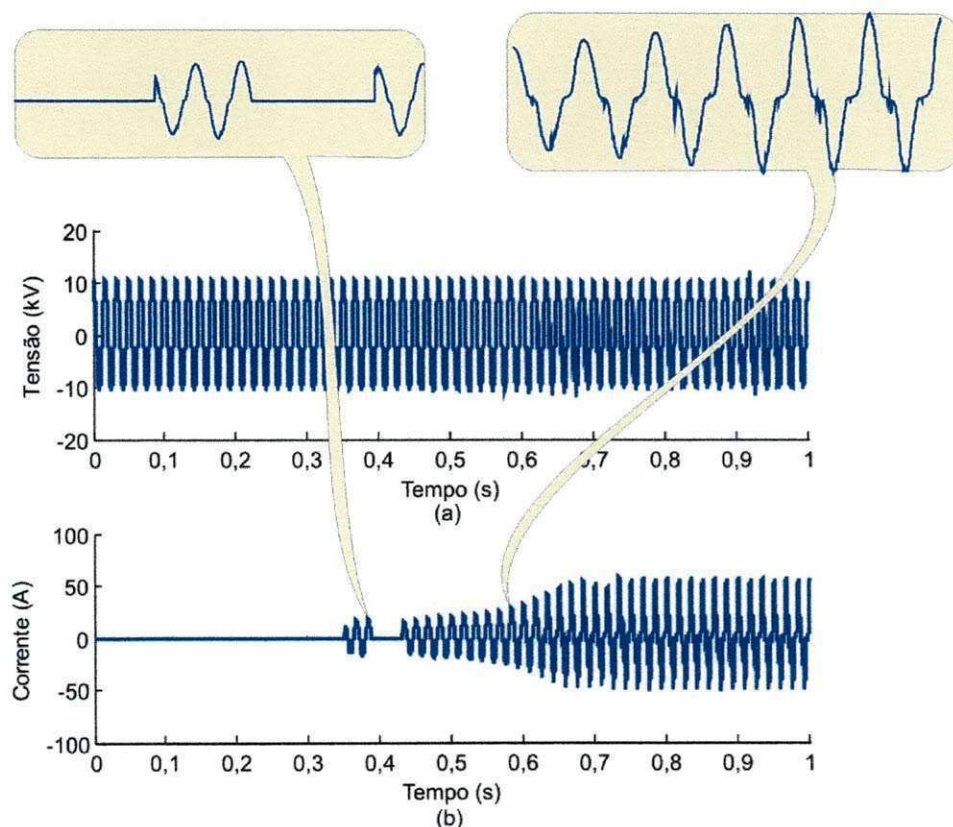
<i>Superfície</i>	$a_8$	$a_7$	$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$R^2$
<b>Areia</b>	6,91e+11	-5,77e+11	2,01e+11	-3,79e+10	4,14e+9	-2,65e+8	9,45e+6	-1,74e+5	1,73e+3	0,978
<b>Asfalto</b>	3,05e+12	-2,86e+12	1,12e+12	-2,27e+11	2,92e+10	-2,11e+9	8,49e+7	-1,71e+6	1,41e+4	0,946
<b>Brita</b>	7,08e+7	-1,71e+8	1,70e+8	-9,12e+7	2,84e+7	-5,25e+6	5,65e+5	-3,35e+4	1,05e+3	0,944
<b>Calçamento</b>	4,75e+9	-7,95e+9	5,30e+9	-1,84e+9	3,63e+8	-4,06e+7	2,47e+6	-7,75e+4	1,34e+3	0,963
<b>Grama</b>	3,63e+10	-334e+10	1,28e+10	-2,61e+9	3,09e+8	-2,13e+7	8,27e+5	-1,72e+4	2,12e+2	0,954
<b>Solo local</b>	0	0	0	-3,17e+6	2,75e+6	-8,32e+5	1,05e+5	-6,89e+3	5,13e+2	0,977



**Figura 3.17 – Curva correspondente à função polinomial estimada para a resistência  $R_2$ :**  
**(a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) calçamento; (e) grama; (f) terra local.**

Todo o processo de modelagem foi feito para os seis tipos de superfícies, dos quais, se tinham dados reais obtidos nos ensaios de campo (grama, calçamento, asfalto, areia, brita e terra local). As características de *buildup*, *shoulder*, não-linearidade, assimetria e intermitência da corrente de falta foram consideradas nas simulações. Na Figura 3.18 está

ilustrada a tensão e corrente de uma FAI simulada considerando-se os dados obtidos nos ensaios em terra local.



**Figura 3.18 – Simulação de uma FAI em terra local: (a) tensão; (b) corrente.**

Quanto maior for a abrangência de características de modelos simulados frente aos fenômenos ocorridos no sistema elétrico, maior será a confiabilidade de algoritmos de diagnóstico baseados nessas simulações. O modelo apresentado contempla as principais características de FAI, mostrando-se com grande potencial no auxílio de futuros trabalhos que tratem da detecção e localização desse tipo de falta.

O resultado final obtido pelo modelo de FAI, basicamente, se traduz na forma de onda da corrente de falta. Isso se deve ao fato desse tipo de falta, na maioria dos casos, não afetar fortemente os níveis de tensão ao longo do alimentador (EPRI, 1982). Então, para avaliar o modelo, foram feitas comparações entre as correntes de FAI simuladas e as correntes reais medidas. Da Figura 3.19 à Figura 3.24 são apresentadas as correntes de FAI simuladas e medidas nas diversas superfícies de contato escolhidas.

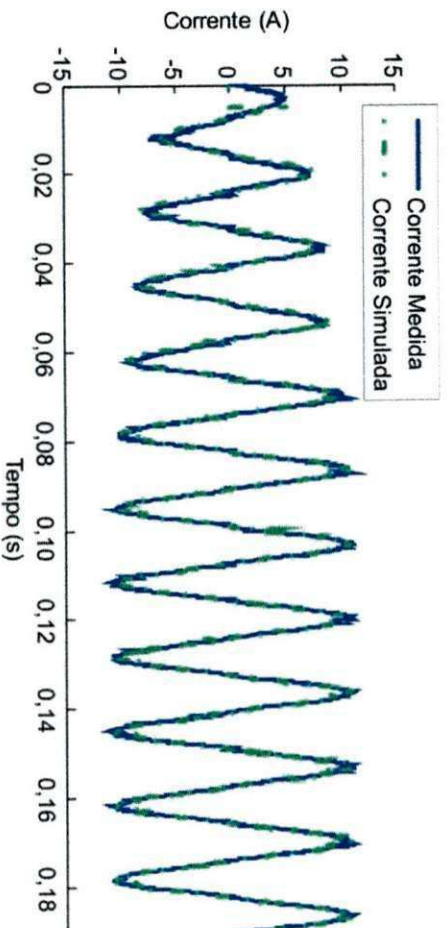


Figura 3.19 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na areia.

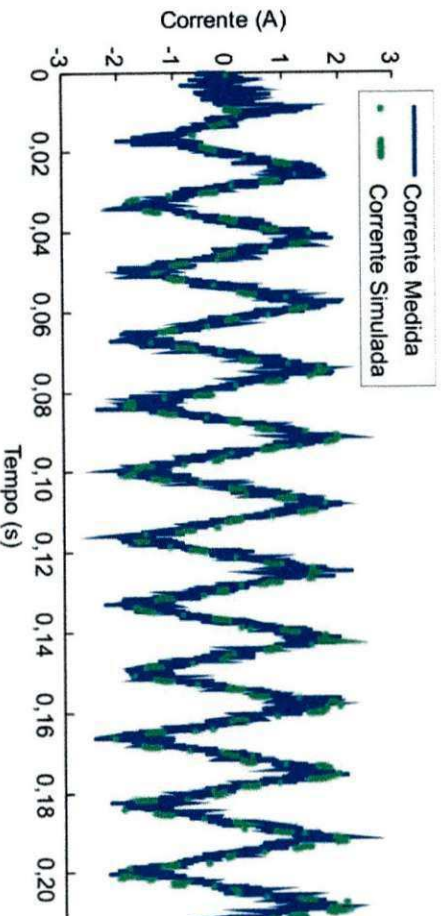


Figura 3.20 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida no asfalto.

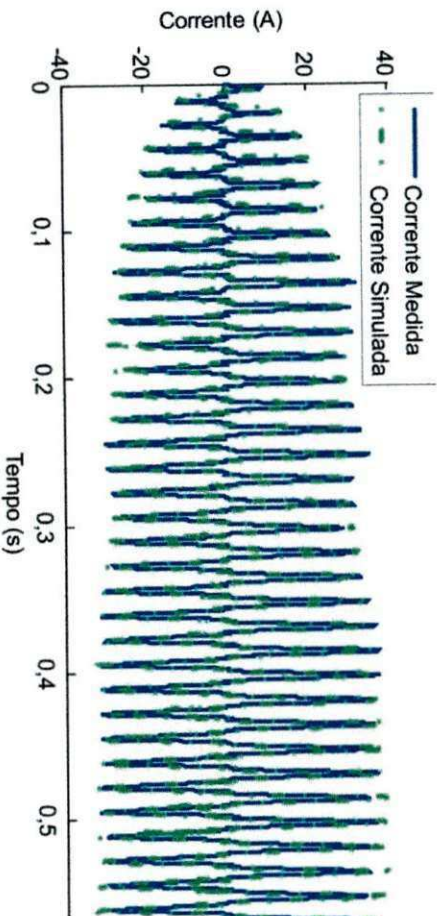


Figura 3.21 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na brita.



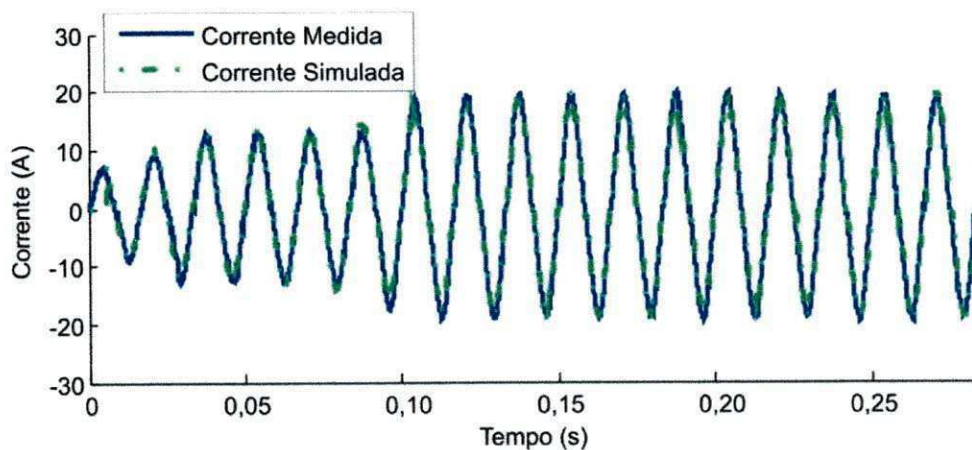


Figura 3.22 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida no calçamento.

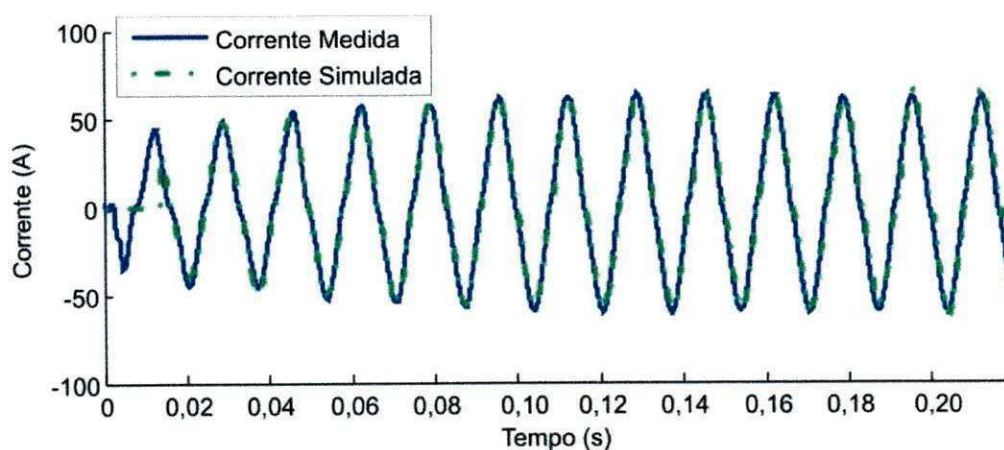


Figura 3.23 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na grama.

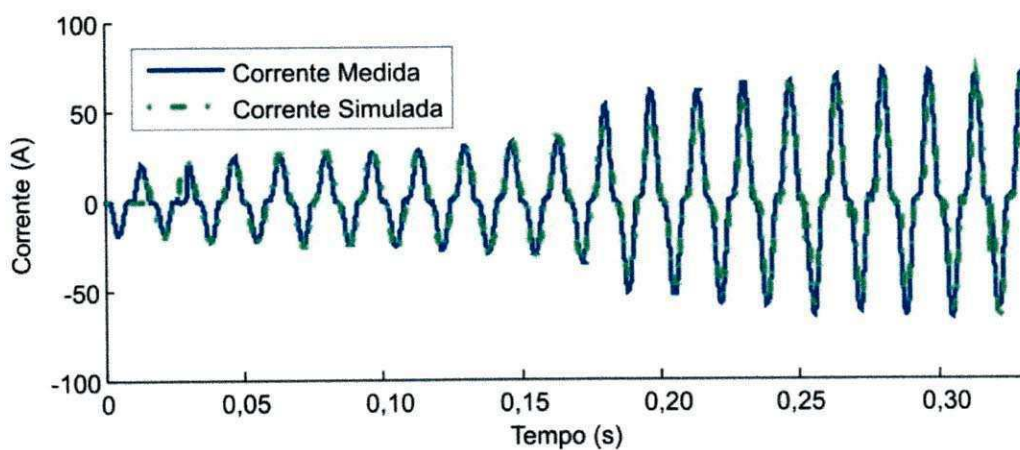


Figura 3.24 – Comparação entre as correntes de FAI simulada e medida na terra local.

O coeficiente de determinação  $R^2$  foi calculado para cada caso, a fim de se ter uma melhor compreensão da proximidade entre os dados reais e os simulados. Na Tabela 3.4 estão apresentados os valores de  $R^2$ . A maioria dos valores ficou acima de 0,92, demonstrando que o modelo de FAI se aproxima muito dos valores medidos nos ensaios. No caso do asfalto, que obteve o menor valor de  $R^2$  entre os estudados, se destaca a ocorrência de ruídos de alta frequência interferirem na medição. Tais ruídos estiveram presentes nas outras medições, mas não chegaram a interferir tão fortemente nas comparações devido às correntes de falta terem amplitudes bem superiores às dos ruídos, o que não ocorreu com o asfalto.

**Tabela 3.4 – Qualidade da aproximação do modelo de FAI frente a valores reais medidos.**

<i>Superfície</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Areia	0,9797
Asfalto	0,8279
Brita	0,9227
Calçamento	0,9884
Gramma	0,9632
Solo local	0,9439

## Capítulo 4

### Construção da Base de Dados

Para a geração de uma base de dados simulada de forma automática, foi utilizada uma metodologia para construção de base de dados baseada no método proposto por SOUZA *et al.* (2005), que propõe a execução do seguinte algoritmo:

- Seleção do sistema elétrico a ser implementado;
- Seleção do *software* para simulação das faltas;
- Modelagem do sistema elétrico;
- Seleção das variáveis de simulação das FAI;
- Simulação das FAI.

As variáveis de simulação escolhidas referentes às FAI são: superfície de contato, local de aplicação da FAI, ângulo de incidência de FAI e condição de operação do sistema.

Conforme o Capítulo 3.2, o alimentador de Boa Vista onde foram realizados os ensaios de FAI foi escolhido para ser modelado e o programa ATP foi utilizado para simular as diversas situações de falta no sistema.

As condições de carregamento das cargas variaram entre 25 e 100% em passos de 25% da capacidade instalada. Nove entre as noventa barras do sistema foram escolhidas como locais de falta. Um resumo das variáveis de simulação é apresentado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Variáveis de simulação.**

Variáveis de simulação	Especificação
Tipo de falta	AT
Carregamento (%)	25, 50, 75, 100
Local de falta (Barra)	10, 23, 30, 44, 49, 56, 63, 68, 90
Intermitência	Sim ou não
Superfície de contato	Asfalto, areia, brita, calçamento, grama e terra local

No ATP, os parâmetros referentes às variáveis de simulação, são ajustados no campo do arquivo de entrada (.atp) de acordo com as variáveis específicas para cada cenário de falta.

Como os dados fornecidos pelo ATP não obedecem à formatação IEEE COMTRADE (Apêndice B), fez-se o uso da rotina MODELS do ATP. Para isso, adotou-se a seguinte metodologia:

- Extraíram-se os valores de tensão e corrente fornecidos pelo ATP no início do alimentador, na frequência de amostragem de 15360 Hz, que é a mesma de alguns RDP encontrados no mercado;
- Criou-se um arquivo com os dados convertidos para um formato similar ao IEEE COMTRADE.

Apesar de já estarem em um formato similar ao IEEE COMTRADE, os dados, que devem ser inteiros, são escritos pela MODELS como variáveis reais.

A automatização propriamente dita iniciou-se com a programação do conversor, o qual consiste numa rotina em C++ para ler os dados em números reais, convertê-los em números inteiros e escrevê-los em um novo arquivo, agora no formato IEEE COMTRADE.

O procedimento desenvolvido fornece os dados correspondentes a um tipo de falta específico. Para construir a base de dados é necessário unir as diversas situações de falta, as quais são obtidas a partir da combinação das variáveis de simulação. O instante de tempo no qual cada chave envolvida com o evento é fechada concorda com o ângulo de incidência escolhido.

Para tornar o processo de construção da base de dados ainda mais prático, concentram-se as variáveis de cada caso no início do arquivo (.atp), fazendo-se uso da função \$PARAMETER do ATP. Com esta função é possível transformar as constantes de cada caso em variáveis de simulação.

Mediante a criação de um arquivo para processamento em lote (.bat), a simulação de todos os casos definidos nos arquivos .atp é realizada automaticamente. O arquivo .bat tem como objetivos: simular cada caso; apagar os arquivos de saída do ATP que não são de interesse da aplicação em questão; executar o programa em C++ convertendo, assim, os arquivos de dados fornecidos pelo ATP em um arquivo .dat no padrão IEEE COMTRADE e renomear estes arquivos de saída de forma padronizada.

Uma nomenclatura específica foi estabelecida para cada caso, de forma que a partir dela fosse possível saber todas as condições ocorridas no cenário de falta. Pode-se tomar como exemplo

#### RDP(S)\_fAT\_BAR10\_ARE\_C25\_a0.

Neste caso, a oscilografia da falta foi obtida a partir de um RDP localizado na saída da subestação, com o registro de uma falta entre a fase A e a terra, na barra 10, tendo como superfície de contato a areia, com um carregamento de 25% da carga instalada e com ângulo de incidência de 0°. Esse registro é apresentado na Figura 4.1.

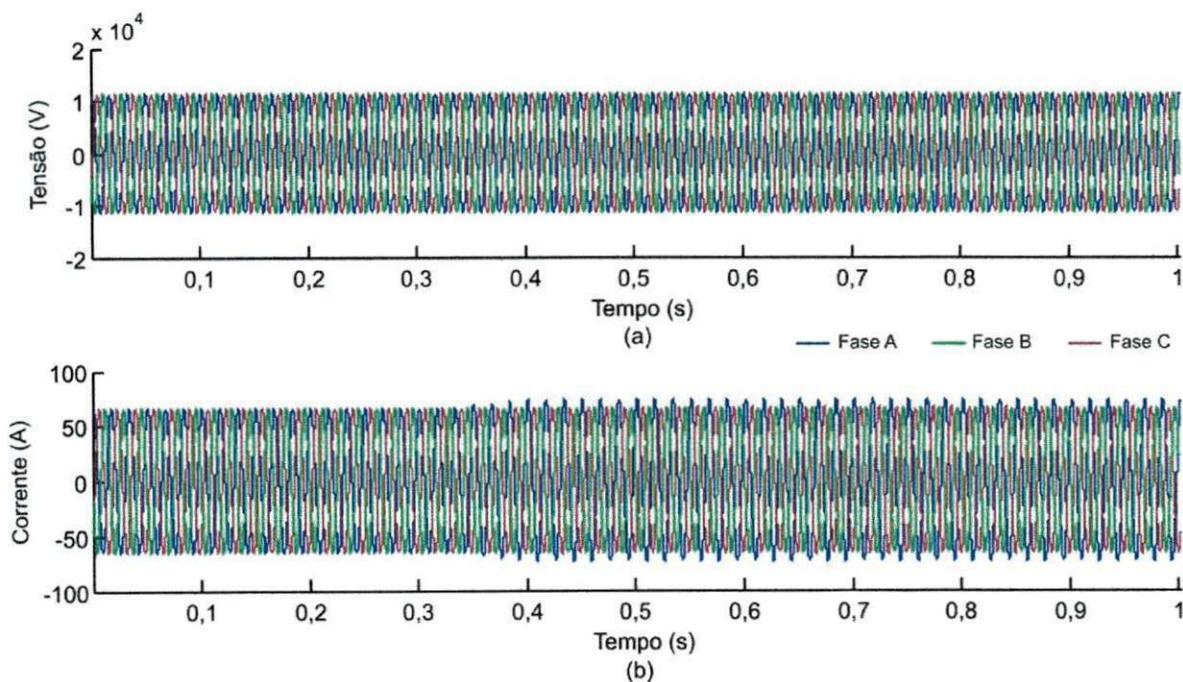


Figura 4.1 – Registro RDP(S)\_fAT\_BAR10\_ARE\_C25\_a0; (a) tensão; (b) corrente.

Baseando-se na rotina \$PARAMETER, programou-se uma rotina em MATLAB® para gerar todas as configurações de falta desejadas. Para isso, a rotina:

- Escreve os arquivos .atp de todas as combinações possíveis das variáveis (base de registros);
- Escreve o arquivo .bat, seguindo uma nomenclatura sistemática para os arquivos;
- Escreve os arquivos .cfg do padrão IEEE COMTRADE, conforme os dados da base de dados a ser construída.

Na Figura 4.2 está apresentado de forma ilustrativa o processo de construção da base de dados.

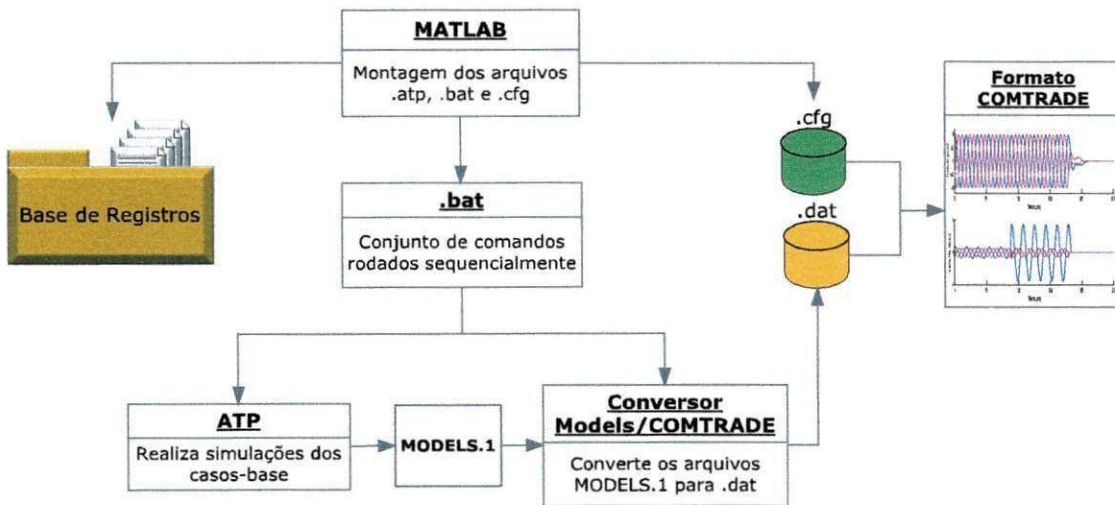


Figura 4.2 – Processo de construção da base de dados.

A base de dados foi dividida em seis partes, cada uma com o nome da superfície de contato usada em suas simulações. Na Tabela 4.2 é apresentada a quantidade de registros de cada base e do total.

Tabela 4.2 – Grandezas das bases de dados.

Base de dados	Superfície de contato	Número de registros
I	Areia	72
II	Asfalto	72
III	Brita	72
IV	Calçamento	72
V	Grama	72
VI	Terra local	72
Total		432

O processo de construção manual de uma base de dados é difícil, demorado e susceptível a erros. Foi apresentada uma metodologia de automação desse processo, tornando esta construção rápida, eficiente e livre de erros de digitação.

Os dados obtidos nos ensaios de FAI foram essenciais para a correta parametrização do modelo da falta, adequando-o a cada diferente tipo de superfície de contato, e, conseqüentemente, tornando os registros contidos na base mais próximos ao fenômeno real. A base de dados de FAI proposta permite o desenvolvimento de novos métodos de diagnóstico além da avaliação do desempenho dos já existentes.

## Capítulo 5

# Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

Sistemas especialistas são de extrema versatilidade e vasto uso no campo de diagnóstico de faltas. No entanto, a necessidade de bases de dados que realmente sejam representativas aos fenômenos estudados dificulta a sua utilização, visto que é necessário um grande volume de dados para se ter confiabilidade no resultado final.

O processo de construção de uma base de dados manual é trabalhoso e demorado, além de susceptível a erros. As informações contidas nesse trabalho possibilitam a automatização da geração dessa base de forma rápida, eficiente e sem erros.

A qualidade da base de dados está diretamente relacionada com os modelos usados para a representação do fenômeno estudado. O modelo desenvolvido considera as principais características das FAI, como: *buildup*, *shoulder*, assimetria, não-linearidade e intermitência. O uso da chave controlada por TACS para simulação de intermitência acrescentou, a um modelo já conhecido, mais uma característica de FAI, tornando-o mais representativo.

A realização de experimentos possibilitou um melhor conhecimento das características das FAI. Tais características variam em incidência e intensidade dentre as diferentes superfícies de contato testadas. Consequentemente, diferentes parâmetros foram



considerados para a modelagem de FAI levando-se em consideração as superfícies de contato.

Este é apenas um passo no processo de criação de novos algoritmos de diagnóstico de faltas de alta impedância. Pode-se observar quão complexa é a missão de criar uma metodologia segura e viável para a identificação desse tipo de falha.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

1. Utilização da linguagem C para incorporar as rotinas desenvolvidas (até então na linguagem MODELS) às simulações digitais em tempo real utilizando o RTDS<sup>TM</sup>, tornando possível uma avaliação de dispositivos reais de proteção com relação às FAI simuladas, fazendo-se uso das saídas analógicas disponíveis neste equipamento;
2. Consideração da aleatoriedade inerente nas FAI pelo modelo proposto. Essa aleatoriedade incidiria principalmente no número de ciclos entre a ignição e extinção do arco elétrico (intermitência).
3. Criação de um método de diagnóstico de FAI, tomando como base os registros oriundos de bases de dados criadas a partir do modelo sugerido nesta dissertação;
4. Implementação de um algoritmo de diagnóstico em um *hardware* (por exemplo, em um processador digital de sinais) para monitoramento de transitórios no sistema e localização automática de faltas cuja avaliação pode ser realizada por meio de simulações em tempo real via RTDS<sup>TM</sup>;
5. Desenvolvimento de um sistema físico para diagnóstico de FAI, consistindo num módulo que receba todos os dispositivos e equipamentos necessários para aquisição de dados de tensão do secundário de transformadores de corrente e de potencial, para filtragem dos sinais, tratamento de dados, para apresentação do diagnóstico da falta e, por fim, para proteção dos dispositivos contra condições climáticas adversas e contra interferências eletromagnéticas, possibilitando a aplicação do dispositivo em diferentes ambientes sem que o seu funcionamento seja comprometido.

## Referências Bibliográficas

- ADAMIAK, M.; WESTER, C.; THAKUR, M. & JENSEN, C., "High Impedance Fault Detection on Distribution Feeders", último acesso em 21 de Julho de 2011 às 10h, [http://www.geindustrial.com/indsys/pm/pr/hiz\\_fault\\_dist.pdf](http://www.geindustrial.com/indsys/pm/pr/hiz_fault_dist.pdf)
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulos 1 ao 8*, 2011.
- ANEEL. [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) último acesso em 15 de maio de 2011 às 14h.
- 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.
- COSTA, F. B.; LIRA, G. R. S.; SANTOS, W. C.; SILVA, J. A. C. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. & PAES JR, M. R. C.; "High Impedance Fault Detection". *21st International Conference On Electricity Distribution*, 2011, Frankfurt.
- EMANUEL A. E.; GULACHENSKI E. M.; CYGANXKI D.; ORR A. J. & SHILLER S. "High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.5, n. 2, pp. 676-686, Abril 1990.
- EPRI. *EPRI REPORT. Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders*. Palo Alto, 1982.
- FONTAN, D. M. S. "Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando um algoritmo evolutivo". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2006.
- GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M. & LUBKEMAN, D. L. "A fault location technique for rural distribution feeders". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, n. 6, pp. 1170-1175, Novembro/Dezembro 1993.
- JEERINGS D. I. & LINDERS J. R., "Ground resistance-revisited", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, n. 2, pp. 949-956, Abril 1989.

- KAUFMANN, R. H. & PAGE, J. C. "Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems – nature of the problem". *AIEE Transactions on Power Apparatus Systems*, v. 79, Dezembro de 1960.
- LAZKANO, A.; RUIZ, J.; ARAMENDI, E. & LETURIONDO, L. A. "A new approach to high impedance fault detection using wavelet packet analysis". *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference*, Vol.3 pp. 1005 –1010, 2000.
- LEUVEN EMTP CENTER. ATP – Alternative Transient Program – Rule Book. Herverlee, Belgium, 1987.
- LIRA, G. R. S., "Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Pára-Raios de Óxido de Zinco". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2008.
- MORETO, M. "Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.
- 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, pp. 1175-1180.
- NAKAGOMI, R. M. "Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição". Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2006.
- SEDIGUI, A. R.; HAGHIFAM, M. R.; MALIK, O. P. & GHASSEMIAN, M. H. "High Impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, 2005.
- SHARAF, A. M. & WANG, G. "High impedance fault detection using feature-pattern based relaying". *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003*. Vol. 1. Dallas.
- SOUZA B. A. "Distribuição de energia elétrica" – Apostila – Universidade Federal da Paraíba – 1997.
- SOUZA B. A.; BRITO N. S. D.; NEVES W.; DANTAS K. M. & FONTES A. V. "Construção automática de bases de dados – Uma experiência de P&D entre CHESF e a UFCG". *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Outubro de 2005, Curitiba, Brasil.

- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J. & SRINIVASAN, R. A. "Probability and Statistics".  
New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- THE MATHWORKS, INC. "Curve Fitting Toolbox User's Guide". [S.l.], 2007.
- URIARTE, F. M. "Modeling, Detection, And Localization of High-Impedance Faults In  
Low-Voltage Distribution Feeders". Dissertação de Mestrado. Faculty of the Virginia  
Tech Polytechnic Institute and State University. 2003.
- YANG, M. T.; GUAN, J. L. & GU, J. C. "High impedance faults detection technique  
based on wavelet transform". *International Journal of Electrical, Computer and  
Systems Engineering*, vol. 1, 2007.
- YIBIN X. & CHAN D.. "An improved model of high impedance arcing fault in  
distribution systems". *Proc of Australasian Universities Power Engineering Conference  
(AUPEC) 96, Australia*, Vol. 2. Outubro de 1996.
- YU, D. C. & KHAN, S. H. "An adaptive high and low impedance fault detection method,"  
*IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, n. 4, pp. 1812–1821, Outubro 1994.

## Apêndice A

### Configuração do alimentador de Boa Vista para efeito de simulação

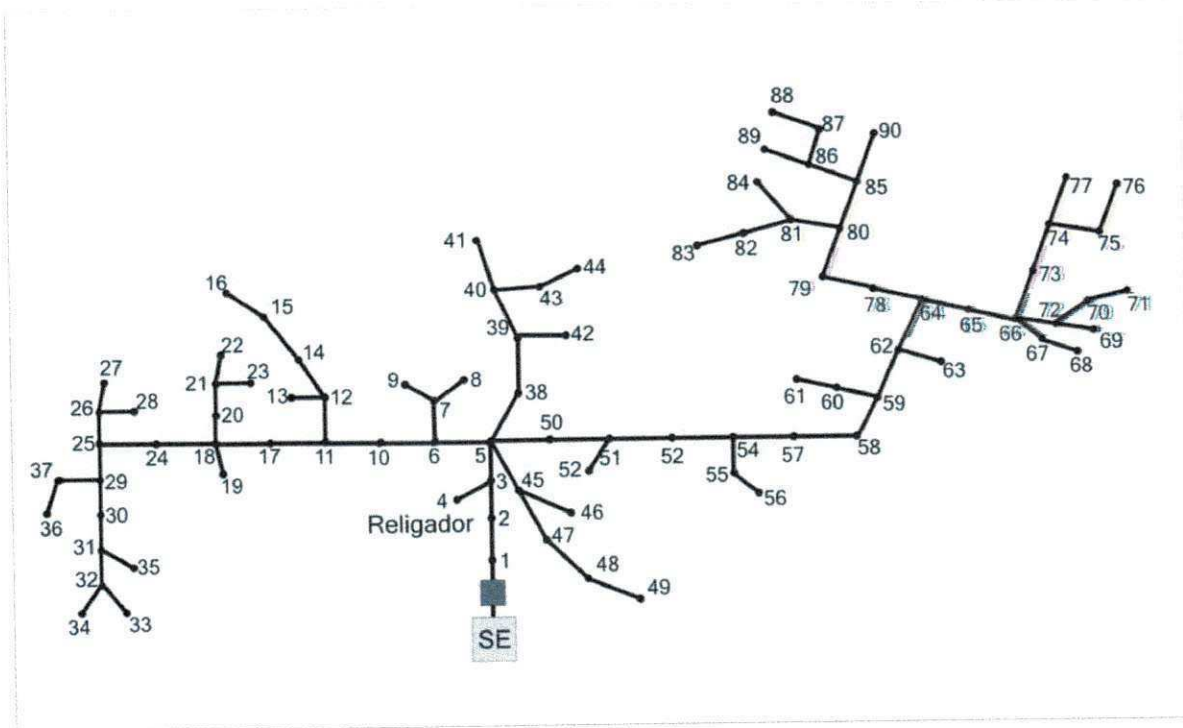


Figura A.1 – Diagrama unifilar do modelo do alimentador escolhido.

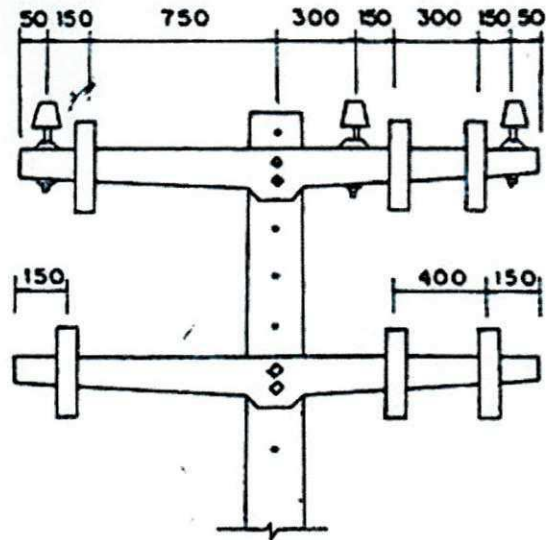


Figura A.2 – Configuração das cruzetas.

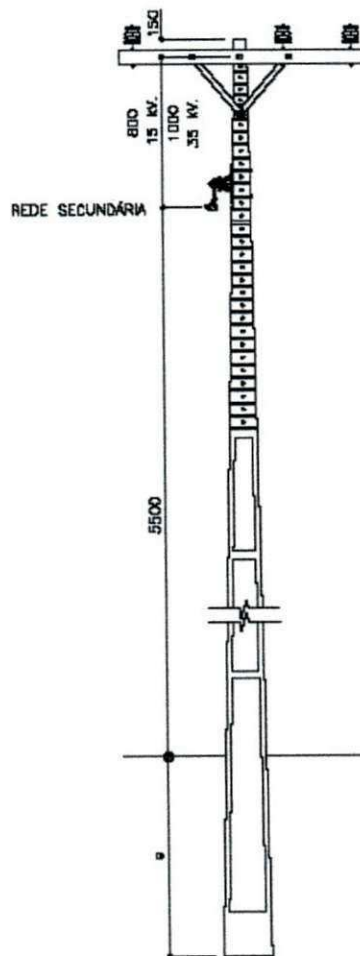


Figura A.3 – Estrutura dos postes.

Tabela A.1 – Comprimentos dos trechos do alimentador escolhido.

DE	PARA	Comprimento (m)	DE	PARA	Comprimento (m)
SE BVA	1	430	54	57	2000
1	2	430	57	58	2000
2	3	900	58	59	1200
3	4	1900	59	60	2000
3	5	1500	60	61	2000
5	6	1000	59	62	1100
5	45	2000	62	63	2500
5	50	1300	62	64	1100
5	38	2000	64	65	2000
6	7	2000	65	66	2000
7	8	1000	66	67	1400
7	9	1000	67	68	1400
6	10	1500	66	72	1200
10	11	1500	72	69	1200
11	12	1500	72	70	1800
12	13	1500	70	71	1800
12	14	1800	66	73	2500
14	15	1800	73	74	2500
15	16	2000	74	75	2000
11	17	1700	74	77	2100
17	18	1700	75	76	2500
18	19	2000	64	78	2000
18	20	1500	78	79	2000
20	21	1500	79	80	2300
21	22	1000	80	81	1500
21	23	1200	81	84	1500
18	24	1300	81	82	2000
24	25	1200	82	83	2000
25	26	1000	80	85	2400
26	27	500	85	86	3000
26	28	600	86	87	1600
25	29	1300	87	88	3000
29	37	1500	86	89	1200
37	36	1500	85	90	2000
29	30	1500	38	39	1500
30	31	1500	39	42	1200
31	35	1100	39	40	1000
31	32	1200	40	43	1100
32	33	1000	43	44	1000
32	34	1000	40	41	1600
50	51	1500	45	46	600
51	52	1200	45	47	2000
52	54	1200	47	48	2000
54	55	1000	48	49	2400
55	56	1000			

Tabela A.2 – Cargas distribuídas ao longo do alimentador escolhido.

BARRA	Carga (kVA)	BARRA	Carga (kVA)
1	0	46	20
2	0	47	15
3	75	48	25
4	285	49	15
5	502,5	50	1245
6	35	51	150
7	10	52	20
8	15	53	0
9	30	54	0
10	15	55	10
11	30	56	5
12	5	57	0
13	10	58	0
14	10	59	20
15	10	60	80
16	20	61	315
17	30	62	35
18	15	63	45
19	40	64	30
20	15	65	60
21	15	66	45
22	35	67	25
23	30	68	5
24	30	69	10
25	15	70	15
26	15	71	25
27	15	72	10
28	5	73	25
29	60	74	25
30	10	75	15
31	10	76	25
32	15	77	25
33	15	78	100
34	5	79	20
35	15	80	90
36	35	81	5
37	15	82	15
38	360	83	15
39	0	84	75
40	0	85	30
41	55	86	10
42	20	87	25
43	20	88	5
44	15	89	5
45	45	90	5



## Apêndice B

### Padrão IEEE COMTRADE

As informações fornecidas pelos relés digitais, RDP e programas de simulação têm feito com que quantidades cada vez maiores de dados se formem continuamente. Estas informações podem ser geradas, transmitidas e armazenadas em diferentes formatos, dependendo do sistema de aquisição e transmissão empregado.

A diversidade de formato dificultava a análise dos dados, uma vez que exigia mais do analista, até que em 1991 adotou-se o padrão COMTRADE (IEEE Standard **COM**mon Format for **TR**ansient **D**ata **E**xchange for Power Systems). Um formato aberto, para o qual todos os outros formatos pudessem ser convertidos (IEEE, 1991). Este padrão foi revisado em 1997 e em 1999, definindo um formato comum dos arquivos de dados que possibilita o intercâmbio dos arquivos entre os vários sistemas de análise de falta, testes e simulação.

Três tipos de arquivos são gerados no padrão COMTRADE. Cada qual possui uma classe específica de informação. O nome desses arquivos tem extensão que designa o tipo (Tabela B.1).

**Tabela B.1 – Tipos de arquivos do padrão COMTRADE.**

<b>Tipo</b>	<b>Extensão</b>
Cabeçalho	.hdr
Configuração	.cfg
Dados	.dat

Os arquivos são seqüenciais e os campos de cada registro são delimitados por vírgula. Isto é, as informações são organizadas em linhas numa ordem padronizada, sendo os dados em cada linha separados por vírgulas.

Arquivos de cabeçalho: são arquivos de texto criados pelo programa conversor com o objetivo de permitir que os dados possam ser impressos e entendidos pelo usuário. Arquivos deste tipo podem conter qualquer informação desejada. Por exemplo: nome da subestação, identificação do equipamento (linha de transmissão, transformador, reator, dentre outros), comprimento da linha, relação de transformação do transformador de potencial ou de corrente e localização do defeito. As informações contidas em um arquivo de cabeçalho dependem apenas do conversor fornecido pelo fabricante do dispositivo de registro.

Arquivos de configuração: são criados pelo programa conversor como um arquivo de texto. O formato dos dados é predefinido para que possam ser lidos e interpretados corretamente pelo programa computacional de análise, o qual os associará aos valores armazenados no arquivo de dados correspondente. Os arquivos de configuração são organizados conforme a Tabela B.2.

O campo *cccc* no registro tipo 3 quase não é usado. O fator de conversão do canal é  $ax + b$ , sendo  $a$  e  $b$  números reais dados nos campos correspondentes do registro tipo 3.  $x$  é o valor da amostra do arquivo .dat a ser convertido. Isto é, o valor convertido de  $x$  corresponde a  $ax + b$  em unidades *uu* especificadas no campo correspondente.

Arquivos de dados: são arquivos do tipo ASCII, ou binário, criados pelo programa conversor. Os dados de um arquivo deste tipo possuem formato predefinido de modo que possam ser lidos e interpretados pelo programa de análise, o qual os associará conforme especificado no arquivo de configuração correspondente.

Um arquivo de dados deve conter os valores organizados em linhas e colunas, de modo que cada linha corresponda a um conjunto de valores da primeira amostra de canal precedido de um número seqüencial e o tempo do conjunto de amostras. O número de linhas varia de acordo com o de amostras, o que define o tamanho do arquivo.

A primeira coluna deve conter o número da amostra. A segunda, o tempo da amostra, em microssegundos, do início do registro. As demais colunas devem conter os valores amostrados da tensão, da corrente e do estado, os quais devem ser inteiros com seis

dígitos e separados por vírgula. Valores inexistentes devem ser representados por 999999 e as informações de estado por 0 ou 1.

Todos os dados fornecidos pelo ATP para formação da Base de Dados serão convertidos para o padrão COMTRADE.

**Tabela B.2 – Registros e campos dos arquivos de configuração.**

Nº	Registro	Campo	Descrição do campo
1	Nome e identificação da subestação	Station_name Id	Nome da subestação. Nome do registrador.
2	Número e tipo de canais	TT nnt,nnt	Número total de canais. Número de canais do tipo t t={A: analógico/D: digital}.
3	Nome dos canais, unidades, fatores de conversão e informações dos canais	nn, id p cccccc uu a,b skew min,max  m	Número e nome do canal. Identificação de fase (A, B, C, N). Circuito ou componente monitorado. Unidade do canal (V, A, kV, etc.). Componentes do fator de conversão. Número real. Menor e maior valor da taxa de amostragem do canal id. Estado normal ou de alarme do canal (apenas para canais digitais).
4	Frequência nominal	IF	Frequência nominal em Hz (50, 60).
5	Taxa de amostragem e número de amostras	nrates  sssss1, endsamp1 ... sssssn, endsampn	Nº de taxas de amostragem diferentes no arquivo .dat. Taxa de amostragem em Hz e última amostra nessa taxa.
6	Data e hora da primeira amostra	mm/dd/yy hh:mm:ss.ssssss	Mês, dia e últimos dígitos do ano. Hora, minuto e segundo.
7	Data e hora do trigger	mm/dd/yy hh:mm:ss.ssssss	Mês, dia e últimos dígitos do ano. Hora, minuto e segundo.
8	Tipo de arquivo de dados	ft	Informa se o arquivo de dados é ASCII ou binário.