RENATO MIKIO NAKAGOMI

**Proposição de um Sistema para Simulação de
Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

São Paulo
2006

RENATO MIKIO NAKAGOMI

Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Cesar Senger

São Paulo
2006

Ficha Catalográfica

Nakagomi, Renato Mikio

Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição. São Paulo, 2006.

90p.

Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Redes de distribuição de energia elétrica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. II. t

Dedico este trabalho à minha esposa,
pelo carinho e pelo incentivo.

Agradecimentos

Ao professor Eduardo Cesar Senger pela oportunidade, confiança, apoio e inesgotável paciência.

Aos demais amigos do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos (L•PROT), Eduardo, Francisco e Giovanni, pela amizade sincera e por toda ajuda dispendida.

A todos os professores do PEA que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Um dos problemas mais graves e preocupantes que ocorrem em redes de distribuição é a falta de alta impedância proveniente do rompimento e conseqüente queda do condutor primário. Devido ao seu alto grau de periculosidade, é fundamental que tal fenômeno seja exaustivamente analisado e pesquisado. Com a evolução da tecnologia digital, os programas de simulação computacional se tornaram grandes aliados nas pesquisas em proteção de sistemas elétricos.

A partir do estudo de modelos já desenvolvidos e testados de faltas de alta impedância em redes de distribuição, o presente trabalho realiza uma análise deste tipo de falta e discute a implementação de um modelo de fácil configuração e adaptável a diferentes cenários.

Mais do que isso, este trabalho se propõe a desenvolver uma interface computacional propícia para viabilizar este tipo de estudo em redes de distribuição, dada a necessidade de se obter uma ferramenta que possibilite a automatização do processo de simulação deste fenômeno.

Com o resultado deste trabalho será possível testar e validar esquemas de proteção contra faltas de alta impedância ocasionadas por rompimento e queda de condutor primário em redes de distribuição, bem como auxiliar no desenvolvimento e implementação de novos algoritmos de detecção deste tipo de falta.

Abstract

The high impedance fault caused by the broken and fallen conductor is one of the most hazardous and worrying problems that occur in distribution network. Due to its high harmful level it is necessary to analyze and research such phenomenon exhaustingly. The evolution of digital technology allowed the development of computing simulation software that became a great ally to the research of electrical systems protective devices.

Based on the study of already developed and tested high impedance fault models the present work revisits this type of fault and discuss the implementation of an easy configureable model that is adaptable to different scenarios.

Beyond this, the present work also proposes to develop a proper computing interface in order to make the study of such faults at distribution network viable once it is necessary to have a tool that allows the automation of high impedance fault simulating process.

The results of this work will allow to test and validate protective schemes against high impedance faults caused by the breakdown and fall of primary conductors at distribution network systems, as well as they will be helpful when developing and implementing new algorithms for detection of such kind of fault.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.1.1	Sobre as Faltas de Alta Impedância	1
1.1.2	Sobre Programas de Simulação em Sistemas de Potência	4
1.2	Objetivos	5
1.3	Apresentação do Trabalho	6
2	Revisão da Literatura	8
2.1	Características da Falta de Alta Impedância em Redes de Distribuição	8
2.1.1	Rompimento e Queda de Condutor Primário	8
2.1.2	Estudo do Fenômeno dos Arcos Elétricos em Faltas de Alta Impedância .	9
2.1.3	Modelo de Mayr para o Arco Elétrico	17
2.2	Modelos de Falta de Alta Impedância	21
2.2.1	Modelo A: Resistência fixa	21
2.2.2	Modelo B: Combinação de impedâncias não-lineares	21
2.2.3	Modelo C: R_f e L_f	22
2.2.4	Modelo D: 2 diodos, 2 fontes DC e impedância	25
2.2.5	Modelo E: Resistência Variável Controlada por TACS	28
3	Adaptação e Implementação do Modelo de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição	31
3.1	Ensaio de Campo	31
3.1.1	Características do Solo	32

3.1.2	Arranjo Experimental	32
3.1.3	Resultados dos Ensaios	34
3.1.4	Conclusões sobre os Resultados dos Ensaios	39
3.2	Modelagem do Evento de Falta de Alta Impedância	40
3.2.1	Modelagem da Queda de Condutor	40
3.2.2	Modelagem das Características da Falta de Alta Impedância	41
3.2.2.1	O Controle da Resistência HZR1	43
3.2.2.2	O Controle da Resistência HZR2	45
4	Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição	48
4.1	ATPCAD	50
5	Resultados	61
6	Conclusões	65
	Anexo A – Exemplo de Arquivo de Entrada do ATP	67
	Referências	86

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

1.1.1 Sobre as Falhas de Alta Impedância

A falta de alta impedância em redes de distribuição ocorre quando há o contato de um condutor primário energizado de um sistema elétrico com uma superfície de alto valor resistivo (árvore, asfalto, construção, solo, etc.). Este tipo de falta pode gerar correntes de pouca amplitude, justamente pelo fato da existência de uma superfície de contato de falta com uma impedância muito alta frente a tensão aplicada proveniente do sistema de distribuição. Portanto, por ser uma falta de alta impedância, a corrente drenada tende a ser bem menor do que uma corrente de falta franca, podendo apresentar um valor menor do que a corrente de carga ou chegar até mesmo a zero [1].

Devido aos fatos relatados acima, a detecção e eliminação da falta de alta impedância é dificultada, prejudicando a atuação do sistema convencional de proteção da rede (p.ex. dispositivos de sobrecorrente como relés ou fusíveis), permitindo a existência do defeito por tempo indeterminado. Diante disso, a queda ou contato do condutor da rede primária energizado em vias públicas ou em construções pode provocar inúmeros danos à propriedade assim como, indubitavelmente, coloca em risco a vida de pessoas e animais, pois o alto potencial elétrico gerado nesta situação pode causar aquecimento e até combustão de certos materiais, além de provocar queimaduras e eletrocução de seres vivos. Desta forma, o tipo mais preocupante de falta de alta impedância para as concessionárias de energia elétrica é o rompimento de um condutor da rede primária de distribuição com conseqüente queda ao solo.

De acordo com estudos jurídicos [2], existe argumentação suficiente apontando a responsabilidade (parcial ou mesmo integral) das concessionárias dos serviços públicos de energia elétrica sobre eventuais danos causados pelas faltas de alta impedância. Além disso, há um reiterado julgado a respeito deste fato, fazendo com que a justiça brasileira esteja

mais propensa a condenar as concessionárias julgadas a pagarem multas indenizatórias adequadas às vítimas quando do acontecimento deste tipo de falha em seu sistema elétrico.

A fim de impedir os acidentes e diminuir a duração da ocorrência de faltas de alta impedância na rede de distribuição, buscando evitar danos e prejuízos tanto do lado do consumidor quanto do lado da concessionária, é preciso que tais faltas sejam passíveis de serem detectadas e eliminadas o quanto antes. Para tanto, é necessário que sejam desenvolvidas pesquisas cada vez mais aprofundadas que auxiliem no estudo da eficácia do sistema de proteção e na criação de dispositivos que atuem com precisão e rapidez.

Ao longo dos anos, diferentes métodos foram propostos para identificar e detectar a ocorrência de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição, baseando-se cada qual, direta ou indiretamente, em determinados resultados de tensões e/ou correntes de falta. Os métodos de identificação e de eliminação de falta de alta impedância variam desde simples relés de sobrecorrente até sofisticados esquemas de proteção, incluindo relés digitais microprocessados com algoritmos de inteligência artificial. Muitos destes métodos se apoiaram em modelos desenvolvidos por meio da observação e análise de faltas de alta impedância reais. No entanto, nota-se que os modelos até aqui desenvolvidos representam casos particulares de falta de alta impedância, terminando por não representar o fenômeno em sua totalidade.

Alguns métodos de detecção de faltas de alta impedância, por exemplo, utilizam relés de subtensão [3], sobrecorrente de sequência zero e negativa [3, 4], sobretensão de sequência zero e negativa [3, 5] e relés baseados na razão entre correntes e/ou tensões [3, 6-8]. Porém, percebe-se que tais métodos não são totalmente eficazes pois, como foi mencionado, este tipo de falta, por sua própria característica, não provoca grandes variações na amplitude de corrente e tensão quando estes valores são vistos pelos dispositivos de proteção alocados nas subestações.

Há métodos eficazes para a detecção de rompimento de condutores, como o estudo apresentado em [9] que se baseia no desequilíbrio de tensões provocado por tal fenômeno. No entanto, a implementação do esquema proposto requer a instalação de sensores nas extremidades dos alimentadores monitorados, o que exige a instalação de um sistema de comunicação para transmitir a informação até um equipamento de proteção à montante.

Muitos dos artigos pesquisados e estudados levam em consideração o fato de que a falta de alta impedância está intimamente ligada à geração de harmônicas e componentes de alta frequência no sinal de corrente devido ao aparecimento de arcos elétricos e ao comportamento errático da corrente propagando-se pela superfície de contato, desenvolvendo relés baseados principalmente na detecção e análise de harmônicas [1, 10-18].

A dificuldade existente neste tipo de solução é que a determinação de uma assinatura de falta de alta impedância a partir da análise das harmônicas presentes nos sinais de tensão e corrente não é infalível, pois seria preciso, antes de mais nada, discriminar este tipo de falta de outras ocorrências naturais do sistema de distribuição, as quais também contribuem para o surgimento de harmônicas [19, 20]. Portanto, apesar do crescimento confiável na amplitude das frequências harmônicas indicar uma condição de falta com arco [21], alguns estudos ressaltam que é necessário ter cautela ao atribuir harmônicas diretamente a uma falta de alta impedância, pois existem equipamentos (alguns eletrodomésticos, máquinas de solda a arco, elementos controlados por tiristores) e fenômenos transitórios (operações de chaveamento na rede com religadores e disjuntores, bancos de capacitores e transformadores) que introduzem harmônicas similares às da falta, o que pode confundir os sensores e causar atuações indevidas dos relés [1, 17, 19, 21, 22].

A evolução da tecnologia digital e o surgimento de métodos de processamento digital de sinais permitiu que se aumentasse a complexidade dos algoritmos de detecção deste tipo de falta. Uma das últimas evoluções atualmente é o estudo da detecção de faltas de alta impedância utilizando métodos de inteligência artificial, presentes em várias pesquisas. O reconhecimento de padrões e a inteligência artificial apresentam métodos efetivos para detectar a maioria das faltas de alta impedância que antes eram indetectáveis [23].

O reconhecimento de padrões é uma das ferramentas estudadas para este determinado fim. As pesquisas podem variar desde simples algoritmos de reconhecimento de padrões baseados em tensões e correntes resultantes de modelos de falta de alta impedância [24, 25] ou baseados em métodos probabilísticos [26], até estudos de reconhecimento de padrão com classificação baseada na minimização da entropia (que caracteriza o comportamento da falta de alta impedância em termos de aumento da amplitude da corrente de falta e duração da ignição do arco [13]) ou mesmo métodos de comparação de distorção da forma de onda do evento com a forma de onda em regime (fazendo também a diferenciação dos fatores de forma entre eventos de falta, chaveamentos, operação de bancos capacitivos, fornos a arco e outras situações e equipamentos que causem uma distorção semelhante à da falta [27]).

Outra ferramenta de inteligência artificial bastante utilizada é a de redes neurais. Este método pode variar desde redes neurais artificiais com camadas múltiplas (*multilayer perceptron*) [28-33], associadas à estudo de graus caóticos [34] ou modelos estocásticos [35], e até redes com elementos adaptativos que analisam vários conjuntos de regras com pesos diferentes para diferentes situações e com regras de pontuação e correção de pesos como algoritmo de aprendizagem [36].

Além destes dois tipos de algoritmos de inteligência artificial utilizados para a detecção de faltas de alta impedância, existem os métodos que utilizam a lógica *Fuzzy* [37], transformadas *Wavelets* [38-43] e conceitos de geometria fractal [44]. Ainda existem os algoritmos mistos que unem as técnicas de *Wavelets* às redes neurais [45] ou ainda que realizam a associação destas últimas com análises estatísticas [46].

A utilização de técnicas de inteligência artificial demanda, em sua implementação, tipificar o fenômeno estudado, ou seja, é preciso definir a contento quais as características do fenômeno que serão consideradas para que o algoritmo seja capaz de decidir ou atuar corretamente. Portanto, o programa precisa ser ensinado e treinado a identificar e analisar padrões de comportamento do fato estudado, a fim de que possa reconhecê-los diante de novos dados amostrados.

Para o estudo das faltas de alta impedância, os pesquisadores testam e desenvolvem seus algoritmos e avaliam seus esquemas de proteção baseados em oscilografias das tensões e correntes capturadas de casos reais, testes de campo, ou em resultados de simulação computacional utilizando modelos teóricos.

1.1.2 Sobre Programas de Simulação em Sistemas de Potência

Devido à evolução tecnológica que vem ocorrendo nas últimas décadas, os engenheiros e cientistas foram capazes de aumentar a sua produtividade criando ferramentas computacionais para auxiliar em seus estudos e pesquisas. Na área de sistemas de potência foram desenvolvidos vários programas baseados na modelagem matemática dos elementos que compõem uma rede elétrica com o intuito de simular o comportamento das tensões e correntes dos sistemas durante o regime permanente e quando da ocorrência de faltas. No estudo de proteção de sistemas elétricos é importante que o simulador seja capaz de fornecer como resultado a oscilografia das tensões e correntes ao longo do tempo, incluindo seu comportamento transitório durante uma ocorrência de falta, por exemplo.

A opção de obter oscilogramas de falta de alta impedância a partir de testes em campo se torna pouco atrativa devido à necessidade de se realizar um grande número de ensaios em solos com diferentes resistividades, taxa de umidade e tipo de cobertura. Por isso, o estudo do comportamento deste tipo de falta por meio de programas de simulação é interessante para o desenvolvimento e validação de novos algoritmos de detecção e extinção de faltas de alta impedância em redes de distribuição, bem como para a avaliação e coordenação do sistema de proteção convencional já existente.

Um dos programas de simulação da área de sistemas de potência mais conceituado e conhecido é o ATP (*Alternative Transient Program*). O ATP é um programa computacional para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e/ou eletromecânica. Por meio dele é possível simular redes elétricas complexas e diversos sistemas de controle [47]. Além disso, o ATP permite que o usuário crie seus próprios elementos de rede e configure cenários diversificados para serem simulados. Por exemplo: é possível criar modelos de dispositivos de proteção para serem testados juntamente à simulação da ocorrência de uma falta cuja impedância varie de acordo com um padrão personalizado.

A entrada de dados do ATP pode ser feita por meio de um arquivo texto descritivo respeitando regras de formatação próprias ou então por meio de uma interface gráfica própria do tipo CAD (*Computer Aided Design*) denominada ATPDRAW. A modelagem de elementos ou cenários pode ser feito de duas maneiras: a primeira refere-se à criação dos *MODELS* utilizando uma linguagem de programação própria do ATP, similar às linguagens *PASCAL* ou *MODULA-2*, baseada na linguagem *FORTRAN* [48]; a segunda está relacionada aos chamados *foreign models* (ou modelos externos, em tradução livre), que são programas escritos em linguagem C e podem ser inseridos dentro do código do próprio ATP [49].

Os *MODELS* possuem uma estrutura básica que deve ser rigorosamente respeitada, compreendendo a entrada de dados, declaração de variáveis e definição de constantes, bem como a área de inserção do código do modelo em si. Por meio dos *MODELS* é possível implementar processos que resultam em variáveis *TACS* que podem controlar diversos dispositivos pré-existentes no programa ATP.

Existem outros programas de simulação de transitórios disponíveis no mercado, no entanto o ATP é o único programa gratuito e que une todas as funcionalidades necessárias para a simulação de transitórios em redes de distribuição e para a implementação de modelos próprios de elementos de rede ou equipamentos. Além disso, o ATP é um programa extremamente flexível a ponto de permitir que seja utilizado como uma ferramenta à parte acoplada a um programa principal, pois é executado em ambiente DOS, o que permite criar qualquer tipo de interface gráfica para interagir com seu arquivo executável.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por primeiro objetivo pesquisar e avaliar os modelos para faltas de alta impedância já propostos na literatura, visando adaptar e implementar o modelo julgado mais conveniente para simulação no ambiente ATP. Tal modelo deverá ser de fácil imple-

mentação, suficientemente preciso e ao mesmo tempo versátil e configurável ao ponto de permitir sua adaptação para qualquer sistema elétrico, em qualquer condição de carga para os quais se intencione simular um caso de falta de alta impedância. Assim, este modelo poderá servir para testar a eficácia de novos algoritmos de detecção de falta de alta impedância em redes de distribuição, auxiliando no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos de proteção.

Para atender a essa aplicação, cria-se a necessidade de utilizar o modelo de falta de alta impedância em diversos pontos de uma dada rede elétrica de distribuição e sob diversas condições de carga. No entanto, a implementação de todos os casos de falta desejados em diferentes pontos das redes no ATP é uma tarefa que demanda certo tempo para sua execução, mesmo utilizando-se de ferramentas gráficas como o ATPDRAW. Além disso, configurar e descrever sistemas de distribuição para simulação em ATP é um trabalho que também dispende muito tempo, dada a complexidade destes sistemas por possuírem várias ramificações e diferentes tipos de cargas em seus ramos.

Visando facilitar o estudo de faltas de alta impedância ocorridas em diferentes pontos de um sistema de distribuição e em diferentes situações de carga, este trabalho propõe-se, como segundo objetivo, a desenvolver e implementar um programa computacional para gerar automaticamente casos de falta de alta impedância em redes de distribuição para serem simulados no ATP a partir de uma interface gráfica amigável.

1.3 Apresentação do Trabalho

Este trabalho está dividido em capítulos, cujos conteúdos são:

- Capítulo 1: Introdução

No Capítulo 1 é apresentada a descrição da falta de alta impedância em redes de distribuição, ressaltando sua complexidade e a importância de seu estudo. Além disso, há um breve relato sobre o programa a ser utilizado como base para a implementação do sistema de simulação computacional. Neste mesmo capítulo são apresentados os objetivos deste trabalho, bem como a sua estrutura.

- Capítulo 2: Revisão da Literatura

O Capítulo 2 apresenta a caracterização das faltas de alta impedância em redes de distribuição, incluindo o estudo sobre arcos elétricos, bem como os estudos já realizados para a modelagem deste tipo de falta.

- Capítulo 3: Adaptação e Implementação do Modelo de Falta de Alta Impedância em Redes de Distribuição

No Capítulo 3, seguindo a evolução dos estudos feitos sobre a falta de alta impedância, foram realizados ensaios de campo a fim de verificar e comprovar a existência de arcos elétricos neste tipo de falta, bem como obter oscilografias para a análise do comportamento das correntes de falta e da característica V_{xI} . Utilizando-se dos dados obtidos por meio dos ensaios e dos estudos realizados, foi feita a implementação do modelo da falta de alta impedância em redes de distribuição utilizando-se o recurso de *MODELS* do ATP.

- Capítulo 4: Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância para Redes de Distribuição

O Capítulo 4 mostra o Sistema para Simulação de Falta de Alta Impedância para Redes de Distribuição, bem como a ferramenta computacional denominada ATPCAD, desenvolvida para automatizar a geração dos casos de simulação.

- Capítulo 5: Resultados

No Capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos a partir da simulação de uma falta de alta impedância em uma rede de distribuição utilizando-se do modelo implementado.

- Capítulo 6: Conclusões

O Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre a adaptação do modelo de falta de alta impedância e sobre o desenvolvimento e utilização do respectivo sistema para a simulação deste tipo de falta. Neste capítulo também são apresentadas sugestões para futuras melhorias a serem realizadas tanto no modelo quanto no aplicativo desenvolvido.

2 Revisão da Literatura

2.1 Características da Falta de Alta Impedância em Redes de Distribuição

2.1.1 Rompimento e Queda de Condutor Primário

Uma das características presentes no tipo de falta de alta impedância considerada neste trabalho é a ocorrência do rompimento e conseqüente queda do condutor primário, o qual anuncia o início deste fenômeno.

Ao longo do tempo, a falta de alta impedância considerada neste trabalho é constituída de quatro etapas, como se pode observar na Figura 2.1 e na Tabela 2.1.

Figura 2.1: Sequência de eventos considerada para as faltas de alta impedância em redes de distribuição

A primeira etapa corresponde à condição de pré-falta em que as correntes que circulam pela rede são produzidas somente pelas cargas. Em determinado instante (t_0) admite-se que ocorre o rompimento de um dos condutores da rede primária. Após o rompimento, o cabo leva um tempo (t_{queda}) para atingir o solo. Durante a queda, admite-se que não ocorre

Etapa		Tempo	Comentários
1	Pré-falta	$0 \leq t < t_0$	As correntes que circulam na rede são produzidas somente pelas cargas.
2	Rompimento do cabo	$t = t_0$	Abertura da fase em que ocorre o defeito.
3	Queda do cabo	$t_0 < t < t_0 + t_{queda}$	Admite-se que durante a queda não há contato entre o cabo rompido com outras fases ou o neutro.
4	Arco-Elétrico	$t \geq t_0 + t_{queda}$	O cabo chega ao solo e inicia-se o arco elétrico.

Tabela 2.1: Etapas da simulação das faltas de alta impedância

nenhum contato do cabo rompido com os outros condutores da rede (fases ou neutro). O tempo de queda de um condutor pode ser estimado por meio da seguinte equação:

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2.1)$$

Sendo:

h = altura da rede primária

g = aceleração da gravidade

Considerando a altura da rede primária entre 8 e 10 metros e a aceleração da gravidade aproximadamente 10m/s^2 , a equação 2.1 resulta em tempos de queda da ordem de 1,3 segundos.

O rompimento e queda do condutor da rede primária pode ocasionar o contato do mesmo com alguma superfície de alta resistividade tanto do lado fonte, quanto do lado carga, podendo também ocorrer o contato dos dois lados, como é mostrado na Figura 2.2.

2.1.2 Estudo do Fenômeno dos Arcos Elétricos em Faltas de Alta Impedância

Segundo constatado por pesquisas [50], as faltas ocasionadas pelo rompimento e queda de condutores do sistema primário de distribuição sobre superfícies que apresentam alta impedância geralmente provocam o aparecimento de arcos elétricos.

É comum que o condutor caído e ainda energizado não apresente um contato elétrico firme com a superfície em questão. A uma pequena distância e com uma pequena diferença de

Figura 2.2: Cenários possíveis para a ocorrência de contato do condutor primário da rede de distribuição com uma superfície de alta resistividade

potencial, o ar se comporta como um bom isolante. Aumentando-se essa diferença de potencial, a resistência elétrica do ar diminui significativamente a partir de um certo limiar e, ultrapassando-o, ocorre o rompimento do dielétrico, o que resulta na passagem de corrente entre os dois condutores. O rompimento se inicia com elétrons livres que são acelerados pelo campo elétrico. Possuindo energia cinética suficiente, esses elétrons ionizam moléculas de ar quando da colisão com as mesmas, liberando assim novos elétrons. Estes, por sua vez, liberam mais elétrons repetindo o processo num curto espaço de tempo causando um fenômeno de avalanche. Esse fenômeno é o responsável pela repentina capacidade do ar de conduzir corrente. Com a avalanche, pode ocorrer a condução de corrente de forma contínua, que é chamada então de arco. Isto acontece desde que a resistência associada ao arco seja suficientemente baixa e a diferença de potencial aplicada suficientemente alta. Tipicamente isto não ocorre de imediato. Antes do estabelecimento de um arco estável é muito comum que ocorra um centelhamento, que nada mais é que uma seqüência rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico.

Alguns experimentos em campo e em laboratório foram conduzidos para simular uma falta de alta impedância, a fim de estudar a formação de arcos elétricos em faltas de alta impedância.

Em um dos trabalhos pesquisados [51] foram apresentados resultados de medidas realizadas com ajuda de uma montagem de laboratório. Tais resultados, apesar de obtidos para uma situação específica (tipo de solo definido, ambiente de laboratório, etc.), são úteis para caracterizar o comportamento do arco elétrico no interior do solo e permitem uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos durante as faltas de alta impedância.

O arranjo experimental mostrado na Figura 2.3 a seguir, foi utilizado para estudar o comportamento do arco no caso de solo arenoso. A tensão do secundário de um transformador (7,9 kV) foi aplicada a um vaso metálico cilíndrico (diâmetro = 30 cm e altura = 50 cm) contendo areia. Um resistor variável foi conectado em série para simular e variar a resistência de terra.

Figura 2.3: Arranjo experimental utilizado para caracterização do arco elétrico [51]

Esse arranjo foi utilizado para medir as características de tensão versus corrente bem como as componentes harmônicas da corrente de arco em função do valor desta.

Figura 2.4: Formas de onda de correntes de arco típicas [51]

Como resultado importante deste ensaio, mostrou-se que a corrente de falta de alta impedância não é simétrica, sendo a magnitude do semi-ciclo positivo maior que a do semi-ciclo negativo. Formas de onda típicas para corrente e tensão de falha são mostradas na Figura 2.4. Este tipo de comportamento é característico de falhas tanto com grande corrente de curto como com pequena corrente de curto, desde que haja a ocorrência de arco.

Essa assimetria pode ser observada também na Figura 2.5(a), que mostra a característica $v(t) \times i(t)$ evidenciando a histerese existente. Na Figura 2.5(b) é mostrada a curva $v(t) \times i(t)$ obtida de um modelo teórico proposto pelo estudo do artigo [51], como dito anteriormente, baseado no comportamento do arco elétrico em solo arenoso.

As tensões V_p e V_N não dependem, para os casos práticos, da geometria dos eletrodos e nem do material utilizado na sua fabricação. Fatores de grande influência são a porosidade e a

Figura 2.5: Curva $v(t) \times i(t)$ [51]

umidade do solo arenoso. Quanto mais poroso e seco o solo, maiores são as tensões V_P e V_N . Uma maior umidade do solo modifica a geometria local do arco e as condições de transferência de calor, fazendo com que o arco não seja provocado logo no início da energização. Somente após o aquecimento do solo em torno dos eletrodos é que ocorre o arco, fato que é explicado pelo desenvolvimento de vapor que aumenta a porosidade na região em torno dos eletrodos, propiciando a formação do arco. Com a propagação do arco no solo a tensão de arco aumenta.

Figura 2.6: O desenvolvimento do arco elétrico em solo arenoso

O desenvolvimento do arco é ilustrado na Figura 2.6. Quando o arco é disparado, muda-se a distribuição do campo elétrico no solo de forma drástica com um crescimento acentuado

do campo elétrico na "ponta" do arco elétrico. Alguns fatores, como emissão termiônica, alto gradiente de campo elétrico e o afastamento do eletrodo da camada condutiva do solo, fazem com que o arco avance solo adentro. A assimetria da curva $v(t) \times i(t)$ é atribuída à sílica aquecida que se forma em torno do arco e que se comporta como um catodo, emitindo elétrons, o que causa uma menor queda de tensão quando o eletrodo está submetido a uma tensão positiva.

Com a penetração do arco no solo dois parâmetros mudam:

- a umidade do solo (o solo em torno do arco se torna mais seco);
- o balanço entre a taxa de geração de calor pelo arco e a taxa de transmissão de calor para o solo.

Esses fatores resultam na extinção do arco. A partir desse estágio existiriam então duas possibilidades:

- A umidade do restante do solo difunde-se umedecendo a região em torno do eletrodo e provocando conseqüentemente o reinício do arco. Este utilizará um outro caminho através do solo, já que o inicial está vitrificado.
- No caso de um condutor que possui diversos pontos de contato com o solo pode ocorrer que em um outro ponto, até então inativo, se inicie a formação do arco devido às mudanças na distribuição do campo elétrico no solo.

Concluiu-se a partir daí que a corrente gerada num arco é distorcida, assimétrica, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada semi-ciclo.

A distorção na forma de onda, induzida pela não-linearidade da resistência do arco, promove o aparecimento de um conteúdo harmônico de baixa ordem na corrente (3° ao 10° harmônicos aproximadamente).

A assimetria entre semi-ciclos (diferença entre as amplitudes da corrente nos semi-ciclos positivos e negativos), ocasionada principalmente pela diferença de mobilidade dos portadores de carga positivos e negativos, é o principal fator responsável pelo aparecimento dos harmônicos de ordem par da fundamental (2°, 4°, 6°, ...).

A intermitência aleatória (faiscamento) e a descontinuidade da corrente durante o estabelecimento e a extinção do arco levam ao surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência.

A variação da amplitude da corrente ao longo do tempo provoca o aparecimento de raias espectrais em frequências não múltiplas da fundamental, chamadas de "harmônicos inter-

calados" [21].

Esse último efeito ocorre essencialmente porque a resistência de contato do defeito (uma associação entre a resistência do solo, a resistência do arco e uma resistência diferenciada que surge ao longo dos caminhos de ionização no interior do solo - chamados fulguritos), tem um comportamento dinâmico, variando de um instante para outro.

Aqui é necessário recapitular brevemente o processo de desenvolvimento do defeito de alta impedância para esclarecer o mecanismo da variação de cada resistência dessa associação: no caso de um condutor caído o arco elétrico dá-se inicialmente entre a superfície do condutor e partículas da superfície do solo. Neste processo há a produção de calor e a consequente carbonização e vitrificação de regiões do solo adjacentes aos pontos de arco. Este caminho de ionização, chamado de fulgurito, tem resistividade tipicamente menor que a do solo adjacente, dando origem a resistências lineares na faixa de 2 a 100 k Ω /m [51], o que modifica o gradiente do campo elétrico ao seu redor. Com isto, as regiões de centelhamento, onde ocorrem os arcos, tendem a migrar para os limites destes "caminhos", que vão se estendendo e alastrando. Esta árvore de fulguritos ganha volume, passando a constituir uma espécie de eletrodo de aterramento para a corrente do defeito, distribuindo-a no solo progressivamente.

A resistência de arco é de natureza variável e depende, entre outras coisas, da distância dos eletrodos, da composição do ar, do gradiente e da intensidade do campo elétrico, da temperatura, etc.

No caso da falta de alta impedância em redes de distribuição, os eletrodos são ou a superfície do condutor e partículas do solo ou partículas do solo entre si. À medida que se desenrola o defeito e se desenvolvem os fulguritos, todas as condições citadas variam, além de que não ocorre apenas um arco contínuo, mas sim um conjunto de pequenos arcos simultâneos nos pontos de gradiente mais elevado, que vão se modificando à medida que o defeito evolui.

A resistividade do solo varia pela ação do calor gerado pelo arco que tende a secar sua umidade natural. A resistência dos fulguritos, que inicialmente não existe, vai gradativamente influenciando cada vez mais na resistência equivalente do contato.

Devido à natureza dos fenômenos envolvidos, esta variação da resistência de contato não é um fenômeno determinístico, mas sim aleatório. Porém, como ele tem uma tendência definida, podemos dizer que este processo aleatório tem memória e, assim, justifica-se a presença de harmônicos intercalados no espectro da corrente de defeito que vem refletir este comportamento.

Resumindo, a corrente de falta de alta impedância pode apresentar um comportamento tanto firme como errático devido ao fenômeno do arco elétrico, sendo, às vezes, uma senóide comum e, outras vezes, um sinal com distorção considerável dado o conteúdo harmônico significativo presente neste [1], dependendo mais do arco elétrico e da resistência do solo do que da própria impedância do sistema [52].

Comprovando as afirmações feitas até aqui, são apresentadas as oscilografias de um ensaio realizado pela CESP em 1985 na subestação de Conchas [53]. Este ensaio foi conduzido lançando-se um cabo energizado ao solo a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas, sendo repetido em vários pontos diferentes ao redor da subestação.

Figura 2.7: Oscilograma da corrente na fase ensaiada durante o teste da CESP na subestação de Conchas [53]

Nos oscilogramas, como o mostrado na Figura 2.7, pode-se notar o aspecto do crescimento da envoltória da corrente de defeito. Este comportamento é típico e se repete em quase todas as medições do ensaio, sendo conhecido como fase de *buildup* da corrente de falta de alta impedância.

Tal forma de envoltória é bastante genérica e observada em grande parte das ocorrências de rompimento de condutor. Vemos que na Figura 2.8(b), o tempo de elevação da amplitude da corrente é bem maior do que na Figura 2.8(a). Este maior tempo de crescimento (fase de *buildup*) deve-se principalmente à acomodação física do cabo, ou seja, o tempo que este leva para assentar completamente no solo, estabelecendo assim a resistência de contato final da falta de alta impedância.

É fácil observar a semelhança entre o gráfico do segundo caso (Figura 2.8(b)) e o obtido pela CESP (Figura 2.7). Vê-se que o tempo de crescimento da corrente é ainda maior do que o da referência, indicando diferenças entre as dimensões do cabo e/ou as condições de lançamento, fatores que parecem ser determinantes para este comportamento.

Em testes com lançamento de cabo já energizado, é possível observar durante a fase de crescimento alguns trechos em que a amplitude permanece constante antes de voltar a

(a) cabo energizado já em contato com o solo

(b) cabo já energizado lançado ao solo

Figura 2.8: Comportamento da corrente em ensaios de falha de alta impedância [54]

crescer. Esses trechos são denominados *shoulders* (Figura 2.9).

Figura 2.9: Detalhamento de *shoulder*

Uma observação a ser analisada é o resultado do estudo apresentado no artigo [54], que afirma que o conceito usual de arco elétrico pode necessitar de modificação quando este

é gerado por uma falta de alta impedância. A impedância deste tipo de falta tem natureza altamente resistiva, enquanto a maioria dos arcos elétricos observados ocorrem em circuitos de natureza altamente indutiva. Segundo este mesmo artigo, a corrente de arco é pequena e o tamanho do arco é menor durante a falta de alta impedância se comparado a arcos sob outras condições. Por exemplo, em um circuito de transmissão, um arco sustentado pode se prolongar por muitos metros e a corrente de arco inicial de centenas de ampères pode vaporizar o condutor diminuindo a resistência de arco devido a formação de íons metálicos. Uma falta de alta impedância em redes de distribuição, por outro lado, pode desenvolver um arco de apenas uma polegada aproximadamente. A corrente inicial pode ser menor que uma centena de ampères. Com um eletrodo não definido no contato à superfície e com uma pequena corrente, não haverá vaporização metálica para suprir a sustentabilidade do arco elétrico. Arcos de menor duração com intervalos de inatividade pequenos foram observados em condições de solo úmido e notou-se que a mudança na amplitude é maior para estes casos. Arcos de duração média com intervalo médio foram observados em condições de solo seco e arcos de longa duração com intervalos longos foram observados em condições de solo arenoso [21].

Isso mostra que as tensões e correntes resultantes de uma falta que envolve a formação de um arco elétrico estão submetidas a variações de magnitude em função das condições locais, isto é, os resultados dessas grandezas, portanto, serão influenciados pelas características geométricas, espaciais, ambientais e elétricas do sistema [55].

2.1.3 Modelo de Mayr para o Arco Elétrico

Muitos autores têm trabalhado em teoria de dinâmicas da tensão e corrente em um arco elétrico baseado em estudos de laboratório. Os estudos apresentados em [55] e [56] propuseram um modelo válido explicando este fenômeno usando o conceito de *spark gap* (ou espaçamento de centelhamento, em tradução livre). Segundo estes estudos, o espaço de ar não conduz até a tensão aplicada alcançar o ponto de ruptura. Então, a corrente flui e atinge seu máximo quando a tensão aplicada se iguala à tensão de arco (V_{arco}). Depois disso, a corrente de arco diminui e se torna zero, i.e. o arco se extingue. Quando ocorre a extinção, o arco requer um potencial, conhecido como tensão de reignição, a qual apresenta polaridade oposta. Todo este procedimento explica a típica característica tensão versus corrente de um arco.

Vários modelos elétricos têm sido propostos para descrever o comportamento do arco e foram apresentados em [57]. No escopo de queda de condutores, o artigo [58] apresentou

estudos sobre testes de falta de alta impedância descrevendo dependências da magnitude da corrente de arco devido a diferença de potencial, distância do espaçamento de ar, características da superfície de aterramento e condições ambientais do ponto de aterramento. Um comportamento altamente variável foi descrito devido às impurezas perto do ponto de aterramento, ao aquecimento provocado pelo arco, que é grande o suficiente para fundir materiais, e à evolução de diferentes caminhos para o fluxo de corrente nas superfícies.

Contudo, apesar de tais características variáveis, o estudo de modelos de arcos estáveis é útil para a compreensão dos mecanismos de estabelecimento e comportamento do arco elétrico e apresenta resultados compatíveis com a realidade do fenômeno. Neste sentido, os modelos de arcos elétricos para estudos de falta de alta impedância inspiraram-se principalmente nos estudos de Mayr.

De acordo com um dos estudos pesquisados [59], a teoria de Mayr assume a existência de um arco de área de seção transversal constante dentro da qual a temperatura varia com a dimensão radial do arco e com o tempo. Esta teoria também assume que o comportamento do arco é governado por uma quantidade de energia característica que leva a uma perda constante de potência. Este modelo permite prever o comportamento da característica tensão-corrente de arco, bem como o seu conteúdo harmônico.

O comportamento dinâmico do arco elétrico segundo Mayr é descrito pela seguinte equação diferencial [60, 61]:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = v(t) \cdot i(t) - N_0 \quad (2.2)$$

onde:

Q é a energia armazenada no arco,

N_0 é taxa de queda de energia do arco,

$v(t)$ é a tensão de arco, e

$i(t)$ é a corrente de arco.

É assumido ainda que a resistência elétrica R do plasma do arco é dada por:

$$R(t) = k \cdot e^{-\frac{Q(t)}{Q_0}} \quad (2.3)$$

onde Q_0 é uma constante correspondente a uma energia inicial armazenada no arco.

Este modelo da resistência do arco elétrico permite o cálculo da resistência de arco $R(t)$ de forma bastante simples quando $v(t)$ ou $i(t)$ são conhecidos. Para isso basta derivar a equação 2.3, obtendo assim:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{k}{Q_0} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \cdot e^{-\frac{Q(t)}{Q_0}} = -\frac{R(t)}{Q_0} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Como:

$$i(t) = \frac{v(t)}{R(t)} \quad (2.5)$$

obtem-se, substituindo a equação 2.4 e a equação 2.5 na equação 2.2, a seguinte equação diferencial não-homogênea de 1ª ordem:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{N_0}{Q_0} \cdot R(t) - \frac{v^2(t)}{Q_0} \quad (2.6)$$

É interessante notar que neste modelo a constante T_I é interpretada como uma constante de tempo (energia armazenada / taxa de queda de energia), sendo um dos parâmetros desse modelo.

$$T_I = \frac{Q_0}{N_0} \quad (2.7)$$

Assumindo-se que a tensão aplicada ao arco é senoidal, isto é:

$$v(t) = V \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (2.8)$$

obtem-se a seguinte solução em regime permanente senoidal para a resistência de arco $R(t)$:

$$R(t) = \frac{V^2}{2N_0} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + 4\omega_0^2 \cdot T_I^2} \cdot \cos(2\omega_0 t) + \frac{2\omega_0 \cdot T_I}{1 + 4\omega_0^2 \cdot T_I^2} \cdot \sin(2\omega_0 t) \right] \quad (2.9)$$

Com essa expressão pode-se calcular a corrente de arco utilizando a equação 2.5.

Resulta, portanto, que a resistência de arco $R(t)$ é periódica com frequência $2\omega_0$ quando a excitação é periódica de frequência ω_0 . Isto implica uma corrente de arco não-senoidal como aquela mostrada na Figura 2.10, em que foi assumido:

$$\frac{V^2}{2N_0} = 1 \quad (2.10)$$

e $T_I \approx 0,0027s$, sendo esse valor da constante de tempo escolhido para que a forma de onda de $i(t)$ tenha semelhança com as de correntes de falha obtidas por meio de medidas.

A Figura 2.11 mostra o comportamento $v(t) \times i(t)$ obtido e que, como é esperado, é claramente não-linear.

Figura 2.10: Corrente de arco a partir do modelo de Mayr com constante de tempo $T_I \approx 0,0027s$

Figura 2.11: Corrente de arco versus tensão aplicada, obtida a partir do modelo de Mayr com constante de tempo $T_I \approx 0,0027s$

2.2 Modelos de Falta de Alta Impedância

Vários pesquisadores se propuseram a criar um modelo de falta de alta impedância e, enquanto muitos o fizeram pela observação destas faltas em seu próprio sistema, alguns decidiram replicar o problema e criar faltas de alta impedância em ambientes controlados.

Como dito anteriormente, os estudos de detecção de faltas de alta impedância sobre métodos de inteligência artificial demandaram o desenvolvimento de modelos deste tipo de falta. A maioria dos modelos descritos a seguir foram utilizados para treinar algoritmos baseados em redes neurais ou lógica *Fuzzy*, para servir como gabarito para comparação no reconhecimento de padrões ou como fonte de sinais para a utilização de transformada *Wavelets*.

2.2.1 Modelo A: Resistência fixa

O modelo mais simples de falta de alta impedância implementado é o que representa esta falta como uma resistência fixa conectada entre o ponto de falta e a terra. Observou-se que quanto mais preciso é o modelo do sistema, os dados calculados se aproximam mais dos dados medidos, ou seja, a modelagem da falta de alta impedância neste caso depende exclusivamente da precisão da modelagem do sistema como um todo [62].

É possível notar que, para o sistema apresentado neste estudo, a falta de alta impedância modelada para este caso específico não gera nenhum tipo de distorção na forma de onda da corrente.

No entanto, como foi verificado anteriormente, em muitos casos de falta de alta impedância há o aparecimento de arcos elétricos, os quais podem causar muitas distorções na forma de onda da corrente deste tipo de falta, invalidando este modelo para muitos casos.

2.2.2 Modelo B: Combinação de impedâncias não-lineares

Um modelo desenvolvido para ser flexível é o modelo que utiliza a combinação de impedâncias de falta não-lineares [63]. Basicamente, este modelo baseia-se no ciclo de tensão, ou seja, enquanto a tensão aumenta durante o meio-ciclo positivo ou negativo, a impedância diminui. Existem, portanto, 16 impedâncias de falta não-lineares diferentes e cada impedância apresenta uma amplitude variando de zero a 5000 ohms durante meio ciclo de tensão. O estudo sugere, então, que sejam escolhidas e combinadas as impedâncias não-lineares, a fim de simular uma falta de alta impedância.

É perceptível que esta não é a aproximação ideal para o desenvolvimento de um modelo

flexível, uma vez que se torna um modelo extremamente complexo para se configurar, necessitando de muitos testes e estudos sobre como modelar as não-linearidades das impedâncias e como combinar tais impedâncias para que apresentem um resultado aceitável.

2.2.3 Modelo C: R_f e L_f

Um dos muitos modelos utilizados para simular a falta de alta impedância com presença de arco elétrico, é o modelo que utiliza uma impedância de falta variável contendo uma resistência de falta R_f e uma indutância de falta L_f [25, 32, 39, 45, 64]. Este modelo foi utilizado principalmente para auxiliar no desenvolvimento e treinamento de algoritmos baseados em técnicas de inteligência artificial. O esquema do sistema estudado pode ser visualizado a seguir na Figura 2.12.

Figura 2.12: Sistema utilizado para o desenvolvimento de localização de falta de alta impedância

Figura 2.13: Circuito equivalente do sistema estudado

Modelando-se o sistema sob condição de falta de alta impedância com presença de arco elétrico, tem-se o circuito equivalente mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.14: Implementação em MATLAB/Simulink do sistema estudado

O circuito equivalente citado foi implementado em MATLAB/Simulink e pode ser visto na Figura 2.14.

Sendo que [25]:

l : comprimento da linha = 32 km

V : tensão do gerador = 25 kV

R_S : resistência-série do gerador = $0,7\Omega$

L_S : indutância série do gerador = 7 mH

R_{line} : resistência da linha = $0,25\Omega/\text{km}$

L_{line} : indutância da linha = $0,99472\text{ mH}/\text{km}$

C_{line} : capacitância da linha = $11,17\text{ nF}/\text{km}$

R_l : resistência da carga = 200Ω

L_l : indutância da carga = 200 mH

R_f : resistência de falta = $R_{f0} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{i_f}{i_{f0}}\right)^\beta\right)$

R_{f0} : resistência de falta inicial = 20Ω

α : coeficiente = $0,6$

β : coeficiente = 2

i_f : corrente de falta

i_{f0} : corrente de falta inicial = 70

L_f : indutância de falta = 3 mH

Os resultados da simulação em MATLAB/Simulink encontram-se nas Figuras 2.15, 2.16 e 2.17.

Figura 2.15: Tensão na fonte e tensão no ponto de falta durante a falta de alta impedância

Figura 2.16: Corrente na fonte e corrente no ponto de falta durante a falta de alta impedância

Figura 2.17: Característica $V \times I$ da falta de alta impedância simulada para o sistema em questão

Nota-se que os resultados deste modelo são compatíveis com as pesquisas e ensaio mostrados anteriormente. No entanto, verificou-se que este modelo é muito específico para cada sistema elétrico, necessitando de um estudo para cada configuração de cargas, a fim de conseguir calibrar os valores corretos de R_f e L_f para que estes provoquem o efeito desejado de uma falta de alta impedância.

2.2.4 Modelo D: 2 diodos, 2 fontes DC e impedância

A Figura 2.18 mostra um modelo bastante simples proposto em [51] e que permite a realização de cálculos teóricos, utilizado para o treinamento de redes neurais artificiais [31, 40]. É possível ver o modelo implementado em MATLAB/Simulink (Figura 2.19). O arco de falta

Figura 2.18: Circuito para modelar tensões e correntes de arco apresentado em [51]

de alta impedância é modelado com a ajuda de duas fontes DC com tensões V_P e V_N conectadas em paralelo (através de dois diodos), mas com polaridades invertidas. Utilizando-se

$V_N > V_P$, pode-se calcular a amplitude de frequências harmônicas em função da diferença $(V_N - V_P)$ e de:

$$\tan \theta = \frac{X_L}{R} \quad (2.11)$$

Os resultados da simulação em MATLAB/Simulink encontram-se nas Figuras 2.20, 2.21 e 2.22.

Figura 2.19: Implementação do sistema da Figura 2.18 em MATLAB/Simulink

Figura 2.20: Tensão na fonte e tensão no ponto de falta durante a falta de alta impedância

Figura 2.21: Corrente na fonte e corrente no ponto de falta durante a falta de alta impedância

Figura 2.22: Característica V_{xI} da falta de alta impedância simulada para o sistema em questão

Pelo cálculo da Equação 2.11, e também por meio de medidas, conclui-se que a diferença ($V_N - V_P$) tem pouca influência sobre a 3ª harmônica enquanto que a 2ª harmônica é gerada praticamente somente por essa assimetria.

2.2.5 Modelo E: Resistência Variável Controlada por TACS

Um dos modelos utilizados para treinar um algoritmo baseado em redes neurais foi o modelo de resistência variável (R_f) controlada por TACS. Neste modelo, a simulação da instabilidade do arco é feita por meio do uso de um gerador de números aleatórios nos MODELS do ATP e os valores da tensão de arco e do período de extinção são escolhidos estocasticamente entre valores pré-definidos [35].

Apesar de ser um modelo aparentemente representativo, é um modelo imprevisível, já que é regido por um parâmetro baseado em números aleatórios, e a sua implementação torna-se trabalhosa e pouco flexível devido à necessidade do conhecimento dos valores de tensão de arco e do período de extinção.

Uma outra aproximação foi feita desenvolvendo-se um modelo computacional para as faltas de alta impedância produzidas pelo rompimento de condutores primários em redes de distribuição de média tensão, implementado no software ATP com a utilização de duas resistências variáveis controladas por TACS [65].

Como visto anteriormente, destacam-se as seguintes características das correntes durante faltas de alta impedância:

- a) Distorção da forma de onda: essa distorção é produzida pela não linearidade da resistência do arco gerado no interior do solo.
- b) Assimetria entre semi-ciclos: diferença entre as amplitudes dos ciclos positivos e negativos da forma de onda da corrente de falta.
- c) Intermitência e descontinuidade da corrente: essa característica é responsável pela geração dos componentes de alta frequência no espectro da corrente de falta.
- d) Crescimento da amplitude da corrente com *buildup* e *shoulders*.

Este modelo representa de forma bastante precisa as características a, b e d. Apenas a característica c (intermitência e descontinuidade) não foi considerada por tratar-se de um processo aleatório de difícil representação. Dessa forma os sinais gerados com esse modelo não irão conter os componentes harmônicos de ordem elevadas.

Figura 2.23: Controle das Resistências por TACS

Figura 2.24: Forma de onda da corrente durante evento de falta de alta impedância [65]

Para representar a impedância de falta, esse modelo utiliza-se de duas resistências variantes no tempo (componente *TVR – Time-Varying Resistance* – do ATP) em série (Figura 2.23). Uma das resistências é usada para produzir a distorção e a assimetria da característica tensão-corrente observadas em todos os ciclos da corrente de falta. A outra é utilizada para modelar o *buildup*.

Após o termino dessa fase, essa segunda resistência é zerada e não mais influi no processo de simulação da falta.

Figura 2.25: Ocorrência de *buildup* e *shoulders* da curva de corrente durante a falta de alta impedância [65]

A Figura 2.24 e a Figura 2.25 mostram o resultado da corrente de falta gerada pelo uso do modelo acima descrito, sendo possível observar que este modelo respeita as características gerais de uma falta de alta impedância. Na Figura 2.26 é apresentado o resultado do comportamento V_{xI} deste modelo, que é compatível com o descrito pelos estudos de arcos elétricos.

Figura 2.26: Característica V_{xI} para a falta de alta impedância

3 Adaptação e Implementação do Modelo de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição

3.1 Ensaios de Campo

Foi realizada uma série de doze ensaios de rompimento e queda de condutores visando caracterizar eletricamente o fenômeno de propagação da corrente de falta de alta impedância no interior do solo durante esse tipo de evento. Os ensaios tiveram como objetivo também realizar o levantamento da característica V_{xI} da falta, além de verificar e comprovar o aparecimento de arcos elétricos. A Figura 3.1 mostra um dos ensaios realizados nas instalações do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo (USP).

Figura 3.1: Ensaio de falta de alta impedância realizado nas instalações do IEE-USP

3.1.1 Características do Solo

Uma restrição importante que deve ser feita com relação aos ensaios realizados, reside no fato de que o solo da Cidade Universitária (Campus da USP) apresenta uma resistividade muito baixa, não podendo ser considerado típico do encontrado na maioria das concessionárias brasileiras. Devido às restrições impostas pelo arranjo experimental utilizado, não foi possível realizar ensaios em outros tipos de solos que pudessem ser considerados mais representativos da média nacional. A Tabela 3.1 apresenta as características do solo no local do ensaio para uma estratificação em duas camadas (como pode ser observado nessa tabela, a resistividade do solo na primeira camada é de apenas 31 $\Omega\cdot\text{m}$).

Resistividade da 1ª camada (ρ_1)	31,0 $\Omega\cdot\text{m}$
Espessura da 1ª camada (d_1)	1,29 m
Resistividade da 2ª camada (ρ_2)	289,21 $\Omega\cdot\text{m}$

Tabela 3.1: Resistividade do solo no local do ensaio

3.1.2 Arranjo Experimental

Os ensaios consistiram em lançar ao solo um condutor de alumínio 1/0 energizado com tensão de $13.8/\sqrt{3}$ kV (tensão fase-terra) fornecida por um transformador monofásico alimentado por fonte de 220V e corrente de curto-circuito de 30kA. Os sinais de tensão e corrente de falta foram registrados por meio de um oscilógrafo YOKOGAWA - modelo AR1100 utilizando frequências de amostragem de 2 ou 10 kHz. O sistema elétrico utilizado nos ensaios é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Esquema elétrico e de medição dos ensaios de falta de alta impedância

Para a realização dos ensaios foi montado um arranjo experimental em um gramado de 19,5m x 20,3m, dentro das dependências do IEE-USP. Este arranjo foi composto por dois

postes de 4m de altura cada, além de um lance de cabo nu de alumínio com alma de aço e mais 4 hastes de cobre (h_1 , h_2 , h_3 como malha de terra para aterramento do enrolamento do trafo e h_4 para fixação da referência elétrica).

Todos os ensaios utilizaram a mesma montagem física, ilustrada na Figura 3.3 e na Figura 3.4. Uma parte dos ensaios foi feita derrubando-se o cabo a partir do poste P_2 , ou seja, após a energização do sistema, desconectava-se a ponta do cabo ligada a P_2 . A outra parte dos ensaios foi realizada já com o cabo no chão, suspenso somente por P_1 .

Figura 3.3: Esquema do arranjo físico para o ensaio de falta de alta impedância

Os equipamentos envolvidos nos ensaios para a caracterização da falta de alta impedância foram:

- Fonte: trifásica, 220V, corrente de curto-circuito = 30kA
- Trafo 1: monofásico, 50kVA, taps baixa: 240/120, taps média = 7967V; 7621V; 7275V; $x_{cc}=2.42\%$.
- Trafo 2: monofásico, 100kVA, taps baixa: 240/120, taps média = 14,4kV; 13,8kV; 13,2kV; 12,6kV; $x_{cc}=2.73\%$.

- TP: marca LAELC, relação nominal = 120:1
- TC: marca ISOLET, relação nominal = 50:5
- Oscilógrafo: YOKOGAWA, modelo AR1100
- Cabo: nu de alumínio com alma de aço 1/0 AWG.

Figura 3.4: Ilustração do ensaio de falta de alta impedância

3.1.3 Resultados dos Ensaios

Figura 3.5: Arcos elétricos resultantes dos ensaios de falta de alta impedância

Ao todo foram feitos doze ensaios de falta de alta impedância. Em todos os ensaios observou-se a ocorrência de arcos-elétricos através do ar (Figura 3.5), próximo dos pontos de contato do cabo com o solo e com uma corrente média de falta de 57A (resistência de falta

ENSAIO n°	1	2	3
TAP do trafo	Trafo 1 → 7967 V	Trafo 1 → 7967 V	Trafo 1 → 7967 V
Tipo de ensaio	curto franco na A.T.	cabo direto no chão	cabo direto no chão
f_A	10 kHz	10 kHz	2 kHz
Duração	586,6 ms	586,6 ms	3599,5 ms
I_c	5182,0 A	40,82 A	68,0 A
V	0 V	5502,0 V	5168,0 V
n° de condutores	1	1	1
ENSAIO n°	4	5	6
TAP do trafo	Trafo 1 → 7967 V	Trafo 1 → 7967 V	Trafo 1 → 7967 V
Tipo de ensaio	cabo em queda	cabo em queda	cabo direto no chão
f_A	2 kHz	10 kHz	2 kHz
Duração	3599,5 ms	586,6 ms	3599,5 ms
I_c	45,58 A	47,2 A	47,06 A
V	5448,0 V	5129,0 V	5084,0 V
n° de condutores	1	1	1
ENSAIO n°	7	8	9
TAP do trafo	Trafo 2 → 12,6kV	Trafo 2 → 12,6kV	Trafo 2 → 14,4kV
Tipo de ensaio	cabo direto no chão	cabo direto no chão	cabo direto no chão
f_A	10 kHz	10 kHz	10 kHz
Duração	586,6 ms	586,6 ms	586,6 ms
I_c	51,18 A	62,93 A	67,19 A
V	5492 V	6177,0 V	5802,0 V
n° de condutores	1	2	2
ENSAIO n°	10	11	12
TAP do trafo	Trafo 2 → 12,6kV	Trafo 2 → 12,6kV	Trafo 2 → 12,6kV
Tipo de ensaio	cabo direto no chão	cabo em queda	cabo em queda
f_A	2 kHz	10 kHz	2 kHz
Duração	3599,5 ms	586,6 ms	3599,5 ms
I_c	70,20 A	67,13 A	69,06 A
V	5635,0 V	6252,0 V	5661,0 V
n° de condutores	2	2	2

Tabela 3.2: Características dos ensaios realizados

média igual a 99Ω). As características de cada ensaio realizado podem ser visualizadas na Tabela 3.2.

Como os ensaios foram todos realizados sobre o mesmo tipo de terreno, os resultados foram semelhantes para todos os ensaios. As figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam as tensões e correntes registradas no ensaio n°8. A característica $V \times I$ em pu para o ensaio n°8 é apresentada na Figura 3.10.

Figura 3.6: Tensão de falta medida na fonte durante o ensaio n° 8

Figura 3.7: Detalhe da tensão de falta medida na fonte durante o ensaio n° 8

Figura 3.8: Corrente de falta medida na fonte durante o ensaio nº 8

Figura 3.9: Detalhe da corrente de falta medida na fonte durante o ensaio nº 8

Figura 3.10: Característica VxI obtida do ensaio nº 8

Figura 3.11: Buildup e shoulder

É preciso observar que as características de *buildup* e *shoulder* se manifestam, ainda que timidamente, nos ensaios de falta de alta impedância realizados no IEE-USP (Figura 3.11).

Para efeito ilustrativo, a seguir encontra-se a forma de onda da corrente de falta de alta impedância do ensaio n°4. Tal corrente apresenta uma certa diferença quanto ao padrão de comportamento de uma forma de onda de corrente de falta de alta impedância padrão. Isso ocorre, pois o cabo utilizado nos ensaios não estava devidamente tensionado e assumiu o formato helicoidal durante e após sua queda, rebatendo no solo pelo menos uma vez e demorando para acomodar-se completamente.

Figura 3.12: Corrente de falta medida na fonte durante o ensaio n° 4

3.1.4 Conclusões sobre os Resultados dos Ensaios

Com relação aos ensaios realizados é importante fazer as seguintes observações:

- a) A fonte de média tensão utilizada nos ensaios (fonte de 220V em série com o trafo de distribuição) é “fraca”, isto é, a impedância do Thévenin equivalente é alta quando comparada com a verificada em um alimentador real. Isso reduz a corrente de falta e, principalmente, distorce a tensão de fase no ponto de falta (Figura 3.7).

- b) A resistividade da primeira camada do solo no local onde foi realizado o ensaio é extremamente baixa ($31\Omega.m$) e não pode ser considerado representativo dos solos encontrados no Brasil. Essa baixa resistividade não favorece à formação do arco no interior do solo e, dessa forma, as características típicas da corrente de falta de alta impedância (assimetria e distorção) são pouco observáveis na corrente registrada no ensaio (Figura 3.9).
- c) Apesar das observações anteriores, acredita-se que os resultados obtidos nos ensaios realizados são efetivamente importantes, pois as características principais de uma falta de alta impedância aparecem, ainda que tímidas e apesar das limitações citadas acima.

3.2 Modelagem do Evento de Falta de Alta Impedância

Após a análise dos modelos de falta de alta impedância estudados e apresentados na literatura, optou-se por implementar no Sistema de Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição o modelo adaptado daquele de resistências variáveis em série controladas por TACS [65].

A escolha deste modelo baseou-se principalmente em dois fatores:

- a) O modelo é o que melhor pode descrever as principais características de uma falta de alta impedância e tende a ser mais flexível com relação à sua configuração e adaptação a vários cenários.
- b) O modelo é de fácil compreensão e implementação.

3.2.1 Modelagem da Queda de Condutor

Como citado no Capítulo 2, a simulação da falta de alta impedância é constituída de quatro etapas. Para a modelagem da queda do condutor foi utilizado um conjunto de chaves devidamente posicionadas simulando o rompimento do cabo com seu conseqüente contato com a superfície do solo.

Para simular as três primeiras fases, o modelo computacional desenvolvido utiliza três chaves controláveis como mostrado na Figura 3.13 e detalhado na Tabela 3.3. Observe que, para simular a abertura do condutor, o modelo dispõe de duas chaves em série (chaves A e B). Esse recurso permite simular o contato do condutor do lado fonte ou do lado carga (para falta do lado fonte abre-se a chave B, para falta do lado carga abre-se a chave A).

Figura 3.13: Chaves para simulação das faltas de alta impedância

Etapa	Tempo	Comentários	Chaves	
			abertas	fechadas
1	Pré-falta	As correntes que circulam na rede são produzidas somente pelas cargas.	C	A e B
2	Rompimento do cabo	Abertura da fase em que ocorre o defeito.	(A ou B) e C	(B ou A)
3	Queda do cabo	Admite-se que durante a queda não há contato entre o cabo rompido com outras fases ou o neutro.	(A ou B) e C	(B ou A)
4	Arco-elétrico	O cabo chega ao solo e inicia-se o arco elétrico.	(A ou B)	(B ou A) e C

Tabela 3.3: Etapas da simulação das faltas de alta impedância

3.2.2 Modelagem das Características da Falta de Alta Impedância

Como citado anteriormente, o modelo desenvolvido e implementado neste trabalho é constituído por duas resistências variáveis em série. A resistência denominada *HZR2* assume valores não nulos somente durante a etapa de *buildup* da corrente. Essa resistência começa com um valor relativamente elevado e vai diminuindo seu valor de forma monotônica ao longo do tempo, de forma a representar o crescimento típico da corrente verificado na etapa de acomodação do condutor rompido no solo. Já a resistência denominada *HZR1* varia da

mesma forma dentro de todos os ciclos do sinal de corrente. A variação dessa resistência é feita de forma a gerar o sinal de corrente com a distorção e a assimetria típicas. O controle das duas resistências é implementado com a utilização da ferramenta *MODELS* existente no ATP.

O modelo computacional completo (chaves com as resistências variáveis) desenvolvido para a simulação das faltas de alta impedância é ilustrado na Figura 3.14.

Figura 3.14: Modelo Computacional desenvolvido para simulação das faltas de alta impedância

O modelo completo é, então, constituído por dois componentes:

- Controlador das chaves: o usuário fornece a fase faltosa, o lado do contato (carga ou fonte) e os instantes t_0 e t_{queda} e o controlador comanda as chaves para que os fechamentos e aberturas das três chaves, mostradas na Figura 3.15, ocorram nos instantes adequados. O controlador implementado em linguagem *MODELS* é chamado *MODEL SWCTRL* (*Switch Controller*).
- Controlador das resistências: consiste em uma rotina escrita em linguagem *MODELS* do ATP responsável por reger as mudanças em cada instante de tempo das resistências *HZR1* e *HZR2* visando representar de forma adequada o fenômeno do arco elétrico que ocorre no solo. No programa ATP os valores calculados pelo algoritmo para essas duas variáveis (*HZR1* e *HZR2*) servem como entrada de dados para duas resistências tipo 91 do ATP, controláveis por *TACS*. A seguir, discute-se como o algoritmo realiza o controle dessas duas resistências.

Figura 3.15: Controlador de chaves

3.2.2.1 O Controle da Resistência HZR1

Como já comentado, o objetivo do controle dessa resistência é reproduzir a distorção e a assimetria existente em todos os ciclos da corrente de falta. Como ilustrado na Figura 3.16, para realizar essa tarefa, o controle de *HZR1* calcula, para cada instante de tempo, o valor da resistência em função da tensão de fase existente no ponto de falta naquele instante. Essa

Figura 3.16: Controle da Resistência *HZR1*

rotina é implementada de forma a reproduzir a característica V_{xI} da falta para os ciclos de regime permanente da falta como a apresentada na Figura 3.17. Essa característica é constituída por dois semi-ciclos: o semi-ciclo de subida (composto pelos valores que definem o aumento da tensão e da corrente, partindo do menor ao maior valor de ambas grandezas) e o semi-ciclo de descida (definido pelos pontos que iniciam no maior valor de tensão e corrente e terminam nos menores valores das grandezas). Na Figura 3.17 a curva sobe pelos pontos em vermelhos (derivada positiva da tensão) e desce pelos pontos em azul (derivada negativa). Dada a tensão no ponto de falta em determinado instante de tempo, a partir da característica V_{xI} obtém-se a corrente de falta e a seguir calcula-se a correspondente resistência. Ou seja, definida a tensão na entrada do controle de *HZR1* e conhecendo-se o seu sentido (derivada positiva ou negativa), calcula-se a corrente por meio de uma interpolação simples. A partir destes dois valores, calcula-se *HZR1*. Na rotina implementada a característica V_{xI} é descrita a partir de uma tabela de pares tensão-corrente e a interpolação para o cálculo da resistência *HZR1* é feita como descrito a seguir:

a) Dada a tensão no ponto de falta - $v(t)$ -, o programa determina em que faixa da tabela

Figura 3.17: Característica VxI de falta de alta impedância

tensão-corrente essa tensão se encontra, isto é:

$$v_n \leq v(t) < v_{n+1} \quad (3.1)$$

b) a corrente correspondente a $v(t)$ é estimada a partir da interpolação:

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

c) conhecidos $v(t)$ e $i(t)$ calcula-se a resistência $HZR1(t)$:

$$HZR1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (3.3)$$

É conveniente observar que para gerar as características de não linearidade e assimetria observada nas correntes de falta, a resistência de falta $HZR1$ não é constante, variando de valor em cada instante de tempo ao longo do ciclo. Neste trabalho, a resistência de falta (R_{falta}) será definida como o valor assumido por $HZR1$ no pico da corrente, isto é, R_{falta} é calculado como a relação entre a tensão de pico e a corrente de pico do ciclo da característica VxI.

Uma dificuldade em se trabalhar com o modelo apresentado reside no fato de ser necessário levantar a característica VxI dependendo do cenário a ser simulado. A solução para facilitar e flexibilizar a utilização do modelo foi possibilitar o uso de uma curva característica VxI em

p.u. Sendo assim, a tensão e corrente de base são dadas por:

$$V_{BASE} = V_{nominaldefase} \quad I_{BASE} = \frac{V_{BASE}}{R_{falta}} \quad (3.4)$$

Com a utilização dessas duas bases, qualquer curva característica VxI pode ser facilmente transformada em p.u. Os pontos da curva característica VxI da falta de alta impedância são implementados no controlador da resistência *HZR1*. Ao fornecer a tensão nominal de fase do alimentador e a resistência de falta desejada na simulação, a rotina desnormaliza a curva, utilizando-a normalmente. A vantagem dessa solução é que faltas com diferentes valores de resistência de falta (R_{falta}) podem ser simuladas utilizando a mesma curva característica VxI em p.u. (as correntes de falta simuladas terão diferentes amplitudes, porém com a mesma forma). Será somente necessário alterar os pontos da curva VxI se for preciso mudar a forma da curva VxI, isto é, alterar as características de não-linearidade e assimetria da falta de alta impedância. A seguir encontram-se um gráfico de uma curva VxI em p.u. (Figura 3.18) e seus respectivos pontos (Tabela 3.4).

Figura 3.18: Exemplo de curva característica VxI para faltas de alta impedância utilizando valores em p.u.

3.2.2.2 O Controle da Resistência HZR2

Este controle é responsável por inserir e controlar a resistência *HZR2* durante a etapa de *buildup*. Como pode ser observado na Figura 3.14, a impedância de falta total é dada pela

V subida (pu)	I subida (pu)	V descida (pu)	I descida (pu)
-0.9887	-1.0165	1	0.9605
-0.9667	-1.0042	0.9815	0.9137
-0.9297	-0.9648	0.9409	0.8496
-0.8781	-0.9031	0.9041	0.7633
-0.819	-0.8218	0.8449	0.6548
-0.7416	-0.7108	0.7933	0.5365
-0.653	-0.5974	0.7158	0.4157
-0.5497	-0.4644	0.6384	0.3097
-0.4428	-0.3213	0.5535	0.2161
-0.3099	-0.1981	0.4575	0.147
-0.1807	-0.0871	0.358	0.0928
-0.048	-0.0206	0.251	0.0558
0.0074	-0.0008	0.1403	0.0263
0.0849	0.0139	-0.0368	-0.0378
0.2214	0.1076	-0.1659	-0.0625
0.3654	0.221	-0.2803	-0.0896
0.4797	0.3516	-0.3762	-0.134
0.5941	0.4773	-0.4833	-0.1957
0.6974	0.6105	-0.5645	-0.2622
0.7859	0.7264	-0.6457	-0.3583
0.8597	0.82	-0.7231	-0.4594
0.9225	0.9013	-0.7858	-0.5731
0.963	0.9531	-0.8522	-0.6837
1	1	-0.8965	-0.7897
		-0.9407	-0.8736
		-0.9667	-0.9352
		-0.9851	-0.9844
		-0.9851	-1.0239

Tabela 3.4: Exemplo de valores da curva característica $V \times I$ em p.u.

soma das duas resistências em série, isto é:

$$HZR(t) = HZR1(t) + HZR2(t) \quad (3.5)$$

Como mencionado anteriormente, a função $HZR1(t)$ tem uma característica periódica ao longo dos diversos ciclos da falta. Já a função $HZR2(t)$ tem um valor elevado no começo da falta e diminui de forma monotônica durante a etapa de *buildup* até tornar-se zero no regime permanente. A resistência $HZR1(t)$ é obtida dos dados de tensão e corrente de regime e $HZR2(t)$ deve ser determinada dos dados do período transitório (etapa de *buildup*). A função $HZR2(t)$ pode ser obtida subtraindo-se da resistência total - $HZR(t)$ - o valor de $HZR1(t)$. Não é prático, no entanto, fazer esse cálculo para todos os instantes de tempo. Para simplificar

esse procedimento, adotou-se uma equação de envoltória baseada no cálculo do valor da impedância para os instantes de tempo em que tensão e a corrente atingiam o valor de pico.

A rotina de controle da resistência *HZR2* consiste em uma implementação computacional de uma fórmula de envoltória, a qual para cada instante de tempo da simulação calcula o valor de *HZR2*.

Os detalhes da implementação da falta de alta impedância em *MODELS* para o ATP podem ser visualizados no exemplo mostrado no ANEXO A.

4 Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição

Para se avaliar o desempenho dos dispositivos de proteção na detecção das falhas de alta impedância há a necessidade de simular a ocorrência deste tipo de falta em diferentes pontos da rede primária de distribuição, sob diversas condições de carga e também com diferentes valores de resistência de falta (R_{falha}). A ferramenta de simulação utilizada neste trabalho, como já mencionado, foi o programa computacional denominado ATP, cujo uso é amplamente aceito e disseminado entre os profissionais do setor elétrico.

Este procedimento proposto para a avaliação dos dispositivos de proteção mostra duas dificuldades principais:

- a) a rede primária de distribuição apresenta uma topologia bastante complexa, com centenas de ramais laterais e um grande número de cargas distribuídas ao longo dos nós. Isso torna a montagem manual do arquivo de dados para o caso de simulação no ATP uma tarefa bastante difícil;
- b) como comentado anteriormente, a análise do desempenho da proteção exige a simulação de um grande número de situações de falta, o que torna o processo manual extremamente tedioso e cansativo.

O cenário mostrado acima é agravado ainda mais pela necessidade de utilização das rotinas *MODELS* que modelam as falhas de alta impedância. A fim de superar as dificuldades do procedimento proposto, criou-se o programa denominado ATPCAD, que facilita a geração de casos para simulação de falhas de alta impedância no ATP, automatizando o processo de elaboração dos arquivos de simulação. Esse sistema é constituído por três ambientes (Figura 4.1):

- a) Ambiente Concessionária: é constituído pela Base de Dados Corporativos da conces-

sionária (BD CON) e por um programa (EXTRATOR CON) responsável por extrair dessa base as informações referentes à topologia e aos parâmetros elétricos das redes a serem simuladas. Essas informações são fornecidas ao ambiente ATPCAD por meio de um arquivo ASCII e são:

- topologia física do alimentador: descrição dos trechos do alimentador primário e o tipo de rede em cada trecho;
- topologia elétrica do alimentador: tipo dos condutores, bitola, parâmetros elétricos e impedâncias de seqüência positiva e zero além de outros dados relevantes de cada trecho;
- descrição dos elementos de proteção ao longo do alimentador;
- descrição dos transformadores de distribuição ao longo do alimentador;
- descrição dos bancos de capacitores distribuídos ao longo do alimentador, e;
- outras informações adicionais (potência de curto circuito ou impedância equivalente da fonte).

b) Ambiente ATPCAD: é constituído por uma Base de Dados própria do sistema (BD ATPCAD), desenvolvida em MySQL, e por dois aplicativos de software, sendo eles o TOPCONV e o ATPCAD. A base de dados armazena as informações dos alimentadores extraídas da base de dados corporativa da concessionária e as informações referentes às faltas já simuladas. O aplicativo TOPCONV é responsável por inserir as informações contidas no arquivo fornecido pelo programa Extrator CON para a base de dados do ATPCAD. O ATPCAD é a peça principal para o gerenciamento desse sistema. É um programa computacional desenvolvido em Visual Basic, tendo como ferramenta gráfica principal a biblioteca OPEN GL. É por meio deste programa que é possível visualizar a rede elétrica cadastrada na Base de Dados, escolher o local e o tipo da falta a ser aplicada, configurar os dados da falta, além de visualizar valores de tensão e corrente da rede em regime permanente.

c) Ambiente ATP/EMTP: é constituído pelo programa de simulação do tipo ATP/EMTP. O programa ATP/EMTP processa os arquivos .ATP, gerando como resultados os arquivos .PL4 e .LIS. O arquivo .PL4 é um arquivo codificado, podendo ser visualizado somente por programas específicos como o PLOTXY ou PCPLOT). Por outro lado, arquivo .LIS é um arquivo texto (ASCII) e é utilizado pelo ATPCAD para a visualização dos resultados do fluxo de potência calculado para uma determinada simulação em regime permanente.

Com relação à simulação de faltas de alta impedância, o usuário pode, por meio do ATPCAD, fornecer a tensão de fase do alimentador e a resistência de falta de alta impedância (R_{falta}) desejada na simulação. A vantagem dessa solução é que faltas com diferentes valores de R_{falta} podem ser simuladas utilizando a mesma curva característica VxI (que é descrita em pu). O usuário também pode fornecer novos pontos da curva VxI se desejar alterar as características de não-linearidade e assimetria.

Figura 4.1: Diagrama do Sistema de Gerenciamento e Visualização de Faltas

4.1 ATPCAD

O ATPCAD é um programa computacional que, por meio de interfaces gráficas bastante amigáveis, além de gerar os arquivos para simulação de faltas de alta impedância no ATP, também auxilia o engenheiro na exploração e análise dos resultados da simulação. Essa rotina apresenta as seguintes facilidades:

- faz a leitura do alimentador a ser simulado a partir de um arquivo ASCII extraído da base de dados corporativa das empresas e que contem as informações referentes à topologia e aos parâmetros elétricos do alimentador;

- testa a consistência dos dados lidos e, não havendo erros, armazena essas informações em uma base de dados própria;
- permite ao usuário visualizar graficamente a topologia da rede e os pontos com equipamentos conectados (transformadores, banco de capacitores, elementos de proteção);
- insere de forma automática as rotinas *MODELS* necessárias para a modelagem das faltas de alta impedância;
- gera automaticamente o arquivo de dados para simulação da rede no software ATP. Nesta etapa, o programa disponibiliza facilidades gráficas para que o usuário indique em que ponto da rede será incluída a falta de alta impedância e em quais pontos as tensões e correntes serão registradas;
- permite ao usuário visualizar graficamente os resultados da simulação em regime permanente realizada no ATP;
- permite ao usuário visualizar os fasores de tensão e corrente em todos os nós da rede, resultantes da simulação em regime permanente realizada pelo ATP.

Efetivamente, o ATPCAD permite gerar casos de simulação para dois tipos de falta: curto-circuitos e faltas de alta impedância. Caso a falta seja de alta impedância, é possível criar somente casos para simulação de transitórios. No entanto, se a falta for um curto-circuito, é possível gerar casos para simulação tanto de transitórios como de regime permanente. Ainda há a possibilidade de gerar casos para análise de regime permanente somente, sem situação de falta.

Logo após a instalação do aplicativo e sua devida configuração, é possível escolher por meio da interface gráfica o alimentador com o qual se deseja trabalhar (Figura 4.2).

O ATPCAD possui ferramentas de navegação sobre a topologia, permitindo o rápido e fácil manuseio da mesma e também a visualização das barras, cargas, elementos de proteção e capacitores cadastrados na base de dados (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6).

Além de todas as ferramentas comuns para a visualização da topologia de uma rede de distribuição, o ATPCAD permite escolher um ponto de falta na topologia, configurar a falta desejada e gerar automaticamente um caso de simulação a ser processado pelo ATP.

Figura 4.2: Tela de verificação e escolha de topologia

Figura 4.3: Ferramentas do ATPCAD permitem a navegação pela topologia e visualização dos componentes de rede

Figura 4.4: Selecionando área da topologia para aproximar a área de visualização

Figura 4.5: Área selecionada para aproximação

Figura 4.6: Detalhe de visualização de cargas e barras

Inserir Falta / Configurar Simulação

Dados Gerais da Simulação

☐ Regime Permanente

☒ Transitório

Número de amostras por ciclo: 16 amostras/ciclo

Tempo total de simulação: 1500 ms

Dados da Falta

Tipo da Falta

☒ High Z (Alta Impedância)

☐ Curto-circuito

Dados da Fonte

Tensão Nominal de Linha: 13.8 kV

Tensão na S.E.: 1 p.u.

Ângulo de fase: 0 graus

Dados da Carga

Fator de Potência: .9

Carregamento: 11 MVA

High Z

Falta: Fase B

Instante da falta: 200 ms

Tempo de queda do cabo: 1000 ms

Lado da Falta

☒ Gerador

☐ Carga

Curva de Comportamento de High Z

Resistência de falta HZ: 250 Ohms

C:\ATPCAD\CONFIG\curvapadiao.vxi

Curto-circuito

Falta:

Instante da falta: 0 ms

Rompimento

☐ Sim

☐ Não

Lado da Falta

☐ Gerador

☐ Carga

Resistência(s) de falta

R_1: 124 Ohms

R_2: 231 Ohms

R_3: 150 Ohms

R_4:

Inserção de Falta no Elemento: ID 219

Pos.X(origem): 162131,0

Pos.Y(origem): 30679,0

Pos.X(destino): 161446,0

Gerar Caso Cancelar

Figura 4.7: Exemplo de tela de configuração de falta

Por meio da interface gráfica apresentada na Figura 4.7, configura-se uma falta através dos seguintes itens:

a) Dados Gerais da Simulação

- Tipo de simulação: para configurar a simulação com falta, deve-se primeiramente escolher o tipo de simulação que deseja executar. Para tanto, é necessário que escolha entre duas opções: Regime Permanente e Transitório. Para o caso de Regime Permanente, o programa EMTP/ATP calcula os fasores de tensões e correntes para todas as barras na condição de falta. Sendo assim, ao escolher a opção de simulação em Regime Permanente, a tela de configuração da falta adquire um formato específico. A simulação em Regime Permanente somente é permitida para faltas de curto-circuito, sendo possível, portanto, configurar alguns parâmetros de simulação (dados da fonte e da carga) e os dados da falta (lado de ocorrência da falta, fases envolvidas e respectivas resistências de falta). Por ser uma configuração de simulação em Regime Permanente, não existe a necessidade de inserir o tempo total de simulação e nem o tempo de falta. Os parâmetros de tempo, neste caso, possuem valor -1, o que está de acordo com a configuração exigida pelo programa EMTP/ATP. No caso de estudo transitório, é possível escolher tanto a opção de falta de curto-circuito, quanto a de alta impedância.
- Número de amostras por ciclo: o usuário pode escolher entre 16, 32, 64, 128 ou 256 amostras por ciclo (de 60Hz).
- Tempo total de simulação: o tempo total de simulação é definido pelo usuário, no entanto, possui limitações relacionadas a cada passo de integração. O programa ATPCAD calcula automaticamente o limite de tempo de simulação e, em caso de uma entrada de dados não permitida, avisará o usuário quando este executar a verificação do caso, antes de salvar o arquivo.

b) Dados da Falta

- Tipo da Falta: o usuário poderá escolher a simulação de falta de curto-circuito ou de alta impedância, dependendo obviamente do tipo de simulação ao qual o sistema será submetido. Como já explicado anteriormente, as simulações em regime permanente permitem apenas a inserção de faltas de curto-circuito, enquanto as simulações transitórias permitem tanto a falta de curto-circuito, quanto a falta de alta impedância.

- Dados da Fonte: os dados referentes à fonte são a Tensão Nominal de Linha, a Tensão na Subestação (S.E.) e o Ângulo de Fase. A Tensão Nominal de Linha é a tensão de linha da fonte, dado em kV. A Tensão na S.E. é a tensão em p.u. entregue pela subestação. O Ângulo de Fase: é o ângulo em graus da fase A da alimentação.
- Dados da Carga: os dados referentes à carga são o Fator de Potência e o Carregamento. Ao invés de configurar cada fator de potência para cada carga pendurada no sistema, preferiu-se implementar um fator de potência único generalizado para todo o sistema. Quanto ao Carregamento, o usuário deve inserir a potência total real consumida para a simulação desejada (em MVA). Esta potência será distribuída proporcionalmente à potência nominal instalada em cada barra do alimentador.

c) Configuração High Z (Falta de Alta Impedância)

- Falta: escolher a fase (A, B ou C) em que a falta de alta impedância está ocorrendo.
- Instante da falta: define o instante (em ms) do rompimento do condutor.
- Tempo de queda do cabo: define o tempo (em ms) que o condutor rompido leva para atingir o solo, após seu rompimento.
- Lado da Falta: escolhe-se o lado em que o cabo se rompe (lado da carga ou do gerador).
- Curva de Comportamento de High Z: como descrito anteriormente, o modelo de falta de alta impedância baseia-se em uma curva característica que define o comportamento de tensão e corrente durante tal situação. Nesta parte do programa ATPCAD, o usuário pode utilizar a curva característica (padrão) já existente ou, então, criar a uma curva característica de falta de alta impedância personalizada. A curva padrão utiliza os mesmos valores de tensão e corrente (em p.u.) da curva modelada em [65]. Para utilizar uma curva totalmente personalizada, com outra silhueta, o usuário deve criar um simples arquivo do tipo ASCII (texto comum, editado no *NOTEPAD* do Windows ou *EDIT* do DOS) com a seguinte estrutura:
 - 1^a. linha: quantidade n de pares de coordenadas $V \times I$ que representam a curva de subida da característica de falta de alta impedância.
 - 2^a. linha: quantidade m de pares de coordenadas $V \times I$ que representam a curva de descida da característica de falta de alta impedância.
 - Demais linhas: duas colunas de valores, onde a 1^a. coluna recebe os valores de tensão (em p.u.) e a 2^a. coluna recebe os valores de corrente (em p.u.). O arquivo deve obrigatoriamente conter, na seqüência, as n linhas de pares de

coordenadas V_{xI} que representam a curva de subida da característica de falta de alta impedância e logo em seguida os m pares de coordenadas V_{xI} que representam a curva de descida da característica de falta de alta impedância. Não deve haver linhas em branco entre os pares de valores e a separação das colunas deve ser feita com espaço simples ou *TAB* (veja o exemplo na Figura 4.9 e seu resultado na Figura 4.10).

Nesta parte do programa, o usuário deve indicar também uma resistência de falta para servir de base para a curva característica escolhida, definindo efetivamente a curva V_{xI} da falta de alta impedância para este caso Figura 4.8.

Figura 4.8: Curva personalizada a partir da curva característica padrão da falta de alta impedância: parametrizando a partir da Resistência de Falta HZ

d) Configuração Curto-circuito

- Falta: escolher o tipo de falta de curto-circuito: A-N, B-N, C-N, A-B, B-C, C-A, A-B-N, B-C-N, C-A-N, A-B-C, A-B-C-N. O modelo do circuito utilizado para criar a falta de curto-circuito pode ser visualizado na Figura 4.11 e na Tabela 4.1. Após a escolha do tipo de falta de curto-circuito, o programa ATPCAD libera os campos de preenchimento da(s) respectiva(s) resistência(s) de falta.
- Instante da falta: define o instante (em ms) de ocorrência da falta.
- Rompimento: deve-se escolher se há o rompimento do cabo durante a falta.

Tipo de falta	Resistência(s) de falta				Chave(s) acionada(s)			
A-N	R_{an}				C_{ha}	C_{hn}		
B-N	R_{bn}				C_{hb}	C_{hn}		
C-N	R_{cn}				C_{hc}	C_{hn}		
A-B	$R_{ab} = R_{an} + R_{bn}$				C_{ha}	C_{hb}		
B-C	$R_{bc} = R_{bn} + R_{cn}$				C_{hb}	C_{hc}		
C-A	$R_{ca} = R_{cn} + R_{an}$				C_{hc}	C_{ha}		
A-B-N	R_{an}	R_{bn}	R_n		C_{ha}	C_{hb}	C_{hn}	
B-C-N	R_{bn}	R_{cn}	R_n		C_{hb}	C_{hc}	C_{hn}	
C-A-N	R_{cn}	R_{an}	R_n		C_{hc}	C_{ha}	C_{hn}	
A-B-C	R_{an}	R_{bn}	R_{cn}		C_{ha}	C_{hb}	C_{hc}	
A-B-C-N	R_{an}	R_{bn}	R_{cn}	R_n	C_{ha}	C_{hb}	C_{hc}	C_{hn}

Tabela 4.1: Adaptação das resistências de falta da interface ao modelo utilizado

- Lado da Falta: deve-se escolher o lado em que a falta ocorre (lado da carga ou do gerador), caso haja o rompimento do cabo durante a falta.

Por meio do ATPCAD é possível também inserir pontos de medição de tensão e corrente nas barras da topologia de rede de distribuição para que os dados sejam analisados *a posteriori* utilizando qualquer ferramenta que seja capaz de interpretar o arquivo de saída PL4 do ATP.

Uma outra funcionalidade do ATPCAD é a possibilidade de visualizar as medidas de tensões e correntes em todas as barras no ATPCAD, referentes ao resultado obtido a partir do fluxo de potência em regime permanente calculado pelo programa ATP, ou seja, dados de tensão e corrente no instante t_0 .

A screenshot of a Windows Notepad application window. The title bar reads "curvastd.vxi - Bloco de notas". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Formatar", and "Ajuda". The text area contains a list of numerical values arranged in two columns. The first column starts with "31", "26", "-1", and continues down to "-1.003865225". The second column starts with "-0.984615259", "-0.969230517", "-0.938462204", and continues down to "-0.984615259". The values in the second column are generally the negative of the values in the first column, with some variations in the middle section where the first column has positive values and the second column has negative values. The window has a standard Windows interface with a scroll bar on the right and a taskbar at the bottom.

Figura 4.9: Exemplo de arquivo de curva totalmente personalizada

Figura 4.10: Visualização da curva totalmente personalizada

Figura 4.11: Modelo do circuito para simulação de falta de curto-circuito

5 Resultados

O modelo de falta de alta impedância implementado e o programa ATPCAD foram utilizados em um estudo feito pela equipe de pesquisa do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos (L•PROT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para uma concessionária brasileira para a avaliação da proteção da sua rede de distribuição [66-68]. Por meio do sistema desenvolvido neste trabalho foi possível obter com facilidade correntes de curto-circuito ao longo das redes de distribuição estudadas para faltas simuladas em diversas localidades.

O sistema proposto também foi utilizado para auxiliar no desenvolvimento de um novo algoritmo para a detecção de faltas de alta impedância a ser implementado em um relé digital criado pelo L•PROT. Foram simulados centenas de casos de falta de alta impedância, tanto do lado carga quanto do lado gerador, em diferentes pontos da rede de distribuição. Os resultados (correntes e tensões de falta de alta impedância medidas no alimentador) foram gravados, sintetizados através de uma caixa de testes OMICRON e utilizados nos testes de aprimoramento do novo algoritmo desenvolvido pelo L•PROT.

Um dos alimentadores utilizados nos projetos mencionados foi o alimentador denominado GM03 mostrado na Figura 5.1. Este alimentador possui as seguintes características:

- Quantidade de trechos = 1386
- Quantidade de cargas = 592
- Quantidade de chaves/fusíveis = 78
- Quantidade de capacitores = 0
- Área de ocupação= 281,1 km²
- Comprimento total de cabo = 242,89 km
- Potência total instalada = 14,42 MVA

Figura 5.1: Alimentador GM03

Os dados acima mostram que, para montar este alimentador trecho a trecho e configurar cada carga existente no ATP, a tarefa seria, com certeza, muito dispendiosa. No entanto, com o auxílio do sistema desenvolvido, o estudo pôde ser realizado com eficiência.

A seguir encontram-se os dados de um caso simulado (trecho em verde na Figura 5.1), bem como seus resultados. Na Figura 5.2, pode-se visualizar a tela do ATPCAD que mostra a configuração do caso simulado. Pelas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 é possível observar as características

de *buildup*, assimetria e distorção típicas das correntes de faltas durante eventos de rompimento de condutor.

Figura 5.2: Dados da falta simulada apresentados pelo ATPCAD

Figura 5.3: Corrente de falta de alta impedância resultante da simulação. O condutor primário chega ao solo em $t = 2.9s$

Figura 5.4: Detalhe do *buildup* da corrente de falta resultante da simulação em ATP

Figura 5.5: Detalhe da assimetria da forma de onda da corrente da falta resultante da simulação em ATP

6 Conclusões

Por meio dos resultados obtidos pelas simulações realizadas, nota-se que a forma de onda da corrente de falta de alta impedância está de acordo com a literatura pesquisada e confere com os resultados obtidos nos ensaios. Por isso, é possível considerar o modelo implementado com sendo válido para estudos de falta de alta impedância em redes de distribuição causada por rompimento e queda de condutor primário.

Observando a complexidade das redes de distribuição e a dificuldade de descrição das mesmas em casos a serem simulados pelo ATP, pode-se concluir que o programa ATPCAD é uma valiosa ferramenta de auxílio ao engenheiro para a realização de estudos de faltas em redes de distribuição. O ATPCAD permite a visualização, inserção e configuração de pontos de falta e facilita a criação dos casos em ATP, pois automatiza o processo de descrição dos trechos da rede de distribuição, bem como a colocação de pontos de falta e medição. Além disso, o ATPCAD permite visualizar medidas em regime permanente mostradas diretamente sobre a topologia da rede em estudo.

Apesar do sistema desenvolvido neste trabalho atender às expectativas supracitadas, ainda é possível melhorar suas características. Em estudos futuros sobre as faltas de alta impedância, seria interessante pesquisar o efeito de diferentes tipos de solo e suas respectivas resistividades sobre a resistência da falta, bem como a variação destas resistividades quando submetidas à diferentes taxas de umidade do ambiente. Tais estudos poderão ser relacionados com a deformação das formas de onda de correntes de falta, possivelmente automatizando o processo de criação de uma curva característica $V \times I$ de falta de alta impedância. Além disso, é possível também incluir em pesquisas futuras o estudo e a modelagem das componentes de alta frequência presentes em faltas de alta impedância.

Quanto ao programa ATPCAD, uma sugestão de melhoria é a criação de um interpretador de fórmulas para o usuário inserir sua própria equação para definir a envoltória de *buildup* e *shoulder*. Além disso, pode-se adicionar ao programa a criação de um gráfico tridimensional para observação da variação da amplitude de corrente ao longo da rede de distribuição, utilizando a biblioteca gráfica do OPEN GL, permitindo ao usuário uma visualização mais ime-

diata do comportamento das correntes de falta.

Anexo A – Exemplo de Arquivo de Entrada do ATP

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C ARQUIVO DE SIMULACAO GERADO POR ATPWT.EXE - VERSAO 1.0 (30/03/2004)
C Criado em: Tue Oct 19 17:50:18 2004
C Programacao: Giovanni Manassero Jr giomanjr@pea.usp.br
C               Renato M. Nakagomi rmikio@pea.usp.br
C               Eduardo C. Senger senger@pea.usp.br
C               Eduardo L. Pellini epellini@pea.usp.br
C -----
C Universidade de Sao Paulo - EPUSP
C www.pea.usp.br
C -----
$PREFIX, C:\ATPDRAW\ATP\LIB
$SUFFIX, .LIB
$DUMMY, XYZ000
C -----
C Miscellaneous data card ....
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C DELT >< TMAX >< XOPT >< COPT >< EPSILN >< TOLMAT >< TSTART >
5.208E-56.00000060.00000      1.00E-12
C IOUT >< IPLOT >< IDOUBL >< KSSOUT >< MAXOUT >< IPUN >< MEMSAV >< ICAT >< NERERG >< IPRSUP >
      10      10      0      1      0      0      0      1      0
C -----
C ESCRITA DA MODELS PARA O TIPO DE FALTA
C -----
MODELS
INPUT
  VFALTA {v(HZX001)},
  VENTR  {v(HZSWCA)},
  IFALTA {i(HZX001)},
  IENTR  {i(HZSWCA)},
OUTPUT
  FSCAB,
  FSCBC,
  FSCCA,
  FSCA,
  FSCB,
  FSCC,
  HIGZR1,
  HIGZR2,
MODEL SWCTRL
DATA MODE
  SRATE
  TSTEP

```

```
FREQ
F2FAB
F2FBC
F2FCA
F2FTAB
F2FTBC
F2FTCA
F1FA
F1FB
F1FC
F3F
VAR KFACTOR
KSFACTOR
F2PABMOMENT
F2PBCMOMENT
F2PCAMOMENT
F2PGABMOMENT
F2PGBCMOMENT
F2PGCAMOMENT
F1PAMOMENT
F1PBMOMENT
F1PCMOMENT
F3PABCMOMENT
JFACTOR
F2PABCYCLES
F2PBCCYCLES
F2PCACYCLES
F2PGABCYCLES
F2PGBCCYCLES
F2PGCACYCLES
F1PACYCLES
F1PBCYCLES
F1PCCYCLES
F3PABCCYCLES
SWCCOUNTER
SWITCHK
SWITCHL
SWITCHM
SWITCHN
SWITCHO
SWITCHP
KSTATUS
LSTATUS
MSTATUS
NSTATUS
OSTATUS
PSTATUS
DUMMYN
SWK
SWL
SWM
SWN
SWO
SWP
OUTPUT SWK
      SWL
      SWM
      SWN
```

```

        SWO
        SWP
    INIT
        KFACTOR := (1/(SRATE*FREQ))/TSTEP
        KSFACTOR := KFACTOR*SRATE
    IF MODE = 0 THEN
        F2PABMOMENT := F2FAB
        F2PBCMOMENT := F2FBC
        F2PCAMOMENT := F2FCA
        F2PGABMOMENT := F2FTAB
        F2PGBCMOMENT := F2FTBC
        F2PGCAMOMENT := F2FTCA
        F1PAMOMENT := F1FA
        F1PBMOMENT := F1FB
        F1PCMOMENT := F1FC
        F3PABCMOMENT := F3F
    ELSE
        JFACTOR := FREQ*0.001
        F2PABMOMENT := F2FAB*JFACTOR
        F2PBCMOMENT := F2FBC*JFACTOR
        F2PCAMOMENT := F2FCA*JFACTOR
        F2PGABMOMENT := F2FTAB*JFACTOR
        F2PGBCMOMENT := F2FTBC*JFACTOR
        F2PGCAMOMENT := F2FTCA*JFACTOR
        F1PAMOMENT := F1FA*JFACTOR
        F1PBMOMENT := F1FB*JFACTOR
        F1PCMOMENT := F1FC*JFACTOR
        F3PABCMOMENT := F3F*JFACTOR
    ENDIF
    F2PABCYCLES := KSFACTOR*F2PABMOMENT
    F2PBCCYCLES := KSFACTOR*F2PBCMOMENT
    F2PCACYCLES := KSFACTOR*F2PCAMOMENT
    F2PGABCYCLES := KSFACTOR*F2PGABMOMENT
    F2PGBCCYCLES := KSFACTOR*F2PGBCMOMENT
    F2PGCACYCLES := KSFACTOR*F2PGCAMOMENT
    F1PACYCLES := KSFACTOR*F1PAMOMENT
    F1PBCYCLES := KSFACTOR*F1PBMOMENT
    F1PCCYCLES := KSFACTOR*F1PCMOMENT
    F3PABCCYCLES := KSFACTOR*F3PABCMOMENT
    SWCCOUNTER := 0
        SWK := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
        SWL := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
        SWM := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
        SWN := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
        SWO := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
        SWP := -1 -- INITIAL CONDITION FOR SWITCH IS OPENED
    KSTATUS := -1
    LSTATUS := -1
    MSTATUS := -1
    NSTATUS := -1
    OSTATUS := -1
    PSTATUS := -1
    ENDINIT
    EXEC
    IF SWCCOUNTER < F2PABCYCLES THEN
    IF KSTATUS = -1 THEN
    SWITCHK := -1
    ENDIF

```

```
ELSE
SWITCHK := 1
KSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F2PBCCYCLES THEN
IF LSTATUS = -1 THEN
SWITCHL := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHL := 1
LSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F2PCACYCLES THEN
IF MSTATUS = -1 THEN
SWITCHM := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHM := 1
MSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F2PGACYCLES THEN
IF KSTATUS = -1 THEN
SWITCHK := -1
ENDIF
IF NSTATUS = -1 THEN
SWITCHN := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHK := 1
KSTATUS := 1
SWITCHN := 1
NSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F2PGBCCYCLES THEN
IF LSTATUS = -1 THEN
SWITCHL := -1
ENDIF
IF OSTATUS = -1 THEN
SWITCHO := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHL := 1
SWITCHO := 1
LSTATUS := 1
OSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F2PGCACYCLES THEN
IF MSTATUS = -1 THEN
SWITCHM := -1
ENDIF
IF PSTATUS = -1 THEN
SWITCHP := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHM := 1
SWITCHP := 1
MSTATUS := 1
PSTATUS := 1
```

```
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F1PACYCLES AND NSTATUS = -1 THEN
SWITCHN := -1
ELSE
SWITCHN := 1
NSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F1PBCYCLES AND OSTATUS = -1 THEN
SWITCHO := -1
ELSE
SWITCHO := 1
OSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F1PCCYCLES AND PSTATUS = -1 THEN
SWITCHP := -1
ELSE
SWITCHP := 1
PSTATUS := 1
ENDIF
IF SWCCOUNTER < F3PABCCYCLES THEN
IF KSTATUS = -1 THEN
SWITCHK := -1
ENDIF
IF LSTATUS = -1 THEN
SWITCHL := -1
ENDIF
IF MSTATUS = -1 THEN
SWITCHM := -1
ENDIF
ELSE
SWITCHK := 1
KSTATUS := 1
SWITCHL := 1
LSTATUS := 1
ENDIF
SWK := SWITCHK
SWL := SWITCHL
SWM := SWITCHM
SWN := SWITCHN
SWO := SWITCHO
SWP := SWITCHP
IF MODE = 0 THEN
IF SWCCOUNTER = 99999999 THEN
SWCCOUNTER := 99999998
ENDIF
ELSE
IF SWCCOUNTER = 100000000 THEN
SWCCOUNTER := 99999999
ENDIF
ENDIF
SWCCOUNTER := SWCCOUNTER + 1
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL HZMODT
DATA RZERO
UDLIM
UDTOL
BUTTORD
```



```

    BUTTFC
    VBASE
    IBASE
    HZTSTEP
INPUT  VFAULT
      VINPUT
      IFAULT
      IINPUT
VAR  VUP[1..29]
     IUP[1..29]
     VDOWN[1..29]
     IDOWN[1..29]
     VPAST
     IPAST
     TIME
     TIMEX
     TEMPO
     BIGGERR
     RMEDIO
     REXTR
     UPDOWN -- UP := 1  DOWN := 0
     CHANGUD
     UPPING
     DOWNING
     STEPUD
     TAMUP
     TAMDOWN
     VO[1..4]
     V1[1..4] -- BUFFER CIRCULAR P/ FILTRO BUTTERWORTH
     FILTCNT
     VIN
     IIN
     HZR1
     HZR2
     INOW
     VNOW
     AUX
     AUX2
     I
     J
     K
     SAIR
     FAULT
     BUTN[1..2]
     BUTD[1..2]
     INDBIGGERR
     SOMAR
     FATOREXP
     RBASE
     VBASECURVA -- VBASE DO NOVO ALGORITMO ADAPTATIVO
     IBASECURVA -- IBASE DO NOVO ALGORITMO ADAPTATIVO
     VBUFFER[1..320] -- BUFFER PARA GUARDAR UM CICLO DE TENSAO
     IBUFFER[1..640] -- BUFFER PARA GUARDAR UM CICLO DE CORRENTE + BUFFER CIRCULAR
     TBUFFER -- CTE DE CONTAGEM DO BUFFER
     FLAGFAULT
     MAXVBUFFER
     MAXIBUFFER
OUTPUT HZR1

```

```
HZR2
INIT
-- TABELAS DE TENSAO, CORRENTE, RESISTENCIA
VUP[1] := -13.644122
IUP[1] := -198.544131
VUP[2] := -13.340064
IUP[2] := -196.141947
VUP[3] := -12.830094
IUP[3] := -188.444040
VUP[4] := -12.118059
IUP[4] := -176.396724
VUP[5] := -11.302106
IUP[5] := -160.509554
VUP[6] := -10.234054
IUP[6] := -138.835305
VUP[7] := -9.012049
IUP[7] := -116.687898
VUP[8] := -7.586055
IUP[8] := -90.700637
VUP[9] := -6.110027
IUP[9] := -62.766151
VUP[10] := -4.276056
IUP[10] := -38.689718
VUP[11] := -2.494045
IUP[11] := -17.015469
VUP[12] := -0.662000
IUP[12] := -4.021838
VUP[13] := 0.101994
IUP[13] := -0.163785
VUP[14] := 1.935964
IUP[14] := 5.131938
VUP[15] := 3.463952
IUP[15] := 10.900819
VUP[16] := 4.939981
IUP[16] := 18.125569
VUP[17] := 6.314015
IUP[17] := 28.717015
VUP[18] := 7.638014
IUP[18] := 42.202002
VUP[19] := 8.809985
IUP[19] := 60.491356
VUP[20] := 9.878037
IUP[20] := 81.201092
VUP[21] := 10.948013
IUP[21] := 104.786169
VUP[22] := 11.660048
IUP[22] := 127.898089
VUP[23] := 12.476001
IUP[23] := 149.099181
VUP[24] := 12.984047
IUP[24] := 165.950864
VUP[25] := 13.544053
IUP[25] := 178.471338
VUP[26] := 13.800000
IUP[26] := 187.606915
VDOWN[1] := 13.800000
IDOWN[1] := 195.323021
VDOWN[2] := 13.290029
```

```
IDOWN[2] := 186.169245
VDOWN[3] := 12.730024
IDOWN[3] := 176.050955
VDOWN[4] := 11.864036
IDOWN[4] := 160.163785
VDOWN[5] := 10.846019
IDOWN[5] := 141.874431
VDOWN[6] := 9.624014
IDOWN[6] := 119.235669
VDOWN[7] := 8.198020
IDOWN[7] := 93.230209
VDOWN[8] := 6.619997
IDOWN[8] := 68.680619
VDOWN[9] := 5.041975
IDOWN[9] := 43.166515
VDOWN[10] := 3.055976
IDOWN[10] := 21.019108
VDOWN[11] := 1.171970
IDOWN[11] := 2.711556
VDOWN[12] := -0.508046
IDOWN[12] := -7.388535
VDOWN[13] := -2.290057
IDOWN[13] := -12.211101
VDOWN[14] := -3.868080
IDOWN[14] := -17.506824
VDOWN[15] := -5.192079
IDOWN[15] := -26.169245
VDOWN[16] := -6.670032
IDOWN[16] := -38.216561
VDOWN[17] := -7.790043
IDOWN[17] := -51.210191
VDOWN[18] := -8.910055
IDOWN[18] := -69.990901
VDOWN[19] := -9.978106
IDOWN[19] := -89.736124
VDOWN[20] := -10.844094
IDOWN[20] := -111.938126
VDOWN[21] := -11.760117
IDOWN[21] := -133.539581
VDOWN[22] := -12.372082
IDOWN[22] := -154.249318
VDOWN[23] := -12.982123
IDOWN[23] := -170.627843
VDOWN[24] := -13.340064
IDOWN[24] := -182.656961
VDOWN[25] := -13.594087
IDOWN[25] := -192.283894
VDOWN[26] := -13.594087
IDOWN[26] := -200.000000
TAMUP := 26 -- TAMANHO DA MATRIZ DE VALORES VUP E IUP
TAMDOWN := 26 -- TAMANHO DA MATRIZ DE VALORES VDOWN E IDOWN
-- LIMPA FILA DE TENSOES
FOR J:=1 TO 4 DO
  V0[J] := 0
  V1[J] := 0
ENDFOR

-- SHIFT E ADICAO DE EXTREMOS PARA TABELA DE SUBIDA
```

```

FATOREXP := 1.300000

FOR J:=(TAMUP+1) TO 2 BY -1 DO
VUP[J] := 1000*VUP[J-1]
IUP[J] := IUP[J-1]
ENDFOR
VUP[1] := 1000*VUP[2]*FATOREXP
IUP[1] := IUP[2]*FATOREXP
VUP[TAMUP+2] := 1000*VUP[TAMUP+1]*FATOREXP
IUP[TAMUP+2] := IUP[TAMUP+1]*FATOREXP

-- SHIFT E ADICAO DE EXTREMOS PARA TABELA DE DESCIDA
FOR J:=(TAMDOWN+1) TO 2 BY -1 DO
VDOWN[J] := 1000*VDOWN[J-1]
IDOWN[J] := IDOWN[J-1]
ENDFOR
VDOWN[1] := 1000*VDOWN[2]*FATOREXP
IDOWN[1] := IDOWN[2]*FATOREXP
VDOWN[TAMDOWN+2] := 1000*VDOWN[TAMDOWN+1]*FATOREXP
IDOWN[TAMDOWN+2] := IDOWN[TAMDOWN+1]*FATOREXP

-- ATUALIZACAO DO TAMANHO DAS TABELAS
TAMUP := TAMUP + 2
TAMDOWN := TAMDOWN + 2

-- INICIALIZACAO DE VARIAVEIS
UPDOWN := 1
VPAST := 0 -- VUP[0] -- TENSÃO INICIAL ADOTADA. SUPOR DESCIDA INICIALMENTE
IPAST := 0
CHANGUD := 1
UPPING := 0
DOWNING := 0
FILTCNT := 1
STEPUD := 0
SOMAR := 0
BIGGERR := 0
INDBIGGERR := 1
TIME := 0
-- INI: NOVO BLOCO INSERIDO EM 24.09.2004
TBUFFER := 1
FLAGFAULT := 0
TIMEX := 0
-- FIM
RBASE := VBASE/(SQRT(3)*IBASE)
-- ACHAR MAIOR RESISTENCIA
FOR J:=1 TO TAMUP DO
IF (IUP[J]<RZERO AND IUP[J]>(-RZERO)) THEN
IUP[J] := RZERO
ENDIF
AUX2 := VUP[J]/IUP[J]
SOMAR := SOMAR + AUX2
IF AUX2>BIGGERR THEN
BIGGERR := AUX2
INDBIGGERR := J
ENDIF
ENDFOR

FOR J:=1 TO TAMDOWN DO

```

```

IF (IDOWN[J]<RZERO AND IDOWN[J]>(-RZERO)) THEN
IDOWN[J] := RZERO
ENDIF
AUX2 := VDOWN[J]/IDOWN[J]
SOMAR := SOMAR + AUX2
IF AUX2>BIGGERR THEN
BIGGERR := AUX2
INDBIGGERR := J
ENDIF
ENDFOR

-- ACHAR R MEDIO
RMEDIO := SOMAR/(TAMUP+TAMDOWN)

-- ACHAR R DA EXTREMIDADE
REXTR := VUP[TAMUP]/IUP[TAMUP]

-- ZERAR VBUFFER
MAXVBUFFER := 0
MAXIBUFFER := 0
FOR J:=1 TO 320 BY 1 DO
    VBUFFER[J] := 0
    IBUFFER[J] := 0
ENDFOR

HZR1 := RZERO
HZR2 := RZERO
ENDINIT

EXEC
-- INI: NOVO BLOCO INSERIDO EM 24.09.2004
    FAULT := 0

    VIN := VINPUT
    IIN := IINPUT

    VBUFFER[TBUFFER] := VIN
    IBUFFER[TBUFFER] := IIN
    IBUFFER[TBUFFER+320] := IIN

    TBUFFER := TBUFFER + 1
    IF (TBUFFER > 320) THEN
        TBUFFER := 1
        FLAGFAULT := 1 -- LIDO UM CICLO INTEIRO. LIBERA A FALTA
    ENDIF

    MAXVBUFFER := 0
    MAXIBUFFER := 0
    FOR J:=1 TO 320 BY 1 DO
        IF VBUFFER[J] >= 0 THEN
            IF VBUFFER[J] > MAXVBUFFER THEN
                MAXVBUFFER := VBUFFER[J]
            ENDIF
        ELSE
            IF VBUFFER[J] < -MAXVBUFFER THEN
                MAXVBUFFER := -VBUFFER[J]
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF

```

```

        IF IBUFFER[J] >= 0 THEN
            IF IBUFFER[J] > MAXIBUFFER THEN
                MAXIBUFFER := IBUFFER[J]
            ENDIF
        ELSE
            IF IBUFFER[J] < -MAXIBUFFER THEN
                MAXIBUFFER := -IBUFFER[J]
            ENDIF
        ENDIF
    ENDFOR

    IF (VFAULT=VIN AND FLAGFAULT=1)THEN
        FAULT := 1
    ELSE
        FAULT := 0
    ENDIF

    IF FAULT = 0 THEN
        VBASECURVA := MAXVBUFFER
    ELSE
        IBASECURVA := MAXIBUFFER
    ENDIF

    -- TABELAS DE TENSAO, CORRENTE, RESISTENCIA
VUP[1] := -13.644122
IUP[1] := -198.544131
VUP[2] := -13.340064
IUP[2] := -196.141947
VUP[3] := -12.830094
IUP[3] := -188.444040
VUP[4] := -12.118059
IUP[4] := -176.396724
VUP[5] := -11.302106
IUP[5] := -160.509554
VUP[6] := -10.234054
IUP[6] := -138.835305
VUP[7] := -9.012049
IUP[7] := -116.687898
VUP[8] := -7.586055
IUP[8] := -90.700637
VUP[9] := -6.110027
IUP[9] := -62.766151
VUP[10] := -4.276056
IUP[10] := -38.689718
VUP[11] := -2.494045
IUP[11] := -17.015469
VUP[12] := -0.662000
IUP[12] := -4.021838
VUP[13] := 0.101994
IUP[13] := -0.163785
VUP[14] := 1.935964
IUP[14] := 5.131938
VUP[15] := 3.463952
IUP[15] := 10.900819
VUP[16] := 4.939981
IUP[16] := 18.125569
VUP[17] := 6.314015
IUP[17] := 28.717015

```

```
VUP[18] := 7.638014
IUP[18] := 42.202002
VUP[19] := 8.809985
IUP[19] := 60.491356
VUP[20] := 9.878037
IUP[20] := 81.201092
VUP[21] := 10.948013
IUP[21] := 104.786169
VUP[22] := 11.660048
IUP[22] := 127.898089
VUP[23] := 12.476001
IUP[23] := 149.099181
VUP[24] := 12.984047
IUP[24] := 165.950864
VUP[25] := 13.544053
IUP[25] := 178.471338
VUP[26] := 13.800000
IUP[26] := 187.606915
VDOWN[1] := 13.800000
IDOWN[1] := 195.323021
VDOWN[2] := 13.290029
IDOWN[2] := 186.169245
VDOWN[3] := 12.730024
IDOWN[3] := 176.050955
VDOWN[4] := 11.864036
IDOWN[4] := 160.163785
VDOWN[5] := 10.846019
IDOWN[5] := 141.874431
VDOWN[6] := 9.624014
IDOWN[6] := 119.235669
VDOWN[7] := 8.198020
IDOWN[7] := 93.230209
VDOWN[8] := 6.619997
IDOWN[8] := 68.680619
VDOWN[9] := 5.041975
IDOWN[9] := 43.166515
VDOWN[10] := 3.055976
IDOWN[10] := 21.019108
VDOWN[11] := 1.171970
IDOWN[11] := 2.711556
VDOWN[12] := -0.508046
IDOWN[12] := -7.388535
VDOWN[13] := -2.290057
IDOWN[13] := -12.211101
VDOWN[14] := -3.868080
IDOWN[14] := -17.506824
VDOWN[15] := -5.192079
IDOWN[15] := -26.169245
VDOWN[16] := -6.670032
IDOWN[16] := -38.216561
VDOWN[17] := -7.790043
IDOWN[17] := -51.210191
VDOWN[18] := -8.910055
IDOWN[18] := -69.990901
VDOWN[19] := -9.978106
IDOWN[19] := -89.736124
VDOWN[20] := -10.844094
IDOWN[20] := -111.938126
```

```

VDOWN[21] := -11.760117
IDOWN[21] := -133.539581
VDOWN[22] := -12.372082
IDOWN[22] := -154.249318
VDOWN[23] := -12.982123
IDOWN[23] := -170.627843
VDOWN[24] := -13.340064
IDOWN[24] := -182.656961
VDOWN[25] := -13.594087
IDOWN[25] := -192.283894
VDOWN[26] := -13.594087
IDOWN[26] := -200.000000
TAMUP := 26 -- TAMANHO DA MATRIZ DE VALORES VUP E IUP
TAMDOWN := 26 -- TAMANHO DA MATRIZ DE VALORES VDOWN E IDOWN
-- O RBASE EH MANTIDO. RECALCULA-SE O IBASECURVA
    IF FAULT = 0 THEN
        IBASECURVA := VBASECURVA/(SQRT(3)*RBASE)
    ELSE
        VBASECURVA := IBASECURVA*(SQRT(3)*RBASE)
    ENDIF

    FOR J:=1 TO TAMUP DO
        VUP[J] := (1000*VUP[J]/VBASE)*VBASECURVA
        IUP[J] := (IUP[J]/IBASE)*IBASECURVA
    ENDFOR
    FOR J:=1 TO TAMDOWN DO
        VDOWN[J] := (1000*VDOWN[J]/VBASE)*VBASECURVA
        IDOWN[J] := (IDOWN[J]/IBASE)*IBASECURVA
    ENDFOR

    -- SHIFT E ADICAO DE EXTREMOS PARA TABELA DE SUBIDA
    FATOREXP := 1.300000

    FOR J:=(TAMUP+1) TO 2 BY -1 DO
        VUP[J] := VUP[J-1]
        IUP[J] := IUP[J-1]
    ENDFOR
    VUP[1] := VUP[2]*FATOREXP
    IUP[1] := IUP[2]*FATOREXP
    VUP[TAMUP+2] := VUP[TAMUP+1]*FATOREXP
    IUP[TAMUP+2] := IUP[TAMUP+1]*FATOREXP

    -- SHIFT E ADICAO DE EXTREMOS PARA TABELA DE DESCIDA
    FOR J:=(TAMDOWN+1) TO 2 BY -1 DO
        VDOWN[J] := VDOWN[J-1]
        IDOWN[J] := IDOWN[J-1]
    ENDFOR
    VDOWN[1] := VDOWN[2]*FATOREXP
    IDOWN[1] := IDOWN[2]*FATOREXP
    VDOWN[TAMDOWN+2] := VDOWN[TAMDOWN+1]*FATOREXP
    IDOWN[TAMDOWN+2] := IDOWN[TAMDOWN+1]*FATOREXP

    -- ATUALIZACAO DO TAMANHO DAS TABELAS
    TAMUP := TAMUP + 2
    TAMDOWN := TAMDOWN + 2
-- PRECISA ZERAR AS VARIAVEIS BIGGERR e SOMAR NOVAMENTE
    BIGGERR := 0
    SOMAR := 0

```



```

--
-- ACHAR MAIOR RESISTENCIA
FOR J:=1 TO TAMUP DO
    IF (IUP[J]<RZERO AND IUP[J]>(-RZERO)) THEN
        IUP[J] := RZERO
    ENDIF
    AUX2 := VUP[J]/IUP[J]
    SOMAR := SOMAR + AUX2
    IF AUX2>BIGGERR THEN
        BIGGERR := AUX2
        INDBIGGERR := J
    ENDIF
ENDFOR

FOR J:=1 TO TAMDOWN DO
    IF (IDOWN[J]<RZERO AND IDOWN[J]>(-RZERO)) THEN
        IDOWN[J] := RZERO
    ENDIF
    AUX2 := VDOWN[J]/IDOWN[J]
    SOMAR := SOMAR + AUX2
    IF AUX2>BIGGERR THEN
        BIGGERR := AUX2
        INDBIGGERR := J
    ENDIF
ENDFOR

-- FIM
-- Coef.do filtro Butterworth ordem=1 / fc= 2500Hz
BUTN[1] := 0.09293600190069
BUTN[2] := 0.09293600190069
BUTD[1] := 0.000000000000000
BUTD[2] := 0.81412799619863

TIME := (TIME + HZTSTEP)*FAULT
-- MUDANDO EM 28.09.2004
IF (FAULT = 0) THEN
    TIMEX:=0
ELSE
    TIMEX:= TIMEX+HZTSTEP
ENDIF
-- FIM DA MUDANÇA

-- EXECUTA FILTRO BUTTERWORTH ORDEM X
IF FILTCNT=(BUTTORD+1) THEN
    FILTCNT := 1
ENDIF

VO[FILTCNT] := VIN
VO[FILTCNT+BUTTORD] := VIN

IF TIME>=(BUTTORD*HZTSTEP) THEN
    V1[FILTCNT+BUTTORD] := 0
    FOR J:=1 TO (BUTTORD+1) DO
        V1[FILTCNT+BUTTORD] :=
            V1[FILTCNT+BUTTORD] +
            BUTN[J]*VO[FILTCNT+BUTTORD-J+1] +
            BUTD[J]*V1[FILTCNT+BUTTORD-J+1]
    
```

```

ENDFOR
V1[FILTCNT] := V1[FILTCNT+BUTTORD]
ELSE
V1[FILTCNT] := VIN
V1[FILTCNT+BUTTORD] := VIN
ENDIF

FILTCNT := FILTCNT + 1
VIN := V1[FILTCNT]

IF VIN>=VPAST THEN
UPPING := UPPING + 1
DOWNING := 0
ELSE
DOWNING := DOWNING + 1
UPPING := 0
ENDIF
IF STEPUD=0 THEN
IF UPPING>=UDLIM THEN
UPDOWN := 1
STEPUD := ((UDTOL*0.001)/HZTSTEP)
ENDIF
IF DOWNING>=UDLIM THEN
UPDOWN := 0
STEPUD := ((UDTOL*0.001)/HZTSTEP)
ENDIF
ENDIF
IF FAULT=1 THEN
IF STEPUD>=1 THEN
STEPUD := STEPUD - 1
ELSE
STEPUD := 0
ENDIF
ENDIF

I:=1
SAIR := 0
WHILE SAIR=0 DO
IF UPDOWN=1 THEN
IF IIN<=IUP[1] THEN
VNOW := RBASE*IIN -- MANTEM A RESISTENCIA DE BASE
SAIR := 1
ELSE
IF IIN>=IUP[TAMUP] THEN
VNOW := RBASE*IIN
SAIR := 1
ELSE
IF (IIN>=IUP[I] AND IIN<IUP[I+1]) THEN
IF (VUP[I+1] = VUP[I]) THEN
VNOW :=
VUP[I] +
(IUP[I+1]-IUP[I])*
(IIN - IUP[I])/
(VUP[I+1]-VUP[I])
SAIR := 1
ELSE
VNOW := VUP[I]
SAIR := 1

```

```

ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ELSE
IF IIN >= IDOWN[1] THEN
VNOW := RBASE*IIN
SAIR := 1
ELSE
IF IIN<=IDOWN[TAMDOWN] THEN
VNOW := RBASE*IIN
SAIR := 1
ELSE
IF (IIN<IDOWN[I] AND IIN>=IDOWN[I+1]) THEN
IF (VUP[I+1] = VUP[I]) THEN
VNOW :=
VDOWN[I+1] +
(IDOWN[I]-IDOWN[I+1])*
(IIN - IDOWN[I+1])/
(VDOWN[I]-VDOWN[I+1])
SAIR := 1
ELSE
VNOW := VDOWN[I]
SAIR := 1
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
I := I+1
ENDWHILE

VNOW := VNOW*FAULT
VPAST := VIN
IPAST := IIN

-- AJUSTE PARA V NAO FICAR IGUAL A ZERO EXATAMENTE (A MENOS QUE SEJA REALMENTE ZERO)
IF VNOW<RZERO AND VNOW>(-RZERO) THEN
VNOW := RZERO*FAULT
ENDIF

---- CALCULO DE HZR1 ----
IF FAULT=1 THEN
IF IIN<RZERO AND IIN>(-RZERO) THEN
-- HZR1 := (VNOW/RZERO)*FAULT
HZR1 := RBASE
ELSE
HZR1 := (VNOW/IIN)*FAULT
ENDIF
--IF HZR1<RBASE THEN
--HZR1 := RBASE
--ENDIF
IF HZR1 > BIGGERR THEN
HZR1 := BIGGERR
ENDIF
ELSE
HZR1 := RZERO
ENDIF

```

```

-- AJUSTE PARA R NAO FICAR IGUAL A ZERO EXATAMENTE (A MENOS QUE SEJA REALMENTE ZERO)
IF HZR1<RZERO THEN
HZR1 := RZERO
ENDIF

-- NOVA ROTINA DE DECRESCIMO DE HZR2
  HZR2 := 10*RBASE*2.9030970612*EXP(-0.2731517629*(TIMEX*25/(0.800)))
IF HZR2<=RZERO OR TIMEX <= 0 OR TIMEX > 0.800 THEN
HZR2 := RZERO
ENDIF

IF FAULT = 0 THEN
HZR1 := 999E99
HZR2 := 999E99
ENDIF
-- FIM DA NOVA ROTINA
IF IBASECURVA < RZERO AND IBASECURVA > -RZERO THEN
HZR1 := RBASE
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
USE SWCTRL AS SWC
DATA
  MODE:= 1
  SRATE:= 32.000000
  TSTEP:= 0.0000520833
  FREQ:= 60.000000
  F2FAB:= 900000000.000000
  F2FBC:= 900000000.000000
  F2FCA:= 900000000.000000
  F2FTAB:= 900000000.000000
  F2FTBC:= 900000000.000000
  F2FTCA:= 900000000.000000
  F1FA:= 2900.000000
  F1FB:= 900000000.000000
  F1FC:= 900000000.000000
  F3F:= 900000000.000000
OUTPUT
  FSCAB:=SWK
  FSCBC:=SWL
  FSCCA:=SWM
  FSCA:=SWN
  FSCB:=SWO
  FSCC:=SWP
ENDUSE

USE HZMODT AS HZMODA
INPUT
  VFAULT:= VFALTA
  VINPUT:= VENTR
  IFAULT:= IFALTA
  IINPUT:= IENTR
DATA RZERO := 0.000100
  UDLIM := 3 -- QTAS AMOSTRAS DEVE PERMANECER (UP OU DOWN) PARA GARANTIR Q É UP OU DOWN
  UDTOL := 1 -- [MILISSEGUNDOS] O ALGORITMO SOH PODERA 'VIRAR' A TABELA DEPOIS DE,
NO MINIMO, UDTOL MILISSEGUNDOS
  BUTTORD := 1 -- ORDEM DO FILTRO BUTTERWORTH

```

```

      BUTTFC  := 2500.000000 -- FREQUENCIA DE CORTE DO FILTRO BUTTERWORTH
      VBASE   := 13800.000191
      IBASE   := 200.000000
      HZTSTEP := 0.0000520833
OUTPUT
      HIGZR1:=HZR1
      HIGZR2:=HZR2
ENDUSE
ENDMODELS

/BRANCH
C -----
C < n 1>< n 2>          < R >< X >< C ><LENG>
C THEVENIN EQUIVALENTE NA BARRA
51DJA   X0010A          2.1E-32.9E-1
52DJB   X0010B          2.3E-11.0106
53DJC   X0010C
C -----
C DADOS DOS TRECHOS DO ALIMENTADOR
C < n 1>< n 2>          < R >< X >< C ><LENG>
51X0010AX0015A          2.0E-7  2.0000E-7
52X0010BX0015B          2.0E-7  2.0000E-7
53X0010CX0015C
.
.
.
C
51X3205AX3210A          2.3E-1  3.9189E-1
52X3205BX3210B          2.1E-1  9.4984E-2
53X3205CX3210C
C
C -----
C DADOS DAS CARGAS DO ALIMENTADOR
C < n 1>< n 2>          < R >< X >< C ><LENG>
C Transformador: IP-0402/0030 -> Potencia:  10400 (Trifasico)
X0050AX0050B          4.67E42.89E4
X0050BX0050C          4.67E42.89E4
X0050CX0050A          4.67E42.89E4
.
.
.
C Transformador: DP-3829/0015 -> Potencia:   5200 (Trifasico)
X3210AX3210B          9.34E45.80E4
X3210BX3210C          9.34E45.80E4
X3210CX3210A          9.34E45.80E4
C
C -----
C HZ BRANCH
C -----
C          1          2          3          4          5          6          7          8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C TACS TVR (time-varying resistances)
91HZX003HZX002TACS  HIGZR1                                     3
91HZX002HZX001TACS  HIGZR2                                     3
C -----
/SWITCH
C CHAVE DE MEDICAO NA SAIDA DA BARRA DA SE
C < n 1>< n 2>< TCLOSE >< TOPEN >

```

```

DJA  FTA      -1.      10.      1
DJB  FTB      -1.      10.      1
DJC  FTC      -1.      10.      1
C SWITCHES DE FALTAS (normais ou HZ)
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < n 1>< n 2>< TCLOSE >< TOPEN  >
X4115AHZSWCA  -1.000    10.000      0
X4115BNOHIZB  -1.000    10.000      0
X4115CNOHIZC  -1.000    10.000      0
HZSWCANOHIZA  -1.000    1.5000      0
13HZSWCAHZX001      FSCA      0
HZX003      MEASURING      0
C -----
C PROBES DE MEDICAO DE CORRENTE
M4110AX4110A      MEASURING      1
M4110BX4110B      MEASURING      1
M4110CX4110C      MEASURING      1
C -----
/SOURCE
C TENSAO NA BARRA DA SUBESTACAO
C < n 1><< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART >< TSTOP  >
14FTA      1.12677E4      60.    0.00E0      -1.    10.
14FTB      1.12677E4      60.   -1.2E2      -1.    10.
14FTC      1.12677E4      60.    1.20E2      -1.    10.
C -----
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
X0010AX0010BX0010C
X4110AX4110BX4110C
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Referências

- 1 STEWART, J. R. Detecting high impedance faults. p. 48–51, December 1979. Fotocópia de periódico desconhecido.
- 2 LANDINI, L. A. R. A teoria objetiva, administrativa ou do risco integral nos serviços públicos de energia elétrica. In: *II Congresso Brasileiro de Regulação de Serviços Públicos Concedidos*. São Paulo: ABAR/Comissão de Serviços Públicos de Energia, 2001.
- 3 WOLFE, R. F. It's tough to relay high-impedance faults. *Electrical World*, p. 32–33, August 1979.
- 4 BO, Z. Q.; DONG, X. Z.; SHI, S. X.; GAN, Z.; CAUNCE, B. R. J. Detection of high impedance fault using adaptive non-communication protection technique. In: IEEE PES. *Summer Meeting 2002*. Chicago: IEEE Press, 2002. p. 376–381.
- 5 XIANGJUN, Z.; LI, K. K.; CHAN, W. L.; XIANGJEN, Y. Novel techniques for earth fault feeder detection based on negative sequence current in industry power systems. In: IEEE IAS'2001. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference - Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*. Chicago: IEEE Press, 2001. p. 1831–1837.
- 6 CALHOUN, H. J.; BISHOP, M. T.; EICHLER, C. H.; LEE, R. E. Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 6, p. 1643–1648, June 1982.
- 7 LEE, R. E.; BISHOP, M. T. Performance testing of the ratio ground relay on a four-wire distribution feeder. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 9, p. 2943–2949, September 1983.
- 8 HUANG, C. L.; CHU, H. Y.; CHEN, M. T. Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 1427–1435, October 1988.
- 9 SENGER, E. C.; KAISER, W.; SANTOS, J. C. dos; BURT, P. M. S.; MALAGODI, C. V. S. Broken conductors protection system using carrier communication. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 2, p. 525–530, April 2000.
- 10 RUSSELL, B. D.; MEHTA, K.; CHINCHALI, R. P. An arcing fault detection technique using low frequency current components - performance evaluation using recorded field data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 1493–1500, October 1988.
- 11 BALSER, S. J.; CLEMENTS, K. A.; LAWRENCE, D. J. A microprocessor-based technique for detection of high impedance faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PWRD-1, n. 3, p. 252–258, July 1986.

- 12 JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Unique aspects of distribution system harmonics due to high impedance ground faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 1086–1094, April 1990.
- 13 KIM, C. J.; RUSSELL, B. D. A learning method for use in intelligent computer relays for high impedance faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 1, p. 109–115, January 1991.
- 14 JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. A practical protective relay for down-conductor faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 2, p. 565–574, April 1991.
- 15 KWON, W. H.; LEE, G. W.; PARK, Y. M.; YOON, M. C.; YOO, M. H. High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power. v. 6, n. 2, p. 557–564, April 1991.
- 16 ZORIC, K. J.; DJURIC, M. B.; TERZIJA, V. V. Arcing faults detection on overhead lines from the voltage signals. *Electric Power & Energy Systems*, v. 19, n. 5, p. 299–303, 1997.
- 17 SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W. Security testing of high impedance fault detectors. In: IEEE WESCANEX'91. *IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment*. Saskatchewan: IEEE Press, 1991. p. 191–197.
- 18 SHENG, Y.; ROVNYAK, S. M. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, p. 533–536, April 2004.
- 19 RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P. A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 132–140, January 1989.
- 20 BENNER, C. L.; RUSSELL, D. B. Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 635–640, May 1997.
- 21 RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P.; KIM, C. J. Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 1485–1492, October 1988.
- 22 KIM, C. J.; RUSSELL, B. D. Classification of faults and switching events by inductive reasoning and expert system methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 3, p. 1631–1637, July 1989.
- 23 PATTERSON, R. Signatures and software find high-impedance faults. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 8, n. 3, p. 12–15, July 1995.
- 24 SHAHRESTANI, S. A.; YPSILANTIS, J.; YEE, H. Application of pattern recognition to identification of power system faults. *Electric Power Systems Research*, v. 34, p. 211–215, March 1995.
- 25 SHARAF, A. M.; WANG, G. High impedance fault detection using feature-pattern based relaying. In: IEEE PES. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Dallas: IEEE Press, 2003. p. 222–226. Volume 1.
- 26 HÄNNINEN, S.; LEHTONEN, M.; PULKKINEN, U. A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults. *Electric Power Systems Research*, v. 54, p. 199–206, 2000.

- 27 KIM, C. J.; RUSSELL, B. D. Analysis of distribution disturbances and arcing faults using the crest factor. *Electric Power Systems Research*, v. 35, p. 141–148, May 1995.
- 28 SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detection of high impedance arcing faults using a multi-layer perceptron. v. 7, n. 4, p. 1871–1877, October 1992.
- 29 MOHAMED, E. A.; RAO, N. D. Artificial neural network based fault diagnostic system for electric power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, v. 35, p. 1–10, 1995.
- 30 SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 461–470, January 1994.
- 31 SNIDER, L. A.; SHAN, Y. Y. The artificial neural networks based relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. In: APSCOM'97. *4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*. Hong Kong, 1997. p. 100–106. Volume 1.
- 32 KEYHANI, R.; DERICHE, M.; PALMER, E. A high impedance fault detector using a neural network and subband decomposition. In: IEEE ISSPA'2001. *6th International Symposium on Signal Processing and its Applications*. Kuala Lumpur: IEEE Press, 2001. p. 458–461. Volume 2.
- 33 JENSEN, K. J.; MUNK, S. M.; SORENSEN, J. A. Feature extraction method for high impedance ground fault localization in radial power distribution networks. In: IEEE ICASSP'98. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Seattle: IEEE Press, 1998. p. 1177–1180. Speech Processing II/ Neural Networks for Signal Processing.
- 34 KO, J. H.; SHIN, J. C.; RYU, C. W.; PARK, C. G.; YIN, W. Y. Detection of high impedance faults using neural nets and chaotic degree. In: IEEE EMPD'98. *International Conference on Energy Management and Power Delivery*. Singapura: IEEE Press, 1998. p. 399–404. Volume 2.
- 35 SNIDER, L. A.; YUEN, Y. S. The artificial neural-networks-based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. *Neurocomputing*, v. 23, p. 243–254, 1998.
- 36 KIM, C. J.; RUSSELL, B. D. High-impedance fault detection system using an adaptive element model. *IEE Proceedings Generation, Transmission And Distribution*, v. 140, n. 2, p. 153–159, March 1993.
- 37 JOTA, F. G.; JOTA, P. R. S. High-impedance fault identification using a fuzzy reasoning system. *IEE Proceedings Generation, Transmission And Distribution*, v. 145, n. 6, p. 656–661, March 1998.
- 38 LAI, L. L.; STYVAKTAKIS, E.; SICHANIE, A. G. Wavelet transform for high impedance fault identification. In: IEE APSCOM'97. *4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*. Hong Kong, 1997. p. 188–191. Volume 1.
- 39 XIANGJUN, Z.; LI, K. K.; CHAN, W. L. Wavelet analysis based protection for high impedance ground fault in supply systems. In: IEEE POWERCON'2002. *International Conference on Power System Technology*. Kuming, China: IEEE Press, 2002. p. 275–279.

- 40 LAI, T. M.; LO, E.; SUTANTO, D. High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 397–404, January 2005.
- 41 WAI, D. C.; YIBIN, X. A novel technique for high impedance fault identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 3, p. 738–744, July 1998.
- 42 HUANG, S. J.; HSIEH, C. T. High-impedance fault detection utilizing a Morlet wavelet transform approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 4, p. 1401–1410, October 1999.
- 43 LAZKANO, A.; ARAMENDI, E.; LETURIONDO, L. A.; RUIZ, J. Evaluation of a new proposal for arcing fault detection method based on wavelet packet analysis. In: *IEEE PES. Summer Meeting 2001*. Vancouver, 2001. p. 1328–1333. Volume 3.
- 44 MAMISHEV, A. V.; RUSSELL, B. D.; BENNER, C. L. Analysis of high impedance faults using fractal techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 1, p. 435–440, February 1996.
- 45 XIANGJUN, Z.; LI, K. K.; CHEN, W. L.; SHENG, S. Multi-agents based protection for distributed generation systems. In: *IEEE DRPT'2004. International Conference on Electrica Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*. Hong Kong: IEEE Press, 2004. p. 393–397. Volume 1.
- 46 DAS, R.; KUNSMAN, S. A. A novel approach for ground fault detection. In: *57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. Texas: IEEE Press, 2004. p. 97–109.
- 47 KIZILCAY, M. <http://www.emtp.org>. June 2001.
- 48 FURST, G. *MODELS PRIMER For First Time MODELS Users*. [S.l.]. Version nº1.
- 49 HEVIA, O. P. *Compilación del ATP al alcance del usuario*. Argentina.
- 50 EPRI. *EPRI REPORT. Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders*. Palo Alto, 1982. (EL-2757).
- 51 EMANUEL, A. E.; GULACHENSKI, E. M.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S. High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 676–686, April 1990.
- 52 AUCCOIN, B. M.; RUSSEL, B. D. Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 6, p. 1596–1606, June 1982.
- 53 CESP. *CESP. Subestação de Conchas - Ensaio de Curto-Circuito: Parte-I*. Ilha Solteira, 1985. (CON-00-14-03).
- 54 JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance revisited. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 949–956, April 1989.
- 55 KAUFMANN, R. H.; PAGE, J. C. Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems - nature of the problem. *AIEE Transactions on Power Apparatus System*, v. 79, p. 160 – 167, December 1960.

- 56 DUNKI-JACOBS, J. R. The effects of arcing ground faults on low-voltage system design. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 1A-8, May 1972.
- 57 GAMMON, T.; MATTHEWS, J. The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems. In: IEEE. *Industrial and Commercial Power System Technical Conference*. Sparks: IEEE Press, 1999. Session 3, Paper 1.
- 58 IEEE. *Tutorial Course 90H0310-3-PWR: Detection of Downed Conductors On Utility Distribution Systems*. [S.l.], 1989.
- 59 THOMAS, D. W. P.; PEREIRA, E. T.; CHRISTOPOULOS, C.; HOWE, A. F. The simulation of circuit breaker switching using a composite Cassie-modified Mayr model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1829–1835, October 1995.
- 60 LEE, T. H. Dynamic behaviour of electric arcs. In: *The Physics and Engineering of High Power Switching Devices*. E.U.A.: MIT Press, 1975. p. 233–269.
- 61 MAYR, O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*, v. 37, p. 588–608, July 1943.
- 62 LEE, R. E.; BISHOP, M. T. A comparison of measured high impedance fault data to digital computer modeling results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 10, p. 2754–2758, October 1985.
- 63 YU, D. C.; KHAN, S. H. An adaptive high and low impedance fault detection method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1812–1821, October 1994.
- 64 SHARAF, A. M.; ABU-AZAB, S. I. A smart relaying scheme for high impedance faults in distribution and utilization networks. In: CCECE'2000. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Halifax: IEEE Press, 2000. p. 740–744. Volume 2.
- 65 NAM, S. R.; PARK, J. K.; KANG, Y. C.; KIM, T. H. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. In: IEEE PES. *Summer Meeting 2001*. Vancouver: IEEE Press, 2001. p. 1175–1180. Volume 2.
- 66 LPROT-USP. *Metodologia para Detecção e Minimização de Ocorrências de Quedas de Cados de Redes de Distribuição do Sistema CEB - Relatório Final*. São Paulo, 2005.
- 67 LPROT-USP. *Faltas de Alta Impedância - Estudos e Modelagem do Problema*. São Paulo, 2004.
- 68 LPROT-USP. *Desempenho da Proteção de Sobrecorrente na Detecção das Faltas de Alta Impedância*. São Paulo, 2004.