Campus de São Carlos

**Aplicação de relés adaptativos
na proteção digital à distância**

André Luiz Junqueira Gheralde

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

APLICAÇÃO DE RELÉS ADAPTATIVOS NA PROTEÇÃO DIGITAL À DISTÂNCIA

ANDRÉ LUIZ JUNQUEIRA GHERALDE

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denis V. Coury

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017411

São Carlos - 1996

Class.	<u>Foro - EESC</u>
Curr.	<u>2577</u>
Tombo	<u>048/96</u>

Eletricidade

st 0744216

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

G413a Gheralde, André Luiz Junqueira
Aplicação de relés adaptativos na proteção digital
à distância / André Luiz Junqueira Gheralde. -- São
Carlos, 1996.
113p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. Denis V. Coury

1. Proteção digital. 2. Característica
quadrilateral. 3. Relés adaptativos. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 13-2-1996
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor DENIS VINICIUS COURY - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor LUIZ CERA ZANETTA JUNIOR
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES

Coordenador da Área de Engenharia Elétrica
Prof.Dr. GERALDO ROBERTO M. DA COSTA

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Roberto e Ivone pelo apoio,
força e compreensão dada em todos os
momentos ao longo deste tempo e por tudo
o que eles representam.

A Daniela Raffaini pelo carinho, ajuda,
compreensão e por estar sempre ao meu
lado.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Denis Vinicius Coury pela excelente orientação durante a elaboração deste trabalho, sem a qual este seria impraticável.

A CAPES, Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os funcionários e professores e em especial ao Prof. Dr. Ruy Altafim pelo importante auxílio no ingresso no programa de pós-graduação do SEL/EESC-USP.

Aos colegas da pós-graduação e iniciação científica: Bia, Bomfilio, Claudio, Glauco, Kátia, Luiz, Luciano, Makoto, Marcos, Miguel, Pereira, Reinaldo, Tainha, Tomioka, Vagner.

Ao amigo Pedro Adalto pela ajuda.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	-----i
-------------------------	---------------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	-----iii
---------------------------------------	-----------------

LISTA DE TABELAS	-----iv
-------------------------	----------------

LISTA DE SÍMBOLOS	-----v
--------------------------	---------------

RESUMO	-----viii
---------------	------------------

ABSTRACT	-----ix
-----------------	----------------

1. A PROTEÇÃO DIGITAL	-----1
------------------------------	---------------

1.1 INTRODUÇÃO	-----1
----------------	--------

1.2 VANTAGENS ESPERADAS PELO RELEAMENTO DIGITAL	-----2
--	--------

1.2.1 AUTO CHECAGEM E CONFIABILIDADE	-----2
--------------------------------------	--------

1.2.2 ECONOMIA	-----2
----------------	--------

1.2.3 SELETIVIDADE	-----3
--------------------	--------

1.2.4 INTERAÇÃO DO SISTEMA E AMBIENTE DIGITAL	-----3
---	--------

1.2.5 FLEXIBILIDADE E CARACTERÍSTICA ADAPTATIVA	-----4
--	--------

1.2.6 EFICIÊNCIA	-----4
------------------	--------

1.3 ESQUEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	-----5
-----------------------------------	--------

1.3.1 TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE	-----6
---	--------

1.3.2 MÓDULO DE INTERFACE	-----6
---------------------------	--------

1.3.3 MÓDULO DE SINCRONIZAÇÃO	-----7
-------------------------------	--------

1.3.4 CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL	-----7
-----------------------------------	--------

1.3.5 MICROCOMPUTADOR	-----8
-----------------------	--------

1.4 ALGORITMO PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	8
2. ESTADO DA ARTE	10
2.1 MEDIDAS DOS PARÂMETROS DE TENSÃO E CORRENTE	10
2.2 PARÂMETROS DO MODELO RL	13
2.3 TÉCNICAS BASEADAS NA TRANSFORMADA DE FOURIER E WALSH.....	15
2.4 TÉCNICAS BASEADAS NO AJUSTE POR MÍNIMOS QUADRADOS	20
2.5 TÉCNICAS DE FILTRO DE KALMAN	21
2.6 TÉCNICAS BASEADAS NO FENÔMENO DE ONDAS VIAJANTES	23
2.7 TÉCNICAS UTILIZANDO RELÉS ADAPTATIVOS	24
2.8 OUTRAS TÉCNICAS	26
3. RELÉS DIGITAIS DE DISTÂNCIA BASEADOS NA CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL	28
3.1 INTRODUÇÃO	28
3.2 A TÉCNICA DE PROTEÇÃO DIGITAL	30
3.2.1 DETECÇÃO DA FALTA	30
3.2.2 EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS	31
3.2.3 CLASSIFICAÇÃO DA FALTA	33
3.2.4 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA APARENTE	35
3.2.5 VERIFICAÇÃO DA ZONA DE PROTEÇÃO.....	39
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO QUADRILATERAL --	47
3.3.1 DETECÇÃO DA FALTA	50
3.3.2 CLASSIFICAÇÃO DA FALTA	50
3.3.3 EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS ----	52
3.3.4 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA APARENTE E VERIFICAÇÃO DE ZONAS	56
3.3.5 DESEMPENHO DO RELÉ A DISTÂNCIA COM CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL	58

4. RELÉS ADAPTATIVOS	65
4.1 INTRODUÇÃO	65
4.2 AJUSTE DE RELÉ PARA UNIDADE DE PROTEÇÃO À DISTÂNCIA	66
4.3 EFEITO ADVERSO DA RESISTÊNCIA DE FALTA	66
4.4 FUNDAMENTOS DO AJUSTE ADAPTATIVO	68
4.5 AMBIENTE ADAPTATIVO	71
4.6 CONSIDERAÇÕES DA TOPOLOGIA	76
 5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE UM RELÉ ADAPTATIVO	78
5.1 INTRODUÇÃO	78
5.2 ÁREA DE PROTEÇÃO ADAPTATIVA	78
5.3 SIMULAÇÕES COM VARIAÇÕES DE PARÂMETROS	83
5.4 CÁLCULO DOS PESOS ENVOLVIDOS	86
5.5 TOPOLOGIA LÓGICA	89
5.6 TESTES DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO	92
5.7 CONCLUSÃO	106
 6. CONCLUSÕES	107
 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de aquisição de dados por microcomputador.

Figura 2 - Modelo de pré e pós falta para o sistema utilizado.

Figura 3 - Resposta em frequência do filtro baseado na Transformada Discreta de Fourier.

Figura 4 - Esquema sob falta para o sistema considerado.

Figura 5 - Fluxograma inicial do algoritmo utilizado.

Figura 6 - Fluxograma da zona 1 de proteção.

Figura 7 - Fluxograma da zona 2 de proteção.

Figura 8 - Fluxograma da zona 3 de proteção.

Figura 9 - Modelos de característica Quadrilaterais utilizada.

Figura 10 - Linha de transmissão utilizada nos testes.

Figura 11 - Onda de pré e pós falta para a corrente.

Figura 12. - Onda de pré e pós falta para a tensão.

Figura 13 - Resultado da subrotina de classificação de faltas quanto ao tipo

Figura 14(a), 15(a) e 16(a) - Ondas fundamentais e ruidosas para a tensão.

Figura 14(b), 15(b) e 16(b) - Ondas fundamentais e ruídas para a corrente.

Figura 17(a), (b) e (c) - Condições de operação utilizadas nas simulações.

Figura 18- Modelo para uma falta fase a-terra.

Figura 19 - Região de abertura ideal de uma condição de operação.

Figura 20 - Sub-regiões da característica adaptativa.

Figura 21(a) à (d) - Diferentes condições de operação do sistema.

Figura 22(a) à (d) - Característica de proteção primária para as diferentes condições de operação.

Figura 23 - Variação da resistência aparente em função a resistência de falta para diferentes localizações.

Figura 24 - Variação da reatância aparente em função a resistência de falta para diferentes localizações.

Figura 25 - Variação da impedância aparente para diferentes localizações com variação da resistência de falta de 0 a 200(Ω).

Figura 26(a) à (d) - Topologia lógica das condições de operação utilizadas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a-t - Falta envolvendo a fase a e a terra.

b-t - Falta envolvendo a fase b e a terra.

c-t - Falta envolvendo a fase c e a terra.

ab-t - Falta envolvendo as fases a e b e a terra.

bc-t - Falta envolvendo as fases b e c e a terra.

ac-t - Falta envolvendo as fases a e c e a terra.

ab - Falta envolvendo as fases a e b.

bc - Falta envolvendo as fases b e c.

ac - Falta envolvendo as fases a e c.

abc - Falta trifásica.

TDF - Transformada Discreta de Fourier.

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(a) utilizando a condição de operação 1.

Tabela 2 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(a) utilizando a condição de operação 2.

Tabela 3 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(a) utilizando a condição de operação 3.

Tabela 4 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 1.

Tabela 5 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 2.

Tabela 6 - Verificação das zonas de proteção referente à característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 3.

Tabela 7(a) - Pesos das retas da condição de operação 1.

Tabela 7(b) - Pesos das retas da condição de operação 2.

Tabela 7(c) - Pesos das retas da condição de operação 3.

Tabela 7(d) - Pesos das retas da condição de operação 4.

Tabela 8 - Funcionamento da característica Adaptativa referente à condição de operação 1.

Tabela 9 - Funcionamento da característica Adaptativa referente à condição de operação 2.

Tabela 10 - Funcionamento da característica Adaptativa referente à condição de operação 3.

Tabela 11 - Funcionamento da característica Adaptativa referente à condição de operação 4.

LISTA DE SÍMBOLOS

$A, B, C, D, A', B', C', D'$ - Parâmetros da linha de transmissão.

E_{am} - Tensão no terminal M.

E_{an} - Tensão no terminal N.

h - Relação entre os potenciais das fontes.

i - Sinal de corrente.

I - Sinal de corrente.

I' - Derivada do sinal de corrente.

I''_a - Fator sobreposto da corrente na fase a.

I''_b - Fator sobreposto da corrente na fase b.

I''_c - Fator sobreposto da corrente na fase c.

I''_0 - Fator sobreposto da corrente de sequência zero.

I''_{Ma} - Fator sobreposto de corrente da fase a.

I''_{Mb} - Fator sobreposto de corrente da fase b.

I''_{Mc} - Fator sobreposto de corrente da fase c.

I''_{M0} - Fator sobreposto de corrente de sequência zero.

I_{AMF} - Corrente de linha no trecho M-F.

I_{ANF} - Corrente de linha no trecho N-F.

I_m - Valor máximo da corrente.

I_{mf} - Corrente da fase faltosa.

I_{m0} - Corrente de sequência zero.

$I(t)$ - Amostras de corrente na tempo.

I_0 - Corrente de sequência zero.

I_{pk} - Valor de pico da corrente.

K - Razão entre a fase faltosa e a não faltosa.

L - Indutância.

L_i - Saídas lineares.

N - Número de amostras por ciclo.

R_A - Resistência aparente.

R - Resistência.

R_f - Resistência de falta.

T - Período Amostral.

t - unidade de tempo.

Δt - Intervalo de tempo entre uma amostra e a sua subsequente.

V_c - Componente cossenoidal da tensão.

V_{f1} - Fasor de tensão de sequência positiva da linha de transmissão.

V_{f2} - Fasor de tensão de sequência negativa da linha de transmissão.

V_{f0} - Fasor de tensão de sequência zero da linha de transmissão.

V_m - Valor máximo de tensão.

V_{mf} - Tensão da fase faltosa.

V_s - Componente senoidal da tensão.

$V(t)$ - Amostras de tensão no tempo.

V_{pk} - Valor de pico da tensão.

V' - Derivada do sinal de tensão.

X_A - Reatância aparente.

X - Distância da falta ao barramento do relé.

$X_{V,I}(n)$ - Forma de onda de tensão e corrente amostrados.

X_K - Vetor de estados do processo nx1 no tempo t_k .

W_{II} - Pesos associados as retas.

W_i - Frequência angular do sinal de corrente.

W_v - Frequência angular do sinal de tensão.

W_k - Vetor sequência não correlata nx1.

Z - Impedância aparente.

Z_{ap} - Impedância aparente.

Z_{LM} - Impedância da linha no trecho M-F.

Z_{LN} - Impedância da linha no trecho N-F.

Z_{sm} - Impedância equivalente da fonte E_{am} .

Z_{SN} - Impedância equivalente da fonte E_{an} .

Z_1 - Impedância de sequência positiva.

Z_0 - Impedância de sequência zero.

ΔZ - Variação da impedância aparente.

ω - Frequência angular.

φ - Ângulo de incidência da falta.

θ - Ângulo de fase.

ϕ_v - Ângulo de fase da tensão.

ϕ_z - Ângulo de fase da impedância.

ϕ_k - Matriz transição de estado.

δ - Ângulo de transferência de potência.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de "software" para proteção digital das linhas de transmissão. Com esse propósito são implementados relés de distância com características quadrilaterais e adaptativas.

Um "software" básico para este fim consiste de várias etapas como: detecção da falta, filtragem digital, classificação da falta, cálculo da impedância aparente e verificação das zonas de proteção. Na etapa de filtragem digital das ondas, é utilizada a Transformada Discreta de Fourier (TDF) para a extração dos componentes fundamentais de tensão e corrente.

A característica quadrilateral mostra-se eficiente para determinadas condições de operação fixas do sistema, mas seu desempenho é comprometido quando ocorrem mudanças das mesmas.

Para solucionar este problema, é introduzida a teoria de relés adaptativos onde a característica de abertura do relé digital muda com as alterações nas condições de operação do sistema, mantendo-se assim a eficiência da proteção.

Palavras Chaves: Proteção Digital, Característica Quadrilateral, Relés Adaptativos.

ABSTRACT

The objective of this work is the development of a software for digital protection of transmission lines. For this purpose relays of distance with Quadrilateral and Adaptive characteristics are implemented.

A basic software with this aim consists of several steps such as: detection of the fault, digital filtering of the faulted waves, classification of the fault, impedance calculation and verification of the protection zones. For the digital filtering purpose, the Fourier Discret Transform, is used in order to extract the fundamental phasors of voltages and currents.

Quadrilateral characteristics are shown to be effective under certain operation conditions of the system, but its performance is not so efficient when those conditions are changed.

In order to solve these problems, the theory of adaptive relays was introduced whereby the characteristic of digital relay changes according to the alterations in the conditions of the system operation, and by these means the protection is kept efficient.

Key words: Digital Protection, Quadrilateral Characteristic, Adaptive Relays.

1 - A PROTEÇÃO DIGITAL

1.1 - INTRODUÇÃO

Com o advento dos computadores no início dos anos 60, teve início a sua utilização como ferramenta de análise para os sistemas elétricos de potência. Seu uso inicial restringiu-se às aplicações "off line", tais como problemas de curto circuito, fluxo de carga e estabilidade[1]. Esta restrição foi devida à baixa velocidade e pequena capacidade de memória de seus processadores.

No entanto, a tecnologia digital teve uma rápida evolução, sendo que nos anos 80, já foi possível a sua aplicação "on line", ou seja, em tempo real. Essa aplicação foi utilizada tanto no controle e operação [2], bem como na proteção dos sistemas elétricos de potência.

Atualmente existem sofisticados programas para a proteção digital dos sistemas com desempenho altamente satisfatório, visto que uma perfeita proteção tornou-se vital para o sistema devido ao seu crescimento, complexidade e grau de interligação. Desde então, várias pesquisas têm se direcionado neste sentido, sendo que algumas delas serão citadas neste trabalho.

1.2 - VANTAGENS ESPERADAS PELO USO DOS RELÉS DIGITAIS

Apesar da tecnologia analógica ainda estar presente em sistemas, a aplicação da tecnologia digital à proteção já é bastante difundida nos dias atuais. O releamento digital oferece inúmeras vantagens sobre a tecnologia analógica, algumas das quais se destacam:

1.2.1 - AUTOTESTE E CONFIABILIDADE

Um relé digital pode ser programado para monitorar continuamente seu próprio "software" e "hardware". Isto é possível graças a operação "on line" do relé, possibilitando a detecção de qualquer problema. Assim, o relé poderá sair de serviço caso ocorra uma falha na sua operação, enviando um sinal de alerta para o sistema central. Esse aspecto é talvez o maior argumento em favor dos relés digitais. É esperado, com o autoteste, que problemas no relé sejam detectados e consertados antes que ocorra uma má operação, aumentando assim a confiabilidade do sistema elétrico[1].

1.2.2 - ECONOMIA

Os primeiros relés digitais custavam cerca de 10 a 20 vezes mais que os convencionais. Com o passar dos anos, o preço dos relés digitais vem

diminuindo gradativamente. Essa redução é devida a vários fatores como: combinação de muitas funções em um único equipamento, uso de "hardware" comum para vários "softwares", pequenos relés requerem menor espaço nos painéis, reduzindo o preço de construção, simplificação dos circuitos primários e circuitos adjacentes, redução do preço de manutenção e operação [2].

Hoje é estimado que, para relés do mesmo tipo, o preço do mais sofisticado relé digital deve estar abaixo do equivalente convencional.

1.2.3 - SELETIVIDADE

Os relés digitais não se prendem a características intrínsecas dos equipamentos para delinear as áreas de proteção, como acontece com os relés convencionais que fixam a zona de proteção de acordo com o "hardware". Com esta facilidade, os relés digitais podem fornecer qualquer característica de proteção através de seu "software", aumentando assim a seletividade associada ao equipamento.

1.2.4 - INTERAÇÃO DO SISTEMA E AMBIENTE DIGITAL

Os computadores vêm assumindo muitas das funções desenvolvidas nas subestações. Medições, comunicação de dados, telemetria e controle

são alguns exemplos de sua aplicação. Linhas de fibra óptica, por causa de sua imunidade à interferência eletromagnética, irão provavelmente tornar-se o meio de transmissão de sinais de um ponto ao outro nas subestações e entre subestações. A tendência é que o ambiente digital se acentue cada vez mais nas subestações.

1.2.5 - FLEXIBILIDADE E CARACTERÍSTICA ADAPTATIVA

Revisões ou modificações necessárias podem ser realizadas utilizando as características programáveis de um sistema digital, imprimindo maior flexibilidade ao relé.

Alterações significativas nas condições de operação do sistema podem causar grandes modificações na área de proteção. Armazenando em um banco de dados algumas destas condições é possível optar por aquela característica que melhor se adapte a uma dada situação no que diz respeito a sua proteção. Assim é possível obter uma característica adaptativa nos relés digitais.

1.2.6 - EFICIÊNCIA

É esperado que, para qualquer caso, o relé digital possua um desempenho no mínimo equivalente ao relé convencional devido aos tópicos apresentados anteriormente.

1.3 ESQUEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

É apresentado, na fig.(1), um esquema de aquisição de dados para proteção de linhas de transmissão.

FIGURA (1) Esquema de aquisição de dados para proteção por microcomputador.

1.3.1 - TRANSDUTORES DE TENSÃO E CORRENTE

Os sinais analógicos de entrada são atenuados através de TP's (transformadores de tensão) e TC's (transformadores de corrente) para que estejam em um nível computacional compatível, para então serem convertidos à forma digital, discreta, através de um conversor analógico/digital.

1.3.2 - MÓDULO DE "INTERFACE"

Depois que os sinais de tensão e corrente forem atenuados pelos TP's e TC's, eles entram em um módulo de "interface" onde os sinais serão novamente atenuados, para finalmente atingirem níveis adequados para a digitalização. Nesta etapa, é realizada ainda a conversão dos sinais de corrente em sinais de tensão, pois os microprocessadores trabalham somente com estes sinais.

Este módulo possui também filtros passa baixa para evitar o fenômeno denominado sobreposição de espectro ("aliasing"). O problema de sobreposição de espectros é uma fonte de erro da conversão analógica/digital. Para evitar esse problema, utilizam-se filtros "anti-aliasing", que devem ser filtros passa baixa com frequência de corte igual à metade da taxa amostral utilizada no conversor. Os filtros podem ser passivos, constituídos exclusivamente de capacitores e resistores, ou ativos utilizando amplificadores operacionais.

1.3.3 - MÓDULO DE SINCRONIZAÇÃO

O módulo de sincronização dos sinais é composto por um ou mais multiplexadores e "sample and hold", dependendo da arquitetura adotada para o relé. Os instantes de amostragem são determinados por um "clock", que devem produzir pulsos em uma taxa fixa. Para cada instante, definido pelo "clock", ocorre uma conversão dos valores instantâneos dos sinais analógicos de entrada em uma forma digital. Como o relé, em geral, requer várias entradas, várias conversões são realizadas. O multiplexador faz com que os seis sinais utilizados na conversão sejam processados por um único conversor analógico/digital [1].

1.3.4 - CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL

Este conversor transforma sinais contínuos no tempo (analógicos) em sinais discretos no tempo (digitais). Os sinais digitais são obtidos tomando-se o valor dos sinais analógicos em intervalos de tempo iguais [2].

O principal aspecto do conversor é sua resolução expressa em "bits". Isso afeta a capacidade do conversor de representar o sinal analógico com suficiente precisão para a representação digital. A representação digital é realizada em níveis de quantização, calculada pela fórmula 2^{n-1} , sendo n o número de "bits" do conversor.

Claramente é notado que quanto maior o número de “bits” do conversor, menor o erro cometido na conversão, fornecendo assim uma representação mais perfeita.

1.3.5 - MICROCOMPUTADOR

O microprocessador é o elemento central no esquema de proteção do sistema. Ele é responsável pela execução dos programas, manutenção de várias funções e comunicação com equipamentos periféricos [2].

1.4 - ALGORITMOS PARA A PROTEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A função básica da proteção em linhas de transmissão é o rápido isolamento da parte defeituosa. Sendo assim, existem vários tipos de algoritmos que aplicam filosofias diferentes para tal fim. Elas divergem fundamentalmente quanto ao tipo de relé utilizado. Algumas destas filosofias serão citadas neste trabalho.

A maior parte dos algoritmos utiliza os sinais de tensão e corrente da rede. O algoritmo básico de proteção de linhas de transmissão à distância consiste em várias etapas como: detecção da falta, filtragem digital dos componentes de entrada, classificação da falta, cálculo da impedância aparente e comparação com valores pré-estabelecidos, sendo todas de importância fundamental para o seu funcionamento.

Todas as etapas citadas fazem parte do algoritmo implantado neste trabalho, sendo que elas serão detalhadas nos capítulos subsequentes.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica onde são expostas várias filosofias de proteção utilizadas em sistemas elétricos de potência. Estas técnicas estão em ordem cronológica e filosófica afins.

No capítulo 3, são apresentados os fundamentos teóricos de todas as etapas de um "software" de um relé de distância, que trabalha com a estimativa do valor da impedância até o ponto de falta. São mostrados também os resultados deste "software", utilizando uma característica quadrilateral para proteção.

O capítulo 4 descreve a teoria do relé de distância adaptativo, que é proposto como uma solução para sistemas que apresentam alterações significativas em suas condições de operação.

Já o capítulo 5 mostra os resultados da implementação do algoritmo de um relé adaptativo. Estes resultados estão na forma de gráficos e tabelas.

Os comentários e as conclusões sobre as duas filosofias de proteção digital à distância (quadrilateral e adaptativa) estão na capítulo 6.

2 - ESTADO DA ARTE

A seguir serão apresentadas algumas técnicas para a proteção de linhas de transmissão através da tecnologia digital, sendo colocadas em ordem cronológica e filosófica afins.

2.1 - MEDIDAS DOS PARÂMETROS DE TENSÃO E CORRENTE

Para estes estudos, a forma de onda faltosa é considerada bastante simples, tal como uma senóide de 60 Hz acrescida do componente CC e os parâmetros correspondentes desses sinais são obtidos com um número mínimo de amostras.

Mann [3] assumiu a forma de onda da corrente como sendo senoidal acrescida de um componente exponencial. Uma expressão foi obtida para o módulo da impedância aparente da linha do relé até a falta, em termos das amostras de tensão $V(t)$, corrente $I(t)$ e um fator K , que é função do ângulo de incidência da falta (φ) e o tempo (t) pós-falta. A expressão utilizada por Mann é:

$$|Z| = \frac{V(t)}{I(t)} K(\varphi, t) \quad (1)$$

A técnica é suscetível ao ruído presente nos sinais. Estudos, com uma simulação "off line", mostraram erros de 40% na impedância calculada.

Mantey [4] assumiu as formas de ondas faltosas de tensão e corrente como sendo senoidais e usou a seguinte expressão para impedância complexa de falta.

$$Z = \frac{V_m}{I_m} \angle \theta \quad (2)$$

onde: V_m e I_m são os valores máximos de tensão e corrente, respectivamente, e θ é o ângulo de fase.

A técnica possui um tempo de processamento mínimo, mas os efeitos do ruído não foram investigados.

Mann e Morrison [5] desenvolveram um algoritmo baseado na predição dos valores de pico de tensão e corrente de dados amostrados a cada 0,5ms para um sistema de 50hz, para o cálculo da impedância. As fórmulas propostas são:

$$V = V_{pk} \sin(\omega t) \quad V^2 = V_{pk}^2 \sin^2(\omega t) \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \omega V_{pk} \cos(\omega t) \quad \left(\frac{dV}{dt}\right)^2 = \omega^2 V_{pk}^2 \cos^2(\omega t) \quad (4)$$

Adicionando as equações (3) e (4),

$$V^2_{pk} [\text{sen}^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)] = V^2 + \frac{V'^2}{\omega^2} \quad (5)$$

ou simplesmente:

$$V^2_{pk} = V^2 + \frac{V'^2}{\omega^2} \quad (6)$$

A fórmula para o pico da corrente é similar:

$$I^2_{pk} = I^2 + \frac{I'^2}{\omega^2} \quad (7)$$

O ângulo θ , entre a tensão e a corrente, pode ser calculada por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega I'}{I}\right) - \arctan\left(\frac{\omega V'}{V}\right) \quad (8)$$

onde: $\omega I'$ - frequência angular do sinal de corrente.

$\omega V'$ - frequência angular do sinal de tensão.

I' - derivada do sinal de corrente.

V' - derivada do sinal de tensão.

Assim, a impedância aparente é:

$$Z = \frac{V_{pk}^2}{I_{pk}^2} \quad (9)$$

A magnitude da impedância e o ângulo de fase devem ser comparados a valores constantes pré-estabelecidos, inseridos no programa para determinar se a condição de abertura deve existir.

A necessidade de armazenagem dos dados amostrais é pequena, somente as 40 mais recentes amostras de corrente.

2.2 - PARÂMETROS DO MODELO RL

Esta técnica assume a representação do modelo da linha de transmissão com seus parâmetros concentrados: resistência [R] e indutância [L]. A tensão [V] e corrente [i] que são geradas para diferentes tipos de faltas são relacionadas pela expressão:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (10)$$

Esta representação de uma linha de transmissão admite o componente CC como parte válida da solução. Assim, a equação acima será usada para a determinação dos parâmetros do sistema sob condições de falta.

MacInnes e Morrison [6] propuseram a integração da eq.(10) sob dois intervalos no tempo para que um número suficiente de equações seja resolvido e obtidos os valores de R e L, Assim:

$$\int_{t_0}^{t_1} V dt = R \int_{t_0}^{t_1} i dt + L[i(t_1) - i(t_0)] \quad (11)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} V dt = R \int_{t_1}^{t_2} i dt + L[i(t_2) - i(t_1)] \quad (12)$$

resolvendo para R e L temos:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_1} V dt [i(t_1) - i(t_0)] - \int_{t_0}^{t_1} V dt [i(t_2) - i(t_1)]}{\int_{t_1}^{t_2} i dt [i(t_1) - i(t_0)] - \int_{t_0}^{t_1} i dt [i(t_2) - i(t_1)]} \quad (13)$$

$$L = \frac{\int_{t_0}^{t_1} V dt \int_{t_1}^{t_2} i dt - \int_{t_1}^{t_2} V dt \int_{t_0}^{t_1} i dt}{\int_{t_1}^{t_2} i dt [i(t_1) - i(t_0)] - \int_{t_0}^{t_1} i dt [i(t_2) - i(t_1)]} \quad (14)$$

As integrais são calculadas numericamente utilizando a regra trapezoidal.

Gallen, Chen e Breingan [7] propuseram a resolução da eq.(10) pela aplicação de diferentes aproximações para as equações diferenciais, sendo estas muito similares à solução integral numérica. No entanto, devem ser apontados vários problemas associados às características das linhas de transmissão reais que não são considerados na eq.(10). Esta equação considera linhas perfeitamente transpostas, não considera a capacitância em paralelo,

nem o efeito mútuo de linhas de circuito duplo e a resistência de falta. Uma técnica para atenuar os transitórios de altas frequências, que são introduzidos por alguns desses efeitos, é a filtragem dos sinais de entrada, usando um filtro passa baixa.

Ranjbar e Cory [8] investigaram a mesma técnica, selecionando limites de integração sobrepostos para eliminação de harmônicos específicos. No entanto, a taxa amostral deve ser múltipla da ordem da harmônica a ser removida, o que faz o procedimento restrito à seleção da taxa amostral.

Sanderson e Wright [9] incluíram o capacitor de compensação série no modelo básico da eq.(10) Neste caso, a nova equação deve ser integrada sobre três intervalos de tempo, dando um número de equações para que os parâmetros possam ser calculados. Esta técnica foi explorada e modificada para incluir o efeito do acoplamento mútuo, linhas não transpostas e resistência de falta.

2.3 - TÉCNICAS BASEADAS NA TRANSFORMADA DE FOURIER E WALSH

Essas técnicas se fundamentam na teoria de transformadas ortogonais. Admite-se que a forma de onda medida consiste de um componente fundamental, acrescida de uma infinita soma de certos

harmônicos. Um par ortogonal de funções base, senoidais ou quadradas, são correlacionados com os dados amostrais para extrair os componentes da função base da forma de onda de entrada.

Ramamoorthy [10] propôs que os componentes fundamentais de tensão e corrente podem ser extraídos dos transitórios faltosos, correlacionando um ciclo de dados amostrais com amostras armazenadas de ondas seno-cosseno de referência.

Se as expressões das formas de ondas são dadas na forma retangular, então as expressões gerais para os componentes seno e cosseno da tensão da amostra k são dadas por:

$$V_s = \frac{1}{n} \left[2 \sum_{l=1}^{n-1} V_{k-n+l} \sin\left(\frac{2\pi l}{n}\right) \right] \quad (15)$$

$$V_c = \frac{1}{n} \left[V_{k-n} + V_k + 2 \sum_{l=1}^{n-1} V_{k-n+l} \cos\left(\frac{2\pi l}{n}\right) \right] \quad (16)$$

onde: V_s e V_c são componentes das amostras das tensões e n o número de amostras por ciclo. As expressões podem ser convertidas à forma polar, sendo a expressão para a tensão:

$$V = (V_s^2 + V_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

e o ângulo de fase dado por:

$$\phi_V = \tan^{-1}\left(\frac{V_S}{V_C}\right) \quad (18)$$

Se cálculos similares são feitos para o sinal de corrente, então a expressão para a impedância, na forma polar, é dada por:

$$|Z| = \sqrt{(V_S^2 + V_C^2) / (I_S^2 + I_C^2)} \quad (19)$$

A expressão para o ângulo de fase da impedância é:

$$\phi_Z = \tan^{-1}\left(\frac{V}{I}\right) \quad (20)$$

Finalmente, se as expressões (19) e (20) excederem a valores pré-estabelecidos, isto determina a ação do relé. Está implícito na análise de Fourier a filtragem dos dados.

Esse método promete uma melhor precisão porque utiliza somente os componentes fundamentais, sendo todos os outros rejeitados. Considera-se que os dados são disponíveis para o ciclo completo. No entanto, no momento da falta, a expressão para a impedância não é definida e qualquer valor calculado é uma aproximação. Mas o erro, causado por essa aproximação no método de Fourier é bem pequeno em comparação com outros métodos.

Eichhorn, Ladniak e Lobos [11] propuseram um algoritmo que melhora o comportamento do transitório na proteção à

distância. Esse método baseia-se no cálculo dos fasores de tensão e corrente em tempo real, utilizando uma dupla filtragem dos sinais através da Transformada de Fourier ou Filtros de Kalman, e também propõe o uso de uma janela amostral variável.

O método proposto capacita a uma melhor predição dos parâmetros desejados para proteção de uma linha de transmissão sob condições transitórias.

A forma de onda básica dos sinais são dados da seguinte maneira:

$$G = Xb - jXa = \sum_{n=0}^{N-1} K_{bn}fn - j \sum_{n=0}^{N-1} K_{an}fn \quad (21)$$

onde:

$$K_{an} = \frac{1}{AC - B^2} [C \sin(nwT) - B \cos(nwT)] \quad (22)$$

$$K_{bn} = \frac{1}{AC - B^2} [A \cos(nwT) - B \sin(nwT)] \quad (23)$$

$$A = \sum_{n=0}^{N-1} \sin^2(nwT)$$

$$B = \sum_{n=0}^{N-1} \sin(nwT) \cos(nwT)$$

$$C = \sum_{n=0}^{N-1} \cos^2(nwT)$$

onde: N - número de harmônicas.

fn - valores das amostras de tensão e corrente.

T - intervalo amostral.

Os autores comentam que o algoritmo pode ser recursivo, reduzindo o tempo de cálculo e tornando-se mais eficiente.

Phadke, Hlibka e Ibrahim [12] sugeriram o algoritmo da Transformada de Fourier de meio ciclo, com o intuito de melhorar o tempo de resposta. No entanto, são introduzidos erros adicionais devido ao componente CC e altas harmônicas. Um esquema de compensação dos erros foram implementados.

Gangadharan e Anbalagan [13] também desenvolveram um método para o cálculo da impedância aparente baseado na Transformada de Fourier de meio ciclo para diminuição do tempo de resposta do relé.

O modelo proposto define 3 zonas de proteção quadrilaterais para proteção da linha de transmissão, determinadas pelo "software".

Horton [14] sugeriu um algoritmo baseado na função Walsh, que é intimamente relacionado com a Transformada de Fourier de ciclo completo. As funções ortogonais que são correlacionadas com a forma de onda faltosa são ondas quadradas par ou ímpar.

O cálculo é mais simplificado desde que as ondas quadradas assumem os valores ± 1 somente.

2.4 - TÉCNICAS BASEADAS NO AJUSTE POR MÍNIMOS QUADRADOS

A técnica de mínimos quadrados pode ser aplicada na proteção digital, obtendo-se estimativas razoavelmente boas.

Lockett, Munday e Murray [15] admitiram uma forma de onda que contém componente CC, componente de frequência fundamental e harmônicas de ordem específica.

A forma de onda faltosa é então:

$$K_1 e^{-ht} + \sum_{n=1}^m [K_{2n} \text{sen}(mwt) + K_{2n+1} \cos(mwt)] \quad (24)$$

onde: $K_1, K_2, \dots, K_{2n+1}$ são parâmetros incógnitos, n é o número de harmônicas a serem consideradas, h é a constante de decaimento e w a frequência angular.

Então, o ajuste por mínimos quadrados envolve a minimização da expressão:

$$E = \int_0^T \left\{ I - K_1 e^{-ht} - \sum_{n=1}^N [K_{2n} \text{sen}(mwt) + K_{2n+1} \cos(mwt)] \right\}^2 \quad (25)$$

onde I é a forma de onda a ser analisada e T é o intervalo amostral.

As soluções do procedimento de minimização são os parâmetros incógnitos k_r , $r=1,2,\dots,2n+1$. Os parâmetros selecionados,

componentes reais e imaginários dos fasores da corrente e da tensão na frequência fundamental, são então utilizados para calcular a impedância aparente vista pelo relé.

Sachdev e Baribeau [16] admitiram a mesma expressão (24), mas com os termos exponenciais e senoidais expandidos usando série de Taylor.

Deve ser enfatizado que o método de ajuste por mínimos quadrados é computacionalmente bastante complexo e sua precisão é dependente do período de amostragem, bem como do número de amostras por ciclo.

2.5 - TÉCNICAS DE FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman é um estimador ótimo recursivo e, portanto, é utilizado no procedimento "on-line". Por esse motivo, é um processo rápido, mas requer um estudo estatístico aprofundado do modelo a ser usado, antes de ser aplicado. Alguns conceitos que precisam ser previamente conhecidos são: autocorrelação, variância e covariância do sinal ruidoso.

Girgis [17] desenvolveu um algoritmo utilizando Filtro de Kalman para filtragem dos componentes de tensão e corrente ruidosos para cálculo posterior da impedância aparente vista pelo relé.

O modelo matemático de estado dos sinais propostos são:

$$X_{k+1} = \phi_k X_k + W_k \quad (26)$$

onde: X_k é o vetor de estados do processo nx1 no tempo t_k .

ϕ_k é a matriz transição de estado.

W_k é o vetor sequência não correlata nx1 com estrutura de covariância conhecida.

As medidas do processo são considerada em pontos discretos no tempo, de acordo com a relação:

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (27)$$

Atualização da estimativa com a medida Z_k :

$$X_k = X_k + K_k (Z_k - H_k X_k) \quad (28)$$

Após a utilização do Filtro de Kalman obtém-se os componentes fundamentais de tensão e corrente para o cálculo da impedância aparente.

Coury [18] desenvolveu uma nova técnica probabilística de classificação de falta baseada no filtro de Kalman adaptativo, usando medidas de tensão.

Essa técnica é baseada no fato de que a variância do ruído muda em magnitude, e a matriz de covariância inicial difere apreciavelmente de uma fase faltosa para uma não faltosa no caso da

tensão. Portanto, dois modelos de filtro de Kalman processam os dados de tensão, tendo em ambos os modelos duas variáveis de estados. Um modelo considera a variância do ruído, covariância inicial, etc, de uma fase faltosa, o outro considera os parâmetros correspondentes de uma fase não faltosa. Através de probabilidades posteriores, é então identificada a verdadeira condição de fase.

2.6 - TÉCNICAS BASEADAS NO FENÔMENO DE ONDAS VIAJANTES

Ao contrário da maioria das demais técnicas que utilizam somente os componentes fundamentais de tensão e corrente para o cálculo da impedância aparente, esta requer os componentes de alta frequência para a sua análise.

Mansour e Swift [19] utilizaram a técnica de ondas viajantes com comunicação entre os terminais. Porém, o método possui uma grande limitação prática, já que no processo de digitalização, para não ocorrer o fenômeno de sobreposição de espectros, é preciso limitar as altas frequências em no máximo metade da taxa amostral. Isso limita a sua aplicação por eliminar componentes de altas frequências importantes para análise do método.

2.7 - TÉCNICAS UTILIZANDO RELÉS ADAPTATIVOS

A proteção adaptativa é uma técnica que permite o modelamento da área de proteção mediante mudanças nas condições do sistema, visando a manter o melhor desempenho da proteção do sistema elétrico. Isto significa que a área de proteção muda de formato mediante variações significativas nos parâmetros do sistema, mantendo a zona de proteção sempre próxima da ideal.

Xia, Li e David [20] utilizaram a técnica do relé adaptativo para delinear a zona de proteção. A característica de abertura é composta de 4 curvas que são influenciadas pelos parâmetros do sistema.

O método proposto utiliza saídas lineares associadas a portas lógicas para determinar a abertura ou não do relé.

A vantagem deste método está na simplicidade do modelamento das zonas de proteção para as várias condições do sistema.

Zhizhe e Deshu [21] utilizaram um método para a proteção à distância e demonstraram que esta pode ser obtida formando um sistema de controle adaptativo. Regras sobre as informações, funções e sequência de tempo devem ser usadas no projeto.

Três métodos adaptativos são sugeridos para lidar com os seguintes problemas: efeito da variação da frequência, efeito da resistência de falta na falta fase terra e efeito da oscilação de potência no sistema de potência.

Um modelo de proteção digital para um sistema dinâmico de 500 kV foi testado e os resultados mostraram que o desempenho da proteção à distância pode ser melhorado com o uso dos métodos adaptativos.

Jampala, Venkata e Damborg [22] utilizaram o conceito de multi-processamento e supercomputação com a intenção de reduzir o tempo de execução para satisfazer as necessidades computacionais em tempo real do esquema adaptativo na proteção de linhas de transmissão. Os autores não mostraram detalhes de implementação do relé na prática porque isso depende do sistema computacional utilizado.

Rockefeller, Wagner e Linders [23] desenvolveram o conceito de hierarquia computacional ligada à proteção adaptativa envolvendo: linha de transmissão, processamento paralelo, subestação anfitriã e processador remoto ligados por canais que transmitem dados antes e depois de um distúrbio.

A solução adaptativa apresentada introduz uma melhora na proteção da linha de transmissão e na confiabilidade da operação do sistema.

O trabalho, que será desenvolvido, apresenta um relé digital adaptativo para proteção à distância de linhas de transmissão. Inicialmente é calculada a impedância aparente até o ponto de falta. A técnica de filtragem utilizada no trabalho foi a Transformada Discreta de Fourier de meio ciclo pelo seu ótimo desempenho na rejeição de harmônicas de altas frequências, como também do componente CC. Vale ressaltar que foi utilizada a técnica de relés adaptativos para a caracterização de diferentes áreas primárias de proteção, de acordo com as condições mutantes de operação do sistema.

2.8 - OUTRAS TÉCNICAS

Aggarwal, Johns e Tripp [24] desenvolveram uma técnica por comparação direcional digital dos fasores de tensão e corrente com compensadores capacitivos nas linhas.

Essa técnica baseia-se no fato de que, em operação normal, os fasores de tensão e corrente que entram em um ponto da linha são iguais aos respectivos fasores que saem deste ponto da linha, isto é, em um determinado ponto da linha, a soma dos fasores dos sinais é igual a zero. Quando ocorre um distúrbio, a superposição modal dos sinais faz com que componentes de tensão e corrente fiquem com

polaridades opostas, traduzindo-se em uma diferença no valor dos sinais, acusando assim a presença do distúrbio.

Phadke, Ibrahim e Hlibka [25] investigaram o comportamento de um relé digital à distância, de alta velocidade, baseado na teoria de componentes simétricos. É mostrado que uma única equação é adequada para manipular todos os tipos de faltas que possivelmente possam ocorrer em um sistema de potência trifásico.

Hope, Malik e Dash [26] propuseram correlacionar os sinais de tensão e corrente para determinar a potência da linha. A autocorrelação do sinal de corrente foi usada para se obter o quadrado da magnitude. A impedância aparente é então calculada fazendo-se a razão da potência pelo quadrado da corrente.

3 - RELÉS DIGITAIS DE DISTÂNCIA BASEADOS NA CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL

3.1 INTRODUÇÃO

Devido a sua extensão física em relação a outros componentes, a linha de transmissão é o elemento do sistema elétrico onde ocorre a maioria dos defeitos. Acrescentando a isto, o aumento no grau de interligação e de complexidade do sistema elétrico brasileiro, existe um interesse muito grande na melhoria da proteção de linhas de transmissão. O avanço da tecnologia dos microprocessadores proporcionou o aparecimento dos relés digitais para proteção de linhas de transmissão em substituição a relés eletromecânicos e de estado sólido. A partir deste fato, surgiram várias filosofias para relés digitais. O uso destes tem atraído cada vez mais interesse por possuir inúmeras vantagens sobre os relés convencionais tais como auto-teste, confiabilidade, fator econômico, etc, como explicitado no Capítulo 1.

Será descrito neste capítulo um "software" que visa à proteção das linhas de transmissão através de um relé de distância, que atua com sinais de tensão e corrente digitalizados, provenientes de um dos terminais da linha de transmissão.

Quando ocorre uma falta, distorções são incorporadas aos sinais de tensão e corrente. A filtragem digital destas ondas, visando à extração dos componentes fundamentais, é um importante passo para o cálculo da impedância aparente vista pelos terminais da linha e consequentemente sua proteção. Esse trabalho utiliza-se da Transformada Discreta de Fourier(TDF) para uma eficiente filtragem das ondas de tensão e corrente. O sistema escolhido simula uma linha de transmissão com dois terminais e está representado na fig.(2). A fig. 2(a) mostra o modelo de pré-falta do sistema utilizado e a fig. 2(b), o modelo sob curto para o mesmo sistema. O método utilizado pode ser dividido em várias etapas como a identificação do momento de incidência da falta, extração dos componentes fundamentais feita através da TDF de meio ciclo, classificação da falta, cálculo da impedância aparente e finalmente verificação das zonas de proteção. Nesta última fase são utilizadas áreas com características quadrilaterais para determinar a zona de proteção na qual a falta se encontra.

(a) Modelo pré-falta do sistema utilizado.

(b) Modelo faltoso do sistema utilizado.

FIGURA (2) Modelo de pré e pós-falta para o sistema utilizado.

3.2 - A TÉCNICA DE PROTEÇÃO DIGITAL

Um algoritmo para proteção digital em linhas de transmissão consiste de várias etapas. O ponto de partida são formas de ondas de tensão e corrente digitalizadas obtidas através de um simulador digital de faltas em linhas de transmissão denominado TEER.

A seguir serão apresentadas com mais detalhes as diferentes etapas para um algoritmo de cálculo da impedância aparente da linha e verificação das zonas de proteção.

3.2.1 - DETECÇÃO DA FALTA

A primeira etapa do referido algoritmo é a detecção da falta na linha de transmissão. Como dito anteriormente, faltas causam distorções nas formas de onda de corrente e tensão. Os sinais de corrente e tensão podem

mudar em magnitude e/ou ângulo de fase com relação aos dados de pré-falta. Utiliza-se, neste processo, um método que consiste na comparação dos sinais de tensão e corrente de um ciclo com os respectivos sinais do ciclo anterior. Assim, o módulo da diferença entre os valores de tensão e corrente de dois ciclos subsequentes são comparados com valores pré-estabelecidos para detecção da falta. Caso três valores consecutivos dos referidos módulos forem maiores que valores pré-estabelecidos, a falta é detectada. O programa fornece então, em que amostra a falta ocorre e em qual fase ela foi detectada, obtendo-se assim um arquivo de dados de pré e pós-falta.

3.2.2 - EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS

Os sinais pós-falta possuem componentes harmônicos de altas frequências acrescidos do componente CC. Na prática, parte dos transitórios do sistema primário são atenuados pelos transdutores, filtros passa baixa, etc. Mesmo assim, ainda estão presentes ruídos significativos nas ondas de tensão e corrente. Como o método utiliza-se apenas dos componentes fundamentais para o cálculo da impedância, torna-se de extrema importância uma boa filtragem dos referidos sinais pós-falta de tensão e corrente.

O método utilizado é a Transformada Discreta de Fourier (TDF) que possui uma alta precisão para extração dos componentes fundamentais citados. É usada uma janela de dados de meio ciclo de 60(Hz) para

minimizar o tempo computacional, já que, com esta opção, o tempo de composição da janela de dados para processamento é reduzido.

A essência da TDF é a decomposição da forma de onda em diferentes frequências, transformando assim sinais de tensão e corrente em função do tempo em um espectro com amplitude no domínio da frequência. Torna-se então possível a extração dos componentes fundamentais 60(Hz) da tensão e corrente como citado anteriormente.

A equação geral da TDF fornece a magnitude e a fase do fasor fundamental $X_{v,i}(W)$ e é dada por [27]:

$$X_{v,i}(W) = (2 / N) \sum_{n=0}^{n=N-1} \left[X_{v,i}(n) \{ \cos(Wn\Delta t) - j \sin(Wn\Delta t) \} \right] \quad (29)$$

onde:

N = número de amostras por ciclo.

Δt = intervalo de tempo entre uma amostra e a sua subsequente.

$W = 2\pi 60 \text{ Hz}$ frequência do fasor a ser extraído.

$X_{v,i}(n)$ = forma de onda de tensão e corrente amostradas.

Os fasores fundamentais de tensão e corrente pós-falta podem então ser determinados, como:

$$[V'_{Ma,b,c}] = [X_{Ma,b,c}(W)] \quad (30)$$

$$[I'_{Ma,b,c}] = [X_{Ma,b,c}(W)] \quad (31)$$

A fig. (3) mostra a resposta em frequência da onda senoidal normalizada da (TDF) usada. Uma extensa série de estudos foi feita e mostra que a técnica (TDF) é muito eficiente na rejeição de componentes de altas frequências e fornecem uma boa filtragem dos componentes de baixas frequências, particularmente o componente CC. Alguns resultados serão apresentados no item 3.3.3.

FIGURA (3) Resposta em frequência do filtro baseado na Transformada Discreta de Fourier.

3.2.3 - CLASSIFICAÇÃO DA FALTA

A classificação da falta é um requisito essencial para o cálculo da impedância aparente, pois determina as fases envolvidas no distúrbio. Além disso, esta é incorporada ao algoritmo com o intuito de integrar o histórico de ocorrências de faltas em uma determinada subestação.

O método empregado aqui é baseado na comparação entre os fasores sobrepostos de correntes de fase e sequência zero I''_a, I''_b, I''_c e I''_0 para um dado terminal [27], sendo que os fasores sobrepostos são obtidos pela diferença entre os sinais de pós-falta e pré-falta. Assim, considerando dados provenientes do terminal M.

se

a falta é:

$$(I) \quad I''_{Mb} \leq KI''_{Ma} \quad e \quad I''_{Mc} \leq KI''_{Ma} \quad \text{falta A-TERRA}$$

$$I''_{Ma} \leq KI''_{Mb} \quad e \quad I''_{Mc} \leq KI''_{Mb} \quad \text{falta B-TERRA}$$

$$I''_{Ma} \leq KI''_{Mc} \quad e \quad I''_{Mb} \leq KI''_{Mc} \quad \text{falta C-TERRA}$$

$$(II) \quad I''_{Mc} \leq KI''_{Ma} \quad e \quad I''_{Mb} \cong I''_{Ma} \quad e$$

$$I''_0 \geq I_{\min} \quad \text{falta AB-TERRA}$$

$$\text{caso contrário} \quad \text{falta AB}$$

$$I''_{Ma} \leq KI''_{Mb} \quad e \quad I''_{Mc} \cong I''_{Mb} \quad e$$

$$I''_0 \geq I_{\min} \quad \text{falta BC-TERRA}$$

$$\text{caso contrário} \quad \text{falta BC}$$

$$I''_{Mb} \leq KI''_{Ma} \quad e \quad I''_{Ma} \cong I''_{Mc} \quad e$$

$$I''_0 \geq I_{\min} \quad \text{falta AC-TERRA}$$

caso contrário

falta AC

$$(III) \quad I''_{Ma} \cong I''_{Mb} \cong I''_{Mc}$$

falta ABC

Sendo K a razão entre a fase faltosa e não faltosa da corrente, uma série de resultados mostrou que para o sistema estudado, $K=0.3$ originou uma classificação correta para todos os tipos de falta. Na prática, é necessário considerar uma pequena corrente ($I_{\min}$) devido ao desequilíbrio das linhas, erros de transdutores, erros na filtragem, etc.

Deve ser ressaltado que qualquer um dos terminais contém informações suficientes para que a rotina de classificação funcione corretamente para todos os tipos de falta.

3.2.4 - CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA APARENTE

Após a detecção e classificação da falta quanto ao tipo, os pares corrente e tensão apropriados, devidamente filtrados, são selecionados para calcular a resistência e reatância aparentes, vistas pelo relé. Para este passo, a natureza distribuída dos parâmetros de linha podem ser considerada, no entanto, as equações foram modificadas com algumas suposições para simplificar o procedimento computacional.

Consideremos a fig. (4), que ilustra uma condição sob falta para o modelo de linha de transmissão usado.

FIGURA (4) Esquema sob falta para o sistema considerado.

onde:

V_M e I_M tensão e corrente na barra fornecedora de energia.

R_F resistência de falta.

A, B, C, D parâmetros da linha de transmissão entre o ponto de defeito e a barra M.

A', B', C', D' parâmetros da linha de transmissão entre o ponto de defeito e a barra N.

Admitindo-se uma falta fase a para terra, as equações da linha de transmissão para o fasor de tensão e corrente serão então:

$$V_{f1} = D_1 V_{M1} - B_1 I_{M1} \quad (32)$$

$$V_{f2} = D_2 V_{M2} - B_2 I_{M2} \quad (33)$$

$$V_{f0} = D_0 V_{M0} - B_0 I_{M0} \quad (34)$$

onde os índices 0, 1, 2 representam sequência zero, positiva e negativa respectivamente. Para um curto na fase a para a terra:

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f0} = 0 \quad (35)$$

Portanto:

$$(V_{M1} + V_{M2} + V_{M0}) + \frac{D_0 - D_1}{D_1} V_{M0} = \frac{B_1}{D_1} (I_{M1} + I_{M2} + I_{M0}) + \frac{B_0 - B_1}{D_1} I_{M0} \quad (36)$$

e

$$V_{Ma} + \frac{D_0 - D_1}{D_1} V_{M0} = \frac{B_1}{D_1} I_{Ma} + \frac{B_0 - B_1}{D_1} I_{M0} \quad (37)$$

Para a linha de transmissão considerada podemos fazer as seguintes aproximações [18]:

$$\frac{D_0 - D_1}{D_1} \leq 0,02; \frac{B_0 - B_1}{D_1} \cong \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}; \frac{B_1}{D_1} \cong Z_1 X = Z_{ap} \quad (38)$$

Onde:

Z_1 = impedância de sequência positiva por unidade de comprimento.

Z_0 = impedância de sequência zero por unidade de comprimento.

X = distância da falta à barra M onde se localiza o relé.

Z_{ap} = impedância aparente vista através do barramento M.

Para uma linha de transmissão extremamente longa, as suposições anteriores não são válidas, no entanto, neste caso, informações de ambos os lados da linha devem ser usadas para sua proteção [18]. Assim, utilizando as suposições simplificadoras na eq. (36), temos para faltas envolvendo terra, a-terra, b-terra, c-terra, ab-terra, ac-terra, bc-terra e também para faltas trifásicas a seguinte relação para o cálculo da impedância aparente:

$$Z_{ap} = \frac{V_{Mf}}{(I_{Mf} + C_k * I_{M0})} \quad (39)$$

onde:

$$C_k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$$

I_{M0} = corrente de sequência zero.

I_{Mf} = corrente da fase faltosa, no barramento M.

V_{Mf} = tensão da fase faltosa, no barramento M.

Z_1 = impedância de sequência positiva da linha.

Z_0 = impedância de sequência zero da linha

Procedendo de forma similar, caso ocorra uma falta que não envolva terra (ab, ac, bc) a relação utilizada é:

$$Z_{ap} = \frac{(V_{Mfi} - V_{Mfii})}{(I_{Mfi} - I_{Mfii})} \quad (40)$$

onde:

V_{Mfi} e V_{Mfii} = tensões das fases envolvidas vistas pelo relé.

I_{Mfi} e I_{Mfii} = correntes das fases envolvidas vistas pelo relé.

3.2.5 - VERIFICAÇÃO DAS ZONAS DE PROTEÇÃO

Após o cálculo da impedância aparente vista pelo relé, o algoritmo determina a zona de proteção em que a falta se encontra. Uma vez que erros neste cálculo são introduzidos devidos, principalmente, à existência da resistência de falta, uma característica de operação aceitável passa a ser, por exemplo, a quadrilateral. Esta característica possui a forma de um quadrilátero para as 3 zonas de proteção pertencentes ao plano R-X (resistência X reatância) , sendo que os valores limites das zonas de proteção e os ângulos de inclinação destes limites são fornecidos pelo "software". Se a impedância aparente se localizar dentro da primeira zona de proteção, o relé atuará instantaneamente no sentido de isolar a falta existente. Os limites das zonas de proteção são determinados em função do valor da impedância de sequência positiva da linha. A primeira zona de

proteção cobre aproximadamente 80% do comprimento da linha de transmissão. A segunda cobre 110% do comprimento da linha, suprimindo o seu restante e a terceira zona de proteção chega a 150% do comprimento da linha atingindo parte da próxima linha ou equipamento. Nestes casos 2ª e 3ª zonas, o relé é temporizado, significando que o mesmo possui um atraso incorporado em seu sistema de atuação.

A fig. (5) mostra um fluxograma básico do algoritmo utilizado para a obtenção da impedância aparente vista pelo relé ($Z_L = R_L + j X_L$), e as figs (6), (7) e (8) mostram os fluxogramas de verificação da característica quadrilateral para as 3 zonas de proteção citadas acima [13]. X_A , X_B , X_C são os valores de reatâncias limites para as zonas 1, 2 e 3 respectivamente. R_A , R_B , R_C , R_D , R_E , R_F e R_G são os valores das resistências limites para as 3 zonas de proteção. As constantes K_1 , K_2 , K_{L1} e K_{L2} são calculadas pelas fórmulas:

$$K_1 = X_A / R_A$$

$$K_2 = X_A / R_D$$

$$K_{L1} = X_L / R_L$$

$$K_{L2} = X_L / (R_L + R_D)$$

Z_C é a impedância de sequência positiva da linha de transmissão. Estes limites podem ser melhor observados na fig. 9(a), que corresponde a uma das características quadrilaterais utilizadas.

8912532

FIGURA (5) Fluxograma inicial do algoritmo utilizado que calcula a impedância aparente vista pelo barramento M.

$$K_1 = X_A / R_A$$

$$K_2 = X_A / R_D$$

$$K_{L1} = X_L / R_L$$

$$K_{L2} = X_L / (R_L + R_D)$$

FIGURA (6) Fluxograma para verificação se a falta esta na zona 1 de proteção.

FIGURA (7) Fluxograma para verificação se a falta esta na zona 2 de proteção.

FIGURA (8) Fluxograma para verificação se a falta se esta na zona 3 de proteção.

Assim, como exemplos de características quadrilaterais, apresentaremos dois modelos ilustrados nas figs 9(a) e (b), sendo que a característica do item (b) possui um melhor desempenho para os casos onde aparecem altas resistências de falta.

(a) Característica quadrilateral 1.

(b) Característica quadrilateral 2.

FIGURA (9) Modelos de características quadrilaterais utilizadas.

3.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORÍTMO DE PROTEÇÃO DIGITAL À DISTÂNCIA UTILIZANDO CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL

O sistema utilizado para testes neste capítulo é uma linha de transmissão de 150 Km de extensão e tensão nominal de 400 kV em seus barramentos como mostrado na fig.(10). A taxa amostral utilizada é de 2 kHz, por ser um dos valores mais utilizados na prática.

FIGURA (10) Linha de transmissão utilizada nos testes.

Os dados de entrada do “software” desenvolvido são amostras de tensão e corrente gerados através do pacote computacional de simulação de transitório de faltas conhecido como TEER [28]. Este pacote, desenvolvido na Universidade de Bath (Inglaterra), tem por finalidade a obtenção de dados precisos de tensão e corrente antes e depois da incidência de uma falta em uma linha de transmissão de alta tensão. Os dados permanecem registrados em arquivos na forma digital para processamento posterior.

Para a simulação, o pacote TEER utiliza uma teoria eficiente para analisar o comportamento dos transitórios de falta de uma linha de alta tensão. Os programas são baseados na solução de equações através dos teoremas de Superposição e de Thévenin no domínio da frequência. São utilizadas técnicas de análise de matrizes em conjunto com a Transformada Inversa de Fourier para apresentar os dados de uma forma mais apropriada para uma computação digital. As técnicas utilizadas levaram em consideração a disposição física e as características dos condutores, efeito da variação da frequência nos parâmetros da linha, efeitos do tipo de falta, bem como os efeitos causados pelas capacidades diferentes das fontes. As figs(11) e (12) mostram formas de ondas ruidosas de corrente e tensão respectivamente, resultante do programa de simulação citado acima.

A seguir apresentaremos os resultados de cada etapa do “software” desenvolvido.

Figura (11) Um ciclo de pré e dois de pós-falta da corrente para uma falta a 90 Km do terminal M.

Figura (12) Um ciclo de pré e dois de pós-falta da tensão para uma falta a 90 Km do terminal M.

3.3.1 - DETECÇÃO DA FALTA

A etapa de detecção da falta teve um funcionamento altamente satisfatório em todos os casos simulados, sendo que o “software” precisou no máximo de três amostras para acusar a existência da mesma.

3.3.2 - CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

O primeiro tópico em que apresentaremos resultados é o da subrotina para classificação do tipo de falta. Alguns exemplos estão ilustrados na fig.(13) para classificação de faltas tipo fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica(a-t, b-t, ab, ac, bc-t, abc) para uma falta a 30 Km do terminal M. O método utilizado foi baseado na comparação entre fasores sobrepostos de fase e de sequência zero da corrente I_{Ma}, I_{Mb}, I_{Mc} e I_{M0} . Como pode ser observado pela fig.(13), quando um determinado fasor excede o valor limite 0.7 (E_1), a fase é considerada sob falta e se, por outro lado, for inferior a 0.3 (E_2), é considerada não faltosa. A existência do componente I_{M0} é verificada de forma similar ($I_{M0} > E_0 = 0.1$). Assim, com as fases classificadas separadamente, a determinação do tipo de falta é imediata. Como citado anteriormente, E_0, E_1, E_2 são obtidos empiricamente de acordo com o sistema utilizado.

FIGURA (13) Resultados da subrotina de classificação de faltas para uma falta a 30 Km do terminal M com $R_F = 10$ ohms.

3.3.2 - EXTRAÇÃO DOS FASORES FUNDAMENTAIS

As figs 14(a) e (b), 15(a) e (b) e 16(a) e (b) ilustram a técnica de filtragem digital utilizada, baseada na Transformada Discreta de Fourier (TDF) para a extração dos componentes fundamentais nas ondas de tensão e corrente. O caso ilustrado na fig.14(a) é o da tensão da fase-a para uma falta ocorrida a 140 km do terminal de referência para um tipo de falta fase-terra (at). Na fig.14(b) apresenta a onda de corrente correspondente ao caso anterior. A fig.15(a) ilustra a tensão da fase c para uma falta (ac-t) a 120 Km do terminal emissor. Na fig.15(b), é mostrada a onda de corrente para o mesmo caso, mas para a fase a. A fig.16(a) ilustra a tensão na fase a de uma falta do tipo ab ocorrida a 40 Km do terminal emissor. A fig.16(b) mostra a onda de corrente para o caso anterior. Os exemplos acima atestam a eficiência do método utilizado (TDF) para a extração do componente fundamental das ondas.

Figura 14(a) Tensão (fase a) para uma falta do tipo at ocorrida a 140 Km do terminal M.

Figura 14(b) Corrente (fase a) para uma falta do tipo at ocorrida a 140 Km do terminal M.

Figura 15(a) Tensão (fase c) para uma falta do tipo ac-t ocorrida a 120 Km do terminal M.

Figura 15(b) Corrente (fase a) para uma falta do tipo ac-t ocorrida a 120 Km do terminal M.

Figura 16(a) Tensão (fase a) para uma falta do tipo ab ocorrida a 40 Km do terminal M.

Figura 16(b) Corrente (fase a) para uma falta do tipo ab ocorrida a 40 Km do terminal M.

3.3.4 - CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA APARENTE E VERIFICAÇÃO DE ZONA

As etapas finais do algoritmo proposto é o cálculo da impedância aparente vista pelo relé e verificação, através da característica quadrilateral, da zona de proteção na qual a falta se encontra. Foram utilizados dois modelos de característica quadrilateral, conforme ilustrados nas figs 9(a) e (b) citadas anteriormente. Estas características são sugeridas na literatura [13].

Na apresentação dos resultados desta etapa, consideremos três condições de operação distintas de um mesmo sistema, representadas nas figs 17(a),(b),(c) e mostraremos tabelas onde o sistema é sujeito a faltas do tipo fase (a-terra) com diversas resistências de faltas referentes a cada uma destas condições. As tabelas apresentam três partes: distância da falta em relação ao terminal emissor em Km e porcentagem do comprimento da linha, impedância aparente calculada pelo relé e a respectiva zona de proteção dada pela característica quadrilateral.

As tabelas (1), (2) e (3) referem-se a fig.9(a). A tabela (1) mostra um bom comportamento do "software", pois refere-se à condição de operação na qual as características quadrilaterais foram baseadas. Já na tabela (2), o funcionamento do "software" não é tão satisfatório, porque houve alteração no fluxo de carga e nas tensões dos barramentos. A tabela (3) mostra que o funcionamento foi satisfatório neste caso, porque a única alteração na condição de operação do sistema foi nas capacidades das fontes.

As tabelas (4), (5) e (6) possuem comportamento semelhante ao das tabelas (1), (2) e (3) respectivamente, porém elas referem-se a característica da fig.9(b). No entanto, deve ser ressaltado que faltas com alta resistência de falta são classificadas como pertencente a zona de proteção 2 para este tipo de característica tabelas (4) e (6).

(a) Condição de Operação 1.

(b) Condição de Operação 2.

FIGURA (17) Condições de operação utilizadas nas simulações.

3.3.5 DESEMPENHO DO RELÉ À DISTÂNCIA COM CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL

Como pode ser observado pelos resultados apresentados, o modelo de zonas de proteção que utiliza a característica quadrilateral é confiável para um sistema onde as grandezas permanecem inalteradas. Caso haja uma mudança significativa na condição de operação do sistema, a característica quadrilateral poderá ter sua operação comprometida. As grandezas que mais influenciam negativamente na atuação da proteção, quando alterados, são o fluxo de carga e as tensões nos barramentos. Para suprir tal deficiência e consequentemente aumentar a porcentagem de atuação instantânea da zona 1, as pesquisas se direcionam atualmente para o uso dos relés adaptativos. Maiores detalhes desta proposta serão apresentados no próximo capítulo.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	25.90+j17.87	1
30 (20%)	32.39+j26.28	1
45 (30%)	38.12+j33.71	1
60 (40%)	42.89+j39.98	1
75 (50%)	47.10+j45.64	1
90 (60%)	50.62+j50.61	1
105 (70%)	53.51+j55.09	1
120 (80%)	55.51+j58.94	2
135 (90%)	56.06+j61.87	2
142.5 (95%)	57.04+j63.34	2
149 (99,3%)	57.16+j63.90	2

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	82.80+j13.20	1
30 (20%)	87.36+j23.40	1
45 (30%)	91.35+j29.80	1
60 (40%)	94.54+j35.22	1
75 (50%)	97.78+j40.97	1
90 (60%)	100.91+j44.96	1
105 (70%)	104.16+j50.44	1
120 (80%)	107.58+j56.13	2
135 (90%)	111.49+j57.49	2
142.5 (95%)	115.68+j58.27	2
149 (99,3%)	115.69+j59.28	2

(b) 50 [Ω] de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de ProteçãoFig.9(a)
15 (10%)	108.73+j17.79	1
30 (20%)	110.58+j25.02	1
45 (30%)	112.38+j31.56	1
60 (40%)	113.87+j37.15	1
75 (50%)	115.61+j42.42	1
90 (60%)	117.43+j47.26	1
105 (70%)	119.38+j51.84	1
120 (80%)	121.47+j56.22	2
135 (90%)	123.94+j60.86	2
142.5 (95%)	126.26+j65.09	2
149 (99,3%)	126.26+j65.10	2

(c) 100 [Ω] de resistência de falta.

TABELA (1) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da figura 9(a) utilizando a condição de operação 1.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	26.74+j21.12	1
30 (20%)	33.52+j31.46	1
45 (30%)	39.50+j41.00	1
60 (40%)	44.51+j49.36	1
75 (50%)	48.92+j57.13	2
90 (60%)	52.59+j64.09	2
105 (70%)	55.58+j70.36	2
120 (80%)	57.61+j75.66	2
135 (90%)	58.19+j79.30	3
142.5 (95%)	57.32+j81.05	3
149 (99,3%)	57.32+j81.06	3

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	105.97+j9.30	1
30 (20%)	113.34+j23.17	1
45 (30%)	119.56+j36.01	1
60 (40%)	124.55+j47.22	1
75 (50%)	129.44+j57.81	2
90 (60%)	134.16+j67.59	2
105 (70%)	139.08+j77.01	3
120 (80%)	144.31+j86.29	3
135 (90%)	150.04+j96.49	externa
142.5 (95%)	155.98+j107.03	externa
149 (99,3%)	155.10+j107.04	externa

(b) 50 $[\Omega]$ de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de ProteçãoFig.9(a)
15 (10%)	149.41+j33.40	externa
30 (20%)	152.41+j46.84	externa
45 (30%)	154.93+j59.41	externa
60 (40%)	156.80+j70.66	externa
75 (50%)	158.73+j81.67	externa
90 (60%)	160.53+j92.26	externa
105 (70%)	162.24+j102.73	externa
120 (80%)	163.79+j113.29	externa
135 (90%)	165.70+j124.79	externa
142.5 (95%)	165.74+j135.64	externa
149 (99,3%)	165.75+j135.65	externa

(c) 100 $[\Omega]$ de resistência de falta.

TABELA (2) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da Figura 9(a) utilizando a condição de operação 2.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	18.46+j15.45	1
30 (20%)	25.93+j24.80	1
45 (30%)	32.44+j32.88	1
60 (40%)	38.09+j39.95	1
75 (50%)	43.04+j46.02	1
90 (60%)	47.27+j51.44	1
105 (70%)	50.74+j56.17	2
120 (80%)	53.28+j60.20	2
135 (90%)	54.33+j63.52	2
142.5 (95%)	51.72+j64.32	2
149 (99,3%)	51.73+j64.33	2

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	78.55+j2.23	1
30 (20%)	84.38+j11.86	1
45 (30%)	89.36+j20.36	1
60 (40%)	93.71+j27.72	1
75 (50%)	97.81+j33.98	1
90 (60%)	101.91+j39.57	1
105 (70%)	106.17+j44.66	1
120 (80%)	110.86+j53.55	1
135 (90%)	116.37+j57.85	2
142.5 (95%)	122.18+j61.01	2
149 (99,3%)	122.19+j61.02	2

(b) 50 [Ω] de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	106.50+j15.56	1
30 (20%)	109.00+j23.58	1
45 (30%)	111.41+j30.84	1
60 (40%)	113.67+j37.36	1
75 (50%)	115.97+j43.21	1
90 (60%)	118.40+j48.74	1
105 (70%)	120.97+j54.03	1
120 (80%)	123.74+j59.38	2
135 (90%)	126.76+j64.93	2
142.5 (95%)	129.64+j70.73	2
149 (99,3%)	129.65+j70.74	2

(c) 100[Ω] de resistência de falta.

TABELA (3) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da figura 9(a) utilizando a condição de operação 3.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	25.90+j17.87	1
30 (20%)	32.39+j26.28	1
45 (30%)	38.12+j33.71	1
60 (40%)	42.89+j39.98	1
75 (50%)	47.10+j45.64	1
90 (60%)	50.62+j50.61	1
105 (70%)	53.51+j55.09	1
120 (80%)	55.51+j58.94	2
135 (90%)	56.06+j61.87	2
142.5 (95%)	57.04+j63.34	2
149 (99,3%)	57.16+j63.90	2

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	82.80+j13.20	1
30 (20%)	87.36+j23.40	1
45 (30%)	91.35+j29.80	1
60 (40%)	94.54+j35.22	1
75 (50%)	97.78+j40.97	1
90 (60%)	100.91+j44.96	1
105 (70%)	104.16+j50.44	1
120 (80%)	107.58+j56.13	2
135 (90%)	111.49+j57.49	2
142.5 (95%)	115.68+j58.27	2
149 (99,3%)	115.69+j59.28	2

b) 50 $[\Omega]$ de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	108.73+j17.79	2
30 (20%)	110.58+j25.02	2
45 (30%)	112.38+j31.56	2
60 (40%)	113.87+j37.15	2
75 (50%)	115.61+j42.42	2
90 (60%)	117.43+j47.26	2
105 (70%)	119.38+j51.84	2
120 (80%)	121.47+j56.22	2
135 (90%)	123.94+j60.86	2
142.5 (95%)	126.26+j65.09	2
149 (99,3%)	126.26+j65.10	2

(c) 100 $[\Omega]$ de resistência de falta.

TABELA (4) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 1.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	26.74+j21.12	1
30 (20%)	33.52+j31.46	1
45 (30%)	39.50+j41.00	1
60 (40%)	44.51+j49.36	1
75 (50%)	48.92+j57.13	2
90 (60%)	52.59+j64.09	2
105 (70%)	55.58+j70.36	2
120 (80%)	57.61+j75.66	2
135 (90%)	58.19+j79.30	3
142.5 (95%)	57.32+j81.05	3
149 (99,3%)	57.32+j81.06	3

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	105.97+j9.30	2
30 (20%)	113.34+j23.17	2
45 (30%)	119.56+j36.01	2
60 (40%)	124.55+j47.22	2
75 (50%)	129.44+j57.81	2
90 (60%)	134.16+j67.59	2
105 (70%)	139.08+j77.01	2
120 (80%)	144.31+j86.29	3
135 (90%)	150.04+j96.49	3
142.5 (95%)	155.98+j107.03	externa
149 (99,3%)	155.10+j107.03	externa

(b) 50 $[\Omega]$ de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	149.41+j33.40	3
30 (20%)	152.41+j46.84	3
45 (30%)	154.93+j59.41	3
60 (40%)	156.80+j70.66	3
75 (50%)	158.73+j81.67	3
90 (60%)	160.53+j92.26	3
105 (70%)	162.24+j102.73	externa
120 (80%)	163.79+j113.29	externa
135 (90%)	165.70+j124.79	externa
142.5 (95%)	165.74+j135.64	externa
149 (99,3%)	165.75+j135.64	externa

(c) 100 $[\Omega]$ de resistência de falta.

TABELA (5) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 2.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	18.46+j15.45	1
30 (20%)	25.93+j24.80	1
45 (30%)	32.44+j32.88	1
60 (40%)	38.09+j39.95	1
75 (50%)	43.04+j46.02	1
90 (60%)	47.27+j51.44	1
105 (70%)	50.74+j56.17	2
120 (80%)	53.28+j60.20	2
135 (90%)	54.33+j63.52	2
142.5 (95%)	51.72+j64.32	2
149 (99,3%)	51.73+j64.33	2

(a) resistência de falta nula.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	78.55+j2.23	1
30 (20%)	84.38+j11.86	1
45 (30%)	89.36+j20.36	1
60 (40%)	93.71+j27.72	1
75 (50%)	97.81+j33.98	1
90 (60%)	101.91+j39.57	1
105 (70%)	106.17+j44.66	1
120 (80%)	110.86+j53.55	1
135 (90%)	116.37+j57.85	2
142.5 (95%)	122.18+j61.01	2
149 (99,3%)	122.19+j61.02	2

(b) 50 $[\Omega]$ de resistência de falta.

Distância da falta(Km-%)	$Z_{ap}(\Omega)$	Zonas de Proteção-Fig.9(a)
15 (10%)	106.50+j15.56	2
30 (20%)	109.00+j23.58	2
45 (30%)	111.41+j30.84	2
60 (40%)	113.67+j37.36	2
75 (50%)	115.97+j43.21	2
90 (60%)	118.40+j48.74	2
105 (70%)	120.97+j54.03	2
120 (80%)	123.74+j59.38	2
135 (90%)	126.76+j64.93	2
142.5 (95%)	129.64+j70.73	2
149 (99,3%)	129.65+j70.74	2

(c) 100 $[\Omega]$ de resistência de falta.

TABELA (6) Verificação das zonas de proteção referente a característica quadrilateral da figura 9(b) utilizando a condição de operação 3.

4- RELÉS ADAPTATIVOS

4.1- INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de uma proteção melhor e mais rápida do sistema elétrico, devido a sua interligação e complexidade e com os níveis atuais de informatização, o releamento digital de linhas de transmissão tornou-se não somente viável como muito atrativo. Uma das suas principais vantagens, como citado no capítulo 1, é a possibilidade de escolha da característica, a de um relé à distância, fornecida pelo "software". Com esta filosofia, uma das características usadas é a quadrilateral que possui uma ótima precisão para sistemas pré-estabelecidos, mas não tem o mesmo desempenho quando ocorrem variações nas condições de operação do sistema, como mostrado no capítulo anterior. Para suprir essa deficiência, as pesquisas direcionam-se para o uso dos relés adaptativos. "Proteção Adaptativa é uma filosofia que permite "buscas" automáticas para ajustar várias funções de proteção de forma a manter o melhor desempenho do sistema elétrico"[1]. Isto significa que a característica de abertura muda com as alterações nas condições de operação do sistema, mantendo-se assim a eficiência da proteção.

4.2 - AJUSTE DO RELÉ ADAPTATIVO PARA UNIDADE DE PROTEÇÃO À DISTÂNCIA

Relés digitais sofisticados podem ser projetados para serem adaptados a várias situações de operação, tornando-se independentes da condição mutante do sistema elétrico.

Os relés de distância normalmente utilizam em seus algoritmos parâmetros conhecidos do sistema tais como $(h, \delta, Z_{SM}, Z_{SN})$, sendo h a relação entre as capacidades das fontes, δ ângulo de potência, Z_{SM} e Z_{SN} as impedâncias equivalentes das respectivas fontes. Porém, quando existir variações nos parâmetros para os quais o sistema foi previamente ajustado, ocorre a perda da seletividade na operação do relé. Tomando esta premissa, foi desenvolvido um sistema no qual são consideradas estas variações. Assim, um relé adaptativo foi projetado para solucionar estes problemas, seguindo os passos da atual tecnologia em proteção digital.

4.3 - EFEITO ADVERSO DA RESISTÊNCIA DE FALTA

Relés digitais de distância, como visto no capítulo anterior, utilizam amostras de tensão e corrente para calcular a impedância aparente e utilizam-se de uma característica apropriada para tomar a decisão de abertura da linha faltosa.

FIGURA (18) Modelo para uma falta fase a-terra.

Com referência a fig.(18), supondo que o relé esteja instalado no ponto M, se a falta ocorrer em F e a resistência de falta for R_F , então, a impedância da fase a medida pelo relé será:

$$Z_A = Z_{LM} + \frac{I_{AM} + I_{AN}}{I_{AM}} R_F \quad (43)$$

onde:

Z_{LM} impedância da linha no trecho M-F.

I_{AMF} corrente de linha no trecho M-F.

I_{ANF} corrente de linha no trecho N-F.

Para o cálculo da impedância descrita acima é impossível obter a corrente I_{ANF} , que flui pela resistência de falta, uma vez que só é possível utilizar as medidas disponíveis no terminal M. Os dados vindos do terminal remoto são dependentes tanto da localização e resistência de falta, como também das impedâncias das fontes dos dois terminais.

Consequentemente, nos ajustes dos relés de distância convencionais é introduzida uma margem de segurança para zona 1, cobrindo somente 80% da linha de transmissão, sendo os 20% restantes da linha incluídos na zona 2, evitando assim uma má operação. Um aumento na extensão da zona 1 de proteção aumentaria a margem de segurança do sistema. Isto só seria possível com uma comunicação de alta velocidade entre os terminais remotos da linha de transmissão ou pelo uso de relés adaptativos.

4.4 - FUNDAMENTOS DO AJUSTE ADAPTATIVO

As condições externas do sistema influem diretamente no desempenho da proteção, como explicitado nos itens anteriores. Para demonstrar esse efeito suponhamos o modelo da fig.(18). Consideremos uma falta fase a-terra ocorrida no ponto F com resistência de falta R_F . E_{AM} e E_{AN} , são as tensões em cada terminal da linha de transmissão. Chamando δ de ângulo de potência, I_{LD} é a corrente de pré falta da linha de transmissão. I_{AMF} e I_{ANF} são as correntes de falta, Z_{SM} e Z_{SN} são as impedâncias equivalentes das fontes e h é a relação entre as capacidades das fontes. Podemos definir então:

$$\begin{aligned}
 Z_{1M} &= Z_{ISM} + Z_{ILM} & Z_{0M} &= Z_{0SM} + Z_{0LM} \\
 Z_{1N} &= Z_{ISN} + Z_{ILN} & Z_{0N} &= Z_{0SN} + Z_{0LN}
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

onde "1" representa a sequência positiva e "0" representa a sequência zero.

Podemos então, utilizando-nos destes parâmetros, desenvolver uma equação como a representada abaixo [20]:

$$Z_A = Z_{1LM} + \frac{3R_F}{(Z_{\Sigma} + 3R_F)K_{\delta} + 2C_1 + C_0(1 + 3K_{0L})} \quad (45)$$

onde:

$$Z_{\Sigma} = \frac{2Z_{1M}Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} + \frac{Z_{0M}Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} \quad (46)$$

$$K_{\delta} = \frac{1 - he^{-j\delta}}{Z_{1N} + hZ_{1M}e^{-j\delta}} \quad (47)$$

e, C_1 e C_0 são fatores de distribuição de sequência positiva e zero respectivamente e K_{0L} fator de compensação de sequência zero dados por:

$$C_1 = \frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad C_0 = \frac{Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} \quad (48)$$

$$K_{0L} = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \quad (49)$$

onde: Z_{0L} e Z_{1L} impedância de sequência positiva e zero respectivamente da linha.

Caso a resistência de falta seja igual a zero, a mudança nas características de operação do sistema não influi na impedância da linha. Neste caso, Z_A é representado por Z_{1LM} , que é o valor real da impedância de sequência positiva da linha. Se a impedância de falta for diferente de

zero, a impedância medida será influenciada pela condição de operação do sistema.

Assim obtemos a seguinte expressão para a variação da impedância aparente vista no terminal M.

$$\Delta Z = \frac{3R_F}{(Z_{\Sigma} + 3R_F)K_{\delta} + 2C_1 + C_0(1 + 3K_{0L})} \quad (50)$$

Se o valor de ΔZ for capacitivo, então a reatância medida será menor que o valor real. Porém, se o valor de ΔZ for indutivo, o valor da reatância medida será maior que o valor real. Portanto, o relé poderá operar além da zona de proteção ou abaixo da mesma.

Pode ser visto na eq.(50) que a variação na impedância resultante não depende somente da localização da falta e da resistência de falta, mas também dos parâmetros da condição de operação da rede, tais como: Z_{ISM} , Z_{OSM} , Z_{ISN} , Z_{OSN} , e h. Assim, a condição ideal é o uso de relés adaptativos que conseguem alterar a área de proteção conforme ocorram variações nos parâmetros do sistema.

Apresentaremos alguns modelos de relés adaptativos os quais podem responder a estas mudanças no sistema. Resultados de simulações em computadores mostram como as condições da rede afetam a medida da impedância. Os resultados das simulações para diferentes valores de resistência de falta e localização de falta serão mostrados no capítulo 5.

4.5 - AMBIENTE ADAPTATIVO

Se as condições do sistema (h , δ , Z_{SM} , Z_{SN}) forem fixas e a resistência de falta e localização da falta variáveis, então podem-se definir 4 curvas limites obtidas através de simulações em computadores [20].

O relé digital implementado foi projetado para uma cobertura de 95% da linha de transmissão. Os valores práticos utilizados são mostrados nos gráficos que se seguem. Os limites das curvas são definidos por:

- . Curva I corresponde a faltas sólidas em diferentes localizações ao longo da linha.

- . Curva II corresponde a distâncias remotas (95% do comprimento da linha) com diferentes resistências de falta.

- . Curva III corresponde a faltas em diferentes pontos ao longo da linha com resistência de falta de 200Ω .

- . Curva IV corresponde a falta próxima ao relé com resistência de falta até 200Ω .

Estas curvas limites geram a área de proteção tida como ideal para a condição de operação em questão. Esta região é considerada como ideal, porque, na prática, é muito difícil ocorrerem casos com resistências de falta superiores a 200Ω e também porque esta região cobre quase toda a linha de transmissão.

FIGURA (19) Região de abertura ideal de uma condição de operação genérica.

Para que um relé adaptativo possa operar quando ocorram diversas variações de operação na linha, foram consideradas duas possibilidades: uma é levantar os ajustes para todos os tipos de condições em que a linha pudesse ter "off-line" e armazenar estes padrões em um banco de dados. Porém, além de não ser possível obter todos os dados que a linha poderá apresentar, o banco de dados obtido seria extremamente extenso.

Outra opção seria a atualização da condição do sistema periodicamente, aproximando o sistema atual ao que melhor o represente em um banco de dados disponível. Este banco de dados contém algumas condições de operação padrão. Esta opção visa a minimizar os cálculos "on-line", mantendo a precisão da proteção.

Foram realizadas simulações para quatro modelos com diferentes condições de operação, e seus resultados serão apresentados no capítulo 5.

Um número de segmentos de retas foi utilizado para aproximar os limites das curvas características simuladas. O número de retas é determinado pela precisão requerida e pela capacidade de processamento do microprocessador utilizado.

Cada segmento de reta divide o plano R-X em duas partes. Supondo ser positivo o lado esquerdo da reta e negativo o lado direito, podemos definir se o valor da impedância aparente localiza-se na parte interna ou externa da característica, representando uma determinada zona de proteção.

Se a região de abertura ideal for convexa, as saídas lineares que são as equações das retas utilizadas, combinadas com algumas operações "and" podem determinar a decisão de abertura durante a falta. No entanto, caso a região de abertura ideal não for convexa, simples saídas lineares e operações "and" não são suficientes para tomar a decisão, já que não se pode afirmar qual a localização da impedância. Por esta razão, são introduzidos novos segmentos de retas para dividir a região não convexa em muitas sub-regiões convexas. A combinação das operações "and" e "or" desses sinais pode agora ser usada para obter uma decisão confiável. Estas sub-regiões podem ser observadas na fig.(20).

FIGURA (20) Sub-regiões da característica adaptativa.

As topologias lógicas de decisão dos exemplos simulados serão apresentadas no capítulo 5.

Supondo que a impedância aparente vista pelo terminal M seja dada por $Z_A = R_A + jX_A$, cada saída linear L_i é determinada pela combinação da impedância aparente e seus respectivos pesos. Tomando como exemplo L_1 , o valor da saída linear é definido por:

$$L_1 = W_{11}X_A + W_{12}R_A + W_{10} \quad (51)$$

Uma condição de limite crítico ocorre quando as saídas lineares tornam-se iguais a zero, porque a impedância estaria localizada na reta em questão.

$$W_{11}X_A + W_{12}R_A + W_{10} = 0 \quad (52)$$

onde:

$$X_A = -\frac{W_{12}}{W_{11}} R_A - \frac{W_{10}}{W_{11}} \quad (53)$$

esta equação é linear e mostra que a sua inclinação é dada por $(-\frac{W_{12}}{W_{11}})$ e a intersecção com o eixo das reatâncias(X) é fornecida por $(-\frac{W_{10}}{W_{11}})$. Além disto esta inclinação divide o plano R-X em duas partes.

Para obter os respectivos pesos de cada linha, utilizam-se dois pontos conhecidos desta linha para obter um sistema com duas equações. Então, as saídas lineares de cada um destes pontos formarão este sistema. Exemplificando e supondo que os pontos (o) e (a) da fig.(20) sejam conhecidos teremos:

$$L_1 = W_{11}X_A + W_{12}R_A + W_{10} = 0 \quad (54)$$

substituindo os pontos extremos da saída linear 1 (o) e (a) na eq.(51) teremos:

$$W_{11}X_A(o) + W_{12}R_A(o) + W_{10} = 0 \quad (55)$$

$$W_{11}X_A(a) + W_{12}R_A(a) + W_{10} = 0$$

Adotamos $W_{11} = \pm$ para minimizar os cálculos “on-line” durante as faltas. Resolvendo o sistema de equações (53) obtem-se os valores dos pesos envolvidos. Os demais pesos das outras saídas lineares podem ser

calculados similarmente. Desta maneira teremos todos os pesos envolvidos no problema, que poderão ser listados em uma tabela. As tabelas dos exemplos simulados neste trabalho também serão apresentadas no capítulo 5.

As condições de operação da linha de transmissão considerada são monitoradas constantemente e, ao ultrapassarem certos limites, a região de abertura ideal é renovada e seus pesos recalculados. Depois da falta ser detectada e classificada, o relé de distância calcula a reatância e a resistência aparente. De posse destes valores e da tabela de pesos, as saídas lineares L_i são obtidas. Valores positivos e negativos dessas saídas combinadas com certas relações lógicas “and” e “or” são utilizados para alcançar a decisão de abertura. O esforço computacional requerido é pequeno, totalmente dentro da capacidade dos microprocessadores atuais. O tempo de processamento do “software” proposto leva meio ciclo para aquisição de dados, formação da janela de dados e, no máximo, um ciclo para o processamento das demais etapas do algoritmo. Este tempo de processamento foi estimado para processadores de 16 bits.

4.6 - CONSIDERAÇÕES DA TOPOLOGIA

Na prática, a obtenção de cada região de abertura ideal é simplificada por aproximações lineares das quatro curvas limites I, II, III, IV que delimitam essa região. Os seguintes pontos são pertinentes:

A curva I é obtida variando a localização da falta, utilizando resistência de falta nula. Todas as impedâncias aparentes calculadas com essas características localizam-se próximas a esta curva. Para não causar ambiguidade na região de abertura para faltas sólidas, estipula-se que as curvas limites pertençam a essa região.

A curva II é obtida variando a resistência de falta, mantendo a localização da mesma constante. Incrementando o número de segmentos de retas utilizados para substituir essa curva limite, obtém-se uma melhor precisão na atuação do relé.

A curva III é obtida variando a localização da falta, mantendo constante uma alta resistência de falta. Como em geral nessa região as impedâncias variam pouco, um pequeno número de segmentos de retas são suficientes para manter a precisão, reduzindo o esforço computacional. No entanto, devemos escolher um limite máximo de resistência de falta para determinar o limite de abertura.

A curva IV é obtida variando a resistência de falta, mantendo a falta próxima do terminal onde o relé se localiza. Esta curva fecha a região de atuação da proteção.

Devemos ressaltar que, nos casos estudados as curvas II e IV, são regiões onde ocorrem as maiores variações na impedância aparente, por essa razão, existe a necessidade de um número maior de retas para reproduzir esta área. Já nas curvas I e III estas variações são menores, necessitando um número menor de retas para representá-las.

5 - IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE UM RELÉ ADAPTATIVO

5.1 - INTRODUÇÃO

Como visto em capítulos anteriores, um algoritmo básico para a função de proteção digital à distância em linhas de transmissão, consiste de várias etapas como: detecção e classificação da falta, filtragem digital, cálculo da impedância aparente e decisão de abertura de acordo com uma determinada característica. A etapa do algoritmo, na qual se baseia a unidade adaptativa, é a parte final de decisão da abertura onde a característica adotada deve ser a que mais se adapta à condição de operação do sistema.

5.2 - ÁREA DE PROTEÇÃO ADAPTATIVA

Parte importante da unidade adaptativa é a delimitação da área a ser protegida pelo relé, realizada por quatro curvas limites mencionadas no capítulo anterior.

Sabe-se que essas curvas dependem, fundamentalmente, da condição de operação do sistema. Por essa razão, apresentaremos, neste capítulo, várias áreas de proteção, cada uma representando uma das condições de

operação do sistema simulado. Em todos os casos uma cobertura de 95% do comprimento da linha foi ajustado.

As figs.21(a), (b), (c) e (d) representam quatro condições de operação de um mesmo sistema. Este sistema é representado por uma linha de transmissão de 400 kV com 150 Km de extensão, do mesmo tipo da apresentada no capítulo 3.

Para estas condições de operação, definimos alguns parâmetros como: razão das capacidades das fontes(h), impedâncias equivalentes dos geradores dos dois terminais (Z_M, Z_N) e ângulo de potência (δ).

(a) Condição de operação 1.

(b) Condição de operação 2.

(c) Condição de operação 3.

(d) Condição de operação 4.

FIGURA (21) Diferentes condições de operação do sistema.

Assim, quatro características distintas de proteção devem ser definidas, uma para cada condição de operação do sistema. Essas áreas estão localizadas no plano R-X.

Como visto no capítulo 4, com o objetivo de transformar uma dada característica em regiões convexas, algumas retas são adicionadas. O número de retas introduzidas nestas áreas depende da precisão requerida em cada caso.

As figs.22 (a), (b), (c) e (d) representam as áreas ideais de proteção com suas subregiões, considerando o tipo de falta fase a-terra, para as quatro condições de operação estudadas.

FIGURA 22(a) Característica de proteção primária da condição de operação 1.

FIGURA 22(b) Característica de proteção primária da condição de operação 2.

FIGURA 22(c) Característica de proteção primária da condição de operação 3.

FIGURA 22(d) Característica de proteção primária da condição de operação 4.

5.3 - VARIAÇÕES DA IMPEDÂNCIA APARENTE COM PARÂMETROS DE FALTA

As figs.(23), (24) e (25) representam as variações da medida da impedância aparente com a resistência de falta, para diferentes localizações da falta na linha de transmissão. A condição de operação utilizada nestes testes foi a da fig.21 (a).

Os resultados mostram que o valor da reatância aparente diminui com o aumento da resistência de falta até um certo valor e então volta a crescer

fig.(24). Já o valor da resistência aparente é diretamente proporcional ao valor da resistência de falta, como era de se esperar, mas tende a um valor limite no qual a resistência de falta não mais a influencia fig.(23).

A fig.(25) indica o comportamento da impedância aparente quando se varia a localização de incidência da falta ao longo da linha de transmissão, variando a resistência de falta de 0 a 200Ω .

FIGURA (23) Variação da resistência aparente em função da resistência de falta para diferentes localizações.

FIGURA (24) Variação da reatância aparente em função da resistência de falta para diferentes localizações.

FIGURA (25) Variação da impedância aparente para diferentes localizações com variação da resistências de faltas de 0 a 200(Ω).

A fig.(25) também mostra que a impedância aparente possui um comportamento parecido para as várias localizações da falta quando utilizam-

se várias resistências de falta, crescendo seu valor conforme a falta se afasta do terminal onde se encontra o relé.

5.4 - CÁLCULO DOS PESOS ENVOLVIDOS

Como mencionado no capítulo 4, os pesos são constantes obtidas através da solução de um sistema de equações de retas, cujos pontos extremos são conhecidos. Os pesos que possuem índices W_{i1} foram adotados iguais a ± 1 para minimizar os cálculos "on-line" durante a falta. Já os pesos com índices W_{i2} indicam a inclinação da reta e os de índices W_{i0} fornecem o ponto em que as retas cortam o eixo das reatâncias.

O objetivo destes pesos é fornecer as constantes para a obtenção de todas as equações das retas de forma simplificada. Estas retas ou saídas lineares irão dividir o plano R-X em duas partes, uma positiva e outra negativa, o que proporcionará a descoberta da localização da impedância e consequentemente a decisão de abertura.

Serão apresentadas as tabelas dos pesos 7(a), (b), (c) e (d) que representam as condições de operação das figs.21(a), (b), (c) e (d), respectivamente. O número de elementos dessas tabelas varia de acordo com o número de retas utilizadas na divisão das áreas de proteção. O índice i dos pesos corresponde a este número.

i	W_{i1}	W_{i2}	W_{i0}
1	1	-1.4292	18.1837
2	-1	-0.3689	84.3807
3	1	-0.5496	1.9453
4	-1	0.1127	39.1213
5	1	-0.4768	0.6022
6	-1	-0.8596	145.1785
7	1	-0.9514	52.3658
8	1	-11.4785	1434.4759
9	-1	0.2457	3.6646
10	1	-1.0371	97.6643
11	-1	-0.0586	9.2823
12	-1	-0.0248	5.9857
13	-1	-0.0781	9.6424

TABELA 7(a) Pesos das retas da condição de operação 1.

i	W_{i1}	W_{i2}	W_{i0}
1	1	-1.3484	8.6663
2	-1	-0.3896	85.3067
3	1	-0.6204	1.4229
4	-1	-0.1373	63.6372
5	1	-0.4984	0.2090
6	-1	0.3396	15.7383
7	-1	-1.9064	164.8783
8	1	-1.2183	85.5553
9	-1	0.2428	2.3341
10	1	-7.3339	896.1790
11	1	-1.3019	131.8636
12	-1	0.0961	3.8188
13	-1	0.0695	5.4736
14	1	-0.7397	68.2699
15	-1	-0.2985	28.3779

TABELA 7(b) Pesos das retas da condição de operação 2.

i	W_{i1}	W_{i2}	W_{i0}
1	1	-1.8121	44.2477
2	-1	0.0131	80.1072
3	1	-0.7060	3.6220
4	-1	0.5047	20.7059
5	-1	-0.6039	182.9079
6	1	-1.2539	88.9021
7	-1	-1.5404	352.5107
8	1	-5.9130	1043.2623
9	-1	0.3932	1027.4272
10	-1	-5.2672	2.3245
11	1	-1.8306	257.9917
12	1	-0.8375	101.0057
13	-1	0.0100	6.3676
14	1	-0.2797	28.6252
15	-1	-0.0399	10.5588
16	-1	-0.2121	21.2513
17	-1	0.0781	0.6557
18	-1	-0.1307	2.2850

TABELA 7(c) Pesos das retas da condição de operação 3.

i	W_{i1}	W_{i2}	W_{i0}
1	1	-1.6641	11.5871
2	-1	0.0533	77.1808
3	1	-0.6463	1.3079
4	1	-0.8701	30.9245
5	-1	3.1084	360.2422
6	1	-7.0587	994.8709
7	1	-0.3644	8.9003
8	-1	-5.7939	787.5244
9	-1	0.1274	3.9333
10	1	-1.6789	235.4988
11	-1	0.1280	3.8858
12	-1	-0.2693	33.1942
13	1	-0.7591	93.5327

TABELA 7(d) Pesos das retas da condição de operação 4.

5.5 - TOPOLOGIA LÓGICA

De posse de todos os pesos, são criadas as saídas lineares (L_i), que correspondem às equações das retas pertencentes a área de proteção em questão. Estas saídas combinadas corretamente com portas lógicas "and" e "or" resultam na decisão de abertura do relé.

Adotando o semi-plano esquerdo de cada reta como sendo positivo, utiliza-se a operação "and" caso o valor da impedância aparente se localize deste lado. No entanto, se o valor da impedância aparente estiver no semi-plano direito da reta utilizam-se as operações "not" e "and".

A operação "or" é utilizada para cobrir todas as subáreas convexas que formam a zona de proteção. Assim, caso o valor da impedância aparente calculada, localizar-se em alguma subárea, o programa enviará a mensagem de abertura ao relé.

Tomando como exemplo a fig.22(a) na saída linear (L_1), a área de interesse é o semi-plano localizado à direita que adotamos negativo, então utilizam-se as operações "not" e "and". Para a saída linear (L_2), a região de interesse localiza-se abaixo, sendo este semi-plano adotado positivo, logo utiliza-se a operação "and". A saída linear (L_3) fecha a primeira sub-região convexa e, para a sua análise, a região de interesse está no semi-plano esquerdo adotado positivo, por isso utiliza-se a operação "and". As demais sub-

regiões que formam a característica, seguem esta técnica. A operação lógica “or” cobre todas as sub-regiões para a tomada de decisão.

As figs.26(a), (b), (c) e (d) mostram as topologias lógicas das condições de operação das figs. 21(a), (b), (c) e (d) respectivamente.

FIGURA 26(a) Topologia lógica da condição de operação 1.

FIGURA 26(b) Topologia lógica da condição de operação 2.

FIGURA 26 (c) Topologia lógica da condição de operação 3.

FIGURA 26(d) Topologia lógica da condição de operação 4.

Atribuindo corretamente as operações lógicas relacionadas com todas as saídas lineares da área de proteção, obtém-se uma decisão confiável.

5.6 - TESTES DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO

O algoritmo do relé adaptativo foi extensivamente testado para as quatro condições de operação do sistema estudadas neste trabalho e em todas elas os resultados encontrados foram altamente satisfatórios. A taxa amostral utilizada na maioria dos casos testados é de 2Khz e o ângulo de incidência da falta de 90° .

As tabelas que serão apresentadas contêm as informações necessárias para uma análise do funcionamento do algoritmo. Elas foram montadas variando-se a resistência de falta para as várias distâncias em relação ao terminal onde se encontra o relé.

Nestas tabelas encontra-se o valor da impedância aparente calculada pelo "software", para as várias resistências de faltas utilizadas em diferentes localizações da linha. É também informado se a falta é interna ou externa à região ideal de abertura considerada.

As tabelas 8 (a) à (c) mostram que o relé adaptativo funciona perfeitamente para várias localizações dentro dos 95% da linha que o relé cobre. Já as tabelas 8 (d) e (e) exemplificam faltas ocorridas perto do terminal remoto e externo a ele respectivamente. Nestes casos, o relé adaptativo também teve um funcionamento adequado. As tabelas 8 (f) e (g) mostram faltas dentro dos 95% da linha, com mudanças no ângulo de incidência e diminuição da taxa amostral para 1kHz, respectivamente. Para estes casos, o relé também se mostrou eficiente. Já as tabelas 8 (h) e (i), simulam faltas perto do terminal remoto com as mesmas variações das tabelas 8 (f) e (g) e, mesmo nestes casos, o relé adaptativo mostrou-se eficiente. Todas as tabelas citadas até aqui referem-se à condição de operação 1 do sistema estudado.

As tabelas 9 (a) à (i), 10 (a) à (i) e 11 (a) à (i) são similares às tabelas anteriormente comentadas para as condições de operação 2, 3, e 4, respectivamente.

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	25.90+j17.87	interna
10	44.10+j10.76	interna
30	66.33+j3.95	interna
50	82.80+j5.20	interna
70	95.45+j9.60	interna
90	104.94+j15.02	interna
110	112.00+j20.51	interna
130	117.28+j25.68	interna
150	121.27+j30.38	interna
170	124.32+j34.60	interna
190	126.68+j38.36	interna

(a) Distância 15Km(10%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	47.10+j45.64	interna
10	64.54+j39.78	interna
30	85.02+j33.66	interna
50	97.78+j33.97	interna
70	106.71+j36.89	interna
90	113.11+j40.56	interna
110	117.76+j44.24	interna
130	121.21+j47.65	interna
150	123.82+j50.71	interna
170	125.81+j53.43	interna
190	127.37+j55.83	interna

(b) Distância 75Km(50%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	57.04+j63.34	interna
10	80.75+j53.34	interna
30	102.78+j49.79	interna
50	113.75+j53.54	interna
70	120.01+j57.87	interna
90	123.80+j61.57	interna
110	126.36+j64.57	interna
130	128.09+j66.98	interna
150	129.34+j68.95	interna
170	130.28+j70.58	interna
190	131.00+j71.94	interna

(c) Distância 142,5Km(95%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	55.15+j63.90	externa
10	82.30+j52.98	externa
30	104.98+j50.67	externa
50	115.68+j55.27	externa
70	121.53+j59.86	externa
90	125.02+j63.56	externa
110	127.27+j66.46	externa
130	128.82+j68.75	externa
150	129.93+j70.59	externa
170	130.76+j72.10	externa
190	131.40+j73.35	externa

(d) Distância 149Km(99,3%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	54.97+j63.99	externa
10	82.56+j52.89	externa
30	105.36+j50.81	externa
50	116.02+j55.56	externa
70	121.79+j60.19	externa
90	125.23+j63.89	externa
110	127.44+j66.78	externa
130	128.95+j69.05	externa
150	130.04+j70.87	externa
170	130.85+j72.36	externa
190	131.47+j73.59	externa

(e) Externa ao barramento N com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	50.62+j50.61	interna
10	58.98+j20.19	interna
30	80.54+j25.91	interna
50	95.33+j32.16	interna
70	105.18+j38.16	interna
90	111.78+j43.48	interna
110	116.29+j48.03	interna
130	119.45+j51.88	interna
150	121.73+j55.12	interna
170	123.41+j57.87	interna
190	124.67+j60.22	interna

(f) Distância 90Km(60%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência de 0° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	43.25+j57.67	interna
10	60.77+j56.33	interna
30	82.97+j53.05	interna
50	95.74+j52.71	interna
70	103.91+j54.18	interna
90	109.48+j56.31	interna
110	113.44+j58.54	interna
130	116.35+j60.64	interna
150	118.54+j62.56	interna
170	120.24+j64.26	interna
190	121.58+j65.77	interna

(g) Distância 90Km(60%) de M com $TA=1Kz$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	47.13+j71.54	externa
10	75.32+j66.62	externa
30	99.62+j63.03	externa
50	110.11+j65.06	externa
70	115.73+j67.81	externa
90	119.12+j70.23	externa
110	121.35+j72.20	externa
130	122.90+j73.80	externa
150	124.04+j75.11	externa
170	124.91+j76.18	externa
190	125.58+j77.08	externa

(h) Distância 149Km(99,3%) de M com $TA=1Kz$ e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	50.06+j28.38	externa
10	72.58+j34.37	externa
30	99.21+j45.27	externa
50	111.56+j53.84	externa
70	117.79+j60.02	externa
90	121.28+j64.46	externa
110	123.43+j67.75	externa
130	124.84+j70.25	externa
150	125.81+j72.21	externa
170	126.52+j73.78	externa
190	127.05+j75.07	externa

(i) Distância de 149Km(99,3%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência 0° .

TABELA (8) Referentes a condição de operação 1.

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	18.46+j15.46	interna
10	37.89+j7.73	interna
30	60.74+j0.71	interna
50	78.56+j2.24	interna
70	92.25+j6.94	interna
90	102.45+j12.65	interna
110	109.99+j18.41	interna
130	115.62+j23.81	interna
150	119.85+j28.71	interna
170	123.08+j33.08	interna
190	125.58+j36.96	interna

a) Distância 15Km(10%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	43.05+j46.02	interna
10	62.75+j39.98	interna
30	84.54+j33.36	interna
50	97.82+j33.98	interna
70	106.98+j37.29	interna
90	113.46+j41.25	interna
110	118.11+j45.11	interna
130	121.53+j48.63	interna
150	124.08+j51.75	interna
170	126.03+j54.49	interna
190	127.54+j56.89	interna

(b) Distância 75Km(50%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	53.71+j64.24	interna
10	85.87+j51.85	interna
30	109.38+j51.91	interna
50	119.35+j57.84	interna
70	124.39+j62.76	interna
90	127.27+j66.43	interna
110	129.09+j69.19	interna
130	130.32+j71.31	interna
150	131.19+j72.99	interna
170	131.84+j74.34	interna
190	132.34+j75.45	interna

(c) Distância 142,5Km(95%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	51.72+j64.32	externa
10	89.12+j50.69	externa
30	113.15+j54.11	externa
50	122.18+j61.01	externa
70	126.45+j65.95	externa
90	128.83+j69.39	externa
110	130.30+j71.89	externa
130	131.29+j73.77	externa
150	131.99+j75.23	externa
170	132.52+j76.39	externa
190	132.92+j77.34	externa

(d) Distância 149Km(99,3%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	51.27+j64.29	externa
10	89.73+j50.45	externa
30	113.81+j54.52	externa
50	122.65+j61.56	externa
70	126.78+j66.48	externa
90	129.07+j69.88	externa
110	130.49+j72.33	externa
130	131.12+j74.16	externa
150	132.12+j75.59	externa
170	132.62+j76.72	externa
190	133.01+j77.64	externa

(e) Externa ao barramento N com TA=2Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	43.25+j17.63	interna
10	57.41+j20.32	interna
30	80.29+j26.40	interna
50	95.67+j33.04	interna
70	105.63+j39.32	interna
90	112.15+j44.81	interna
110	116.54+j49.42	interna
130	119.59+j53.26	interna
150	121.77+j56.47	interna
170	123.37+j59.18	interna
190	124.58+j61.46	interna

(f) Distância 90Km(60%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 0° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	39.95+j57.06	interna
10	59.73+j56.45	interna
30	80.70+j53.07	interna
50	96.80+j52.96	interna
70	104.94+j54.73	interna
90	110.38+j57.05	interna
110	114.19+j59.39	interna
130	116.97+j61.53	interna
150	119.05+j63.45	interna
170	120.65+j65.13	interna
190	121.91+j66.61	interna

(g) Distância 90Km(60%) de M com TA=1Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	46.33+j69.94	externa
10	83.08+j64.65	externa
30	107.79+j64.38	externa
50	116.41+j68.46	externa
70	120.55+j71.71	externa
90	122.90+j74.06	externa
110	124.40+j75.81	externa
130	125.43+j77.14	externa
150	126.17+j78.18	externa
170	126.74+j79.01	externa
190	127.17+j79.70	externa

(h) Distância 149Km(99,3%) de M com TA=1Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	$Z_{ap}(\Omega)$	Caract. Adaptativa
0	47.91+j27.65	externa
10	79.57+j36.91	externa
30	108.28+j51.91	externa
50	118.10+j61.30	externa
70	122.35+j67.05	externa
90	124.58+j70.82	externa
110	125.89+j73.45	externa
130	126.74+j75.38	externa
150	127.32+j76.86	externa
170	127.74+j78.02	externa
190	128.06+j78.95	externa

(l) Distância de 149Km(99,3%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 0° .

TABELA (9) Referentes a condição de operação 2.

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	26.74+j21.12	interna
10	49.84+j14.93	interna
30	80.96+j7.01	interna
50	105.97+j9.30	interna
70	126.65+j17.17	interna
90	142.85+j27.72	interna
110	155.06+j39.15	interna
130	164.01+j50.44	interna
150	170.43+j61.06	interna
170	174.96+j70.79	interna
190	178.09+j79.56	interna

(a) Distância 15Km(10%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	48.92+j57.13	interna
10	74.12+j55.34	interna
30	107.68+j52.92	interna
50	129.44+j57.82	interna
70	144.53+j66.68	interna
90	154.89+j76.71	interna
110	161.88+j86.49	interna
130	166.50+j95.44	interna
150	169.49+j103.39	interna
170	171.38+j110.36	interna
190	172.52+j116.45	interna

(b) Distância 75Km(50%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	58.13+j80.87	interna
10	97.39+j79.94	interna
30	136.06+j87.29	interna
50	153.27+j102.08	interna
70	161.15+j115.58	interna
90	164.67+j126.26	interna
110	166.14+j134.49	interna
130	166.60+j140.89	interna
150	166.57+j145.94	interna
170	166.29+j150.00	interna
190	165.90+j153.32	interna

(c) Distância 142,5Km(95%) de M com $TA=2Kz$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	57.32+j81.05	externa
10	100.59+j80.15	externa
30	140.04+j90.34	externa
50	155.98+j107.98	externa
70	162.56+j120.45	externa
90	165.17+j131.45	externa
110	166.05+j139.28	externa
130	166.15+j145.24	externa
150	165.89+j149.90	externa
170	165.48+j153.60	externa
190	165.01+j156.61	externa

(d) Distância 149Km(99,3%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	57.13+j81.06	externa
10	101.14+j80.13	externa
30	140.71+j90.86	externa
50	156.43+j107.89	externa
70	162.79+j121.89	externa
90	165.24+j132.32	externa
110	166.02+j140.08	externa
130	166.07+j145.97	externa
150	165.79+j150.55	externa
170	165.36+j154.19	externa
190	164.87+j157.14	externa

(e) Externa ao barramento N com TA=2Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	54.00+j19.11	interna
10	72.08+j23.77	interna
30	103.74+j36.02	interna
50	127.00+j50.71	interna
70	142.48+j65.54	interna
90	152.23+j79.03	interna
110	158.16+j90.64	interna
130	161.65+j100.40	interna
150	163.62+j108.55	interna
170	164.64+j115.35	interna
190	165.05+j121.06	interna

(f) Distância 90Km(60%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 0° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	41.63+j69.80	interna
10	63.94+j75.43	interna
30	97.07+j81.70	interna
50	117.75+j88.26	interna
70	130.83+j95.75	interna
90	139.27+j103.21	interna
110	144.79+j110.08	interna
130	148.45+j116.15	interna
150	150.91+j121.44	interna
170	152.56+j126.00	interna
190	153.67+j129.97	interna

(g) Distância 90Km(60%) de M com TA=1Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	45.43+j86.09	externa
10	83.32+j94.95	externa
30	122.17+j106.34	externa
50	137.93+j118.29	externa
70	144.97+j128.15	externa
90	148.35+j135.65	externa
110	150.05+j141.34	externa
130	150.93+j145.74	externa
150	151.37+j149.20	externa
170	151.56+j151.99	externa
190	151.63+j154.27	externa

Distância 149Km(99,3%)de M com TA=1Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	62.54+j31.09	externa
10	94.09+j44.57	externa
30	133.77+j73.98	externa
50	150.25+j98.00	externa
70	156.36+j114.81	externa
90	158.37+j126.42	externa
110	158.75+j134.65	externa
130	158.46+j140.70	externa
150	157.91+j145.29	externa
170	157.28+j148.87	externa
190	156.65+j151.73	externa

(l) Distância de 149Km(99,3) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 0° .

TABELAS (10) Referente a condição de operação 3.

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	18.79+j17.11	interna
10	42.19+j9.67	interna
30	72.51+j0.74	interna
50	98.85+j2.65	interna
70	121.11+j10.33	interna
90	138.74+j20.96	interna
110	152.10+j32.66	interna
130	161.94+j44.34	interna
150	169.05+j55.38	interna
170	174.09+j65.53	interna
190	177.60+j74.71	interna

(a) Distância 15Km(10%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	44.10+j55.60	interna
10	71.79+j53.76	interna
30	107.16+j50.46	interna
50	129.83+j55.91	interna
70	145.43+j65.68	interna
90	155.96+j76.52	interna
110	162.91+j86.91	interna
130	167.39+j96.27	interna
150	170.22+j104.50	interna
170	171.95+j111.64	interna
190	172.93+j117.83	interna

(b) Distância 75Km(50%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	55.11+j80.12	interna
10	106.55+j78.92	interna
30	147.14+j94.21	interna
50	160.76+j113.88	interna
70	165.25+j128.35	interna
90	166.48+j138.48	interna
110	166.49+j145.75	interna
130	166.06+j151.15	interna
150	165.46+j155.27	interna
170	164.83+j158.53	interna
190	164.22+j161.15	interna

(c) Distância 142,5Km(95%) de M com $TA=2K\Omega$ e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	53.16+j79.27	externa
10	113.13+j78.83	externa
30	153.04+j101.48	externa
50	163.43+j122.97	externa
70	165.88+j136.91	externa
90	166.04+j146.08	externa
110	165.51+j152.43	externa
130	164.79+j157.05	externa
150	164.07+j160.53	externa
170	163.39+j163.25	externa
190	162.77+j165.43	externa

(d) Distância 149Km(99,3%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	52.71+j79.01	externa
10	114.36+j78.76	externa
30	154.00+j102.82	externa
50	163.79+j124.53	externa
70	165.92+j138.32	externa
90	165.99+j147.30	externa
110	165.32+j153.49	externa
130	164.57+j157.98	externa
150	163.83+j161.36	externa
170	163.14+j163.99	externa
190	162.53+j166.09	externa

(e) Externa ao barramento N com TA=2Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	50.53+j18.53	interna
10	69.47+j23.21	interna
30	103.26+j35.82	interna
50	127.76+j51.35	interna
70	143.56+j67.02	interna
90	153.14+j81.05	interna
110	158.74+j92.94	interna
130	161.91+j102.78	interna
150	163.61+j110.91	interna
170	164.40+j117.63	interna
190	164.65+j123.23	interna

(f) Distância 90Km(60%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência de 0° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	38.24+j67.36	interna
10	62.96+j74.29	interna
30	98.84+j80.85	interna
50	120.18+j87.95	interna
70	133.18+j96.12	interna
90	141.30+j104.10	interna
110	146.46+j111.27	interna
130	149.79+j117.50	interna
150	151.96+j122.85	interna
170	153.39+j127.42	interna
190	154.32+j131.34	interna

(g) Distância 90Km(60%) de M com TA=1Kz e ângulo de incidência de 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	41.98+j83.09	externa
10	96.04+j96.05	externa
30	135.40+j114.17	externa
50	146.30+j129.24	externa
70	149.93+j139.17	externa
90	151.25+j145.84	externa
110	151.71+j150.53	externa
130	151.80+j153.98	externa
150	151.74+j156.62	externa
170	151.62+j158.70	externa
190	151.47+j160.38	externa

(h) Distância 149Km(99.3%) de M com TA=1Kz e ângulo de incidência 90° .

Resistência de falta(Ω)	Z_{ap} (Ω)	Caract. Adaptativa
0	59.09+j29.51	externa
10	104.27+j50.01	externa
30	146.48+j91.24	externa
50	156.53+j117.11	externa
70	158.30+j132.08	externa
90	157.97+j141.35	externa
110	157.13+j147.54	externa
130	156.21+j151.92	externa
150	155.35+j155.16	externa
170	154.59+j157.66	externa
190	153.91+j159.63	externa

(l) Distância de 149Km(99,3%) de M com TA=2Kz e ângulo de incidência 0°

TABELAS (11) Referente a condição de operação 4.

5.7 - CONCLUSÃO

Conclui-se, com os resultados obtidos, que a unidade adaptativa apresenta uma melhora significativa na atuação da proteção, devido principalmente à maleabilidade para obter a característica de proteção.

Pode-se concluir também que, quando a condição de operação do sistema muda significativamente, a sua característica ideal também muda, sendo que esta característica será fornecida pelo "software" do relé adaptativo. Uma solução apresentada para este fim é a formação de um banco de dados contendo algumas condições de operação do sistema mais usuais. Assim, realizando uma checagem periódica da condição do sistema, pode-se utilizar a característica mais próxima disponível no banco de dados para representar a característica requerida.

Na grande maioria dos casos, o relé adaptativo mostrou ser eficiente e confiável. Em poucos casos, houve indicação errada do "software" adaptativo devido ao valor da impedância aparente situar-se nas proximidades das curvas. Esse problema pode ser sanado com o aumento do número de retas introduzidas na zona de proteção, ampliando consequentemente sua precisão, como explicitado no capítulo anterior.

Com os processadores atuais e com a crescente informatização do setor elétrico brasileiro a filosofia adaptativa torna-se um campo extremamente atraente.

6 - CONCLUSÕES

O uso da proteção digital introduz inúmeras vantagens em relação à proteção convencional, como mencionado ao longo desta tese. Uma das principais vantagens relacionadas a esta substituição é a flexibilidade inerente a tecnologia digital e a possibilidade de se imprimir características adaptativas ao relé.

No que diz respeito a proteção digital das linhas de transmissão, foi inicialmente implementado um relé de distância. O mesmo se utiliza dos componentes fundamentais de tensão e corrente obtidos através da Transformada Discreta de Fourier de meio ciclo, para o cálculo da impedância aparente vista pelo relé. O relé digital pode fornecer, através do seu "software", qualquer característica que se deseje para delinear a zona de proteção primária do mesmo. Uma característica do tipo quadrilateral foi implementada inicialmente para proteção da linha de transmissão em questão. Esta característica mostrou ótimo desempenho para uma condição de operação fixa do sistema, mas tem seu desempenho comprometido quando a condição de operação sofre alterações.

O relé adaptativo é uma solução apresentada para estes casos, por possuir a possibilidade de alterar a sua característica de proteção, buscando a mais adequada para uma dada condição de operação e possibilitando assim o aumento da zona primária de proteção do relé.

O relé adaptativo mostrou ser muito eficiente em todos os casos estudados, como comprovado pelos resultados apresentados no Capítulo 5.

A filosofia do relé adaptativo envolve conceitos simples e de fácil programação. Dispondo de um banco de dados que englobe todas as condições de operação usuais de um dado sistema e com uma verificação periódica do mesmo, pode-se optar por aquela que melhor o represente, assim a proteção adaptativa será altamente eficiente se comparada a convencional, aumentando a qualidade do fornecimento de energia.

Conclui-se, finalmente, que a proteção digital, utilizando conceitos adaptativos, está se tornando um campo muito promissor pelas suas vantagens inerentes e deverá ser implementada no sistema elétrico brasileiro em um futuro bem próximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Phadke, G. A.; Thorp, S. J. *"Computer Relaying for Power Systems"*

Copyright .@. 1988, by Research Studies Press LTD and Jonh Wiley
& Sons Inc. Chapter 1, Chapter 3 and Chapter 4.

- [2] Aggarwal, R. *"Digital Technology"*

University the Bath, England, s.n.t., pg 86. Chapter 1.

- [3] Mann, B. J. *"Real Time Computer Calculation of the Impedance of a
Faulted Single Line."*

Elec. Eng. Trans. Inst. Engineers, EE4 : 26-8, Mar. 1969.

NO BRASIL
USP 2652

- [4] Mantey, P. E. *"Computer Requeriments for Event Recording Digital
Relaying e Substation Monitoring."*

In: Sixth IEEE Pica Conference Record 6, 1969 - Proceodings p. 262-
72.

- OK [5] Mann, B. J.; Morrison, I. F. *"Digital Calculation of Impedance for
Transmission Line Protection."*

IEEE Transactions on Power Apparatus e Systems, Pas 90 (1), 270-
9, Jan./Feb. 1971.

- [6] MacInnes, A. D.; Morrison, I. F. *"Real Time Calculation of Resistance
and Reactance for Transmission Line Protection by Digital Computer."*

Trans. Inst. Eng. Aust. EE 7 (1), 16-23, Jan. 1971.

USP 2645
NO BRASIL

- [7] Gallen, T. F.; Chen, M. N.; Breingan, W. D. *"A New Digital
Technique for Transmission Line Protection"*.

In: IEEE Record 77 CH 1186-4 Mar. 1977 - Proceedings 31 p.

NO BRASIL
USP 2631

- OK [8] Ranjbar, A. M.; Cory, B. J. "An Improved Method of the Digital Protection of High Voltage Transmission Lines."

USP 2632

IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Pas - 94(2), 544-50 Mar./ Apr. 1975.

- OK [9] Sanderson, J. V. H.; Wright, A. "Protective Scheme for Series Compensated Transmission Lines."

Proc. Inst. Electr. Eng., 121(11), 1370-84, Nov. 1974.

- [10] Ramamoorthy, M. "Application of Digital Computers to Power Systems Protection."

DIFÍCIL

USP 2626

Journal of Inst. Eng., Índia 52(10), 235-8, June 1972.

- OK [11] Eichhorn, K. F.; Ladniak, L.; Lobos, T. "Algorithms for Digital Distance Protection With Improved Transient Behaviour."

IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.

- OK [12] Phadke, A. G.; Hlibka, T.; Ibrahim, M. "A Digital Computer System for EHV Substation: Analysis and Field Tests."

USP 2627

IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Pas 95(1), 291-301, Jan./Feb. 1976.

- PRO
REC'D [13] Gangadharan, G.; Anbalagan, P. "Microprocessor Based Three Step Quadrilateral Distance Relay for the Protection of EHV/UHV Transmission Lines."

Transactions on Power Delivery, vol. 7 n° 1, January 1992.

[14] Horton, J. M. *"The Use of Walsh Function for High Speed Digital Relaying"*

In: IEEE PES Summer Power Meeting, San Francisco, July 1975
Proceedings p. 1-9.

[15] Luckett, R. G.; Munday, P. J.; Murray, B. E. *"A Substation Based Computer for Control and Protection."*

NO BRASIL
USP 2629

IEE Conference Publication, London, 125, 291-9, Mar. 1975.

[16] Sachdev, M. S.; Baribeau, M. A. *"A New Algorithm for Digital Impedance Relays."*

TEM USP

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas 98
no 6 Nov./Dec. 1979.

[17] Girgis, A. A. *"Application of Kalman Filtering in Relaying of Power Systems."*

REGUEI PARCELO RENATA

Iowa State University, 1981 209p. Tese Doctor of Philosophy ISU.

[18] Coury, D. V. *"Um Estimador Ótimo Aplicado à Proteção Digital dos Sistemas de Potência."*

Universidade de São Paulo, 1987 138p. Tese Mestre em
Engenharia Elétrica.

[19] Mansour, M. M.; Swift, G. W. *"A Microprocessor Based Relaying Travelling Wave Theory the Achievement."*

IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1 January
1986.

[20] Xia, Y. Q.; Li, K. K.; David, A. K. *"Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Distance Protection."*

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9 , January 1994.

- [21] Zhizhe, Z.; Deshu, C. *"An Adaptive Approach in Digital Distance Protection."*

IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 6, n.1, January 1991.

- [22] Jampala, A. K.; Venkata, S. S. *"Adaptive Trasmission Protection Concepts and Computational Issues."*

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, n.1, January 1989.

- [23] Rockefeller, G. D.; Wagner, C. L.; Linders, L. R. *"Adaptive Transmission Relaying Concepts for Improved Performace."*

IEEE Ttransactions on Power Delivery, Vol. 3, n.4, October 1988.

- [24] Aggarwal, R. K.; Jonhs, A. T.; Tripp, D. S. *"The Development and Application of Directional Comparison por Series Compensated Transmission Systems."*

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. pwrđ 2, n.4, October 1987.

- [25] Phadhe, A. G.; Ibrahim, M.; Hlibka, T. *"Fundamental Basic for Distance Relaying with Symmetrical Components."*

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Pas. 96, 635-45 1977.

- [26] Hope, G. S.; Malik, O. P.; Dash, P. K. *"A New Algorithm for Impedance Protection of Transmission Line."*

In: IEEE Pes Summer Power Meeting, Vancouver British, Columbia, Canadá July 1979.

- [27].Coury, D. V. *"A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders"*

Tese de Doutorado, Universidade de Bath, 1992.

- [28] Jonh, A. T.; Aggarwall, R. K. *"Digital Simulation of Faulted EHV Transmission Lines With Particular Reference to Very-High-Speed Protection"*

Proc. IEE, Vol 123, n° 4, Abril 1976, pp 353-359.