



VII Seminário Técnico de Proteção e Controle 22 a 27 de Junho de 2003 Rio de Janeiro - RJ

Artigo 37554002:

DESENVOLVIMENTO DE UM RELÉ DIGITAL DE DISTÂNCIA

Eduardo César Senger.¹
(senger@pea.usp.br)

Francisco A. Reis Filho.¹
(mother@pea.usp.br)

Giovanni Manassero Jr.¹
(giomanjr@pea.usp.br)

Renato M. Nakagomi¹
(rmikio@pea.usp.br)

Harald Wehrend²
(h.wehrend@newage-avkseg.com)

Biao Zhang²
(b.zhang@newage-avkseg.com)

Stefan Bauschke²
(s.bauschke@newage-avkseg.com)

(1) EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP- Brasil

(2) NEWAGE AVK SEG Power Protection – Kempen - Alemanha

1. RESUMO

O trabalho apresenta os principais aspectos do desenvolvimento de um relé digital de distância cujo processo de medição da impedância baseia-se no método da equação diferencial. Essa solução possibilita ao equipamento apresentar um tempo de detecção da falta inferior a $\frac{1}{2}$ ciclo. Inicialmente apresenta-se o algoritmo para classificação da falta, cuja característica inovadora reside no fato de utilizar uma pequena janela de dados ($\frac{1}{8}$ de ciclo), o que permite ao algoritmo alcançar a necessária velocidade de resposta para operar em conjunto com o método da equação diferencial. O trabalho discute ainda a forma como devem ser tratados os sinais de tensão e corrente nos seis elementos de medição de impedância e os resultados do estudo realizado para escolher o algoritmo de medição entre as diversas variantes do método da equação diferencial.

Palavras Chave: proteção de linhas, relés de distância; método da equação diferencial.

2. INTRODUÇÃO

Com a introdução da eletrônica digital, os relés de proteção tornaram-se equipamentos bastante complexos e sofisticados que englobam diversas funções em uma única unidade (funções de proteção; registro de eventos; oscilografia; localização da falta, etc). Neste artigo descreve-se o desenvolvimento de um relé de distância, realizado no âmbito de um contrato de pesquisa entre a Escola Politécnica da USP e a empresa NEWAGE AVK-SEG. Os principais módulos de software existentes nesse equipamento são:

Classificação da falta: utilizado para selecionar quais elementos de medição serão utilizados no cálculo da

impedância durante cada particular condição operativa da rede.

Módulo de Cálculo da Impedância: responsável por calcular a impedância vista pelo relé utilizando o método da equação diferencial.

Módulo ANSI-21: recebe as impedâncias calculadas no módulo anterior e testa a condição de trip para as diversas zonas características de proteção. O relé utiliza, tanto para a proteção de faltas entre fases (função 21) quanto para a proteção de faltas fase-terra (função 21N), 4 zonas com característica MHO ou QUADRILATERAL, configuráveis pelo usuário.

Módulo Power Swing: monitora a ocorrência de oscilações eletromecânicas na rede de potência e implementa as funções 68 (power swing blocking) e 78 (power swing tripping).

Módulo Lógica de Controle Programável: permite ao usuário gerar/editar (via aplicativo gráfico) todos os esquemas lógicos necessários (por ex. teleproteção).

Outras Funções ANSI: implementa todas as outras funções ANSI normalmente disponibilizadas em um relé digital de Distância (p. ex. 67N; 27; 59; 67/46 etc.)

Facilidades de Análise Pós-Falta: integra os módulos de software para análise do evento tais como: oscilografia; seqüência de eventos e localização da falta.

Facilidades de Medição: rotinas de software responsáveis pela medição das principais grandezas elétricas de interesse (tensões fase/linha; correntes; potências ativa e reativa; frequência, etc.)

Facilidades de Monitoramento: rotinas de auto-teste; supervisão dos transformadores de instrumentação; monitoramento de disjuntor ($\sum I^x$); monitoramento do circuito de trip; etc.

Neste trabalho será dado enfoque aos algoritmos utilizados nos módulos que constituem o núcleo do processo de medição de impedância, que são os módulos de classificação da falta e cálculo da impedância.

3. ELEMENTOS DE MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA

Em uma linha trifásica existem 10 tipos distintos de falta: 01 falta trifásica (ABC); 03 faltas fase-fase (AB, BC, CA); 03 faltas fase-terra (AN, BN, CN) e 03 faltas fase-fase-terra (ABN, BCN, CAN). A proteção de distância utiliza 6 elementos de medição, cada um energizado por um diferente par tensão/corrente de entrada de forma a medir corretamente a distância para cada um dos 10 possíveis tipos de falta. A escolha dos pares tensão/corrente é feita de modo que, independente do tipo de falta, o relé meça a impedância de seqüência positiva entre o relé e o ponto de ocorrência da falta. Desses 6 elementos de medição, três elementos, denominados elementos de fase, monitoram as faltas que envolvem duas ou mais fases (curtos trifásico, fase-fase ou fase-fase-terra). Os outros três, denominados, elementos de terra, monitoram as faltas entre uma fase e a terra.

O princípio de funcionamento desses elementos de medição, desenvolvido há muitos anos atrás, utiliza um equacionamento baseado nos fasores de regime permanente das tensões e correntes. Quando o cálculo da impedância no relé de distância é feito com a utilização de algoritmos baseados no método do regime permanente, isto é, que estimam as componentes de frequência fundamental das tensões e correntes (tais como o algoritmo de Fourier; filtro de Kalman, etc.) esse princípio aplica-se diretamente. Já para o algoritmo da equação diferencial, o qual baseia-se em valores instantâneos das tensões e correntes (domínio do tempo), torna-se necessário um desenvolvimento adicional para adaptá-lo aos elementos de medição utilizados com esse novo algoritmo. Essa adaptação é discutida neste item.

O método da equação diferencial baseia-se em um modelo de primeira ordem para o diagrama de seqüência positiva da linha de transmissão, como mostrado na figura 1.

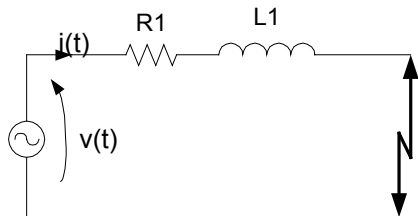


Figura 1: Modelo para a linha de transmissão

Por razões de espaço, neste artigo não é possível demonstrar toda a dedução das equações apresentadas a seguir, mas não é difícil verificar que é possível obter uma forma geral da equação diferencial de primeira ordem, que relaciona as tensões e correntes desse

modelo, válida para os seis elementos de medição, como indicado a seguir:

$$v = R_1 \cdot i_r + L_1 \cdot \frac{di_l}{dt} \quad [1]$$

Sendo que os sinais de tensão e corrente (v ; i_r ; i_l), utilizados em cada um dos elementos de medição, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Sinais de tensão e corrente utilizados nos 6 loops de medição

loop	v	i_r	i_l
AB	v_{ab}	i_{ab}	i_{ab}
BC	v_{bc}	i_{bc}	i_{bc}
CA	v_{ca}	i_{ca}	i_{ca}
AN	v_{an}	$i_a + i_{R_comp}$	$i_a + i_{L_comp}$
BN	v_{bn}	$i_b + i_{R_comp}$	$i_b + i_{L_comp}$
CN	v_{cn}	$i_c + i_{R_comp}$	$i_c + i_{L_comp}$

Onde:

$$i_{R_comp} = \frac{r_0 - r_1}{r_1} \cdot i_0 + \frac{r_{M0}}{r_1} \cdot i_{0m}$$

$$i_{L_comp} = \frac{x_0 - x_1}{x_1} \cdot i_0 + \frac{x_{M0}}{x_1} \cdot i_{0m}$$

r_1 e r_0 = resistências de seqüência positiva e zero da linha (ohms/km).

x_1 e x_0 = reatâncias de seqüência positiva e zero da linha (ohms/km)

r_{M0} e x_{M0} = resistência e reatância mútua, de seqüência zero, com a linha vizinha (ohms/km)

i_{0m} = corrente de seqüência zero na linha vizinha

Quando, para um dado tipo de falta, não se utiliza o elemento correto, a impedância medida será diferente da impedância de seqüência positiva entre o relé e o ponto de falta. Dessa forma, o primeiro passo no processo de medição de impedância é definir uma estratégia para seleção do elemento de medição que será utilizado. A solução adotada neste trabalho consistiu em desenvolver uma rotina de classificação da falta que, em cada ciclo de amostragem, retorna uma variável, denominada *evento*, que assume os valores mostrados na tabela 2.

Tabela 2- Valores da variável evento

evento	situação
0	Corrente na linha abaixo de um valor mínimo
1	Correntes simétricas: carga normal/curto trifásico
2	Curto-circuito fase-fase ou fase-fase-terra
3	Curto-circuito fase-terra

A partir do valor assumido por essa variável, os elementos de medição são selecionados como indicado

na figura 2. Os seguintes comentários podem ser feitos a respeito do procedimento utilizado para a seleção dos elementos de medição:

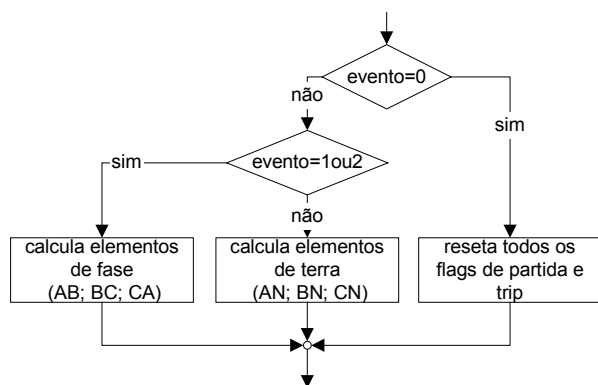


Figura 2. Procedimento para seleção dos loops de medição

- 1)- Quando a corrente nas fases se encontra abaixo de um valor mínimo de threshold (p. ex. linha aberta), situação sinalizada pelo valor zero na variável *evento*, não se utiliza nenhum elemento de medição. Todos os flags que indicam partida ou trip da função 21 e 21N são resetados. Este procedimento evita que o cálculo da impedância assuma valores muitos elevados, o que pode produzir overflow em variáveis do software.
- 2)_ Em todas as situações operativas em que a corrente se encontra acima do valor mínimo e não existe um curto fase-terra na linha (*evento=1* – carga normal/curto trifásico ou *evento=2* – curto dupla-fase-terra) são selecionados, simultaneamente, os três elementos de fase para medição das impedâncias.
- 3)_ Somente após a rotina de classificação identificar a ocorrência de um curto fase-terra (*evento=3*) é que os elementos de fase são substituídos pelos elementos de terra (AN; BN; CN) no cálculo das impedâncias.

Esse procedimento se justifica se lembrarmos que:

- No caso da ocorrência de um curto trifásico os três elementos de fase medirão o valor correto da impedância de seqüência positiva do trecho de linha que vai desde o relé até o ponto de falta (supondo resistência de falta nula).
- Para um curto dupla-fase, um dos elementos de fase (aquele que monitora as fases curto-circuitadas) irá medir a impedância correta e irá gerar o sinal de trip caso a falta se localize dentro da zona de proteção primária do relé. Os outros dois elementos de fase irão medir uma impedância incorreta, porém maior que a impedância do trecho curto-circuitado. Este ponto é importante, pois garante que não existe o risco de uma falta dupla-fase, ocorrendo fora da zona primária, ser vista pelos dois elementos que não correspondem ao par de fases defeituosas, como estando mais próxima e

dentro da zona primária, o que poderia causar um trip indevido.

- Um curto dupla-fase, p. ex. AB, poderia ser visto por um elemento de terra, no caso o elemento BN, como mais próximo do que ele realmente se encontra. Nesta situação, um curto AB na segunda zona poderia ser visto pelo elemento BN como dentro da primeira zona. É por esta razão que o relé não testa os seis elementos de medição simultaneamente. Na solução adotada, os elementos de terra só são testados após a rotina de classificação detectar com segurança que a falta é realmente fase-terra. Já no caso da falta fase-terra, os três elementos de terra são testados. Somente aquele que corresponde à falta defeituosa medirá a impedância correta. Os outros dois irão enxergar uma impedância muito mais elevada e, portanto, fora da característica.

3.1- Algoritmo para Seleção dos Elementos de Medição

Dado que a função de distância será baseada no algoritmo da equação diferencial, o qual apresenta tempos de atuação da ordem de $\frac{1}{2}$ ciclo, o algoritmo de classificação da falta (e conseqüente seleção dos elementos de medição) deverá ser extremamente rápido, preferencialmente apresentando um tempo de classificação entre $\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{4}$ de ciclo. Outra dificuldade é a exigência do algoritmo ser computacionalmente simples, de forma a viabilizar seu processamento em tempo real no software do relé. Preferencialmente deve-se utilizar apenas as quatro operações matemáticas básicas. O algoritmo de classificação desenvolvido para atender a esses requisitos baseia-se em uma análise das componentes simétricas das correntes da linha. Os detalhes dessa análise são semelhantes ao mostrado na referencia [1], a qual descreve o algoritmo de classificação utilizado no módulo de localização da falta que também integra o relé de distância. Por razões de espaço o detalhamento do algoritmo não será reproduzido aqui, podendo o leitor interessado consultar a referencia citada. A principal diferença em relação ao algoritmo apresentado nessa referencia consiste nos filtros utilizados para estimar os fasores de regime permanente das correntes (esses fasores são necessários para o cálculo das componentes simétricas das correntes). Devido ao requisito de velocidade, os fasores agora não poderão mais ser calculados através do tradicional método de Fourier, utilizando uma janela de dados de 1 ciclo. Para tanto, projetou-se, através da técnica dos mínimos quadrados, dois novos filtros ortogonais que utilizam janela de dados de apenas 5 amostras (com a taxa de amostragem de 32 amostras/ciclo utilizada no relé, isso representa pouco mais de $\frac{1}{8}$ de ciclo de 60 Hz). Os coeficientes desse filtro, válidos para a freqüência de amostragem de 32 amostras/ciclo, são apresentados na tabela 3. O cálculo do fasor é feito de forma análoga ao algoritmo de Fourier através das expressões mostradas a seguir.

$$Y_c = \sum_{j=0}^4 a_j \cdot x_{k-j} \quad \text{e} \quad Y_s = \sum_{j=0}^4 b_j \cdot x_{k-j}$$

$$\text{phasor} = Y_c + j \cdot Y_s$$

Tab. 3- Coeficientes do Filtro para cálculo de fasores

Coef. Filtro Y_c		Coef. Filtro Y_s	
a_0	0.74202856734	b_0	-0.75143458642
a_1	0.46981403959	b_1	-0.32191886674
a_2	0.17954482176	b_2	0.11996801445
a_3	-0.11762420286	b_3	0.55724459213
a_4	-0.41027299535	b_4	0.97310657264

Com relação a esse filtro pode-se fazer as seguintes observações:

- A pequena janela de dados utilizada no filtro, obviamente, piora sua resposta em frequência em relação aos filtros de Fourier, como mostrado na figura 3. Porém, como eles serão utilizados somente na filtragem dos sinais de corrente, os quais são pouco contaminados pelas altas frequências geradas pela falta (as componentes de alta frequência são mais pronunciadas nos sinais de tensão), este fato não terá um impacto muito significativo em seu desempenho.
- Os filtros também são sensíveis à componente DC (observe o ganho apresentado pela componente DC na resposta em frequência mostrada na figura 3). Dado que os sinais de corrente podem conter uma significativa componente exponencial amortecida durante a falta, o que pode provocar erros elevados na estimativa do fasor, torna-se necessário pré-filtrar esses sinais para eliminar completamente essa componente. Essa filtragem será feita utilizando um filtro FIR desenvolvido especificamente para essa finalidade e que já foi apresentado em trabalhos anteriores [2]. A equação desse filtro, válida para uma taxa de amostragem de 32 amostras/ciclo e sinais de 60 Hz, é mostrada a seguir :

$$y_k = 0.788961 \cdot x_k - 0.614443 \cdot x_{k-8}$$

A eficiência desse filtro pode ser observada figura 4, a qual apresenta uma corrente de falta na situação de máximo off-set, antes e após a filtragem.

3.2- Algoritmos de Medição baseados na equação diferencial

Os algoritmos baseados na equação diferencial são uma alternativa bastante interessante para os métodos baseados no cálculo dos fasores de regime permanente (Fourier, Kalman, Mínimos Quadrados, etc). Esses algoritmos têm como principais características:

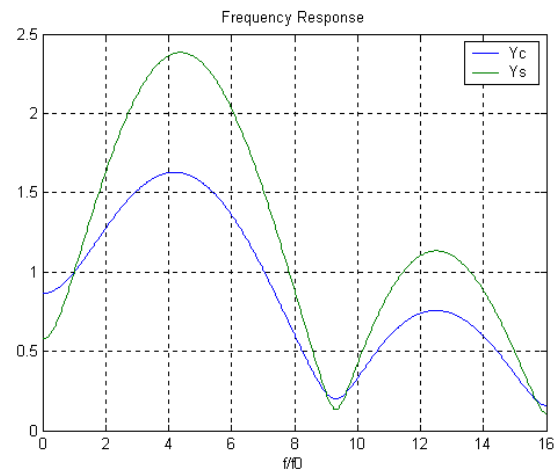


Figura 3: Resposta em frequência para os filtros ortogonais

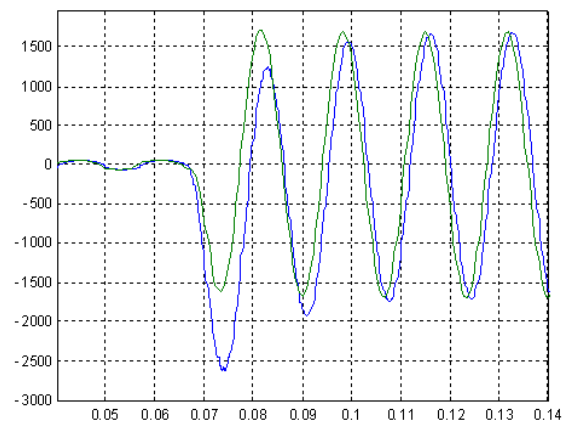


Figura 4: Corrente antes e após o filtro off-set

- Utilização de uma janela de dados curta, o que permite uma detecção mais rápida da falta.
- O algoritmo baseia-se em um modelo de primeira ordem para a linha de transmissão, o qual prevê a existência da componente aperiódica nos sinais de corrente. Dessa forma, a componente aperiódica não provoca erros na estimativa da impedância da falta.
- O algoritmo é robusto aos desvios da frequência fundamental da rede (o que já não ocorre com, por exemplo, o algoritmo de Fourier).
- Dado que o modelo da linha é de primeira ordem, os modos de oscilação produzidos pelas capacitâncias shunt não estão previstos no modelo, e dessa forma, serão fonte de erro na estimativa da impedância. Alguma técnica adicional é necessária para tornar o sistema mais robusto a essas altas frequências.

Na implementação de tempo discreto, a derivada existente na equação diferencial (1) não pode ser calculada exatamente e algum tipo de aproximação é necessária. Nos algoritmos que serão analisados neste relatório duas abordagens distintas são utilizadas:

a)- Integração de (1) seguida de discretização da equação obtida e aproximação numérica para os termos com integração.

b)- Discretização da equação (1) com aproximação numérica para o termo da derivada.

Para definição do algoritmo a ser utilizado no relé selecionou-se 4 variantes do algoritmo da equação diferencial. A referência bibliográfica básica de cada uma desses métodos é apresentada na tabela 4. Os três primeiros métodos (McInnes [3]; McInnes+filtragem [4] e Cho [5]) utilizam a abordagem descrita no item a) acima (integração da equação). Desses três, o primeiro é o algoritmo básico sem nenhuma melhoria; o segundo aumenta a robustez do algoritmo frente às oscilações de alta-freqüência com a utilização de técnicas de filtragem passa-baixas e o terceiro propõe um método de integração que fornece resultados exatos para N freqüências pré-fixadas (fundamental, segunda harmônica, etc.). O último método (Bonard [6]) discretiza a equação diferencial utilizando uma aproximação numérica para o termo da derivada (abordagem b.). Uma melhoria do algoritmo é a utilização de estimação paramétrica através da técnica dos mínimos quadrados. As equações utilizadas em cada um desses métodos são apresentadas no anexo A.

Tabela 4: Métodos baseados na equação Diferencial

Método/ referência	Janela (amostras)	Melhorias
1 <i>McInnes</i> [3]	3	nenhum
2 <i>McInnes + filtragem</i> [4]	3	filtragem passa-baixas
3 <i>Cho</i> [5]	16	Método de integração
4 <i>Bonard</i> [6]	16	aplicação de mínimos quadrados

3.3- Análise do Desempenho dos Algoritmos

Para seleção do algoritmo mais conveniente para implementação no relé em desenvolvimento, testou-se o desempenho dos quatro algoritmos frente a 175 casos de falta. Os sinais das tensões e correntes para esses casos foram gerados através de simulações no software ATP. A resposta dos algoritmos foi simulada através de um programa desenvolvido em linguagem MATLAB. Esse programa recebe os sinais gerados pela simulação no ATP e realiza as seguintes tarefas: a)- simulação da filtragem analógica existente hardware do relé; b)- simulação do processo de conversão analógico-digital (nesta etapa os sinais são amostrados com uma taxa de 32 amostras/ciclo); c)- geração dos sinais de tensão e corrente para os seis loops de medição; d)- classificação da falta; e) cálculo de R e L através das equações apresentadas no anexo A; f)- saídas gráficas com as trajetórias no plano R-X; g) Cálculo dos Indicadores de desempenho do algoritmo.

Para quantificar da forma mais objetiva possível o desempenho de cada algoritmo, definiu-se os quatro indicadores descritos a seguir:

a)- **Erro de regime no cálculo da reatância (X_{Erro}):** diferença percentual entre a reatância de regime permanente estimada pelo algoritmo e a reatância de seqüência positiva da linha no trecho em falta.

b)- **Tempo de estabilização (t_{est}):** É o tempo que a impedância calculada pelo algoritmo leva para se estabilizar em torno da impedância de regime. Considera-se que essa estabilização ocorreu quando, no plano complexo, a impedância calculada permanece dentro de um círculo com centro na impedância de regime e raio igual a 3% do módulo dessa impedância. Esse indicador é útil para quantificar a robustez do algoritmo frente às altas-freqüências geradas pela falta.

d)- **Tempo de Trip (t_{TRIP}):** é o tempo, após a ocorrência da falta, que o relé gasta para tomar a decisão de gerar ou não o sinal de trip. Para a decisão de trip utilizou-se o seguinte critério: o sinal de trip é gerado sempre que 3 amostras consecutivas caíram dentro da zona de atuação e a variação da reatância dessas amostras, com relação à reatância calculada na amostra anterior, é inferior a 2%.

e)- **Trajetória no plano R-X (*Percurso*):** Uma característica dos algoritmos baseados na equação diferencial é que durante a transição da impedância de pré-falta até a impedância de falta, a impedância calculada pelo algoritmo pode assumir valores extremos. Esses valores ocorrem quando o denominador das expressões utilizadas para o cálculo da resistência e reatância assume valores próximos de zero. Mesmo que os resultados fornecidos pelo algoritmo se estabilizem rapidamente em torno do resultado correto, esses valores transitórios extremos são inconvenientes pela possibilidade de ocorrer overflow em variáveis do software do relé. Neste aspecto, a trajetória ideal seria um segmento de reta iniciando-se na impedância de pré-falta e terminando na impedância de falta. O indicador *Percurso*, definido para quantificar esta situação, é dado pela relação entre o comprimento da trajetória, no plano R-X, da impedância calculada pelo algoritmo e o comprimento da trajetória ideal (segmento de reta). Dessa forma, quanto mais o indicador *Percurso* se aproximar de 1, melhor é o desempenho do algoritmo neste aspecto.

Os valores médios desses quatro indicadores, verificados em cada algoritmo, frente aos 175 casos de falta considerados, são apresentados na tabela 5. Para efeito de comparação, nessa tabela, além dos quatro métodos baseados na técnica da equação diferencial, incluiu-se também os resultados para o tradicional algoritmo de Fourier com janela de dados de 1 ciclo. Os resultados mostram que o algoritmo McInnes é extremamente sensível aos transitórios de alta-freqüência, o que se reflete no elevado tempo de estabilização apresentado (valor médio superior a 2 ciclos). Essa sensibilidade pode também ser observada na figura 5, a qual mostra a trajetória no plano R-X da impedância calculada por esse método durante uma falta fase-terra, ocorrendo no pico da tensão (situação

de máximo transitório), em uma linha de 138 kV. Outro aspecto negativo de seu desempenho é o elevado valor assumido pelo indicador percurso. Isto é reflexo dos valores extremos que a impedância assume nas primeiras amostragens após a falta (isso decorre do fato da variável Δ , utilizada nas equações (2) e (3) do anexo A, assumir valores próximos a zero nesses instantes). Esses resultados mostram que a utilização do algoritmo McInnes, em sua forma original, é desaconselhada. O algoritmo Cho também apresenta um desempenho bastante sofrível nesse aspecto. Esse resultado também decorre do fato deste algoritmo não contar com nenhuma melhoria que o torne mais robusto às oscilações de alta frequência.

Os melhores desempenhos são alcançados pelos outros dois algoritmos (McInnes+filtragem e Bonard). A boa robustez desses dois métodos frente às oscilações de alta frequência pode ser observada nos indicadores da tabela 5 e nas figuras 6 e 7 que apresentam as respostas dos algoritmos para o mesmo caso de falta fase-terra.

O algoritmo McInnes+filtering mostrou um erro médio no cálculo da reatância um pouco superior ao observado nos algoritmo Bonard. Além disso o algoritmo também apresentou um desempenho inferior no indicador *Percurso*.

Tabela 5: Média dos Indicadores para 175 casos de falta

método	X_erro (%)	Percurso	t_est (ciclos)	t_trip (ciclos)
McInnes	3.50	10.35	2.06	0.27
McInnes filtragem	3.50	3.82	0.61	0.46
CHO	3.34	54.12	1.30	0.52
Bonard	3.01	1.23	0.62	0.37
Fourier	3.38	1,99	2.01	0.79

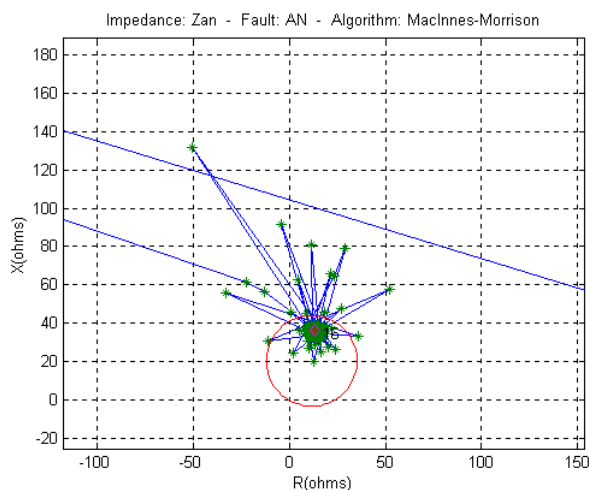


Figura 5: algoritmo McInnes: trajetória da impedância Z_{AN} no plano R-X - falta AN.

Dentre todos os algoritmos analisados, o melhor desempenho foi apresentado pelo algoritmo Bonard implementado para um janela de $\frac{1}{2}$ ciclo, sendo, dessa forma, o algoritmo selecionado para ser utilizado no

relé de distância. Como pode ser observado da tabela 5, esse algoritmo apresenta um desempenho significativamente superior, principalmente em termos de velocidade de atuação, em relação ao tradicional algoritmo de Fourier.

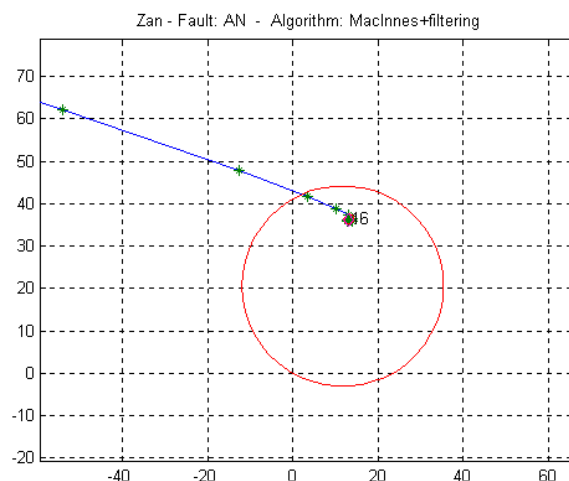


Figura 6: Algoritmo McInnes+filtragem: trajetória da impedância Z_{AN} no plano R-X - falta AN

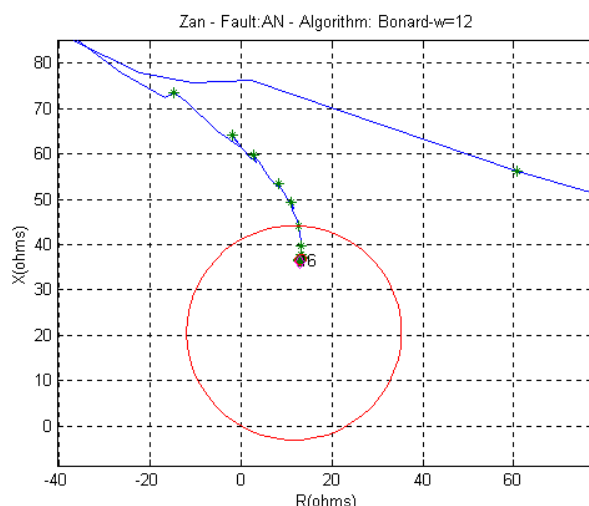


Figura 7: Algoritmo Bonard: trajetória da impedância Z_{AN} no plano R-X - falta AN

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os detalhes de uma solução para a utilização de um algoritmo baseado no método da equação diferencial em um relé digital de distância. Essa solução permite ao relé em desenvolvimento apresentar um tempo de detecção da falta inferior a $\frac{1}{2}$ ciclo.

APÊNDICE A

Nos algoritmos baseados na técnica da equação diferencial, os valores da resistência e indutância são calculados através de expressões do tipo:

$$R = \frac{num_R}{Delta} \quad (2) \quad \text{e} \quad L = \frac{num_L}{Delta} \quad (3)$$

Já as equações para num_R ; num_L e $Delta$ irá variar para cada um dos quatro métodos alternativos considerados neste trabalho, como indicado a seguir:

A1- Algoritmo McInnes:

Este algoritmo consiste em uma integração, através do método trapezoidal, da equação diferencial da linha (equação (1)) sobre dois intervalos consecutivos resultando em um algoritmo que utiliza uma janela de apenas 3 amostras.

$$Delta = \frac{T}{2} [(i_{r_{k-1}} + i_{r_{k-2}}) \cdot (i_{l_k} - i_{l_{k-1}}) - (i_{r_k} + i_{r_{k-1}}) \cdot (i_{l_{k-1}} - i_{l_{k-2}})]$$

$$num_R = [(v_{k-1} + v_{k-2}) \cdot (i_{l_k} - i_{l_{k-1}}) - (v_k + v_{k-1}) \cdot (i_{l_{k-1}} - i_{l_{k-2}})]$$

$$num_L = \frac{T}{2} [(v_k + v_{k-1}) \cdot (i_{r_k} - i_{r_{k-1}}) - (v_{k-1} + v_{k-2}) \cdot (i_{r_k} - i_{r_{k-1}})]$$

Os valores dos sinais v , i_r , i_l são os apresentados na tabela 1.

A2- Algoritmo McInnes+filtragem

O algoritmo da equação diferencial em sua forma original é muito sensível às altas frequências presentes nos transitórios da falta e alguma forma de filtragem é necessária para torná-lo mais robusto. A solução proposta neste método consiste em pré-filtrar, através de um filtro passa-baixas, os resultados de $Delta$, num_R e num_L (mostradas no item A1) antes de realizar as divisões $num_L/Delta$ e $num_R/Delta$ necessárias para o cálculo de L e R (equações [2] e [3]). Os resultados dessas duas divisões são ainda filtrados por um filtro de mediana, de ordem 8, de forma a rejeitar valores extremos.

A3- Algoritmo CHO

O algoritmo McInnes utiliza o método trapezoidal para integrar os termos da equação diferencial. Este método não é exato e introduz erros mesmo se o sinal é constituído somente pela componente fundamental. A diferença deste algoritmo consiste no fato de que ele utiliza um método de integração que permite obter valores exatos para até N frequências previamente selecionadas pelo projetista. As equações deste algoritmo, implementadas para uma janela de 16 amostras (1/2 ciclo) e sinais de 60 Hz, são:

$$Delta = III \cdot (i_{l_{k-9}} - i_{l_{k-15}}) - II0 \cdot (i_{l_k} - i_{l_{k-6}})$$

$$num_R = IV1 \cdot (i_{l_{k-9}} - i_{l_{k-15}}) - IV0 \cdot (i_{l_k} - i_{l_{k-6}})$$

$$num_L = -IV1 \cdot II0 + IV0 \cdot III$$

onde:

$$II0 = C_0(i_{r_{k-9}} + i_{r_{k-15}}) + C_1(i_{r_{k-10}} + i_{r_{k-14}}) + C_2(i_{r_{k-11}} + i_{r_{k-13}}) + C_3(i_{r_{k-12}} + i_{r_{k-12}})$$

$$III = C_0(i_{r_k} + i_{r_{k-6}}) + C_1(i_{r_{k-1}} + i_{r_{k-5}}) + C_2(i_{r_{k-2}} + i_{r_{k-4}}) + C_3(i_{r_{k-3}} + i_{r_{k-3}})$$

$$IV0 = C_0(v_{k-9} + v_{k-15}) + C_1(v_{k-10} + v_{k-14}) + C_2(v_{k-11} + v_{k-13}) + C_3(v_{k-12} + v_{k-12})$$

$$IV1 = C_0(v_k + v_{k-6}) + C_1(v_{k-1} + v_{k-5}) + C_2(v_{k-2} + v_{k-4}) + C_3(v_{k-3} + v_{k-3})$$

C ₀	C ₁	C ₂	C ₃
0.15436e-3	0.79279e-3	0.12702e-3	0.48831

A4- Algoritmo Bonard-Bastide

Este algoritmo consiste em discretizar a equação diferencial (equação (1)) utilizando uma aproximação numérica para o termo da derivada e empregar uma técnica de estimação paramétrica (mínimos quadrados) para a determinação de R e L . O algoritmo implementado para uma janela de 16 amostras (1/2 ciclo) resulta nas seguintes equações:

$$Delta = IR2 \times DIL2 - IRDIL \times IRDIL$$

$$num_R = VIR \times DIL2 - VDIL \times IRDIL$$

$$num_L = VDIL \times IR2 - VIR \times IRDIL$$

$$\bar{i}_{l_j} = \frac{i_{l_{j+1}} - i_{l_{j-1}}}{2 \cdot T} \quad IR2 = \sum_{j=2}^{w-1} i_{r_j}^2$$

$$IRDIL = \sum_{j=2}^{w-1} i_{r_j} \cdot \bar{i}_{l_j} \quad DIL2 = \sum_{j=2}^{w-1} \bar{i}_{l_j}^2$$

$$VDIL = \sum_{j=2}^{w-1} v_j \cdot \bar{i}_{l_j} \quad VIR = \sum_{j=2}^{w-1} v_j \cdot i_{r_j}$$

REFERÊNCIAS

- [1] Senger, E. C.; Reis F., A. F.; Manassero Jr, G.; Mikio, R.; at all – “Algoritmo para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão” - VII Seminário Técnico de Proteção e Controle – Junho/2003 - Rio de Janeiro – RJ
- [2] Senger, E. C.; Santana, N. N; “Pré-Filtragem da Componente Aperiódica Exponencial para os Algoritmos Utilizados em Relés Digitais” – Seminário Técnico de Proteção e Controle – 1998 - Natal
- [3] McInnes, E; Morrison, I. “Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer”. *IEA (Australia) March 1971, p. 16.*
- [4] Akke, M.; Thorp, J. “Some Improvements in the three-phase differential equation algorithm for fast transmission line protection”. *IEEE PWDR, vol. 13; January 1998 p. 66-72.*
- [5] Cho, K. R.; Hong, J. H. “High precision distance relaying algorithm for transmission line protection by optimal approximation technique”. *IEE Transactions of Japan vol.116-B, n.º 2, February 1996. Pp. 248-256*
- [6] Bonard, P.; Bastide, J. “A prototype of multiprocessor based distance relay”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101 no. 2, February 1982. Pp. 491-497*