

Francisco Antonio Reis Filho

"ESQUEMA DE PROTEÇÃO BASEADO NO ALGORITMO DE
CHAMIA-LIBERMAN E ANÁLISE COMPARATIVA COM RELÉS DE
DISTANCIA PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS"

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

São Paulo

1993

Francisco Antonio Reis Filho

"ESQUEMA DE PROTEÇÃO BASEADO NO ALGORITMO DE
CHAMIA-LIBERMAN E ANÁLISE COMPARATIVA COM RELÉS DE
DISTÂNCIA PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS"

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

Área de Concentração;

Engenharia Elétrica

Orientador:

Geraldo Francisco Burani

São Paulo

1993

Dedicatória

À minha mãe pela infinita insistência ...

À minha esposa e filhos a quem dedico com
todo meu carinho este trabalho

Agradecimentos

Ao colega e orientador Prof. Geraldo Francisco Burani pelo incessante estímulo e compreensão.

Aos colegas Kasuo Okamoto e Eduardo Tomio Kina pela grande colaboração e incentivo nas simulações dos programas.

A empresa ABB (Asea Brown Boveri) por possibilitar que este trabalho fosse concluído.

SUMARIO

Resumo

Abstract

1) INTRODUÇÃO.....	001
2) ONDAS TRAFEGANTES EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO.....	003
2.1 Modelo transitório de falta.....	003
2.2 Algoritmo de CHAMIA-LIBERMAN.....	013
2.2.1 Princípios de operação.....	013
2.2.2 Teorema da superposição.....	016
2.2.3 Esquemas de proteção e procedimentos para ajustes.....	019
2.2.4 Aspectos de filtragem.....	027
2.2.5 Aspectos de simulação.....	051
3) ESQUEMAS DE PROTEÇÃO EM LINHAS COMPENSADAS.....	056
3.1 Relés de distância.....	056
3.1.1 A natureza do problema.....	056
3.1.2 Tensões e correntes nas condições de curto-cir- to.....	059
3.1.3 Frequências naturais e sub-síncronas.....	067
3.1.4 Esquemas de tele-proteção.....	075
3.2 Relés de ondas trafegantes.....	078
3.2.1 Esquema de comparação direcional.....	078
3.2.2 Aspectos de filtragem.....	080
4) CONCLUSÕES.....	085
ANEXOS.....	087
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo enfocar dois assuntos principais a saber:

- A Proteção de Linhas de Transmissão utilizando relés que atuam por princípio de Ondas Trafegantes (Chamia-Liberman).

- Análise comparativa dos mesmos com relés que utilizam a medição por impedância (distância) para linhas com Compensação Série.

Inicialmente é feita uma discussão teórica para ressaltar o teorema da Superposição é, através de simulações no EMTP, são analisadas algumas condições operativas.

A seguir é desenvolvido o Algoritmo de Chamia-Liberman com enfoque maior para o aspecto de filtragem e aplicativos do mesmo no sistema de 765 kV de Furnas.

São apresentadas também as condições operativas adversas devido a aplicação dos relés de distância em linhas compensadas, e a seguir são desenvolvidos alguns princípios de processamento digital de sinais em algoritmos que utilizam ondas trafegantes para posterior aplicação em linhas com Compensação Série.

Da análise comparativa conclui-se que a proteção baseada no algoritmo de Chamia-Liberman é melhor alternativa técnica para esquemas de Proteção de Linhas em Extra-Alta-Tensão, que necessitem de curtos tempos de atuação e apresentem as condições operativas mostradas no trabalho.

ABSTRACT

This present dissertation has an objective to focus two best points listened below.

- The protection for transmission lines using relays which has the measuring principle by travelling wave phenomena (Chamia-Liberman).

- Comparative analysis between the scheme above and schemes that uses the measuring principle by impedance (distance) for series compensated lines.

In the beginning is made a theory discussion for emphasize the superposition theorem and through of simulations in EMTF, are analyzed some operational conditions. Afterwards is developed the Chamia-Liberman Algorithm with focus in the filter aspects and their application in the 765 kV system belonging at Furnas.

Are showed also the best opposing operational conditions due the application of distance protection in compensated lines, and following, is developed some principles of digital signal processing in algorithms that uses the principle of travelling waves.

From comparative analysis is conclusive that the protection based in the Chamia-Liberman algorithm is the best technical alternative for protection of lines in extra-high voltages, which needs of very short operating time and has the operational conditions described above.

1) INTRODUÇÃO

Em 1976 a BPA (Boneville Power Administration) solicitou à empresa ASEA ELÉTRICA LTDA um estudo aplicativo que viabilizasse um esquema de proteção ultra-rápido, pois a mesma tinha problemas de estabilidade em seu sistema. Isto motivou o desenvolvimento do relé de ondas trafegantes desenvolvido pela dupla CHAMIA-LIBERMAN no qual além de ser um princípio novo se comparado com o já tradicional relé de distância (diagrama R-X), conseguia reduzir em pelo menos a metade o seu tempo total de atuação. O esquema mostrou-se efetivo e na segunda parte da década de 80, Furnas Centrais Elétricas decidiu introduzir o mesmo esquema no segundo tronco de 765 kV da SE de Foz a Tijuco-Preto.

Portanto, no capítulo 02 o presente trabalho visa analisar o referido esquema com enfoque no princípio de medição e no aspecto de filtragem já que as mesmas utilizam os transitórios de corrente e tensão para auxiliar no processo de medição. Evidentemente que o esquema em pauta apresenta limitações tais como medições monofásicas em faltas evolutivas, mas o esquema já se confirma como eficiente principalmente para linhas de extra-alta tensão com Compensação Série. Com relação à Compensação Série, esta tem sido um difícil problema aplicativo para os esquemas de proteção, apesar dos fabricantes terem tentado algumas soluções operativas para o problema, através de alterações nos processos de medição e filtragem dos relés.

Logo, no capítulo 03, procura-se verificar estas

dificuldades operativas, além de se buscar através de tecnologia digital novas alternativas para implementar o princípio de medição apresentado, já que o relé de CHAMIA-LIBERMAN mostrado no capítulo 02, utiliza basicamente a tecnologia dos relés estáticos disponível na segunda metade dos anos 70. Por último, o objetivo final do trabalho é ressaltar a diferença dos respectivos tempos de atuação entre os dois processos de medições mostrados para as linhas compensadas, e lançar a idéia de que o princípio das Ondas Trafegantes pode se apresentar como a melhor solução técnica para os esquemas de proteção em extra-alta tensão que requeiram curtos tempos de atuação e apresentem as condições operativas citadas.

CAPÍTULO 02: ONDAS TRAFEGANTES EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO2.1 - Modelo Transitório da Falta

Seja o circuito da Fig. 2.1 representando um sistema de transmissão com 01 linha e duas fontes.

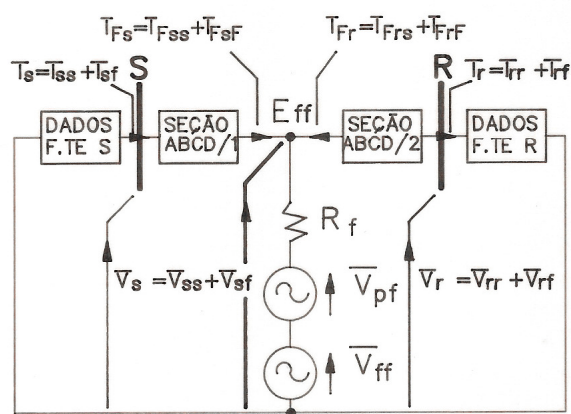


FIGURA 2.1

Onde definimos;

$\bar{V}_{PF(P)}$ = Tensão de Pré-Falta no Ponto P, igual a tensão de regime permanente no Ponto P antes da ocorrência do defeito no domínio da frequência.

$\bar{V}_{FF(P)}$ = Tensão de Falta no Ponto P no domínio da frequência.

$\bar{E}_{FF(P)}$ = Tensão Total no Ponto P.

Para obtermos a tensão Pós-Falta no Ponto P procedemos como segue. A solução pode ser obtida utilizando-se o Teorema da Superposição, onde $\bar{V}_{PF}$ é obtida com o prévio conhecimento das tensões e correntes de Pré-Falta nas barras terminais. Por outro lado, $\bar{V}_{FF}$ é aplicada ao circuito considerando-se todas as fontes nos terminais curto-circuitadas.

Analisando o circuito, matricialmente, temos:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{SS} \\ \bar{I}_{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{RS} \\ \bar{I}_{RS} \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

Onde: $A_1 = \cosh(\psi x)$

$$B_1 = \sinh(\psi x) \cdot Z_0$$

$$C_1 = Y_0 \cdot \sinh(\psi x)$$

$$D_1 = Y_0 \cdot \cosh(\psi x) \cdot Z_0$$

Podendo-se representar também na forma:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{SS} \\ \bar{I}_{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{RS} \\ \bar{I}_{RS} \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

Logo de 2.1.1 e 2.1.2 podemos obter a corrente $\bar{I}_{SS}$ de Pré-Falta no terminal S fazendo:

$$\bar{V}_{SS} = (A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot C_2) \cdot \bar{V}_{RS} + (A_1 \cdot B_2 + B_1 \cdot D_2) \cdot \bar{I}_{RS},$$

$$\bar{I}_{RS} = \frac{\bar{V}_{SS} - (A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot C_2) \cdot \bar{V}_{RS}}{(A_1 \cdot B_2 + B_1 \cdot D_2)} \text{ ou } \bar{I}_{RS} = (\bar{V}_{SS} - A \cdot \bar{V}_{RS}) \cdot B^{-1}$$

e:

$$\bar{I}_{SS} = (A_2.C_1 + C_2.D_1).\bar{V}_{RS} + (B_2.C_1 + D_1.D_2).\bar{I}_{RS}$$

Substituindo o valor de $\bar{I}_{RS}$ na equação acima obtém-se:

$$\bar{I}_{SS} = C.\bar{V}_{RS} + D.B^{-1}(\bar{V}_{SS} - A.\bar{V}_{RS});$$

$$\bar{I}_{SS} = (C - D.B^{-1}.A).\bar{V}_{RS} + D.B^{-1}.\bar{V}_{SS} \quad (2.1.3)$$

De forma análoga obtemos a tensão de Pré-Falta no Ponto P:

$$\bar{V}_{PF(P)} = (A_2 - B_2.B^{-1}.A).\bar{V}_{RS} + B_2.B^{-1}.\bar{V}_{SS} \quad (2.1.4)$$

Devido ao fato de que as equações 2.1.3 e 2.1.4 estão analisadas somente no regime permanente, os respectivos valores de corrente e tensão podem ser considerados na Forma Fasorial no domínio do tempo obtidos diretamente no Domínio da Frequência.

Vamos aplicar agora um defeito no Ponto P com tensão de Pré-Falta igual a $\bar{V}_{PF(P)} \cdot \sin(\omega_0 t + B).h(t)$. Utilizando o Teorema da Superposição concluímos que a tensão de Falta $\bar{V}_{FF(P)}$ é simplesmente igual e oposta a tensão de pré-falta $\bar{V}_{PF(P)}$ no Ponto P.

Logo, para a obtenção do valor de $V_{FF}(P)$ procede-se da forma a seguir:

Da Fig. 2.1.1.1 em relação ao terminal S;

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_{FF} \\ -\bar{I}_{FSF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{SF} \\ -\bar{I}_{SF} \end{bmatrix} \quad (2.1.5)$$

Da Fig. 2.1.1.1 em relação ao terminal R;

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_{FF} \\ -\bar{I}_{FRF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{RF} \\ \bar{I}_{RF} \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

As tensões e correntes nos terminais R e S estão relacionadas com respectivas impedâncias de fonte através das seguintes equações:

$$\bar{V}_{SF} = -\bar{Z}_{SS}.\bar{I}_{SF} \quad (2.1.7)$$

e

$$\bar{V}_{RF} = \bar{Z}_{SR} \cdot \bar{I}_{RF} \quad (2.1.8)$$

Substituindo 2.1.8 em 2.1.6 obtém-se:

$$\bar{E}_{FF} = (A_2 + B_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1}) \cdot (C_2 + D_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1})^{-1} \cdot \bar{I}_{FRF} \quad (2.1.9)$$

e 2.1.7 em 2.1.5 obtém-se:

$$\bar{E}_{FF} = -(A_1 + B_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1}) \cdot (C_1 + D_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1})^{-1} \cdot \bar{I}_{FSF} \quad (2.1.10)$$

Considerando que $\bar{E}_{FF} = \bar{V}_{FF} + R_F \cdot [\bar{I}_{FSF} - \bar{I}_{FRF}]$, onde R_F é uma matriz diagonal com os respectivos valores de resistência de Falta, e utilizando as equações 2.1.9 e 2.1.10 vêm:

$$[\bar{I}_{FSF} - \bar{I}_{FRF}] = [(C_1 + D_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1}) \cdot (A_1 + B_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1})^{-1} + (C_2 + D_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1}) \cdot (A_2 + B_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1})^{-1}] \cdot \bar{E}_{FF} \quad (2.1.11)$$

Substituindo 2.1.11 na equação acima obtém-se:

$$\bar{V}_{FF(F)} = [(C_1 + D_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1}) \cdot (A_1 + B_1 \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1})^{-1} + (C_2 + D_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1}) \cdot (A_2 + B_2 \cdot \bar{Z}_{SR}^{-1})^{-1} + R_F] \cdot [\bar{I}_{FSF} - \bar{I}_{FRF}] \quad (2.1.12)$$

Podemos obter das equações 2.1.1 a 2.1.10 as expressões:

$$\bar{V}_{SF} = [B_1 \cdot D_1^{-1} \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1} + 1]^{-1} \cdot [A_1 - B_1 \cdot D_1^{-1} \cdot C_1] \cdot \bar{E}_{FF} \quad (2.1.13)$$

$$\bar{I}_{SF} = -\bar{Z}_{SS}^{-1} [B_1 \cdot D_1^{-1} \cdot \bar{Z}_{SS}^{-1} + 1]^{-1} \cdot [A_1 - B_1 \cdot D_1^{-1} \cdot C_1] \cdot \bar{E}_{FF} \quad (2.1.14)$$

As equações matriciais mostradas indicam basicamente que pode-se analisar transitóriamente uma linha de transmissão entre 02 terminais através de parâmetros distribuídos e levar-se em consideração as condições que afetam o seu perfil, tais como:

- Efeito das impedâncias de fonte.
- Posição do defeito.
- Tipo de defeito.
- Instante da ocorrência do defeito.

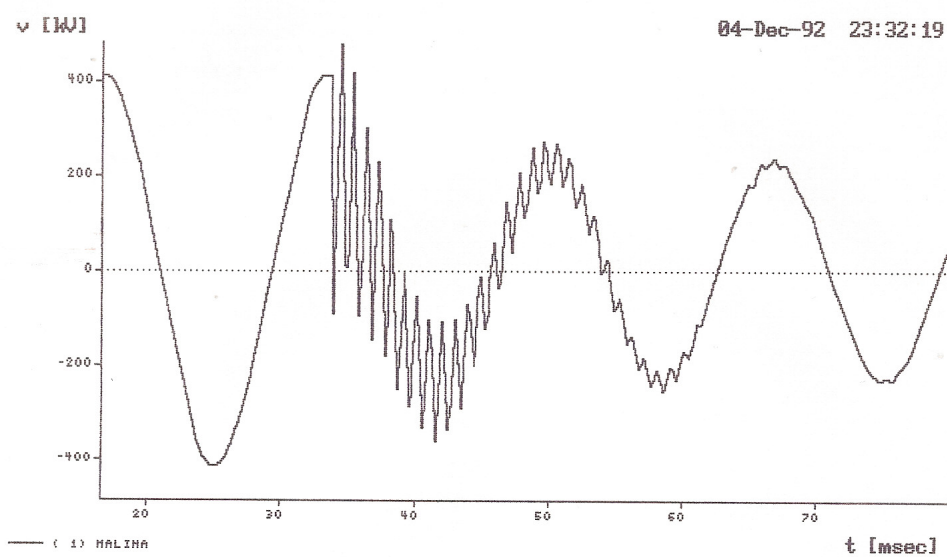
Com relação às impedâncias de fonte pode-se observar através das simulações 2.1.2 e 2.1.3 e aplicando-se um curto monofásico no meio da linha com relações $Z_s / Z_R = 1$ e $Z_s / Z_R = 0,14$, que as respectivas distorções de tensão são mais acentuadas no terminal com uma maior impedância. Por outro lado, a relação de Z_{s0} / Z_{s1} que envolve a sequência zero da fonte para defeitos à terra indicam que quanto maior for esta relação mais distorcida será a onda de tensão em seu terminal. (Nas simulações 2.1.4 e 2.1.5 temos as relações de 0.2 e 2.5 respectivamente).

Com relação a posição do defeito sabe-se que o tempo de trânsito entre a falta e as descontinuidades nos terminais variam com a sua localização. As diferentes velocidades de propagação para o modo terra e as demais podem ser visualizadas para um curto no terminal S e no meio da LT, onde observa-se uma rápida atenuação para o modo terra (simulações 2.1.6 e 2.1.7).

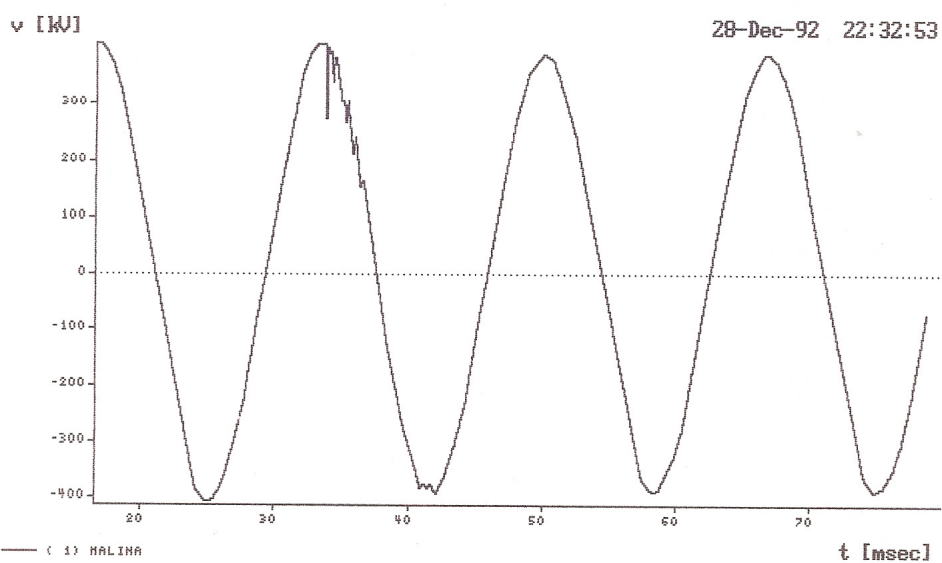
Nas simulações 2.1.8 e 2.1.9 são mostradas respectivamente uma falta trifásica e uma falta com Va passando pelo zero, onde se pode observar que defeitos não envolvendo terra distorcem mais a forma de onda de tensão, enquanto por outro lado a distorção provocada pelo "zero" na tensão é mínima se comparada com a simulação 2.1.2 (Va passando pelo máximo).

Com relação a esquemas de proteção, alguns algoritmos propostos utilizando a comparação de fase (F. Engler-ref-09) e amplitude (Malik-Hope/ref-13) entre os sinais ΔI e ΔV , levam ainda em consideração a magnitude e o ângulo das respectivas impedâncias de fonte. Ambos os

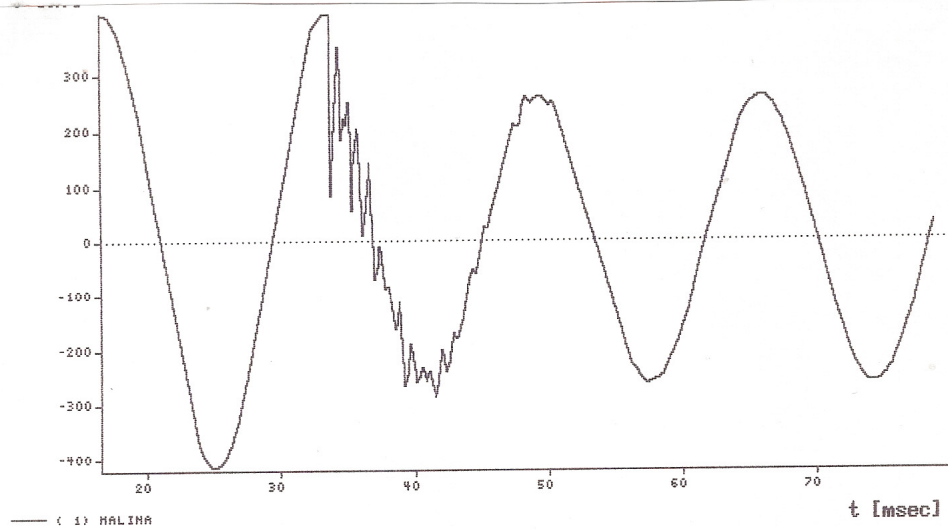
algoritmos utilizam a impedância réplica no circuito de corrente que elimina a componente exponencial DC pela diferenciação do sinal ΔI . Entretanto este sinal de corrente contém componentes de altas frequências que podem ser substancialmente amplificadas pela diferenciação do sinal como descrito. Portanto ambos utilizam uma pré-filtragem analógica, sendo no algoritmo de Malik um filtro analógico passa-baixa com frequência de corte de 120 Hz. Simulações efetuadas indicaram que o algoritmo de Vitins é mais sensível a variação do ângulo em questão, e a medida que o mesmo aumenta, a magnitude da trajetória das fases não faltosas também é acrescida, sendo necessário, portanto um critério especial nos ajustes. Falhas com alta resistência de arco indicaram também que o algoritmo em questão é o mais afetado pelo fenômeno descrito.



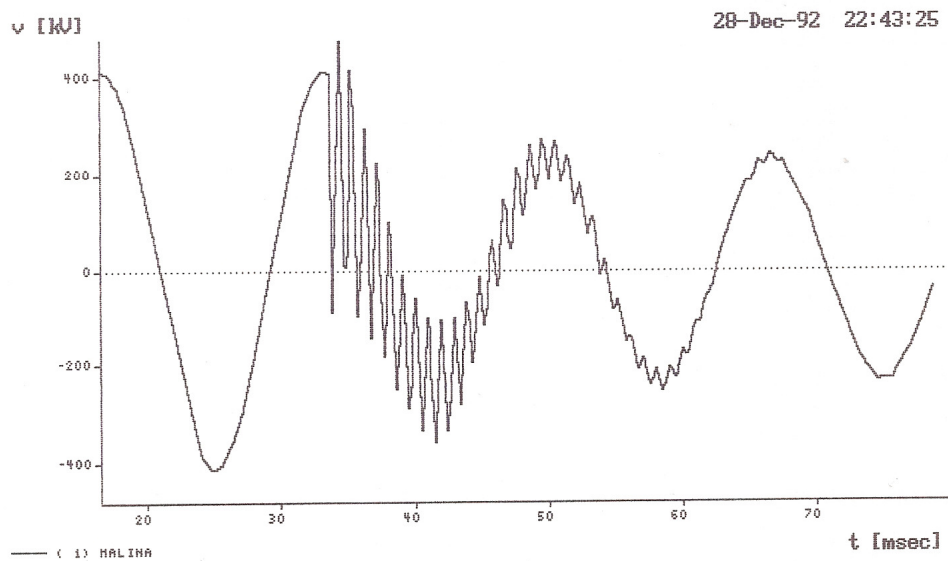
CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
 $Z_s/Z_r=1$.
 FIGURA 2.1.2(TENSAO NA BARRA "S").



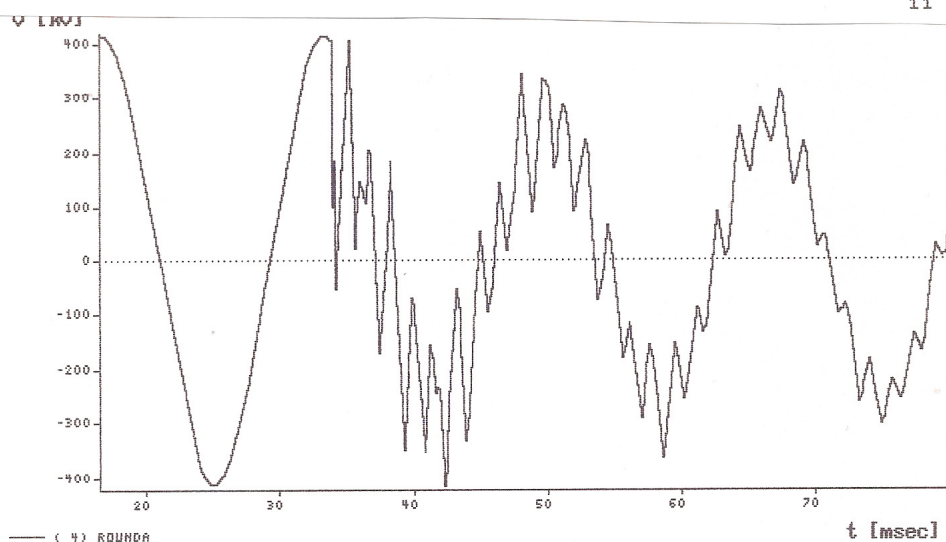
CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
 $Z_s/Z_r=0.14$
 FIGURA 2.1.3(TENSAO NA BARRA "S").



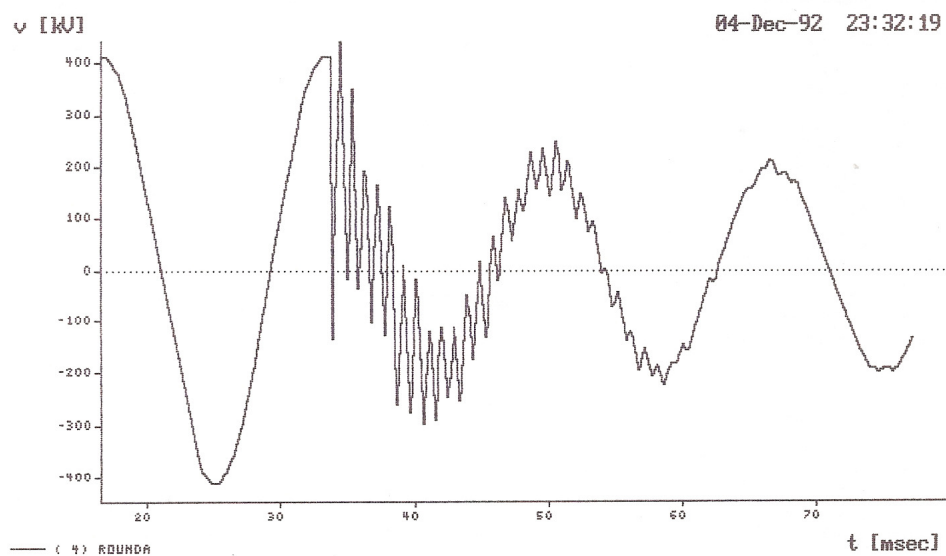
CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
 $Z_{oS}/Z_{pS}=0.2$
 FIGURA 2.1.4(TENSAO NA BARRA "S")



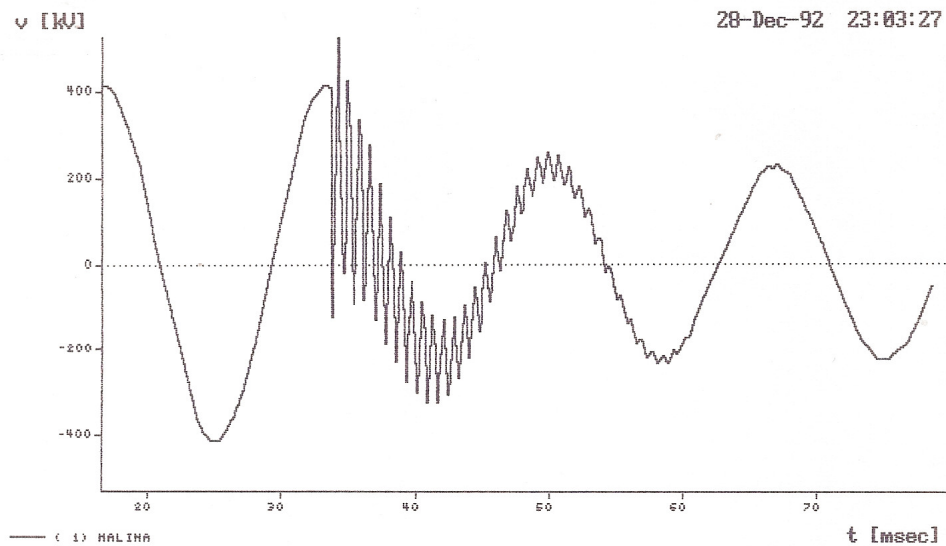
CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
 $Z_{oS}/Z_{pS}=2.5$
 FIGURA 2.1.5(TENSAO NA BARRA "S").



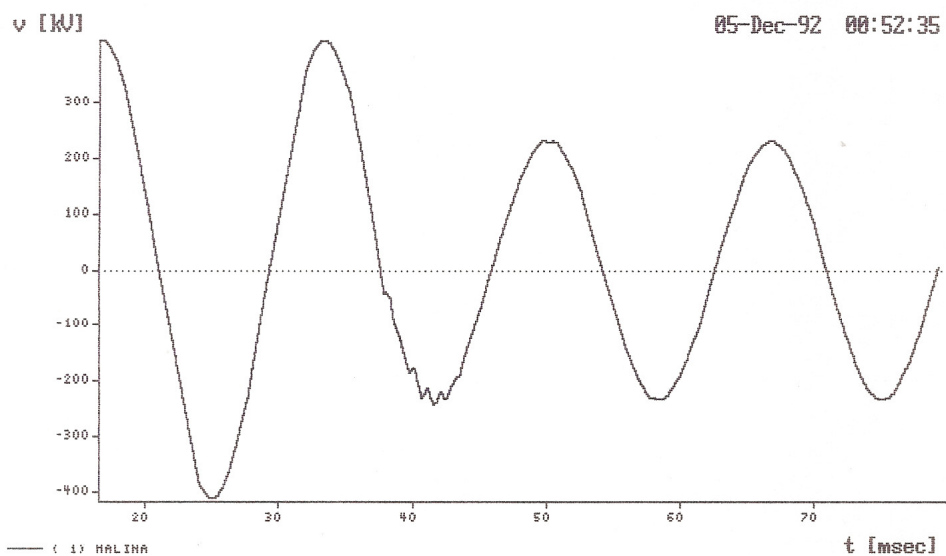
CURTO FASE-TERRA NA BARRA "S".
TENSÃO NA BARRA "R".
FIGURA 2.1.6



CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
TENSÃO NA BARRA "R".
FIGURA 2.1.7



CURTO TRIFASICO NO MEIO DA LINHA.
TENSÃO NA BARRA "S".
FIGURA 2.1.8



CURTO FASE-TERRA NO MEIO DA LINHA.
TENSÃO NA BARRA "S" (v_a PASSANDO PELO ZERO).
FIGURA 2.1.9

2.2 - Algoritmo de CHAMIA-LIBERMAN

2.2.1 - Princípios de Operação.

Em uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos sem perdas, sabe-se que a relação entre tensões, correntes, tempo e distância são completamente descritas pelas "Equações Telegráficas" descritas abaixo: (ref. Anexo 1).

$$\frac{\gamma^2 v}{\gamma t^2} = \frac{1}{LC} \cdot \frac{\gamma^2 v}{\gamma x^2} \quad (2.2.1.1)$$

$$\text{e}$$

$$\frac{\gamma^2 i}{\gamma t^2} = \frac{1}{LC} \cdot \frac{\gamma^2 i}{\gamma x^2} \quad (2.2.1.2)$$

onde L e C são as indutâncias e capacitâncias por unidade de comprimento e x a distância. De acordo com D'Alembert a solução geral para as equações acima pode ser expressa como:

$$v = f_1 \left(x - \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) + f_2 \left(x + \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) \quad (2.2.1.3)$$

$$i = \frac{1}{Z_c} \left[-f_1 \left(x - \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) + f_2 \left(x + \frac{t}{\sqrt{LC}} \right) \right] \quad (2.2.1.4)$$

Z_c = impedância de surto de linha.

O significado físico das equações 2.2.1.3 e 2.2.1.4 é de que qualquer função do tipo $f(x \pm vt)$ representa uma onda trafegante, porque qualquer valor correspondente de x pode ser determinado desde que a função $f(x \pm vt)$ tenha um valor constante e defina um ponto fixo em $f(x \pm vt)$.

O significado físico das polaridades instantâneas relativas entre as correntes e as tensões em uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos pode ser melhor entendido se arbitrarmos para uma determinada referência ($x=0$), um sentido positivo ou negativo para o valor de x . Entendendo esse conceito, ao aplicarmos uma tensão na entrada (entre fase e neutro), a respectiva corrente deflecionará o amperímetro positivamente (medido longitudinalmente) indicando que as mesmas têm o mesmo sinal. Agora ao colocarmos a mesma fonte na saída esta produzirá uma deflexão negativa no amperímetro indicando que a corrente tem sinal contrário à tensão. Ao voltarmos portanto para as equações 2.2.1.3 e 2.2.1.4, arbitra-se que as ondas de corrente e tensão definidas por $f_1(x \pm vt)$ são as ondas incidentes e possuem a mesma polaridade instantânea com o aumento de x . Para a equação $f_2(x \pm vt)$ as ondas são definidas como ondas refletidas e possuem polaridades opostas instantâneas com o sentido negativo de x . A aplicação destes conceitos em sistemas de proteção com ondas trafegantes é feita de forma que a direção do defeito para um dado ponto de observação, ou seja de x , pode ser unicamente determinada pela polaridade relativa entre as variações instantâneas nas correntes (ΔI) e tensões (ΔV) após a ocorrência do defeito (figura 2.2.1.1).