



GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA-GPC

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO PARÂMETROS PLENAMENTE DISTRIBUÍDOS

Gabriel Pino (*)
ESCOLA POLITÉCNICA-USP

Giovanni Manassero Junior
ESCOLA POLITÉCNICA-USP

RESUMO

Este trabalho apresenta um novo método de localização de faltas para linhas de transmissão, que utiliza amostras de tensões e correntes no domínio do tempo para a solução das equações diferenciais que descrevem o fenômeno, e que considera os tempos de propagação desses sinais. O modelo empregado é baseado em equacionamento que adota os parâmetros da linha de transmissão plenamente distribuídos, ao contrário do equacionamento de Bergeron e não utiliza a abordagem fasorial, evitando os problemas decorrentes dessa técnica. O método foi implementado para a localização de faltas em linhas monofásicas e os resultados indicam precisão e velocidade.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão, localização de faltas, proteção, domínio do tempo

1.0 - INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são elos entre centros de geração, normalmente distantes, e centros de consumo. São comumente aéreas e cobrem grandes distâncias, por essas razões estão sujeitas a situações, tais como condições atmosféricas adversas, queimadas e intempéries, que podem originar defeitos, interrompendo a transmissão de energia [1].

Nesse contexto, o trabalho proposto pretende apresentar um método de localização de faltas que é capaz de indicar rápida e precisamente o local de ocorrência do defeito. Para tanto, optou-se por não se utilizar da abordagem fasorial de modo a evitar erros decorrentes dessa técnica: efeito da componente exponencial amortecida [2], resistência de falta [1], posicionamento dos elementos de medição, etc.

O método proposto consiste em utilizar a modelagem do comportamento das linhas sob-regime transitório, no domínio do tempo, em conjunto dos registros dos sinais de tensões e correntes, efetuados por dispositivos eletrônicos inteligentes e/ou registradores digitais de perturbações em ambos os terminais da linha, e proceder com o cálculo para localizar a falta. Esse método apresenta resultados pouco influenciáveis pela resistência de falta e instante de ocorrência, além de utilizar as equações do telegrafista adotando os parâmetros plenamente distribuídos para a representação das linhas, que é mais preciso que o de Bergeron [3,4] que considera as resistências concentradas por trechos esparsos.

2.0 - MODELO NUMÉRICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Utilizar-se-á de modelos numéricos envolvendo o cálculo de tensões e correntes em linhas de transmissão no domínio do tempo para a implementação do algoritmo de localização de faltas. O modelo utilizado possui melhorias sólidas frente ao modelo de Bergeron, dada a distribuição plena dos parâmetros [3]. A Figura 1 ilustra o circuito para a obtenção das equações que regem o comportamento de tensões e correntes. Os subcapítulos seguintes apresentam as diferenças dos dois métodos através de generalizações matemáticas do proposto frente ao de Bergeron.

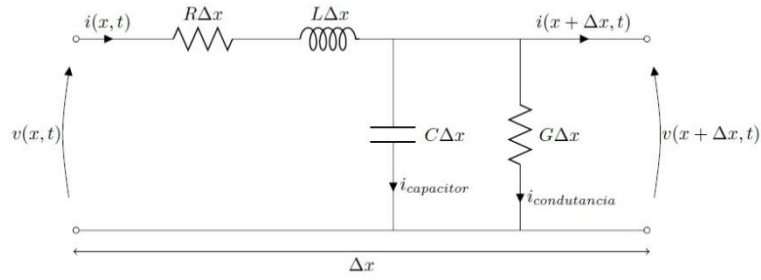


FIGURA 1 - Circuito infinitesimal

2.1 Modelo numérico a parâmetros distribuídos

Desenvolvendo ambas as Leis de Kirchof para o circuito apresentado na Figura 1, obtêm-se as duas equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento da linha de transmissão.

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + RG v(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + RG i(x,t) \quad (2)$$

A aplicação da Transformada de Laplace em (1) e (2) é um modo matemático de se simplificar a resolução de um sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO), no domínio da frequência complexa.

$$\frac{d^2 V(x,s)}{dx^2} = [LCs^2 + (RC + LG)s + RG] V(x,s) \quad (3)$$

$$\frac{d^2 I(x,s)}{dx^2} = [LCs^2 + (RC + LG)s + RG] I(x,s) \quad (4)$$

Necessita-se definir as condições iniciais das variáveis de interesse, tensões e correntes, para a resolução das EDOs (3) e (4). As variáveis V^+ e V^- representam as ondas progressiva e regressiva de tensão no instante inicial, e I^+ e I^- as ondas de corrente, analogamente. A fim de se simplificar a notação, chamar-se-á $a = LC$, $b = RC + LG$ e $c = RG$.

$$V(x,s) = V^+ e^{-x\sqrt{as^2+bs+c}} + V^- e^{+x\sqrt{as^2+bs+c}} \quad (5)$$

$$I(x,s) = I^+ e^{-x\sqrt{as^2+bs+c}} + I^- e^{+x\sqrt{as^2+bs+c}} \quad (6)$$

A relação entre tensão e corrente se dá pela impedância característica da linha de transmissão. Substituindo (6) individualmente nas equações diferenciais advindas das Leis de Kirchoff se obtém

$$I(x,s) = \frac{1}{Z_c(s)} [V^+ e^{-x\sqrt{as^2+bs+c}} - V^- e^{+x\sqrt{as^2+bs+c}}] \quad (7)$$

Para valores frequência próximos ou superiores às frequências industriais é prudente se aproximar a impedância característica por seu valor real.

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{sL+R}{sC+G}} \sim \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

Ao se utilizar a aproximação de (8) em (7), têm-se a expressão de tensões e correntes apenas em função das condições iniciais de tensão, o que facilita a resolução do sistema de equações. Ainda se necessita fatorar os expoentes presentes em (5) e (7) para comodidade em se aplica a Transformada Inversa de Laplace. A fatoração do polinômio se simplifica à medida que ele pode ser transformado em um trinômio quadrado perfeito, ou seja, apresentando determinante nulo, $d = b^2 - 4ac = 0$. Essa condição implica em linhas de transmissão com sinal de potência atenuado e não distorcido [5], pode-se também afirmar que essa condição é imbutida através dos parâmetros obedecendo à relação

$$d = (RC - LG)^2 \sim 0 \quad (9)$$

A Tabela 1 mostra a ordem de grandeza dos parâmetros distribuídos sequenciais para linhas aéreas de circuitos simples para torres padrões em delta e o erro relativo ao se aplicar a condição (9) [6,7]. Confirma-se a nulidade do determinante como uma boa aproximação.

TABELA 1 - Ordem de grandeza de parâmetros sequenciais por nível de tensão

Tensão nominal [kV]	R ⁺ [Ω/km]	L ⁺ [H/km]	C ⁺ [F/km]	G ⁺ [S/km]	(R ⁺ C ⁺ - L ⁺ G ⁺) ²	R ⁰ [Ω/km]	L ⁰ [H/km]	C ⁰ [F/km]	G ⁰ [S/km]	(R ⁰ C ⁰ - L ⁰ G ⁰) ²
362	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
500	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
800	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷

Logo, a fatoração do trinômio pode ser escrita como

$$as^2 + bs + c = \left(s\sqrt{a} + \frac{b}{2\sqrt{a}} \right)^2 \quad (10)$$

Denota-se o fator de atenuação linear

$$\beta = \frac{b}{2\sqrt{a}} = \frac{RC+LG}{2\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Utilizando a condição (9) em (5) e (7), obtêm-se expressões mais simplesmente invertíveis para o domínio do tempo [5].

$$V(x, s) = V^+ e^{-sx\sqrt{a}} e^{-x\beta} + V^- e^{+sx\sqrt{a}} e^{+x\beta} \quad (12)$$

$$I(x, s) = \frac{1}{Z_c(s)} \left[V^+ e^{-sx\sqrt{a}} e^{-x\beta} - V^- e^{+sx\sqrt{a}} e^{+x\beta} \right] \quad (13)$$

Somando as equações (12) e (13), têm-se a equação característica da linha de transmissão, expressão essa facilmente invertível ao domínio do tempo que relaciona tensão e corrente.

$$V(x, s) + Z_c I(x, s) = 2V^+ e^{-sx\sqrt{a}} e^{-x\beta} \quad (14)$$

Aplicando-se a Transformada Inversa de Laplace tem-se a equação característica expressa no domínio do tempo.

$$v(x, t) + Z_c i(x, t) = 2v^+ \left(t - \frac{x}{\sqrt{a}} \right) e^{-x\beta} \quad (15)$$

Tomando uma linha de transmissão de comprimento l , pode-se utilizar (15) para deduzir uma relação matemática entre os terminais local e remoto em que o tempo de propagação dos sinais de tensão e corrente é dado por

$$\tau = l\sqrt{LC} = \frac{l}{\sqrt{a}} \quad (16)$$

Um sinal que parte do terminal local assume em (15) argumentos temporal $t = t_0 - \tau$ e espacial $x = 0$.

$$v(0, t_0 - \tau) + Z_c i(0, t_0 - \tau) = 2v^+(t_0 - \tau) \quad (17)$$

Ao chegar no terminal remoto os argumentos assumem $t = t_0$ e $x = l$.

$$v(l, t_0) + Z_c i(l, t_0) = 2v^+(t_0 - \tau) e^{-l\beta} \quad (18)$$

Substituindo-se (17) em (18) e alterando a convenção de corrente de modo que elas sempre adentrem a linha, obtêm-se uma relação de tensão e corrente entre terminais no domínio do tempo.

$$v_{remoto}(t) - Z_c i_{remoto}(t) = e^{-l\beta} [v_{local}(t - \tau) + Z_c i_{local}(t - \tau)] \quad (19)$$

Analogamente, pode-se chegar na relação para o sinal partindo do terminal remoto.

$$v_{local}(t) - Z_c i_{local}(t) = e^{-l\beta} [v_{remoto}(t - \tau) + Z_c i_{remoto}(t - \tau)] \quad (20)$$

O sistema de tensões e correntes composto por (19) e (20) é uma relação de recorrência entre terminais da linha de transmissão monofásica no domínio do tempo considerando os parâmetros plenamente distribuídos.

2.2 Modelo numérico de Bergeron

O modelo de Bergeron é largamente utilizado para simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência [4]. Pode-se demonstrar que o modelo proposto é uma generalização do de Bergeron ao se assumir $R = G = 0$, o que implica em $\beta = 0$, e caracteriza uma linha de transmissão ideal e sem perdas. Assim, (19) e (20) podem ser reescritas [3] como

$$v_{remoto}(t) - Z_c i_{remoto}(t) = v_{local}(t - \tau) + Z_c i_{local}(t - \tau) \quad (21)$$

$$v_{local}(t) - Z_c i_{local}(t) = v_{remoto}(t - \tau) + Z_c i_{remoto}(t - \tau) \quad (22)$$

Para se considerar o elemento resistivo presente nas linhas, insere-se um quarto da resistência série total concentrada em cada extremo da linha e metade desta no centro da mesma, conforme mostra a Fig 2.

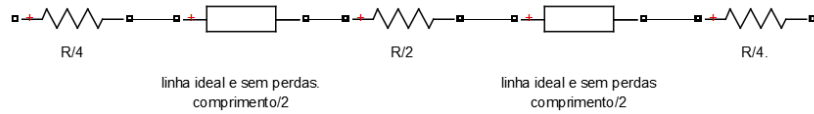


FIGURA 2 - Modelo de Bergeron com resistências concentradas

Adaptando [8, 9] o sistema de equações (21) e (22) às resistências concentradas obtêm-se a equação referente ao terminal local

$$v_{local}(t) - \frac{(4Z_c + R)}{4} i_{local}(t) = \frac{Z_c}{4Z_c + R} [4v_{remoto}(t - \tau) + (4Z_c - R)Z_c i_{remoto}(t - \tau)] + \frac{R}{4Z_c + R} \left[v_{local}(t - \tau) + \frac{4Z_c - R}{4} i_{local}(t - \tau) \right] \quad (23)$$

e ao terminal remoto

$$v_{remoto}(t) - \frac{(4Z_c + R)}{4} i_{remoto}(t) = \frac{Z_c}{4Z_c + R} [4v_{local}(t - \tau) + (4Z_c - R)Z_c i_{local}(t - \tau)] + \frac{R}{4Z_c + R} \left[v_{remoto}(t - \tau) + \frac{4Z_c - R}{4} i_{remoto}(t - \tau) \right] \quad (24)$$

Nota-se que ao se concentrar a resistência série em três pontos ao longo da linha, é necessário que se conheçam os termos históricos de ambos os terminais conforme mostram (23) e (24), o que tornam as iterações computacionalmente mais custosas comparadas as do modelo plenamente distribuído, que necessitam dos termos históricos de apenas um terminal. Além disso, o desenvolvimento algébrico convencional é mais complexo, dificultando a implementação de métodos de localização de faltas no domínio do tempo durante transitórios

eletromagnéticos.

3.0 - METODOLOGIA DO LOCALIZADOR DE FALTAS

A análise da localização de falta em uma linha de transmissão é feita prioritariamente a partir de oscilografias de tensões e correntes em ambos os terminais da linha. Durante o período transitório há reflexões de onda provenientes da perturbação causada pelo curto-circuito, assim os sinais tendem a possuir componentes harmônicas de ordem superiores, além da componente DC em decaimento exponencial. Esse comportamento transitório das formas de onda dificulta a utilização do conceito fasorial sem que se utilize filtros convenientes a tal fim [10]. No intuito de se evitar essa abordagem fasorial, esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um método de localização de faltas no domínio do tempo considerando os parâmetros da linha de transmissão plenamente distribuídos. A Figura 3 mostra a nomenclatura adotada para as variáveis de tensão e corrente envolvidas na análise do curto-circuito, em que x_f é a distância do ponto de ocorrência da falta ao terminal local.

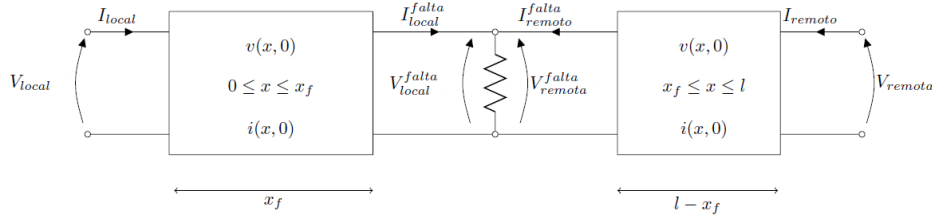


FIGURA 3 - Variáveis adotadas na análise do curto circuito

A topologia do circuito não permite o acesso à medição das tensões de falta vista por cada terminal, v_{local}^{falta} e v_{remoto}^{falta} , tampouco da corrente que a impedância de falta drena individualmente de cada trecho da linha, i_{local}^{falta} e i_{remoto}^{falta} . Para contornar esse impasse, utiliza-se o princípio de que as tensões de falta vistas individualmente pelos terminais local e remoto têm de ser numericamente muito próximas, quão idênticas [11], o que permite a minimização do módulo da diferença entre elas como forma de se descobrir o ponto de falta.

$$\min(|v_{local}^{falta}(t) - v_{remoto}^{falta}(t)|) \xrightarrow{\text{varredura}} x_f \quad (25)$$

A função de minimização (25) tem de ter argumentos conhecidos na análise do curto-circuito tais como as oscilografias de tensão e corrente, daí se desenvolveu um artifício matemático capaz de expressar a tensão de falta vista pelo terminal em função das formas de onda dessas oscilografias em diferentes instantes de amostragem do sinal.

3.1 Variação do instante de amostragem de tensão e corrente

Considerando o ponto de ocorrência do curto-circuito como um seccionador da linha em dois trechos bem delimitados, é possível analisar individualmente cada um dos trechos como uma linha de transmissão. As expressões (19) e (20) podem ser adaptadas ao trecho que se estende do terminal local até o ponto de falta:

$$v_{local}^{falta}(t) - Z_c i_{local}^{falta}(t) = e^{-\beta x_f} \left[v_{local} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) + Z_c i_{local} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) \right] \quad (26)$$

$$v_{local}(t) - Z_c i_{local}(t) = e^{-\beta x_f} \left[v_{local}^{falta} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) + Z_c i_{local}^{falta} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) \right] \quad (27)$$

Assumindo que os parâmetros indutivos e capacitivos não se alterem em ambos os trechos, considera-se a velocidade de propagação das ondas, ξ , como constante. Em (26) e (27) há a presença da corrente drenada pela impedância de falta, que deve ser eliminada, através do adiantamento de $\frac{x_f}{\xi}$ no argumento de cada uma das funções presentes em (27).

$$v_{local} \left(t + \frac{x_f}{\xi} \right) - Z_c i_{local} \left(t + \frac{x_f}{\xi} \right) = e^{-\beta x_f} \left[v_{local}^{falta}(t) + Z_c i_{local}^{falta}(t) \right] \quad (28)$$

Esse artifício matemático permite substituir (26) em (28) e assim isolar a tensão de falta vista pelo terminal local em função de tensão e corrente locais amostradas em dois instantes distintos.

$$v_{local}^{falta}(t) = e^{\beta x_f} \left[v_{local} \left(t + \frac{x_f}{\xi} \right) - Z_c i_{local} \left(t + \frac{x_f}{\xi} \right) \right] \frac{1}{2} + e^{-\beta x_f} \left[v_{local} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) + Z_c i_{local} \left(t - \frac{x_f}{\xi} \right) \right] \frac{1}{2} \quad (29)$$

Analogamente, adapta-se a expressão da tensão de falta vista pelo terminal remoto.

$$v_{remoto}^{falta}(t) = e^{\beta(l-x_f)} \left[v_{remoto} \left(t + \frac{l-x_f}{\xi} \right) - Z_c i_{remoto} \left(t + \frac{l-x_f}{\xi} \right) \right] \frac{1}{2} + e^{-\beta(l-x_f)} \left[v_{remoto} \left(t - \frac{l-x_f}{\xi} \right) + Z_c i_{remoto} \left(t - \frac{l-x_f}{\xi} \right) \right] \frac{1}{2} \quad (30)$$

É possível avaliar que as tensões de falta vistas por ambos os terminais possuem forte presença não linear por parte da incógnita x_f . A não linearidade de (29) e (30) implica na utilização de uma varredura numérica para determinação do ponto de falta.

3.2 Função de minimização numérica

A função de minimização do módulo da diferença entre (29) e (30) pode ser expressa por

$$f_{min}(t) = \min[|v_{local}^{falta}(t) - v_{remoto}^{falta}(t)|] = f(v_{local}, i_{local}, v_{remoto}, i_{remoto}, x_f) \quad (31)$$

A varredura implementa variação do argumento x_f de modo que se obtenha o valor mínimo de $f_{min}(t)$ a cada instante de tempo durante todo processo de localização de falta. Logo, a excursão de x_f entre 0 e l em passos discretizados a cada instante determina o ponto mínimo da função e indica a evolução do local da falta ao longo do tempo. A saída do algoritmo é o ponto de tensão mínima do valor de médio ao longo da janela de falta.

4.0 - RESULTADOS

Os parâmetros utilizados nas simulações se referem ao circuito de transmissão de 40 [km] em 138 [kV] que interconecta as SE Corumbá IV e SE Santa Maria, responsável por despachar a potência gerada pela UHE Corumbá IV ao Sistema Interligado Nacional. O ambiente de simulação adotado foi o Simulink/Matlab, a Figura 4 ilustra a topologia do circuito de transmissão adotado.

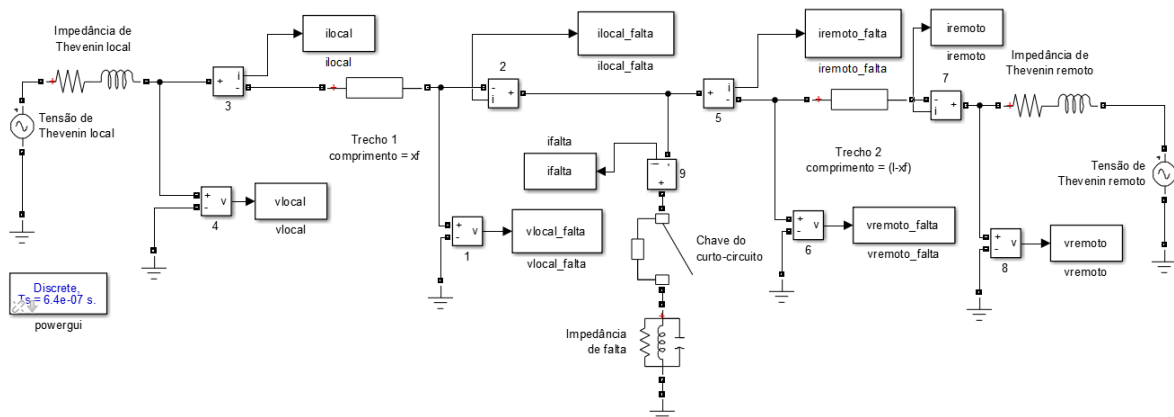


FIGURA 4 - Topologia do circuito de transmissão

As subestações de conexão são modeladas eletricamente por equivalentes de Thevenin e assumem valores de sequência positiva compatíveis para circuitos de 138 kV transmitindo 129.6 MW, conforme mostra a Tabela 2.

TABELA 2 - Parâmetros dos equivalentes de Thevenin

	Tensão [kVrms]	Fase [°]	Resistência [Ω]	Indutância [H]
Terminal local	143.1	0	2.1974	0.0362
Terminal remoto	139.7	-15.487	1.8971	0.0423

Os parâmetros distribuídos de sequência positiva da linha de transmissão, por sua vez, são representados pela Tabela 3.

TABELA 3 - Parâmetros distribuídos da linha de transmissão

Resistência	0.0454 [Ω/km]
Indutância	8.688 [mH/km]
Capacitância	13.18 [nF/km]
Condutância	10 [μS/km]

Em um caso genérico, a perturbação transitória causada pelo curto-circuito é simulada obedecendo aos parâmetros descritos na Tabela 4.

TABELA 4 - Parâmetros para simulação do curto circuito

Tempo de simulação	150 [ms]
Instante de falta	100 [ms]
Janela de falta	50 [ms]
Frequência de amostragem	1.5625 [MHz]
Resistência de falta	10 [Ω]
Indutância de falta	50 [mH]
Capacitância de falta	25 [μF]
Ponto de falta	30 [km]
Discretização do comprimento	10 [m]

A Figura 5 ilustra as formas de onda de tensão de ambos os terminais da linha, evidenciando o perfil do comportamento transitório logo após a ocorrência da falta no circuito de transmissão. Nota-se que a ocorrência do curto-circuito causa um afundamento de tensão de até 0.66 [pu] no terminal local e 0.72 [pu] no terminal remoto. Além disso, há a introdução de intenso conteúdo harmônico de alta frequência originário de reflexões de onda de tensões entre terminais e o ponto de falta e uma componente DC amortecida exponencialmente. As perturbações no circuito têm maiores amplitudes para impedância equivalente de falta menores, que nessa simulação apresenta módulo de 6.15 [Ω] a 60 [Hz].

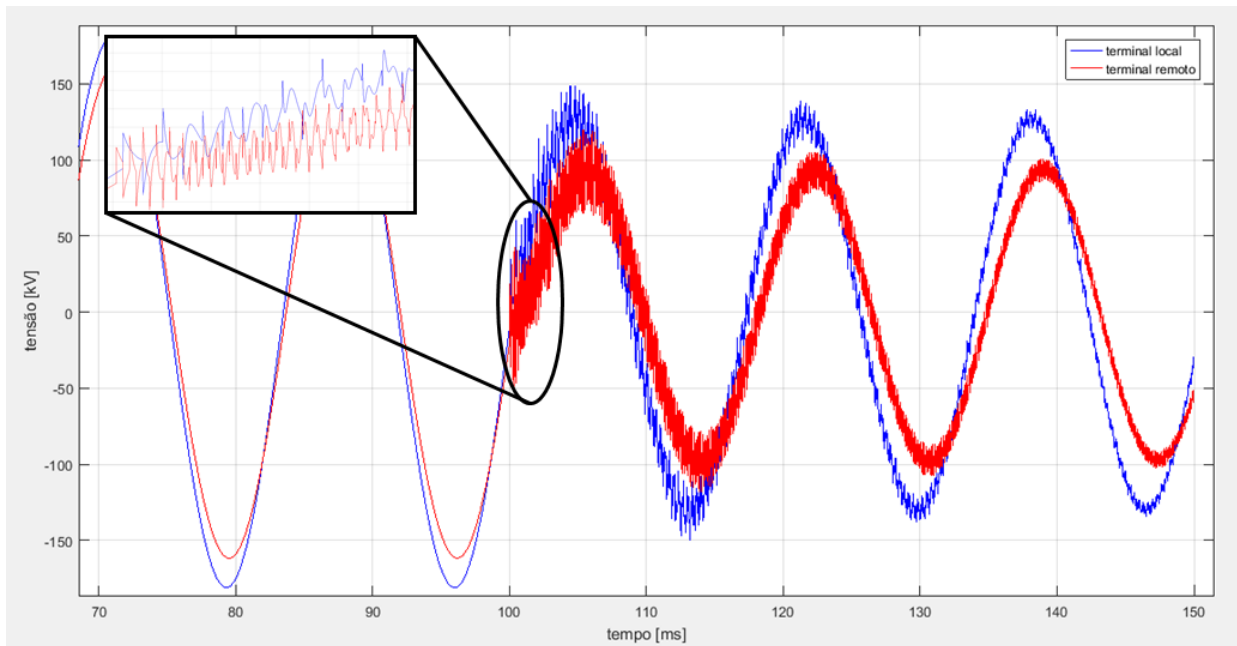


FIGURA 5 - Formas de onda de tensão nos terminais local e remoto

As formas de onda de corrente, por sua vez, apresentam considerável componente DC amortecida exponencialmente no início do período transitório por até três ciclos de onda analisados na janela de falta, o que implica em um pico no módulo de corrente de curto-circuito de até 4.54 [pu] no terminal local e -3.48 [pu] no terminal remoto, conforme mostra a Figura 6. Nota-se que a presença de conteúdo harmônico superior à quinta ordem é praticamente inexistente comparada às formas de onda de tensão.

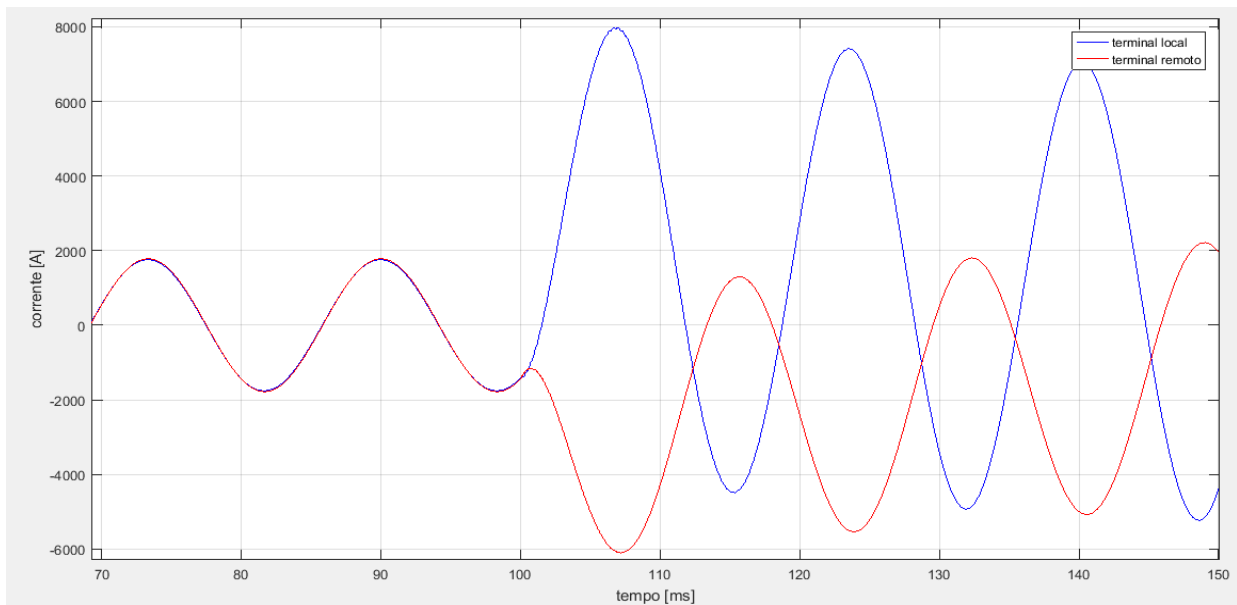


FIGURA 6 - Formas de onda de corrente nos terminais local e remoto

Um dos resultados providos pelo método numérico proposto é processo de minimização da diferença do módulo da tensão de falta vista por ambos os terminais a cada instante de simulação, conforme mostra a Figura 7. Podemos observar um claro comportamento transitório à medida que as varreduras pela busca do ponto de falta evoluem ao longo do tempo.

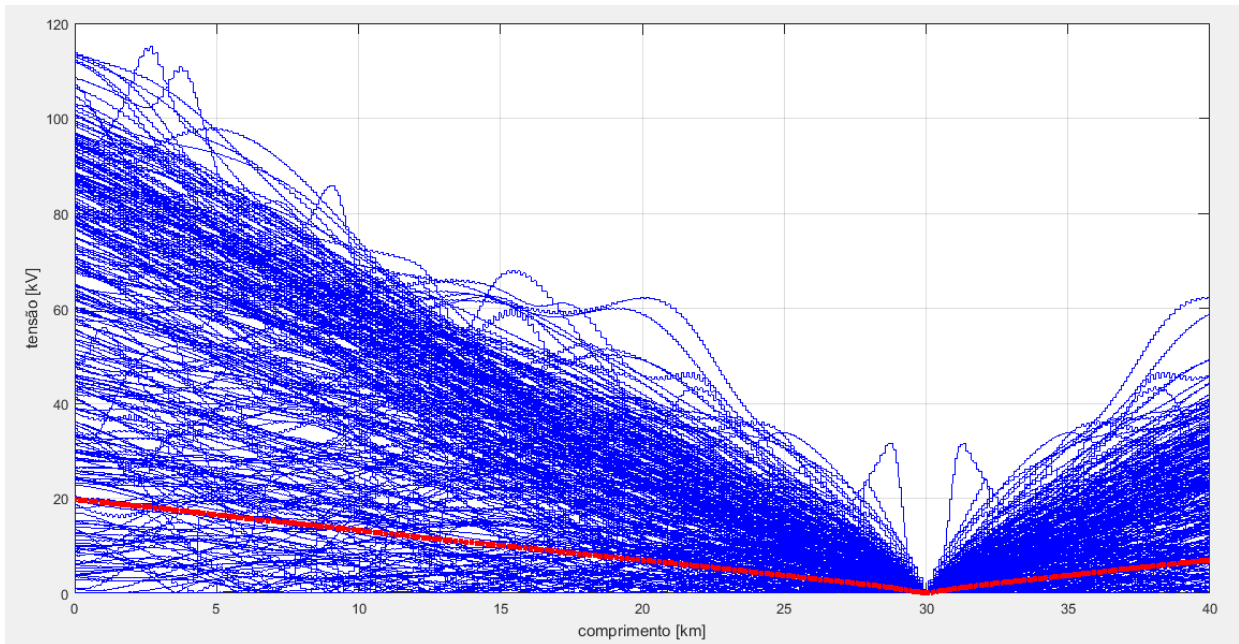


FIGURA 7 - Varredura do processo de minimização

Após o cálculo da curva média, explicitada em vermelho, pode-se calcular a posição em que ela é mínima, que nessa simulação indica 29.99 [km], ou seja, apresenta um erro absoluto de 10 [m] e relativo de 0.033 [%].

Pode-se avaliar também os pontos que implicam a mínima tensão de cada uma das varreduras realizadas ao longo do tempo, conforme mostra a Figura 8.

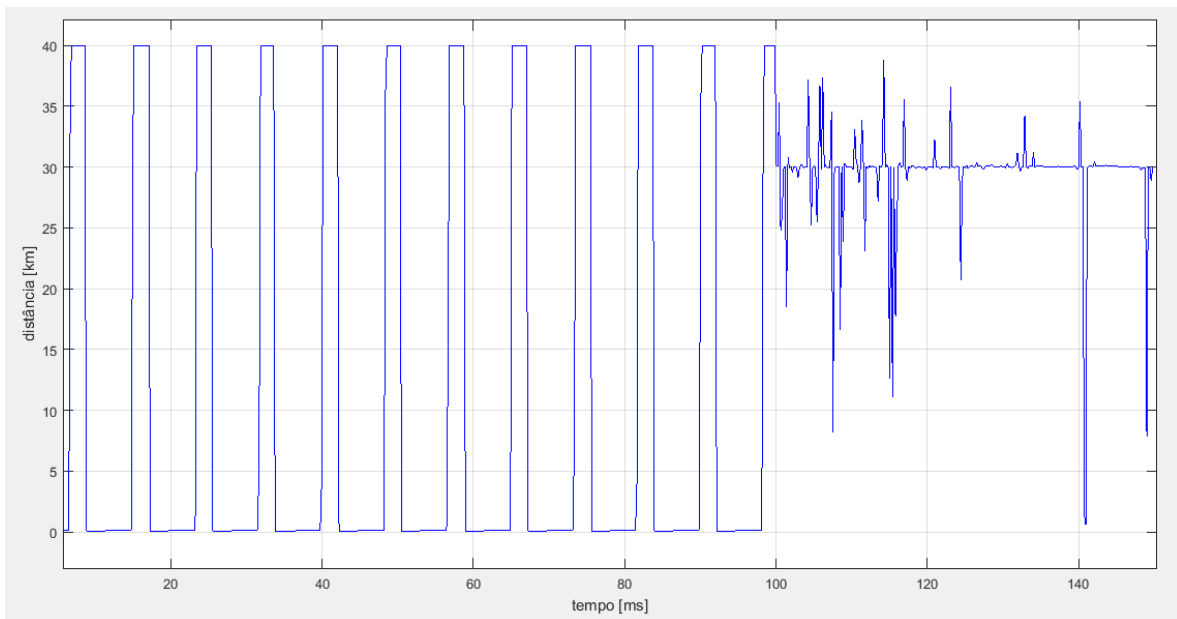


FIGURA 8 - Evolução do ponto de falta ao longo do tempo

Observa-se que antes da ocorrência da falta, o método proposto responde com uma oscilação retangular entre zero e o comprimento total da linha, indicando uma situação sã. Logo após a ocorrência do curto-circuito, há uma oscilação numérica por conta das reflexões de onda e órbita em torno da resposta procurada. A simplicidade da computação e a velocidade da resposta pode indicar uma possível utilização do método proposto também como função de proteção. A análise por janelas de tempo do conteúdo harmônico da forma de onda através da Transformada Short Term Fourier indica uma forte presença da componente DC após a ocorrência da falta sendo esse possivelmente esse fator o parâmetro de trip do sistema de proteção. É possível também avaliar que o código rapidamente orbita em torno da resposta após 3 [ms] da ocorrência da falta.

5.0 - CONCLUSÃO

Apresenta-se o equacionamento que modela o trânsito de ondas de tensão e corrente numa linha de transmissão de parâmetros plenamente distribuídos e ele se mostra uma generalização do método de Bergeron além de notável simplicidade para o manuseio algébrico ao se considerar as perdas modeladas por resistências e condutâncias. Considerando duas linhas distintas através do seccionamento dado pelo curto circuito, utiliza-se individualmente o equacionamento desenvolvido para calcular a tensão de falta vista por ambos os terminais. A varredura da minimização da diferença do módulo dessas tensões determina o ponto de falta com desempenho satisfatório e grande velocidade de computação.

O método numérico apresentado ainda pode ser mais bem explorado à medida que se desenvolva sua utilização para linhas trifásicas de parâmetros variáveis com a frequência.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Pino, Gabriel, *Localização de faltas durante transitórios eletromagnéticos* – São Paulo, 2014.
- (2) Junior, G. M., Rodrigues, E. C. N., Senger, E. C., Nakagomi, R. M., & Pellini, E. L. (2006). *Sistema para localização de faltas em linhas de transmissão com subestações conectadas em derivação*. São Paulo.
- (3) L. J. B. Bergeron, *Water hammer in hydraulics and wave surges in electricity*. Wiley, 1961
- (4) Dommel, H. W. (1969). Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (4), 388-399.
- (5) Doetsch, G., & Herschel, R. (1956). *Anleitungen zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation*.
- (6) LaForest, J. J. (1981). *Transmission-line reference book. 345 kV and above* (No. EPRI-EL-2500). General Electric Co., Pittsfield, MA (USA). Large Transformer Div.; General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Electric Utility Systems Engineering Dept.
- (7) Fuchs, R. D. (1977). *Transmissão de energia elétrica. Linhas Aéreas, 2*.
- (8) Dommel, H. W. (1986). *Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book)*. Bonneville Power Administration.
- (9) Scott-Meyer, W. (1982). *EMTP Rule Book. BPA (1982-4)*.
- (10) Senger, E. C., & Santana, N. D. (1998). Pré-filtragem da componente aperiódica exponencial para os algoritmos utilizados em relés de distância. *VI Seminário Técnico de Proteção e Controle (VI STPC), Natal, RN, Brasil, 27*.
- (11) Johns, A. T., & Jamali, S. (1990, November). Accurate fault location technique for power transmission lines. In *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution* (Vol. 137, No. 6, pp. 395-402). IET.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gabriel Pino obteve grau de bacharel em engenharia elétrica em 2014 pela Escola Politécnica da USP, durante sua graduação também estudou na Technische Universität Darmstadt-Alemanha. Trabalha no setor elétrico desde 2014 atuando em projetos de geração e transmissão. Atualmente é aluno de mestrado pela Escola Politécnica da USP e desenvolvedor de software na Enline MS. Possui interesse nos campos de pesquisa relacionados à proteção de sistemas de potência, simulação e modelagem de linhas de transmissão.

Giovanni Manassero Junior possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com ênfase em Sistemas de Potência. Atualmente é Professor Doutor da EPUSP, integra o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos da EPUSP e desenvolve projetos de pesquisa na área de Proteção, Controle e Automação de Sistemas Elétricos de Potência. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Medição, Controle, Correção e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: proteção de sistemas elétricos de transmissão e redes de distribuição, localização de faltas em linhas de transmissão, localização de faltas em redes de distribuição, faltas de alta-impedância, automação da distribuição e redes elétricas inteligentes (smart grids).