# Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando a Teoria das Ondas viajantes com Algoritmos Genéticos

Edvan C. Almeida\*. Danilo O. Sobreira\*. Bartolomeu F. Santos, Jr.\*. Aryfrance R. Almeida\*.

\* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí; Av. Ministro Petrônio Portela, S/N Centro de Tecnologia, Campus Ininga, CEP 64049-550, Teresina, Piauí, Brasil; (e-mail: edvan-carneiro@uol.com.br; danillosobreira@hotmail.com; bartolomeuf@ufpi.edu.br; aryfrance@ufpi.edu.br ).

**Abstract:** This work presents a new approach using Genetic Algorithm (AG) applied with the Theory of Traveling Waves (TOV) as an automatic method of locating faults in transmission lines. AG are fast in optimized and automatic solutions and TOV are widely used to locate faults in high frequency signals. This work aims to use AG and TOV to locate faults in transmission lines with a terminal using transient voltage signals. The nature of the research is applied, quantitative and exploratory, with computer simulation. The voltage signal analyzed it is simulated in the ATP software and contains 8000 points; a sample of 2% of this population is evaluated and evolved by the AG that seeks optimal solutions on how to solve the imposed objective function. Fault distances compatible with other techniques covered by the literature we were found. Unlike the vast majority of these techniques, in this method presented, the AG automatically locates the fault distance. Using 200 iterations, the implemented tool located the distance for all types of faults, managed to find them with a maximum relative error of 0.199% for phase-to-ground faults and a maximum of 0.756% for all other types of faults.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma nova abordagem usando Algoritmo Genético (AG) aplicado com a Teoria das Ondas Viajantes (TOV) como método automático de localização de faltas em linhas de transmissão. AG são rápidos em soluções otimizadas e automáticas e a TOV são bastantes utilizadas na localização de faltas em sinais de alta frequência. Este trabalho tem como objetivo utilizar AG e a TOV para a localização de faltas em linhas de transmissão com um terminal usando sinais transitórios de tensões. A natureza da pesquisa é aplicada, quantitativa e exploratória, com simulação computacional. O sinal de tensão analisado é simulado no *software* ATP e contem 8000 pontos, uma amostra de 2% dessa população é avaliada e evoluída pelo AG que busca soluções ótimas de como solucionar a função objetivo imposta. Foram encontradas as distâncias de faltas compatíveis com outras técnicas abordadas pela literatura. Diferente da grande maioria dessas técnicas, neste método apresentado, o AG localiza automaticamente a distância de falta. Utilizando 200 iterações, a ferramenta implementada localizou a distância para todos os tipos de falta, conseguiu encontra-las com um erro relativo máximo de 0,199% para faltas fase-terra e máximo de 0,756% para todos os outros tipos de faltas.

Keywords: Transmission Lines, Fault Locations, Traveler Theory, Evolution Systems, Genetic Algorithms.

*Palavras-chaves*: Linhas de Transmissão, Localização de Faltas, Teoria das Viajantes, Sistemas Evolutivos, Algoritmos Genéticos.

# 1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos de potência (SEP) a interligação entre as fontes que geram a energia elétrica e os consumidores finais é feita pelas linhas de transmissão (LT). A pesquisa sobre as técnicas de localização de falhas em linhas de transmissão é objeto de estudo em vários trabalhos científicos (Almeida et al. 2007, Almeida et al. 2014 e Souza et al. 2017). Quando esses defeitos ocorrem, eles podem causar a indisponibilidade da LT. Esta indisponibilidade pode trazer sobrecarga do fluxo de potência nas outras linhas de transmissão de energia elétrica do sistema de transmissão. O reestabelecimento da normalidade do sistema deve ser o mais imediato possível. Pois apesar do sistema está projetado para prever indisponibilidades de recursos, a probabilidade de que outras falhas possam ocorrer nas LT disponíveis, é alta, pois o sistema constituído pelas LT é aéreo e vulnerável a intemperes. A localização rápida da falha e o reconhecimento do tipo, agilizam o tempo para manutenção e recuperação do sistema.

Equipamentos para localização de faltas são construídos para estimar o seu local com precisão, para que a análise dos danos causados por estas, possam ser avaliados com rapidez. Estes equipamentos contam com *softwares* de localização de faltas que têm aliviado o esforço e os riscos associados à inspeção e manutenção de linhas de transmissão de longa distância (Hussain et al. 2015).

A literatura tem apresentado vários procedimentos para localização de falhas, separando-os em duas vertentes amplamente difundidas (Hussain et al. 2015): os algoritmos baseados em ondas viajantes, no domínio do tempo (Davoudi et al. 2012, Costa et al. 2012), e os baseados na frequência fundamental, no princípio da impedância (Jian et al. 2011, Hussain et al. 2014). Podem ser ainda reclassificados com base no:

- Modelo da linha de transmissão utilizada,
- Quantidade de terminais onde os dados são registrados,
- Uso de unidades de medição fasorial (PMUs) ou medições assíncronas.

O objetivo desse trabalho é implementar uma ferramenta computacional automatizada, que utilize Algoritmos Genéticos (AG) que recebem o sinal da falta e em conjunto com a teoria das ondas viajantes (Abreu, 201, Almeida et al. 2017), realiza a localização da faltas na linha de transmissão analisada, comportando-se como um *software* residente em um dispositivo de leitura do sinal de tensão localizado em apenas um terminal da linha. Diferente do que é a presentado em muitos outros trabalhos científicos (Hussain et al. 2014, Abreu, 2015, Hussain et al. 2015), que realizam a leitura em dois ou mais terminais.

O método aqui proposto utiliza as curvas de falta a partir da simulação no Alternative Transient Program (ATP) de um sistema trifásico de dois terminais, com medição em apenas um deles. É considerado que o sistema trifásico tem seus parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, utiliza os mesmos os dados de Abreu (2015), para simulação da LT no ATP. As simulações levarão em consideração os efeitos do ângulo de fase da falta, resistência de terra e também os parâmetros da fonte. O artigo está assim organizado: Após a Seção introdutória, é explicado o cálculo da distância de falta usando a teoria das ondas viajantes, Seção 2. A Seção 3 descreve a utilização de algoritmos genéticos para otimizar soluções de problemas. Na Seção 4 o modelo da LT onde será realizado a simulação das faltas é descrito. A aplicação e demonstração da técnica para localização de falta está na Seção 5. Na Seção 6, é discutido os resultados da aplicação do modelo.



Fig. 1 Diagrama de Laticce.

## 2. TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES (TOV)

A Fig. 1 apresenta o diagrama de Lattice (Souza et al. 2017), que descreve um sistema de dois terminais, quando neste ocorre uma falta, e os deslocamentos das ondas viajantes de acordo com a TOV.

Quando uma falta acontece, no ponto defeito na LT, são geradas ondas de tensão que se propagam nos dois sentidos da linha de transmissão. Ao encontrarem descontinuidade na LT as ondas são refletidas, retornando ao ponto de defeito, sendo mais uma vez refletidas e podem, também, serem refratadas para outra extremidade da linha (Almeida et al. 2017).

O ponto onde ocorre o defeito na LT está entre os dois terminais do sistema, A e B, e nestes tem instalados equipamentos para a medição dos sinais de tensão e corrente. A linha tem o comprimento medido por  $t_T$ , o tempo de propagação da primeira frente de onda que viaja a partir do ponto de falha até atingir o terminal A é dado por t<sub>1</sub>, o tempo para a onda ser refletida no terminal A viajar até o ponto de falha, e ser refletida no terminal A viajar até o ponto A é t<sub>2</sub>. A onda gerada na falta tem uma velocidade de propagação que é representada por v<sub>p</sub> e, então o comprimento d, desde a falta até o ponto de medição A, pode ser calculado como em (1):

$$d = [v_p (t_2 - t_1)]/2.$$
(1)

A frente de onda detectada no terminal A no instante  $t_3$  terá seu valor de tempo menor do que a onda detectada em A no instante  $t_2$ . Isso acontecerá se a falta ocorrer na segunda metade da linha de transmissão, pois a primeira frente de onda que foi refletida no terminal B será refratada em seguida no ponto de falta e chegará em A primeiro. A refração acontece em todas as faltas aterradas (Souza et al. 2017). O cálculo da distância, portanto, será dado por (2):

$$d = l_T - [v_p (t_2 - t_1)]/2.$$
<sup>(2)</sup>

Será utilizado a transformada de Clarke para a transformação modal dos sinais de tensão (Abreu, 2015). Como utilizaremos apenas um terminal para leitura da falta, precisaremos identificar as fases envolvidas e a metade da linha onde ocorreu a falta (Almeida et al. 2017).

#### 3. UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO (AG)

Os AG pertencem a uma classe de modelos computacionais inspirados na evolução das espécies (Hoffmann et al. 996, Bo et al. 2009, Davoudi et al. 2012). Os AG não trabalham diretamente nas variáveis a serem otimizadas, mas codificam soluções em potencial para um problema específico em cadeias de dados que imitam cromossomos. O AG aqui aplicado tem a mesma conotação da empregada por Holland (1986), em que a função *fitness* é avaliada como a própria previsão do classificador.

O AG começa com uma variedade populacional tipicamente aleatória de cromossomos codificados. Aos membros da população inicial são oferecidas oportunidades reprodutivas de tal maneira que, os cromossomos que representam soluções promissoras tenham maior probabilidade de se reproduzirem do que os medíocres (Davoudi et al. 2012). Essas soluções realizam a otimização de um sistema, melhores soluções, que são caracterizados por uma função objetivo que deve ser maximizada ou minimizada.

O sinal de tensão é mensurado no terminal da linha de transmissão em tempo discreto e seus valores armazenados para cada um desses instantes (Davoudi et al. 2012). Este sinal é formado por semirretas entre dois pontos. A equação (3) representa a inclinação de uma reta, entre dois pontos adjacentes, com intervalo de amostragem T.

$$f[\Delta T] = \frac{f[(n+1)T] - f[nT]}{\Delta T}$$
(3)

Onde n representa os intervalos de discretização do sinal de tensão no espaço de amostragem analisado N, sendo n = 0, 1, 2, 3, ..., N-1, N. Sabendo-se que em uma falta na LT, o sinal de tensão sofre variações bruscas devido as ondas viajantes. As maiores variações, isto é, as detecções das maiores inclinações do sinal de tensão trazem a informação das ondas viajantes captadas no terminal de medição. Os intervalos de tempo entre as ondas viajantes informam a distância onde ocorreu a falha. A função objetivo será dada por (4).

$$MaxObj(m) = Max\sum_{n} \left| \frac{V_{Modal}[(n+1)T] - V_{Modal}[nT]}{\Delta T} \right|$$
(4)

A equação (4) mostra que a maximizar a função objetivo é encontrar as maiores inclinações entre o ponto avaliado e o ponto posterior.

Na Fig. 2 é apresentado o fluxograma utilizado neste artigo, a geração das curvas de tensão no ATP, o carregamento destas curvas no Matlab, que aplica AG (sem toolbox específica) para a determinação dos tempos das cristas das ondas, após a entrega desses tempos realiza-se o cálculo da distância de falta. As curvas de tensão são geradas no ATP com frequência de amostragem de 400 kHz, em um intervalo de 20 ms. Então, cada curva de tensão é representada por 8.000 pontos. Após as curvas de tensão serem carregadas pelo Matlab, a transformada de Clarke é aplicada, novamente temos como resultado, três curvas de tensão, modo terra, modo aéreo direto e modo aéreo inverso. A população inicial de 160 indivíduos é produzida aleatoriamente, no intervalo de [1,8001], esse será o espaço de pesquisa de  $2^{L}$ , onde cada solução será uma cadeia de 13 bits de comprimento. Os indivíduos da população guardarão sua posição em relação ao tempo de 20 ms. Estes indivíduos são armazenados em um vetor de indivíduos. No início o AG é utilizado em cada uma das três curvas de tensão modal para 5 gerações, ao final das 5 gerações será medido a aptidão de todos os indivíduos. O melhor resultado define a tensão modal a ser utilizada para 50 gerações. O AG por dentro: primeiro a função de fitness avalia individualmente cada

cromossomo. Com a posição indicada por cada cromossomo e a indicada pelo ponto posterior, são encontrados os valores das tensões nos respectivos pontos. Aplicando (4), a aptidão do cromossomo será o módulo da subtração entre os valores de tensão encontrados. Na segunda etapa, a função Seleção é utilizada para escolher os cromossomos mais aptos. A seleção dos mais aptos é feita por torneio. Todos os cromossomos são reposicionados no vetor de indivíduos, começando pelos cromossomos que tenham maiores aptidões até os cromossomos com menores aptidões. Depois da seleção, são aplicados os operadores genéticos de cruzamento e de mutação, que irão criar a próxima geração. Após a aplicação dos operadores genéticos, a população aumenta seu tamanho, os filhos gerados substituem os pais menos aptos. É então, reestabelecido o tamanho original da população. Observa-se, se o critério de parada já foi atingido, se não, é iniciado uma nova avaliação da população (Davoudi et al. 2012).



Fig. 2 Metodologia Proposta

É utilizado como critério de parada, o número de gerações com valor 50, o número de cromossomos ou indivíduos será de 2% da quantidade de possibilidades de respostas, de um total de 8000. Será utilizado uma taxa de cruzamento de 70%, com dois pontos fixos de *crossover*, a 33% e 66% do tamanho do cromossomo. A taxa de mutação será 10%

aplicada em apenas um gene, menor parte do cromossomo. O gene escolhido será o mais significativo, devido à maior variação que esta mutação causará no cromossomo.

Quando o AG é finalizado serão entregues as posições dos valores de tensão que têm as maiores inclinações. Uma frente de onda pode ser formada por vários segmentos de reta, testase ponto a ponto até encontrar o pico, definindo assim o tempo da crista da onda. Com os tempos das cristas de ondas consecutivas se calcula a distância da falta utilizando (1) ou (2), finalizando com o registro da distância da falta e o cálculo do erro relativo.

# 4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA LT

Neste trabalho é modelado uma linha de transmissão de 500 kV em 60 Hz, transposta com parâmetros distribuídos e dependentes de frequência, sua topologia é ilustrada na Fig. 3. Com dois terminais, geração e medição no terminal A e acoplada ao terminal B, uma carga RL.



Fig. 3 Linha de Transmissão com dois terminais.

O modelo de torre de transmissão é apresentado na Fig. 4, é o mesmo modelo típico utilizado pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, na linha de transmissão que interliga as subestações de Teresina II, no estado do Piauí e de Sobral III, no estado do Ceará, que tem o comprimento total de 330 km (Abreu 2015).

O método proposto é aplicado às simulações realizadas no Alternative Transients Program (ATP), e para modelagem da linha de transmissão utilizou-se o bloco LCC (linha e cabos constantes). Neste bloco, o modelo de linha JMarti de parâmetros variantes na frequência foi utilizado, devido à sua precisão na análise de transitórios eletromagnéticos (Mamis et al. 2013). Neste modelo é considerado que se trata de um sistema trifásico de dois terminais com parâmetros distribuídos e dependentes de frequência. Os efeitos do ângulo de fase, resistência de falta e tipo de falta são investigados, sua representação está de acordo com a representação da Fig. 5.

As faltas simuladas levaram em consideração os ângulos de falta, 0°, 45° e 90°. Para variações da resistência de falta foram utilizados os valores de 1, 5, 10, 20 e 50  $\Omega$ . Os tipos de falta simulados foram, fase-terra (1G), fase-fase (2F), fase-fase-terra (2G), fase-fase-fase (3F) e fase-fase-fase-terra (3G). As distâncias de falta simuladas foram a 55, 110, 220 e

275 km do terminal A. Diferentes transitórios são gerados em uma falta, de acordo com cada variação de ângulo de incidência, resistência de terra, tipo de falta e distância. Podem aparecer transitórios amortecidos e com frequências próximas da frequência fundamental da tensão da linha de transmissão (Mamis et al. 2013). A tabela 1 resume todas possibilidades descritas anteriormente.



Fig. 4 Modelo da Torre de Transmissão de 500kV.



Fig. 5 Sistema de 500kV Modelado no ATP.

Tabela 1. Variáveis para simulação

Distância (km)	Ângulo (°)	Resistência de
55	0, 45, 90	1. 5. 10. 20. 50
110	0, 45, 90	1, 5, 10, 20, 50
220	0, 45, 90	1, 5, 10, 20, 50
275	0, 45, 90	1, 5, 10, 20, 50

## 5. ESTIMAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DAS FALTAS

Nesta seção discutiremos a aplicação dos algoritmos genéticos na estimação da localização das faltas em uma linha de transmissão de energia com base a TOV.

#### 5.1 Aplicação da TOV na Localização de Faltas

A Fig. 6 e a Fig. 7 apresentam leituras dos transitórios da tensão modal de falta a 220 km do terminal A e com ângulo de incidência de 45°. A Falta 2G está representa na Fig. 6 e a falta 1G na Fig. 7. Utilizando (1) para calcular a distância de falta com os valores de  $t_1$  e  $t_2$  da Fig. 6 e da Fig. 7, e  $v_p$ =300.000 km/s, foram encontradas as distâncias de 222,75 km e de 223,20 km respectivamente. Na Fig. 7, na falta 1G,  $t_3$  aparece entre  $t_1$  e  $t_2$ , corroborando com o diagrama de Laticce da Fig. 1, para faltas aterradas as ondas viajantes refletidas para um terminal, serão refratadas no ponto de falta para o outro terminal.



Fig. 6 Transitórios de tensão, falta bifásica não aterrada.



Fig. 7 Transitórios de tensão, falta fase-terra.

As cristas das ondas viajantes são os picos presentes no sinal de tensão modal até que o defeito seja normalizado ou o sistema entre em regime permanente de falta (Dutta et al. 2013).

#### 5.2 Localização das TOV com AG

O programa projetado no *Matlab* recebe as curvas de tensão simuladas no ATP, realiza a transformação modal, aplicando AG nas curvas de tensão modal, com os resultados recebidos do AG, utiliza-os para determinar os tempos das frentes de ondas viajantes, com estes tempos, estima-se a distância d do terminal A ao ponto de falta.

As tensões e correntes podem ter seus fasores V e I calculados em qualquer ponto da linha, por unidade de cumprimento, tendo uma impedância em série  $z = r + j\omega l$  e uma admitância em paralelo dada por  $y = g + j\omega c$ . Esses fasores são calculados por (5) e (6), respectivamente, (Stevenson, 1989):

$$V = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}.$$
 (5)

$$I = \frac{1}{z_0} C_1 e^{\gamma x} - \frac{1}{z_0} C_2 e^{-\gamma x}.$$
 (6)

Sendo r, l, g e c, resistência, indutância, condutância e capacitância da linha de transmissão por km. constante respectivamente. Também,  $\gamma = \sqrt{zy} a$ de propagação,  $z_0 = \sqrt{z/y}$  é a impedância característica da linha. As constantes C1 e C2 podem ser calculadas utilizando as condições de contorno dos terminais. A constante de transmissão da LT pode ser também definida por  $\gamma = \alpha + j\beta$ , com  $\alpha$  sendo a constante de atenuação, em *neppers* por km e  $\beta$  a constante de fase, em radianos por km (Stevenson, 1989). O cumprimento de onda  $\lambda$  é a distância ao longo da linha entre dois pontos da onda que difere em fase por 360°, ou  $2\pi$ rad. Sendo  $\beta$  a defasagem em rad/km, o comprimento de onda é:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}.$$
(7)

A velocidade de propagação da onda em km por segundos é:

$$v = f\lambda. \tag{8}$$

Onde  $f \notin a$  frequência em Hz e v a velocidade de propagação em relação aos parâmetros de linha, que pode ser simplificada por (9):

$$v \approx 1/\sqrt{lc}$$
 (9)

O valor encontrado em (9) será utilizado em (1) ou (2), dependendo do local em que ocorra a falha, juntamente com os tempos das TOV, para estimação da distância de falta.

Em resumo, para a localização da falta, utilizando o método proposto com AG, deve-se seguir os seguintes passos:

Escolha aleatória de valores que compõem o sinal de tensão faltoso discretizado, para criação da população inicial, Fig. 8;
Mensuração de cada cromossomo através da função objetivo, diferenciando os mais adaptados e adequando o tamanho original da população;



Fig. 8 População inicial e localização dos indivíduos.



Fig. 9 Localização dos indivíduos da 10ª geração.



Fig. 10 Saída de dados ao atingir o critério de parada.

- Escolher os melhores cromossomos e aplicar os operadores genéticos para criar a próxima geração, Fig. 9;

 Não satisfeito o critério de parada, o passo de mensuração do seu grau de adaptação deverá ser aplicado à nova geração, Fig. 10;

- Satisfeito o critério de parada os melhores cromossomos serão ser analisados, substituindo inclinação por pico, para localizar os pontos de cristas das ondas viajantes, Fig. 11;

- A primeira crista de frente de onda terá seu valor armazenado e corresponderá a  $t_1$ ;

- O tempo da segunda crista de frente de onda será armazenada em  $t_2$ , se esta for a reflexão da primeira onda no ponto de falta, se for uma refração da primeira onda que foi para o terminal remoto, será  $t_3$ ;

- Se o segundo tempo encontrado for  $t_2$ , será utilizado (1) para estimar a distância, se for  $t_3$ , então será utilizado (2).



Fig. 11 Dados tratados após aplicação do AG.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tipos de faltas descritas na Tabela 1 foram simuladas no ATP usando o modelo de linha aérea, com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, para obtenção dos transientes de falta. Os parâmetros de sequência positiva e utilizado a 60 Hz, foram obtidos de acordo com Vieira (2014) e são: I = 0,7172 mH/km e C = 16,1609 nF/km, aplicando (11) encontramos a velocidade de propagação do modo terra e do modo aéreo em (12) e (13), respectivamente:

$$v \approx 197.051,00 \ km/s$$
 (12)

$$v \approx 293.723, 12 \text{ km/s}$$
 (13)

A distância estimada da falta usando os tempos das ondas extraídos com o AG, a partir do sinal de tensão modal, o erro percentual total e o erro absoluto para 1G é fornecida na Tabela 2 e na Tabela 3 estes mesmos valores são apresentados para as falhas do tipo 2F, 2G, 3F e 3G. O Erro relativo e o Erro absoluto são calculados utilizando (14) e (15), respectivamente.

$$Erro\% = \frac{|Dr - De|}{CL} x100 \tag{14}$$

$$Erro(km) = |Dr - De| \tag{15}$$

Onde Dr é a distância real da falta, De é a distância estimada calculada a partir dos tempos encontrados e CL é o comprimento total da linha de transmissão.



Fig. 12 Falta 1G, tempo, iterações e erro relativo.



Fig. 13 Falta 2G, 2F, 3G, 3F, tempo, iterações e erro relativo.

Foram realizadas 200 iterações para cada combinação das variáveis representada na Tabela 1. Os gráficos apresentados nas Fig. 12, Fig. 13 e Fig. 14 apresenta o tempo de processamento para cada iteração, o percentual de iterações válidas e o Erro relativo. Foi considerada válida, a iteração que apresentou o erro relativo igual ou inferior ao Erro destacado nos gráficos, para cada combinação de simulação.

A Fig. 12 apresenta, para falta 1G considerando todas as resistências de falta, o tempo de processamento e o percentual das iterações válidas para os ângulos  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ , o Erro relativo foi mostrado apenas para os ângulos de  $45^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ , pois, para o ângulo de  $0^{\circ}$  o Erro relativo foi considerado até 5% para validar a iteração. Para os ângulos de  $45^{\circ}$  e  $90^{\circ}$  o valor do Erro relativo máximo foi de 0,199%.

É apresentado na Fig. 13, para falta 2G, 2F, 3G e 3F considerando todas as resistências e todos os ângulos de falta, o tempo de processamento, o percentual das iterações e o Erro relativo. O Erro relativo máximo e mínimo foi de 0,756% e 0,315% respectivamente.



Fig. 14 Falta 1G a 220 km, tempo, iterações e erro relativo.

A Fig. 14 evidencia, para falta 1G considerando todas distâncias de falta, o tempo de processamento, o percentual das iterações válidas e o Erro relativo para o ângulo de 45° de falta. A resistência de falta foi variada nos valores de 1, 5, 10, 20 e 50  $\Omega$ , e o Erro relativo permaneceu o mesmo, com valor de 0,065%.



Fig. 15 Comparação de Métodos.

A Fig. 15 compara o resultado encontrado pelo Método Proposto neste trabalho com método apresentado por Abreu (2015). Para realização desta comparação, foram utilizados os valores encontrado em faltas do tipo 1G, com resistências de falta de 1, 10, 20 e 50  $\Omega$  e com ângulos de 45° e de 90° de falta.

## 7. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado uma nova técnica automatizada para localização de faltas em linhas de transmissão baseada em TOV no sinal de tensão de uma LT e algoritmo genético. A detecção das ondas viajante é obtida pelo AG que localiza as maiores inclinações. Estas inclinações são convertidas em picos, com seus instantes de tempo registrando a chegada das cristas das ondas viajantes ao terminal de medição. O processamento destes tempos é realizado para determinar a distância entre o terminal de medição e o ponto de falta. O método é aplicado a cinco tipos de faltas, variando o ângulo e resistência de falta, com 200 iterações por combinação de variações, em uma linha aérea trifásica com representação de parâmetro distribuído dependente da frequência.

Para faltas 1G o maior Erro relativo foi de 0,199%, entre todas as distâncias e todas as resistências de falta, para os ângulos de 45° e 90°, sendo o ponto defeito encontrado em

95,5% das iterações. Quando comparadas as faltas 2G, 2F, 3G e 3F o resultado é igual para as mesmas distâncias, o maior Erro relativo registrado foi de 0,756% para os ângulos de 0°, 45° e 90°, o ponto defeito foi encontrado em no mínimo, 91,6% das iterações. Para a distância de falta de 220 km do tipo 1G variando a resistência e o ângulo de falta, o Erro relativo registrado foi o mesmo em todas as simulações, 0,065%. Demostrando que a precisão do método é insensível variações na resistência de faltas e também as variações no ângulo no instante da falta.

A proposta apresentada neste trabalho, utilizando TOV e AG, para a localização da falta mostrou resultado satisfatório, melhor do que os valores encontrados na literatura (Davoudi et al. 2012, Abreu, 2015).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal do Piauí – UFPI.

## REFERÊNCIAS

- Abreu, F.C.M. (2015). Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada wavelet sob influência de ruído branco. *Dissertação* (*Mestrado em Engenharia Elétrica*) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.
- Almeida, A.R., Barros, A.K., and Sousa, M.G., (2007). Faults Location in High Voltage Transmission System Using ICA. *IEEE Conf. on Electrical Engineering*, pp. 1-6.
- Almeida, A.R., Almeida, O.M., Silva, J.P., Alves, M.H.S., and Abreu, F.C.M., (2014). Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão a partir de Registros Oscilográficos Usando Análise de Componentes Independentes. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu – PR, Brasil. 22-25/04/2014;
- Almeida, A. R., Almeida, O. M., Junior, B. F. S., Barreto, L. H. S. C., & Barros, A. K. (2017). ICA feature extraction for the location and classification of faults in highvoltage transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 148, 254–263.
- Bo, W., Jiang, Q., and Cao, Y., (2009). Transmission network fault location using sparse PMU measurements. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, China, 6–7 April, 2009.
- Costa, F. B., Monti, A., Lopes, F. V., Silva, K. M., P. Jamborsalamati, and Sadu, A., (2017). Two-terminal traveling-wave-based transmission-line protection, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1382–1393.

- Davoudi, M.G., Sadeh, J., and Kamyab, E., (2012). Time domain fault location on transmission lines using genetic algorithm, *Environment and Electrical Engineering* (*EEEIC*), 11th International Conference, pp.1087,1092, 18-25 May 2012.
- Dutta, P., Esmaeilian, A., and Kezunovic, M., (2014). Transmission line fault analysis using synchronized sampling, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 29, No. 2, pp. 942-950, April 2014.
- Hoffmann, F. and Pfister G., (1996). Genetic Algorithms and Soft Computing, chapter Learning a Fuzzy Control Rule Base Using Messy Genetic Algorithms, pages 279-305. Physica-Verlag, A Springer-Verlag Company.
- Holland, J.H., (1986). Machine learning, an artificial intelligence approach. Volume II, chapter Escaping Brittleness: The possibilities of General Purpose Learning Algorithms Applied to Parallel Rule-Based Systems, pages 593-623. Morgan Kaufmann.
- Hussain, S. and Osman, A.H., (2014). Fault location on series and shunt compensated lines using unsynchronized measurements, *Electric Power Systems Research*, Volume 116, November 2014, Pages 166-173, ISSN 0378-7796R.
- Hussain, S. and Osman, A.H., (2015). Genetic algorithm based fault locator scheme for three-terminal transmission lines using asynchronous measurements. 6th Int. Conf. Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), Istanbul, Turkey, 27–29 May 2015.
- Mamis, M.S., Arkan, M., Keles, C.: Transmission lines fault location using transient signal spectrum, *Electr. Power Energy Syst.*, 2013, 53, pp. 714–718.
- Stevenson WD. *Elements of power system analysis*. McGraw Hill; 1989.
- Souza, D.P.M.D., Christo, E.S., and Almeida, A.R., (2017). Location of Faults in Power Transmission Lines Using the ARIMA Method. *Energies*, 10, 1596.
- Vieira, O. L. (2014). Ferramenta computacional para cálculo da impedância série e capacitância de linhas aéreas de transmissão. *Monografia - Departamento de Engenharia Elétrica*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Zhang, J., Zhou H., and Qian, J., (2011). A two-terminal fault location algorithm using asynchronous sampling based on genetic algorithm. *Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, International Conference, vol.2, pp.1513,1516, 16-20 Oct. 2011.