

# LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO COMPUTAÇÃO DISTRIBUÍDA E ALGORITMO HEURÍSTICO

ALEXANDRE MENEZES DE AGUIAR\*, SILVIO GIUSEPPE DI SANTO†, LEIVIANE CAMARÇO BARBOSA FERREIRA‡, LUIS FERNANDO MOREIRA MACHADO§, ANDRÉ LUIZ VEIGA GIMENES¶, MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA||

\**Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, nº 158 CEP: 05508-010  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo, São Paulo, Brasil*

Emails: alexandre.menezes.aguiar@usp.br, silviogiuseppe@usp.br,  
leiviane.barbosa@usp.br, luisfernando.m.machado@usp.br, gimenes@gmail.com,  
udaeta@pea.usp.br

**Abstract**— With the advance of automation and communication technologies, the distribution grids are becoming smarter along the years and the demand for power quality and a fast restoration after a fault is of great concern for utilities as for consumers. Since one of the major concern is the fast system restoration after a fault occurrence, this paper proposes a solution for the fault location problem using distributed computing, once distributions grids are, in many cases, composed of hundreds of paths. To locate the fault, the solution uses voltage's and current's phasors acquired from the substations terminals. The fault location solution is composed of three main algorithms, being the first responsible for signal processing, the second for the search process control, and the third for the fault distance evaluation inside a path. To verify its efficiency and accuracy a large number of simulations were conducted in ATP/EMTP software, showing that the fault location mean error obtained by the solution was smaller than 11% of the feeder's length.

**Keywords**— Fault Location, Distribution grid, Distributed computing.

**Resumo**— Com o avanço das tecnologias de automação e comunicação, as redes de distribuição estão se tornando mais inteligentes ao longo dos anos e a demanda por qualidade de energia e uma rápida restauração após uma falta são de grande preocupação para as concessionárias e para os consumidores. Como uma das maiores preocupações é a rápida restauração do sistema após uma ocorrência de falha, este artigo propõe uma solução para o problema de localização de faltas utilizando computação distribuída, uma vez que as grades de distribuição são, em muitos casos, compostas por centenas de caminhos. Para localização da falta, a solução usa os fasores de tensão e corrente adquiridos dos terminais das subestações. A solução de localização de faltas é composta de três algoritmos principais, sendo o primeiro responsável pelo processamento do sinal, o segundo pelo controle do processo de busca e o terceiro pela avaliação da distância da falta dentro de um caminho. Para verificar sua eficiência e precisão, um grande número de simulações foi realizado no software ATP/EMTP, mostrando que o erro médio de localização da falta obtido pela solução foi menor que 11% do comprimento do alimentador.

**Palavras-chave**— Localização de faltas, Computação distribuída.

## 1 Introdução

Com o objetivo de melhor contextualizar o problema de localização de faltas utilizando computação distribuída, este capítulo está dividido em duas seções: 1.1 e 1.2. Portanto, a seção 1.1 apresenta os desafios da localização de faltas em redes de distribuição, e principais dificuldades enfrentadas pelos métodos existentes de localização de faltas; A seção 1.2 apresenta os benefícios em considerar a computação distribuída na localização de faltas em redes de distribuição.

### 1.1 Desafios da localização de faltas em redes de distribuição

Os sistemas de distribuição cobrem grandes áreas e estão sujeitos às intempéries que ocorrem em zonas concentradas, o que leva a ocorrência de inúmeros eventos de curto-circuito e, consequentemente, a interrupção no fornecimento de energia elétrica. A interrupção no fornecimento de energia leva a muitos prejuízos tanto para o setor comercial e industrial quanto aos usuários residenciais.

Nestes casos, há uma elevação nos índices de qualidade de fornecimento de energia, como o DEC e o FEC, o que gera prejuízos, também, à própria concessionária de energia.

A maioria dos curtos-circuitos, que acontecem nos sistemas elétricos de potência, possui natureza transitória, como no caso de faltas causadas por descargas atmosféricas e galhos de árvores que tocam os condutores em casos de ventanias, normalmente solucionados por religamento automático. Nesses casos, as concessionárias, que geralmente utilizam as reclamações de falta de energia realizadas pelos consumidores, ficam sem os registros desses eventos. Isso as leva a não programação de manutenções preventivas nesses locais, o que, com o passar do tempo, pode acarretar em condições mais severas de falta.

Dessa forma, diversos métodos de localização de faltas vêm sendo desenvolvidos. Muitos desses métodos (Shafiullah et al., 2017; Zhang et al., 2008; Ferreira et al., 2012; Teng et al., 2014; Morales-Espana et al., 2010; Qianqian et al., 2013; Jose et al., 2013) são aplicados em localização de faltas em redes de distribuição convencionais, ou

seja, que não possuem injeção de geração distribuída. Porém, com o avanço da tecnologia de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, diversos países vêm diversificando sua matriz energética, como é o caso, por exemplo, da Alemanha que, segundo Burger (2014), até 2014 já contava com 31% de sua produção de energia elétrica advindas desses tipos de fontes. Muitas dessas fontes renováveis podem ser instaladas diretamente na rede de distribuição, distribuindo-as em diversos pontos da rede, trazendo vantagens tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores finais.

Como vantagens, podem-se citar a postergação dos investimentos em expansão de geração convencional e em construção de novas linhas de transmissão, redução de perdas técnicas, redução do impacto ambiental, melhoria do perfil de tensão etc. Entretanto, isso se torna um desafio para a localização de faltas, uma vez que modelos confiáveis desses tipos de fontes devem ser desenvolvidos e, além disso, como há fluxo de potência em múltiplas direções nos alimentadores radiais, os métodos convencionais, como os citados anteriormente, podem falhar na localização da falta. Assim, diversos métodos para lidar com este tipo de problema vêm sendo desenvolvidos e podem ser encontrados na literatura, como nas referências (Zhang et al., 2018; Manassero et al., 2017; Dehghani et al., 2017; Hagh et al., 2012; Liu et al., 2013; Brahma, 2011; Mora-Florez et al., 2015; Alwash et al., 2014).

Outros desafios encontrados para a localização de faltas em redes de distribuição com geração distribuída é a desregulamentação do setor elétrico e a liberdade de acesso de unidades de geração distribuída. Além disso, os proprietários das unidades de geração distribuída não são obrigados a disponibilizarem as medições dos sinais de tensão e corrente para a concessionária, o que dificulta sobremaneira o processo de localização.

O método de localização de faltas utilizando programação distribuída, proposto neste artigo, é capaz de localizar corretamente o ponto da falta utilizando somente dados de tensão e corrente disponíveis na subestação da concessionária, bem como os parâmetros dos trechos dos alimentadores e as estimativas das cargas. A estimativa das cargas é uma tarefa difícil, porém na literatura existem diversos métodos, como em Asber et al (2007), capazes de realizar tal estimativa. O método tem a vantagem de fornecer rapidamente os prováveis pontos de ocorrência do defeito, mesmo quando o número de ocorrências é elevado (como no caso das redes de distribuição).

## 1.2 Computação distribuída e paralela

Os benefícios da utilização de computação paralela se tornam evidentes quando problemas que

envolvem um considerável número de processos, que podem ser tratados de maneira independente, devem ser resolvidos. Desta forma, esses tipos de problemas são, muitas vezes, resolvidos em um tempo menor se comparados com o processamento serial.

Segundo Bertsekas e Tsitsiklis (1997), a necessidade por uma computação rápida surgiu inicialmente pela busca por soluções de equações diferenciais parciais (EDPs), as quais surgem em problemas de Dinâmica de Fluidos, Predição do Tempo, Campos Eletromagnéticos, dentre muitos outros. Entretanto, outros tipos de problemas, que necessitam de uma computação de larga escala, vêm surgindo, como é o caso do problema a ser tratado neste trabalho, que envolve a localização de faltas em redes de distribuição.

Dessa maneira, para minimizar o tempo de obtenção do local de ocorrência da falta, o método proposto busca pelo local da falta de forma paralela, ou seja, os trechos da rede de distribuição, que podem ser numerosos, onde, por exemplo, um alimentador urbano de uma concessionária do sudeste do Brasil com 25 km de comprimento (somados os troncos e os ramais laterais) pode chegar a ter cerca de 500 nós, são analisados de forma paralela pelos núcleos de processamento disponíveis, reduzindo o tempo de determinação do ponto de ocorrência da falta, para cada ocorrência. É importante ressaltar a possibilidade de escalonar a solução na ocorrência de múltiplos eventos de curto-circuito no sistema de distribuição. Assim, pretende-se que o local de ocorrência da falta seja determinado no menor tempo possível, minimizando o tempo de deslocamento das equipes de manutenção e, conseqüentemente, o tempo de não abastecimento ao consumidor.

Para tornar possível o paralelismo, diversos computadores constituídos por inúmeros núcleos de processamento são interligados entre si, por meio de uma rede computacional, formando um cluster. Segundo Pitanga (2003), um cluster é definido como um conjunto de nós processadores autônomos, que interligados se comportam como um sistema de imagem única. O conceito de sistema de imagem única estabelece que um sistema paralelo ou distribuído deve se comportar como um sistema centralizado, do ponto de vista do usuário, independentemente deste ser composto por diversos processadores ou recursos geometricamente distribuídos. Ainda segundo Pitanga (2003), os clusters podem ser classificados, basicamente, em quatro tipos: alta disponibilidade, balanceamento de carga, híbrido entre os dois primeiros e processamento distribuído ou processamento paralelo.

### 1.2.1 Alta disponibilidade

Esse tipo de cluster visa manter a alta disponibilidade de serviços aos usuários por meio de redundâncias de sistemas computacionais. Todos os computadores do cluster agem monitorando um ao outro e, na detecção de uma falha, automaticamente um assume a tarefa do outro, possibilitando a continuidade do serviço. O monitoramento é realizado por meio de um software, o qual deve ter conhecimento dos serviços em andamento em cada computador para que a continuidade do serviço seja mantida.

### 1.2.2 Balanceamento de carga

Esse tipo de cluster é normalmente empregado, segundo Pitanga (2003), em redes onde diversos servidores, dedicados à prestação de serviços, estão disponíveis, como por exemplo, redes de internet e redes empresariais. Em diversas aplicações, tais servidores podem desempenhar o mesmo tipo de serviço sendo que, no evento de uma requisição de tarefa, dois ou mais servidores podem responder ao mesmo tempo.

De acordo com Pitanga (2003), o balanceamento de carga não se resume simplesmente no redirecionamento das tarefas para outros servidores, mas também é necessário que o equipamento encarregado de realizar o balanceamento seja capaz de realizar verificação permanente da comunicação, checagem dos servidores e redundância.

### 1.2.3 Combinação entre alta disponibilidade e balanceamento de carga

Nesse tipo de cluster, uma combinação entre os tipos descritos nos itens 1.2.1 e 1.2.2 é realizada, provendo, desta forma, um aumento da disponibilidade e escalabilidade dos serviços e dos recursos. Como exemplificado em Pitanga (2003), esse tipo de cluster é comumente empregado em servidores de internet, e-mail e ftp.

### 1.2.4 Processamento distribuído e paralelo

Para Pitanga (2003), nesse tipo de cluster é possível obter um aumento de disponibilidade e de desempenho das aplicações, onde uma tarefa computacional pode ser dividida em tarefas menores para serem processadas pelos núcleos disponíveis.

Esse tipo de cluster é o que foi empregado neste trabalho, onde a busca pelo ponto de ocorrência da falta, através dos trechos dos alimentadores de distribuição, foi realizada de forma paralela pelos núcleos de processamento disponíveis em cada nó (computador) do cluster.

## 2 Método de localização de faltas proposto

Com o objetivo de explanar, de forma clara, o método de localização de faltas proposto neste artigo, esta seção está dividida em duas subseções:

2.1 (modelagem da rede de distribuição) e 2.2 (algoritmo de localização de faltas).

### 2.1 Modelagem da rede de distribuição

O método de localização de faltas aqui proposto, utiliza os fasores de tensão e corrente obtidos por meio da medição dos sinais de tensão e corrente na Estação Transformadora de Distribuição (ETD). Além disso, o método utiliza como dados de entrada a matriz de admitâncias da rede de distribuição, uma estimativa da impedância das cargas no instante de ocorrência da falta, os equivalentes da subestação, bem como os equivalentes das unidades de geração distribuída.

Os alimentadores de distribuição são compostos por condutores que possuem uma impedância série e capacitâncias entre estes e o solo. Neste artigo, todos os alimentadores foram considerados trifásicos com tensão nominal de 13,8 kV. Os trechos dos alimentadores podem ser representados por um circuito pi por meio de um quadripolo, com constantes ABCD, que relaciona as tensões e correntes entre os seus terminais ( $S$  e  $R$ ), cujo comprimento da linha entre ambos é  $\ell$ . O circuito pi é composto por uma reatância indutiva e resistência em série (1) e capacitâncias divididas igualmente em ambos os lados do circuito, descrito na eq (2) e eq. (3). Desta forma, como os trechos podem ser não transpostos, foram utilizadas as equações a seguir para determinar o circuito  $\pi$  (Bowman and McNamee, 1964).

$$[Z_{SR}] = [B_{SR}] \quad (1)$$

$$[Y_S] = \{[D_{SR}] - [I_d]\} [B_{SR}]^{-1} \quad (2)$$

$$[Y_R] = [B_{SR}]^{-1} \{[A_{SR}] - [I_d]\} \quad (3)$$

$$[A_{SR}] = [y_l]^{-1} [M] [\cosh(\gamma_j \ell)]_D [M]^{-1} [y_l] \quad (4)$$

$$[B_{SR}] = [y_l]^{-1} [M] [\gamma_j \sinh(\gamma_j \ell)]_D [M]^{-1} \quad (5)$$

$$[D_{SR}] = [M] [\cosh(\gamma_j \ell)]_D [M]^{-1} \quad (6)$$

Onde  $[M]$  e  $\gamma_j$  são, respectivamente as matrizes dos autovetores e dos autovalores da matriz descrita pela eq. (7).

$$[P] = [y_l] [z_l] \quad (7)$$

O símbolo  $[\cdot]_D$  significa matriz diagonal,  $[y_l]$  e  $[z_l]$  são, respectivamente, a matriz de impedâncias série e a matriz de admitâncias shunt da linha por unidade de comprimento, tais matrizes possuem dimensão  $n \times n$ , e  $[I_d]$  é a matriz identidade.

As cargas e os transformadores foram modelados em conjunto (na mesma matriz de admitâncias), uma vez que a impedância “vista” dos terminais dos transformadores depende do seu tipo de ligação. As cargas foram consideradas contendo impedância constante com a tensão e conectadas em estrela, sendo que estas não contribuem com a falta.

Os equivalentes de Thevenin são usados para representar as subestações e barras onde as unidades de geração distribuída estão conectadas. Nesses casos, são utilizados os níveis de curto-circuito trifásico e fase-terra em cada barra para determinar as impedâncias equivalentes e o fluxo de potência pré-falta para determinar os equivalentes das tensões.

## 2.2 Algoritmo de localização de faltas

O algoritmo de localização de faltas é dividido em um processo de busca da falta pelos trechos da rede e um de análise de cada trecho, onde este processo realiza uma minimização de uma função objetivo. O método de localização de faltas proposto tem como base o método desenvolvido em Massanero (2017), o qual é aplicado somente para busca serial dos trechos.

O processo de busca da falta pelos trechos, foi implementado de forma que os trechos fossem distribuídos entre os núcleos de processamento disponíveis. A figura 1 mostra o fluxograma de como o processo de busca pelo ponto da falta pela rede de distribuição é realizado.

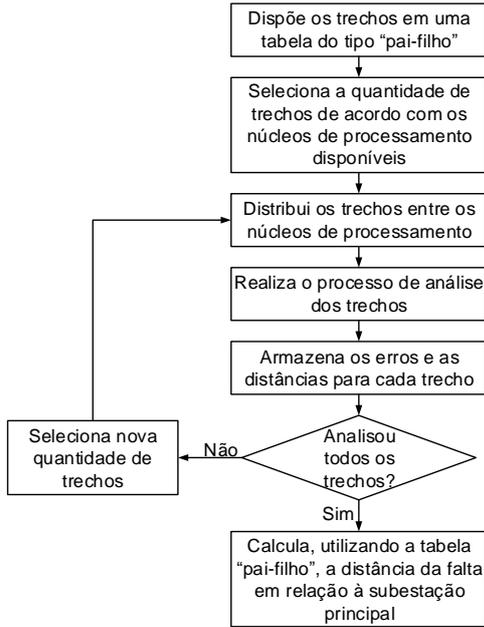


Figura 1: Fluxograma do processo de busca dos trechos

Já o processo de análise funciona conforme o fluxograma apresentado na figura 2, onde foi utilizado o método de otimização *Pattern Search*.

Para entender melhor o fluxograma apresentado na figura 2, é apresentado um detalhamento das equações utilizadas para determinar o erro de uma falta estar em um determinado ponto da rede de distribuição. A matriz de admitâncias é alterada dividindo-se o trecho em análise em duas partes, uma com comprimento  $x$  e outra com comprimento  $\ell - x$ , de forma que um nó correspondente

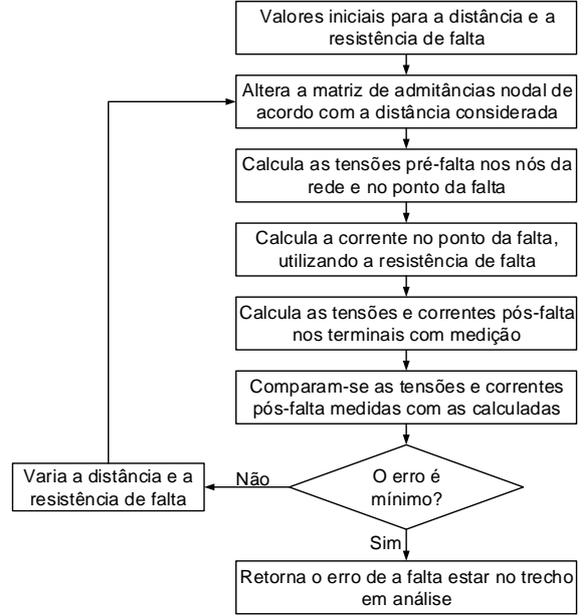


Figura 2: Fluxograma do processo de análise dos trechos

ao ponto da falta seja criado nesta. Isso permite que uma fonte de corrente, a qual será explicada adiante, seja inserida no circuito e que a admitância correspondente a cada parte do trecho seja alterada durante o processo de minimização da função objetivo.

As tensões pré-falta nas barras são calculadas invertendo-se a matriz de admitâncias da rede conforme eq. (8).

$$[V_{bus}] = [Y_{bus}]^{-1} [I_{bus}] \quad (8)$$

Onde, como exemplo,

$$[I_{bus}] = \begin{bmatrix} [I_N^{G1}] & [0] & [0] \\ \dots & [0] & [I_N^{G2}] & [0] & \dots & [0] \end{bmatrix}^T$$

e as correntes  $[I_N^{G1}]$  e  $[I_N^{G2}]$  são calculadas por meio dos equivalentes dos terminais com geração, cujos cálculos se encontram nas equações (9) e (10).

$$[I_N^{G1}] = [Z_{eqv}^{G1}]^{-1} [E_{abc}^{G1}] \quad (9)$$

$$[I_N^{G2}] = [Z_{eqv}^{G2}]^{-1} [E_{abc}^{G2}] \quad (10)$$

A determinação da corrente de falta é dependente do tipo de falta, os quais podem ser: fase-terra; dupla fase-terra; dupla fase e trifásico. Desta forma, a função objetivo é escolhida de acordo com o tipo de falta. Tomando a eq. (11) como modelo matemático da falta, é possível obter equações específicas para o cálculo da corrente de falta para cada tipo de falta mencionado anteriormente.

$$[R_F] = \begin{bmatrix} R_a^F + R_n^F & R_n^F & R_n^F \\ R_n^F & R_b^F + R_n^F & R_n^F \\ R_n^F & R_n^F & R_c^F + R_n^F \end{bmatrix} \quad (11)$$

O cálculo da corrente de falta é realizado com base no equivalente de Thévenin, extraído da eq. (8), e na matriz de resistência de falta, desta forma obtêm-se a eq. (12). Onde,  $[R_F]^{-1}$  foi definido como  $[Y_F]$ , e  $[Y_{FF}]$  a admitância da rede vista do ponto da falta.

$$[I^F] = [Y^F] \{ [Y^{FF}] + [Y^F] \}^{-1} [Y^{FF}] [V^F] \quad (12)$$

Onde  $[V^F]$  é a tensão pré-falta no ponto da falta.

Calculada a corrente de falta, esta é inserida no vetor de correntes injetadas nos nós na posição correspondente ao ponto da falta ( $F$ ), conforme mostra eq. (13).

$$[I_{bus}^F] = \begin{bmatrix} [I_N^{G1}] & \dots & -[I^F] \\ \dots & [0] & [I_N^{G2}] & [0] & \dots & [0] \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

Então, por meio da matriz de admitâncias da rede e do vetor de correntes da calculado na eq. (13), calcula-se o vetor de tensões pós-falta nos nós da rede, na eq. (14).

$$[V_{bus}]_{pos} = [Z_{bus}]^{-1} [I_{bus}^F] \quad (14)$$

Calculado o vetor de tensões pós-falta nos nós da rede, é necessário calcular as correntes pós-falta que fluem pelos circuitos dos terminais onde se tem medição. Assim, calculadas as tensões e correntes pós-falta nos terminais com medição, estas são comparadas às tensões e correntes pós-falta medidas, de acordo com o erro calculado na eq. (15).

$$erro = \sqrt{\sum_i \sum_j \left| \frac{(V_{j-Ti}^{posM} - V_{j-Ti}^{posC})}{V_{j-Ti}^{posM}} \right|^2} + \sqrt{\sum_i \sum_j \left| \frac{(I_{j-Ti}^{posM} - I_{j-Ti}^{posC})}{I_{j-Ti}^{posM}} \right|^2} \quad (15)$$

Onde,

- $V_{j-Ti}^{posM}$  é a tensão pós-falta da fase  $j$  medida no terminal  $i$ ;
- $V_{j-Ti}^{posC}$  é a tensão pós-falta da fase  $j$  calculada no terminal  $i$ ;
- $I_{j-Ti}^{posM}$  é a corrente pós-falta fluindo na fase  $j$  medida no terminal  $i$ ;

- $I_{j-Ti}^{posC}$  é a corrente pós-falta fluindo na fase  $j$  calculada no terminal  $i$ ;

O erro é minimizado através da variação da resistência de falta e da posição da falta no trecho em análise. Desta forma, ao obter o erro mínimo das tensões e correntes, determina-se a posição e resistência da falta no trecho.

### 3 Avaliação do método de localização de faltas

Os algoritmos foram avaliados a partir de três redes de distribuição, cujos parâmetros foram extraídos de (Manassero et al., 2017), onde foram analisadas faltas em diversas condições, tais como: distância, resistência e tipo. Testes de sensibilidade, quanto a desvios nos fasores de tensão e corrente, foram realizados.

A figura 3 apresenta a rede de distribuição de 12 trechos. Esta é uma rede de distribuição radial com comprimento total de 14.4km, tensão nominal de 13.8kV e quatro unidades de geração distribuída.

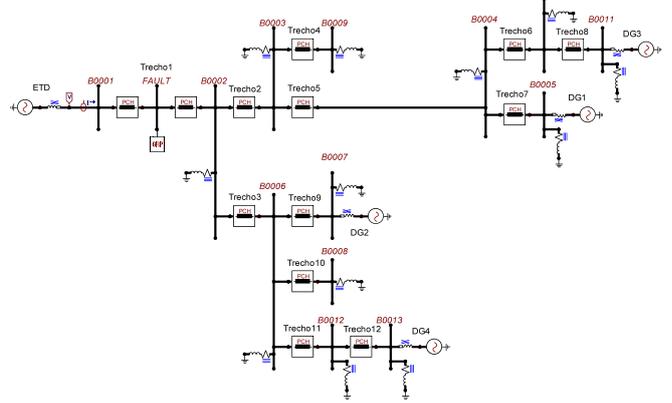


Figura 3: Rede de distribuição - 12 Trechos

Em todas as redes, para cada trecho, faltas foram simuladas no ATP/EMTP em três distintos pontos com cinco diferentes resistências de falta (0.5Ω, 1Ω, 5Ω, 10Ω e 50Ω) e quatro tipos de falta (AN, BC, BCN e ABC).

A tabela 1 mostra os resultados obtidos para os erros na localização da falta na rede de 12 trechos, considerando que o método identificou corretamente o trecho.

Tabela 1: Erros na localização da falta - 12 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	111.3	50.3	106.1	50.0
Desvio-Padrão	215.2	92.5	173.8	84.9
Máximo	1072.0	380.6	851.5	392.5
Mínimo	0.53	1.74	0.12	0.44

A figura 4 apresenta a rede de distribuição de 18 trechos. Esta é uma rede de distribuição em malha com comprimento total de 20.4km, tensão nominal de 13.8kV e seis unidades de geração distribuída.

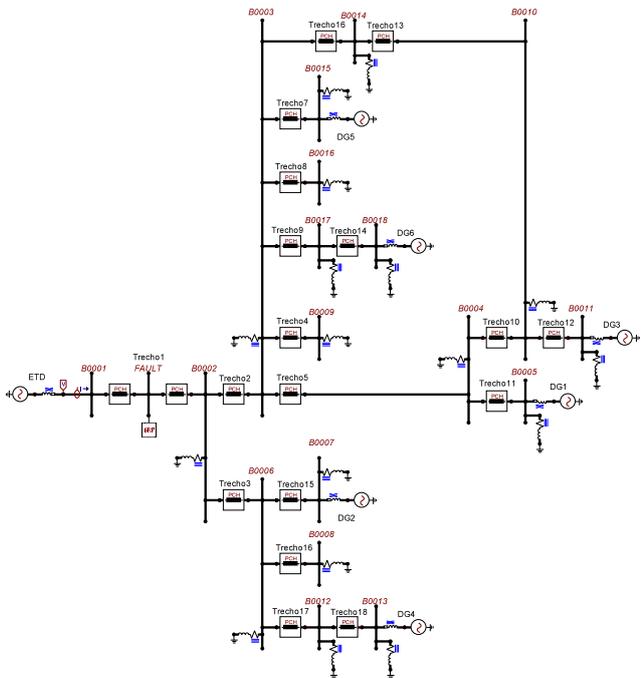


Figura 4: Rede de distribuição - 18 Trechos

A tabela 2 mostra os resultados obtidos para os erros na localização da falta na rede de 18 trechos, considerando que o método identificou corretamente o trecho.

Tabela 2: Erros na localização da falta - 18 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	90.8	45.3	97.4	42.83
Desvio-Padrão	174.5	90.9	166.5	73.6
Máximo	937.5	561.32	929.68	423.83
Mínimo	0.16	1.739	0.34	0.0057

A figura 5 apresenta a rede de distribuição de 24 trechos. Esta é uma rede de distribuição em malha com comprimento total de 27.4km, tensão nominal de 13.8kV e oito unidades de geração distribuída.

A tabela 3 mostra os resultados obtidos para os erros na localização da falta na rede de 24 trechos, considerando que o método identificou corretamente o trecho.

Tabela 3: Erros na localização da falta - 24 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	97.9	55.2	114.0	50.8
Desvio-Padrão	195.5	117.0	232.3	98.6
Máximo	1105.5	888.0	1101.5	677.7
Mínimo	0.04	0.49	0.03	0.08

O maior erro ocorre para uma falta trifásica e de alta impedância, e corresponde a 10.83% do comprimento total da rede de distribuição. O erro médio se mantém entre 40[m] e 120[m], o que indica uma alta precisão do método proposto.

Como podem existir expansões na rede de distribuição, imprecisões nas medições dos sinais de tensão e corrente, imprecisões na estimativa das cargas e dificuldade de obter medições nos termi-

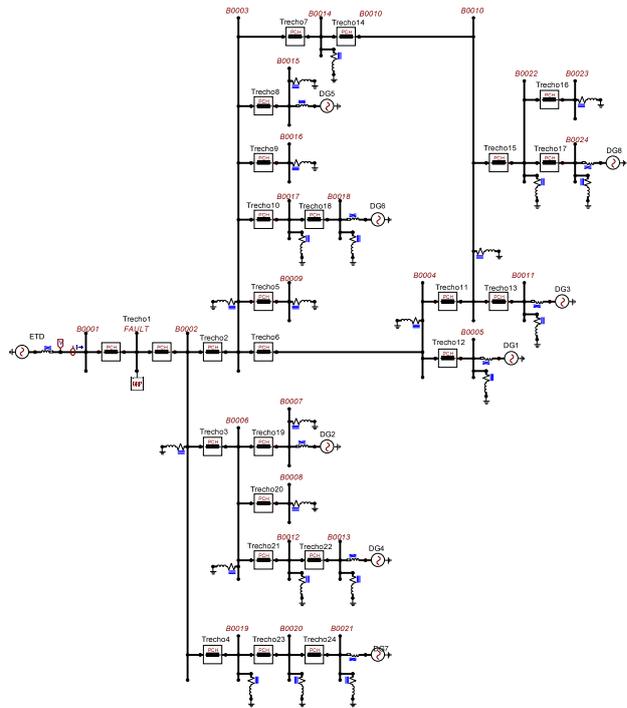


Figura 5: Rede de distribuição - 24 Trechos

mais das GDs, é necessário realizar uma análise de sensibilidade do método de localização de faltas frente à essas condições. Desta forma, no item 3.1 são apresentados os resultados obtidos na análise de sensibilidade realizada.

### 3.1 Análise de sensibilidade

Nesta análise de sensibilidade, verificou-se a influência de erros nos fasores de tensão e corrente nos erros de localização de faltas. Para aplicação dos erros foi considerado uma curva normal com erro médio de 5% e desvio padrão de 0,25% aplicados no módulo dos fasores de tensão e corrente e erro aleatório de  $\pm 180^\circ$  na fase destes. O mesmo número de simulações foi realizado.

A tabela 4 mostra a influência nos resultados devido a erros nos fasores de tensão e corrente, medidos somente nos terminais da subestação, para a rede de 12 trechos.

Tabela 4: Erros na localização por influência dos fasores - 12 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	175.1	150.0	153.7	158.9
Desvio-Padrão	240.2	192.9	169.4	199.2
Máximo	1331.9	1231.9	949.2	1257.5
Mínimo	1.12	2.56	0.48	1.41

A tabela 5 mostra a influência nos resultados devido a erros nos fasores de tensão e corrente, medidos somente nos terminais da subestação, para a rede de 18 trechos.

A tabela 6 mostra a influência nos resultados devido a erros nos fasores de tensão e corrente, medidos somente nos terminais da subestação, para

Tabela 5: Erros na localização por influência dos fasores - 18 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	164.6	154.1	146.2	156.3
Desvio-Padrão	203.6	188.0	198.6	237.1
Máximo	1003.9	1234.3	789.1	1331.9
Mínimo	1.54	0.23	0.92	2.38

a rede de 24 trechos.

Tabela 6: Erros na localização por influência dos fasores - 24 trechos

Erro [m]	ABC	AN	BC	BCN
Médio	202.3	143.8	214.7	152.6
Desvio-Padrão	252.7	173.9	280.7	212.8
Máximo	1203.1	887.9	1266.6	1257.9
Mínimo	2.04	0.42	0.72	0.94

Os resultados mostram que o erro médio não passou de 215 [m] e o maior desvio padrão não passou de 253 [m]. Este fato indica a eficiência e precisão do método de localização de faltas frente a imprecisões nos fasores de tensão e corrente.

Contudo, o erro fasorial tem impacto significativo sobre a identificação correta dos trechos em falta. O gráfico da figura 6 demonstra a precisão na identificação do trecho em falta para rede de 12 trechos, considerando fasores com e sem erro. Na abscissa, o ranqueamento do trecho em falta como o mais provável de estar em falta pelo método.

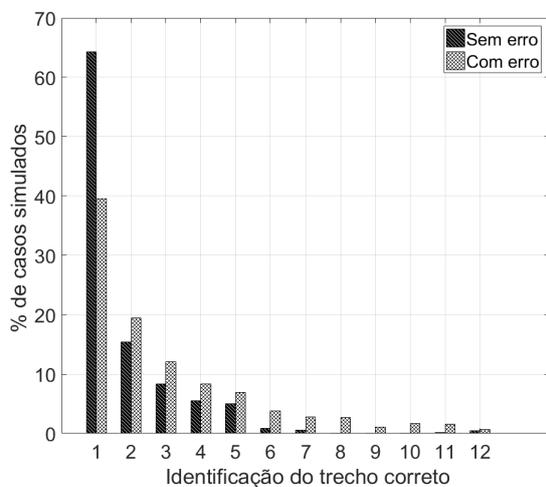


Figura 6: Identificação do trecho - 12 Trechos

A figura 7 apresenta o acerto na identificação do trecho em falta para rede de 18 trechos.

### 3.2 Análise de tempo de processamento

O cluster utilizado, para a solução do problema de localização de faltas, foi configurado por meio de quatro computadores com processador Intel i7 (3.4GHz) *quad-core* com 8GB de memória RAM.

Um dos computadores ficou com a tarefa de *host*, ou seja, ele foi o responsável pelo envio da informação do trecho a ser analisado e pelo recebimento, dos demais computadores (escravos),

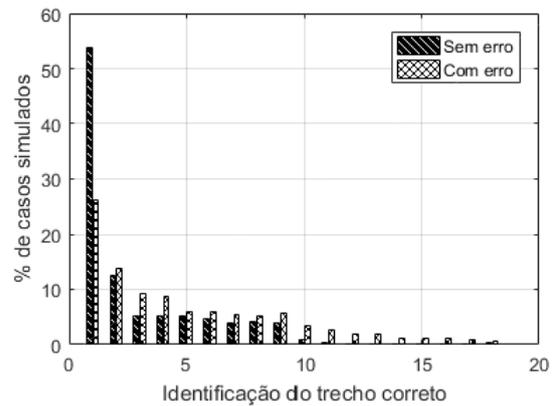


Figura 7: Identificação do trecho - 18 Trechos

do erro, da distância e da resistência encontrados para a falta suposta naquele trecho. Desta forma, o número de trechos analisados em paralelo foi igual ao número de processadores disponíveis, ou seja, igual a doze. Para configuração do cluster foi utilizado o programa Matlab.

O tempo gasto para analisar toda a rede de distribuição utilizando ambos processamentos, distribuído e serial, foi medido durante as simulações. A tabela 7 apresenta as estatísticas para o tempo de processamento distribuído de uma simulação.

Tabela 7: Tempo de processamento distribuído

Tempo [s]	Número de trechos		
	12 T	18 T	24 T
Médio	1.462	1.998	2.921
Desvio-Padrão	0.303	0.690	0.674
Máximo	2.816	5.216	4.645
Mínimo	0.63	0.891	1.164

A tabela 8 apresenta as estatísticas para o tempo de processamento serial de uma simulação.

Tabela 8: Tempo de processamento serial

Tempo [s]	Número de trechos		
	12 T	18 T	24 T
Médio	9.63	17.30	24.46
Desvio-Padrão	2.38	4.03	6.30
Máximo	15.41	28.99	49.29
Mínimo	3.53	6.67	8.64

Os resultados mostram uma redução no tempo de processamento de até 8.66x em relação ao processamento serial.

## 4 Conclusões

O método proposto neste artigo apresenta resultados aceitáveis para localização de faltas em redes de distribuição. Por ser desenvolvido de forma a permitir o processamento distribuído, com o devido *hardware*, este pode ser aplicado em redes elétricas com centenas de trechos. Entretanto, verificou-se um baixo desempenho para faltas de alta impedância e um desempenho reduzido frente a erros de estimação fasorial.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo: 2015/09867-2) e à FDTE e CPFL (projeto PA3025).

## Referências

- Alwash, S., Ramachandaramurthy, V. and Mithulanathan, N. (2014). Fault location scheme for power distribution system with distributed generation, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **PP**(99): 1–1.
- Asber, D., Lefebvre, S., Saad, M. and Desbiens, C. (2007). Modeling of distribution loads for short and medium-term load forecasting, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–5.
- Bertsekas, D. P. and Tsitsiklis, J. N. (1997). *Parallel and distributed computation – numerical methods*, Athena Scientific.
- Bowman, W. I. and McNamee, J. M. (1964). Development of equivalent pi and t matrix circuits for long untransposed transmission lines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **83**(6): 625–632.
- Brahma, S. (2011). Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **26**(3): 1545–1553.
- Burger, B. (2014). Electricity production from solar and wind in germany in 2014, Freiburg-Germany.
- Dehghani, F., Khodnia, F. and Dehghan, E. (2017). Fault location of unbalanced power distribution feeder with distributed generation using neural networks, *CIGRE - Open Access Proceedings Journal* (1): 1134–1137.
- Ferreira, G., Gazzana, D., Bretas, A. and Netto, A. (2012). A unified impedance-based fault location method for generalized distribution systems, *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pp. 1–8.
- Hagh, M., Hosseini, M. and Asgarifar, S. (2012). A novel phase to phase fault location algorithm for distribution network with distributed generation, *Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIGRE 2012 Workshop*.
- Jose, B., Cavalcante, P., Trindade, F. and de Almeida, M. (2013). Analysis of distance based fault location methods for smart grids with distributed generation, *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES*, pp. 1–5.
- Liu, G., Li, Y. and Wen, A. (2013). Voltage change based fault location in distributed network considering distributed generations, *Power and Energy Engineering Conference, 2013 IEEE PES Asia-Pacific*, pp. 1–6.
- Manassero, G., Santo, S. G. D. and Souto, L. (2017). Heuristic method for fault location in distribution feeders with the presence of distributed generation, *IEEE Transactions on Smart Grid* **8**(6): 2849–2858.
- Mora-Florez, J., Herrera-Orozco, R. and Bedoya-Cadena, A. (2015). Fault location considering load uncertainty and distributed generation in power distribution systems, *Generation, Transmission Distribution, IET* (3): 287–295.
- Morales-Espana, G., Mora-Florez, J. and Vargas-Torres, H. (2010). Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems, *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T D-LA), 2010 IEEE/PES*, pp. 803–809.
- Pitanga, M. (2003). *Computação em cluster: o estado da arte*, Brasport.
- Qianqian, L., Zeng, X., Xue, M. and Xiang, L. (2013). A new smart distribution grid fault self-healing system based on traveling-wave, *Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE*, pp. 1–6.
- Shafiullah, M., Abido, M. A. and Al-Hamouz, Z. (2017). Wavelet-based extreme learning machine for distribution grid fault location, *IET Generation, Transmission Distribution* **11**(17): 4256–4263.
- Teng, J.-H., Huang, W.-H. and Luan, S.-W. (2014). Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators, *Power Systems, IEEE Transactions on* (4): 1653–1662.
- Zhang, H., Tian, Z. and Zhang, E. (2008). An improved algorithm for fault location in distribution network, *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on*, pp. 727–730.
- Zhang, S., Lin, S., He, Z. and j. Lee, W. (2018). Ground fault location in radial distribution networks involving distributed voltage measurement, *IET Generation, Transmission Distribution* **12**(4): 987–996.