

Posicionamento Otimizado de Remotas de Medição para Aprimorar a Localização de Falhas em Redes de Distribuição

Bruno Pereira* Clever Pereira* Alberto De Conti*

* PPGEE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais,
(bpr@ufmg.br; clever@ufmg.br; conti@cpdee.ufmg.br).

Abstract: This work presents a study on optimized positioning of measurement units over an electrical power distribution network for improved fault location, based on an algorithm developed on PROTLAB/UFMG: the SISLOC – Distribution Network Fault Location System. To study this, a new algorithm denominated remoteLOC was developed. Here we present the improvements made on the SISLOC algorithm and the findings about points over a network that, if chosen for having a measurement unit, provide the best enhancement on coverage for fault location.

Resumo: Este trabalho compreende o estudo do posicionamento de remotas de medição em uma rede de distribuição para melhor localização de falhas utilizando o algoritmo desenvolvido no PROTLAB/UFMG: o SISLOC – Sistema de Localização de Falhas para Rede de Distribuição. Para tal, foi desenvolvido o programa denominado remoteLOC. Aqui são apresentadas as melhorias no algoritmo do SISLOC e as descobertas sobre quais pontos de uma rede, se escolhidos para possuírem unidades de medição, apresentam os melhores ganhos em cobertura para localização de falta.

Keywords: fault location. distribution networks. optimization. power systems. radial networks. optimal positioning. phasor measurement units.

Palavras-chaves: localização de falhas. redes de distribuição. otimização. sistemas de potência. redes radiais. posicionamento ótimo. unidades de medição fasorial.

1. INTRODUÇÃO

Há diferentes abordagens disponíveis para localizar falhas em redes de distribuição. Segundo (Orlowski, 2006, p. 12), estas podem ser agrupadas como abordagens diretas ou indiretas.

As abordagens diretas são baseadas na medição de sinais elétricos, em ponto único ou múltiplo, seguidas por utilização de técnica para análise dos sinais e consequente determinação do local de falta. As mais comuns se agrupam em dois tópicos: análise dos sinais de frequência fundamental, utilizando técnicas de impedância de linha; e análise dos sinais de alta frequência, harmônicos e oscilação natural, utilizando técnicas de ondas viajantes. Dentre estes métodos, alguns utilizam medição em um único terminal, outros em dois terminais.

As abordagens indiretas são aquelas que não utilizam medição de sinais de tensão e corrente, mas, por exemplo, dados sobre status de dispositivos da rede como religadores, interruptores e seccionadores, relés de proteção, ou mesmo sistemas de distribuição e administração integrados (Orlowski, 2006, p. 29-34).

Além destes, pesquisas e projetos vêm sendo realizados propondo novas maneiras de se localizar falhas baseadas em técnicas matemáticas ou de inteligência artificial, como em

Javadian et al. (2009) e Chen et al. (2016). Contudo, dado o número reduzido ou incompleto de informações sobre os sistemas de distribuição, o desequilíbrio natural das redes e das cargas, a variação das configurações de rede e sua heterogeneidade, nenhuma dessas técnicas se consolidou de forma definitiva.

Este trabalho visa analisar e descobrir possíveis ganhos de qualidade na localização de falta no caso de se possuir mais pontos de medição de sinais elétricos. Para isso, parte-se de uma metodologia já existente (SISLOC – vide seção 2.1) que considera medição apenas na saída da subestação de potência e inclui-se o posicionamento otimizado de remotas adicionais de medição, visando aprimorar a localização de falhas (remoteLOC – vide seção 2.2). São apresentadas melhorias do algoritmo de localização, uma análise da influência das remotas na localização final da falta, a definição do problema de posicionamento ótimo e resultados de localização por alocações de remotas propostas utilizando-se o programa remoteLOC.

2. ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZADOS NESTE TRABALHO

2.1 SISLOC

O algoritmo do software SISLOC, Sistema de Localização de Falhas em Redes de Distribuição, foi de-

envolvido no PROTLAB/UFMG em projeto de P&D ANEEL/CEMIG/UFMG. O SISLOC faz uso de uma abordagem direta de localização de faltas baseada na determinação da impedância de falta. A metodologia e o bom desempenho desse método são apresentados em Barreto and Pereira (2011) e Pereira and Valadão (2005).

Inicialmente, o algoritmo do SISLOC trabalhava com um único ponto de medição. Como a rede de distribuição é tipicamente radial, supunha-se sua localização na subestação. O registro poderia ser uma oscilografia armazenada em um relé digital de proteção ou em algum dispositivo de registro digital. Durante o desenvolvimento do remoteLOC, o programa SISLOC foi aprimorado para utilizar múltiplas medições de remotas. Em seguida, identificando-se que, além de utilizar medições de remotas, também seria necessário analisar onde estas deveriam ser instaladas. Nisso, deu-se início à busca para determinar quais são as barras de uma determinada rede de distribuição que forneceriam as informações mais valiosas para o localizador de faltas. Em um exemplo rápido, duas remotas de medição instaladas em barras adjacentes de uma rede de 200 barras possivelmente não conseguiriam trazer informações relevantes para a localização das faltas nessa rede.

2.2 RemoteLOC

RemoteLOC é o nome dado ao algoritmo de otimização baseado em heurísticas proposto para a alocação de remotas de medição na rede de distribuição que foi acoplado ao SISLOC para a melhoria de localização de faltas. Esse algoritmo parte do pressuposto de que a utilização de múltiplos pontos de medição é uma realidade tendo em vista os desenvolvimentos recentes em redes inteligentes e dispositivos remotos de medição como PMUs (Phasor Measurement Units) equipados com GPS de baixo custo, como o equipamento discutido em Carta et al. (2008).

No ramo de alocação de PMUs, existem diversos trabalhos que tentam otimizar o problema de observabilidade da rede elétrica em cenários de cálculo de fluxo de potência, otimizando índices como BOI – *Bus Observability Index* e SORI – *System Observability Redundancy Index*, como em Ravindra and Rayapudi (2017). Nestes trabalhos também são discutidas e propostas heurísticas de busca para resolução do problema de alocação, como em Reis (2012). O presente estudo busca resolver o problema de alocação, mas com o objetivo de otimizar o problema de melhoria de localização de faltas para o SISLOC, observando cenários de curto-circuito.

3. O ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA MÚLTIPLAS MEDIÇÕES

O algoritmo de localização do SISLOC se baseia no método de "assinatura de uma falta". Esse método parte do pressuposto de que cada falta possui características individuais relacionadas a seu tipo, localização e resistência de falta. Em outras palavras, cada falta gera sinais únicos no sistema. Assim, com o conhecimento da topologia e dos sinais derivados da falta, é possível estimar a falta que os gerou e conseqüentemente determinar a localização da falta geradora de tal assinatura.

O funcionamento do algoritmo segue as seguintes etapas:

- (1) Ler os arquivos de topologia e parâmetros da rede e da oscilografia da falta.
- (2) Identificar os estágios pré e pós falta e inferir o tipo de falta (TF).
- (3) Estimar os fasores para os estágios pré e pós falta.
- (4) Isolar o sistema de falta.
- (5) Localizar a falta, utilizando a metodologia de simulação de sistemas de falta do SISLOC.
- (6) Apresentar o sistema de falta de cada barra que apresentaria o menor erro quando comparado aos valores medidos.

Este trabalho apresenta uma melhoria do algoritmo original. Modificações relativamente simples nas etapas 1 a 4 permitiram incluir mais de um ponto de leitura, sendo a leitura da oscilografia de forma sincronizada o ponto possivelmente mais crítico. A etapa 5 requereu maiores modificações para ser capaz de operar com mais de um ponto de medição. Por isso, é discutida em maior detalhe a seguir.

3.1 Localização da falta

Compreendendo-se que a discretização de parâmetros existente é feita por barras, uma falta de resolução máxima deverá ter ocorrido em uma barra do sistema. Para cada barra na rede, cria-se um sistema puro de falta **simulado**, definido em Pereira (2015), otimizado para representar da forma mais próxima possível o comportamento do sistema puro de falta **medido**. As barras que possuem sistemas de falta **simulados** de menor erro quando comparadas ao **medido** são aquelas nas quais se verifica a maior probabilidade de ocorrência da falta real. Nessa etapa, apresenta-se o erro mínimo para cada barra K .

3.2 Localização da falta: cálculo do erro para N medições

A função $e_B(K)$ em (1) compara os sinais de tensão **simulados** e **medidos** em cada ponto de medição,

$$e_B(K) = \left| \frac{V_{medidoB}^{barraK} - V_{simuladoB}^{barraK}}{V_{medidoB}^{barraK}} \right| \quad (1)$$

onde

- $e_B(K)$: erro visto pela barra B de uma suposta falta na barra K
- $V_{medidoB}^{barraK}$: módulo da tensão na barra B no circuito puro de falta **medido** no caso de falta em K
- $V_{simuladoB}^{barraK}$: módulo da tensão na barra B no circuito puro de falta **simulado** no caso de falta em K

No caso de **medição em somente um ponto**, na versão original do SISLOC modelava-se o erro visto somente pela barra **FONTE**, como descrito em (2),

$$EF(K) = e_{FONTE}(K) \quad (2)$$

onde

- $EF(K)$: erro final para uma possível falta na barra K
- $e_{FONTE}(K)$: erro visto pela barra **FONTE** para uma possível falta na barra K

No caso de **número de medições/remotas (NR) > 1**, uma modificação é introduzida. Isso é feito no remoteLOC modelando-se o erro final conforme (3),

$$EF(\mathbf{K}) = \max_{i=1}^{NR} (e_i(\mathbf{K})) \quad (3)$$

onde

- $\max_{i=1}^{NR}(e_i(\mathbf{K}))$: o erro máximo visto por todas barras de remotas, inclusive a barra da fonte para uma possível falta na barra \mathbf{K}

Pode-se notar que (2) é uma particularização de (3) para uma remota posicionada na fonte. Nos dois casos, o sistema de falta simulado na barra \mathbf{K} desejado é aquele que minimiza o erro, conforme (4).

$$\min EF(\mathbf{K}) \quad (4)$$

Evidencia-se o que se altera com a introdução das remotas: o cálculo do erro. Para o caso utilizando mais pontos de medição, ele é dado pela superposição vista em (3).

3.3 Relatório da localização da falta

De forma a ilustrar a aplicação do SISLOC, simulou-se uma falta ABT, com resistência de falta de 20Ω , na barra 6 da rede modelo de 16 barras visualizada na figura 1. Com esta falta, gerou-se o relatório de localização de faltas disponível na tabela 1. Ele contém a informação ordenada de erros finais ($EF(\mathbf{K})$) mínimos observados para faltas simuladas em cada barra \mathbf{K} do sistema, para uma dada resistência de falta, que minimiza o erro, quando comparado ao sistema medido, para uma suposta falta naquela barra.

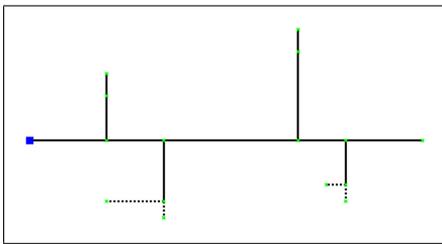


Figura 1. Visualização de uma topografia modelo simples: 100 MVA, 13,8 kV, 16 barras, 1 fonte, 12 barras trifásicas, 4 barras bifásicas, representadas por linhas pontilhadas

Tabela 1. Relatório de Localização do SISLOC.
Tipo de falta: ABT.

Num	Barra	Nome Barra	RF (Ω)	Erro
1	6	No06	20,000	0,001 %
2	16	No16	20,228	0,748 %
3	14	No14	20,654	1,247 %
4	13	No13	20,642	1,356 %
5	12	No12	20,966	1,911 %
6	5	No05	21,360	2,513 %
7	4	No04	21,806	4,026 %
8	3	No03	22,323	7,944 %
9	10	No10	21,295	23,694 %
10	9	No09	21,665	23,945 %
11	2	No02	11,832	42,387 %
12	7	No07	10,896	43,180 %
13	8	No08	10,222	43,636 %

Pode-se ver na tabela 1 que a barra indicada como mais provável de ocorrência da falta é a barra No06, uma vez que ela possui o menor erro. No entanto o SISLOC elenca outras possíveis barras da rede onde a falta pode ter ocorrido, de forma a cobrir possíveis erros de registro, topológicos ou mesmo paramétricos da rede monitorada, além de possíveis simetrias, como por exemplo, as barras No16, No14 e No13.

4. OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS REMOTAS DE MEDIÇÃO

4.1 Influência de pontos de medição adicionais

Cada remota adicional significa mais uma informação de medição do sistema de falta. Um cenário com uma única medição é um caso específico onde se utiliza apenas um dos múltiplos pontos possíveis de medição para se localizar a falta. Dessa forma, utilizando-se de superposição, o local mais provável de falta é aquele que, baseado em todos os dados disponíveis das remotas, apresenta um sistema de menor erro máximo para um dado grupo de remotas. Por sua vez, os locais mais prováveis são aqueles que ao fim desse cálculo apresentam valores de erro em ordem crescente.

A introdução de pontos com remotas de medição possibilita diversas melhorias no processo de localização de faltas, tais como:

- Aumento da confiabilidade do localizador – um maior número de pontos de medição adiciona dados ao problema, levando a resultados mais confiáveis.
- Aumento da exatidão e precisão do localizador – um maior número de pontos de medição melhor rejeitará os locais menos prováveis, e portanto, delimitará de forma mais adequada os locais mais prováveis de faltas.

Esses ganhos se dão pela redução da característica de simetria multimodal do problema de localização. Isto é, há um melhor discernimento de sistemas de falta simulados que antes eram semelhantes: com mais pontos de comparação relativa, menos sistemas possuirão simetria, o que torna o problema de localização na rede mais unimodal.

4.2 Qualidade de um resultado de localização

Um localizador de faltas instalado em uma rede de distribuição deve apresentar características de precisão, exatidão e confiabilidade. Deseja-se localizar a barra mais próxima do curto e reduzir erros de medição e ambiguidades por simetrias topológicas. Contudo, existe a dificuldade em quantificar um resultado não único pois, conforme discutido na seção 3.3, o localizador apresenta diversas barras mais prováveis como o local de curto. A apresentação de um único ponto pode, diversas vezes, estar incorreta. Com isso, as equipes de manutenção podem deixar de confiar no localizador.

Em busca de eliminar esta dificuldade, exemplifica-se uma utilização do localizador. Dado um usuário que receba o relatório de localização da tabela 1, ele poderá atacar o problema da inspeção local de diferentes maneiras. Uma possibilidade seria a busca das N barras mais prováveis.

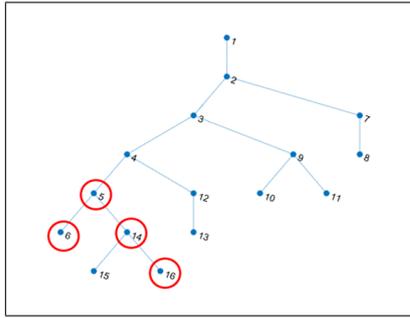


Figura 2. Melhor resultado de localização: barras mais próximas

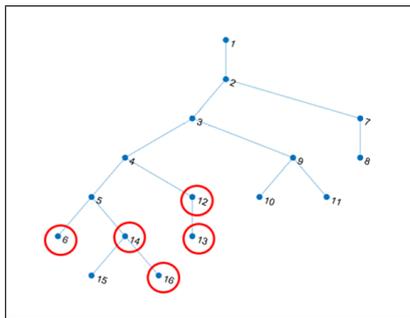


Figura 3. Pior resultado de localização: barras mais distantes e em maior número

Caso sejam escolhidas as 4 barras mais prováveis, o operador sairia em busca do curto partindo do ponto No06 e posteriormente tentaria buscá-lo nos pontos No16, No14 e No13. Esse planejamento pode ser estabelecido por empirismo notando o índice de eficiência em casos reais para cada rede. Como as diversas topologias apresentarão erros de parâmetros e de medição, cada caso levará a um planejamento de busca. De acordo com a experiência empírica obtida com a utilização do localizador SISLOC, buscar nas 11% mais prováveis barras, isto é, para 100 barras, as 11 de menor erro, se mostrou uma estratégia efetiva.

As figuras 2 e 3 apresentam uma comparação de estratégias de busca, onde as barras circunscritas em vermelho representam as barras a serem buscadas. Fica evidente que resultados de localização que indiquem barras em menor número e mais próximas são o cenário mais desejado.

Suponha-se então alguma técnica de leitura de resultados e portanto, planejamento de busca. Entende-se que cada barra adicionada para inspeção representa uma busca a mais. Entretanto, buscar mais próximo e em meio a uma rota bem elaborada apresenta menor custo. Define-se, portanto, um custo total de planejamento. Este será, ponderadamente, o custo de percorrer as arestas da rede, somado ao de se inspecionar cada barra. Define-se como o custo total (CT) o expresso em (5),

$$CT = \lambda_d * NAP + \lambda_i * NB \quad (5)$$

onde

- λ_d : valor gasto pela empresa para percorrer a distância de uma aresta
- λ_i : valor gasto pela empresa para inspecionar uma barra
- NAP : número de arestas a serem percorridas
- NB : número de barras a serem inspecionadas

Por simplicidade, o termo $\lambda_d * NAP$ é denominado Custo de Distância Ótima (CD), enquanto o termo $\lambda_i * NB$ é denominado Custo de Inspeção (CI). Uma discussão mais detalhada sobre esses parâmetros é apresentada a seguir.

Custo da Distância de Rota Ótima (CD) O CD é importante para diferenciar casos onde o localizador delimita melhor uma região e possui maior precisão, concentrando barras na mesma região. Uma menor região implica uma menor distância total a ser percorrida. No presente estágio, o algoritmo desconsidera as rotas possíveis nas ruas e supõe que o time de campo sempre caminhará pelas arestas e supõe que as barras possuem a mesma distância entre si. Isso não é exatamente o que se encontra no cenário real, mas é suficiente para o estudo. Uma solução comercial poderia incluir a integração com um sistema cartográfico, por exemplo. Para calcular o custo de distância, faz-se o caminho mínimo de um operador para visitar todos os pontos da árvore geradora mínima que contém todas as barras a serem buscadas, como ilustrado na figura 4.

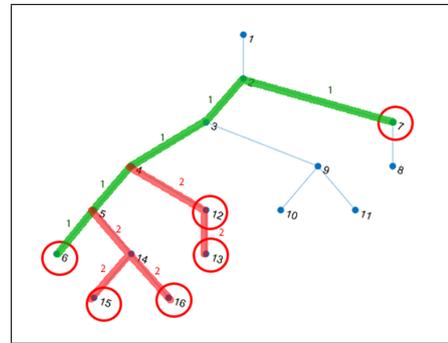


Figura 4. Árvore dos custos de distância. Para explorar todas as barras circunscritas em vermelho, as arestas em verde são percorridas uma vez, as arestas em vermelho, duas vezes, uma em cada sentido.

Custo de Inspeção (CI) O custo de inspeção é importante para diferenciar casos onde o localizador elimina barras, isto é, quando menos barras devem ser inspecionadas.

Como exemplo de aplicação de CD e CI , a tabela 2 apresenta os custos dos casos das figuras 2 e 3 para valores de λ_d e λ_i unitários.

Tabela 2. Custos de busca de um usuário

Barras a Inspeccionar	Caso Fig.2	Caso Fig.3
CD	6, 5, 14, 16	6, 15, 16, 12, 13
CI	3	8
CI	4	5
Custo Total ($CD + CI$)	$3 + 4 = 7$	$8 + 5 = 13$

4.3 A otimização dos locais

O problema de otimização consiste em denominar os agrupamentos de N remotas que melhor localizam faltas dada uma topologia. O contexto, assim como já mencionado, é uma rede de distribuição em que faltas são variadas em resistência de falta, localização e tipo. Implementa-se o seguinte fluxograma:

- (1) Criar os casos de teste **fixos** (falta na barra B, de resistência de falta RF, de tipo de falta TF).

- (2) Simular a resposta de um grupo de N remotas. Obter, para cada grupo e cada um dos casos, um relatório conforme descrito em 3.3.
- (3) Com uma estratégia de determinar a lista de barras a se examinar, calcular o custo de cada planejamento seguindo a análise de custo em 4.2, especificamente usando (5).
- (4) Dada a lista de custos para cada agrupamento, ordenar estes agrupamentos de remotas pelo custo médio de todos casos teste. Os que apresentaram os menores custos médios são os melhores agrupamentos.

Escolher N pontos de X barras disponíveis para serem pontos de medição é um problema de explosão combinacional, que sofre da "maldição da dimensionalidade". Grupos de 4 remotas em 200 barras totalizam $64 * 10^6$ agrupamentos, de 20 remotas significariam $1,6 * 10^{27}$ agrupamentos.

Do ponto de vista teórico, seria necessário simular um número infinito de casos para representar todas as possibilidades de falta em uma topologia. Em uma rede real, de aproximadamente 200 barras, com 11 tipos de faltas (AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC, ABCT), caso as resistências de falta sejam fixadas em 2, 10 e 20 ohms, esse número seria reduzido para um total $NumCasos = NumBarras * NumTiposFaltas * NumResistFalta = 200 * 11 * 3 = 6600$ casos possíveis.

Usando como base o tempo de execução do remoteLOC ser 26 s por 100 casos de falta, avaliar 6600 casos, para cada cada agrupamento, levaria cerca de 1,2 horas. Para exaustivamente avaliar todos agrupamentos possíveis de, por exemplo, 4 remotas para todos os 6600 casos de falta significaria 3500 anos de processamento. Isto evidencia a impossibilidade de se realizar o tratamento do problema de forma exaustiva e também sugere o emprego de heurísticas de busca para sua solução. Além disso, indica a necessidade de usar números reduzidos de casos de teste para permitir uma evolução mais rápida dessa heurística.

4.4 A exploração do problema

Duas redes são analisadas, a rede modelo de 16 barras ilustrada na figura 1 e a rede real de 186 barras ilustrada na figura 5. A rede modelo é uma rede simplificada que auxilia a coleta de informações relevantes do problema e permite o teste e o aprimoramento do método proposto em condições controladas.

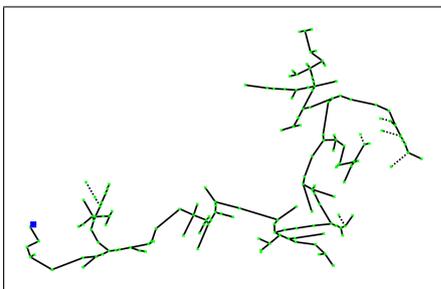


Figura 5. Visualização de uma topografia real: 100 MVA, 13,8 kV, 186 barras, 1 fonte, 179 barras trifásicas, 7 barras bifásicas

Duas características específicas do problema se tornam críticas para a criação da heurística: o aumento da impedância entre dois pontos do grafo da rede de distribuição

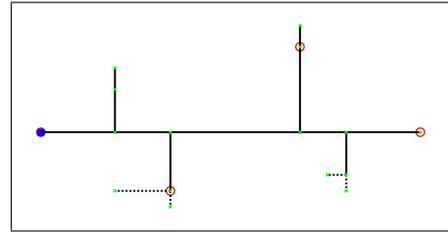


Figura 6. Rede Modelo + 3 remotas: melhor agrupamento Solução por método exaustivo, CT: 8

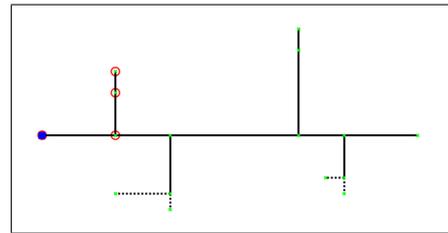


Figura 7. Rede Modelo + 3 remotas: pior agrupamento Solução por método exaustivo, CT: 19

conforme eles se distanciam e o fato de a rede de distribuição estar disposta em forma de árvore, com topologia radial a partir da fonte.

Para explorar a rede modelo (Figura 1) e qualificar agrupamentos, foram simulados 15 casos de falta, um por barra. A partir de simulação exaustiva, identificaram-se agrupamentos de 3 remotas que apresentavam os melhores resultados de localização, qualificados conforme descrito em 4.2. O melhor agrupamento identificado está ilustrado na figura 6, evidenciando remotas espaçadas, que provêm melhor cobertura da rede. O pior agrupamento, ilustrado na figura 7, indica remotas mais próximas e menor cobertura. Esse resultado é intuitivo, já que um maior espalhamento de pontos de medição ao longo da rede significa melhor cobertura e, portanto, melhor localização de falta.

4.5 A Heurística de busca utilizada

Após a exploração da rede modelo, alguns padrões foram observados. A heurística desenvolvida foi baseada na metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), descrita por M. Gendreau (2009). Para elitização de soluções, optou-se por sempre criar agrupamentos iniciais com remotas posicionadas em pontas (nós de grau 1) do grafo. Ainda na fase construtiva da heurística, eram gerados 2000 agrupamentos aleatórios e selecionavam-se os 200(10%) agrupamentos que apresentavam remotas mais distantes entre si (soma de todas as distâncias de cada par de remotas no agrupamento).

Na fase exploratória, foram usados operadores de busca local. Ao todo, quatro operadores foram aplicados consecutivamente às melhores soluções encontradas ao fim da busca denominada Busca Aleatória em População Elitizada (BAPE) que propõem mover uma ou mais remotas aleatoriamente escolhidas, componentes de um indivíduo/grupo:

- (1) Mover uma remota para o nó mais próximo de grau 1
- (2) Mover duas remotas para os nós mais próximos de grau 1 (para cada uma delas)

- (3) Mover uma remota para o segundo nó mais próximo de grau 1
- (4) Mover uma remota para o nó mais próximo, sem restrição de grau

Para cada um dos operadores, foram tentadas 10 execuções consecutivas e, em caso de não melhora, iniciava-se o novo operador. A remota a ser alterada de local era selecionada aleatoriamente. Caso houvesse melhora com o novo grupo, iniciava-se novamente rodando o primeiro operador. A condição de parada é o tempo limite de 35 minutos.

5. RESULTADOS NA REDE REAL

Para testar a rede real, geraram-se 56 casos de teste (30% do número de barras na rede). Fixados estes, exploraram-se os agrupamentos que apresentavam menores custos médios de *CT*. Para a rede real, foram usadas quatro remotas extras para exemplificação.

A fim de comprovar a efetividade da etapa de busca local, foram comparadas execuções do remoteLOC com e sem esta etapa. Ela pode vista no KDE (*Kernel Density Estimation*) do *CT* de todos os agrupamentos gerados, ilustrado na figura 8.

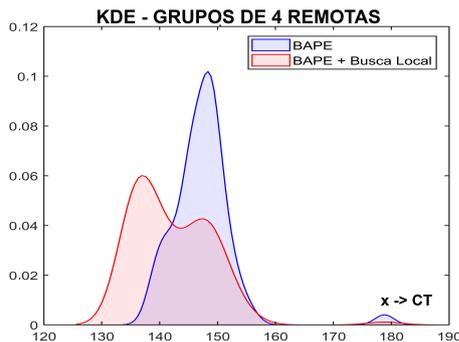


Figura 8. *Kernel Density Estimation* do *CT* dos 200 agrupamentos finais de execuções BAPE e BAPE + Busca Local, para 4 remotas na rede real

A inserção de operadores de busca local, que exploram características específicas do problema, aprimorou os resultados ainda mais. Isso fica evidenciado no deslocamento da curva para a esquerda (menores *CT*).

Para se comprovar a melhoria propiciada pelas remotas introduzidas, compara-se com o cenário de 0 remotas para os mesmos casos teste. O valor de *CT* para 0 remotas (medição somente na fonte) foi de **301**. O melhor agrupamento obtido para 4 remotas está ilustrado na figura 9, que obteve *CT*: **126**, melhoria de **58%**. O pior caso para 4 remotas teve um *CT* de **190**, que ainda representa uma melhoria de **37%** quando comparado com 0 remotas.

Conclui-se, pois, que os resultados obtidos com a rede real indicaram que a adição de remotas aprimora o localizador, com redução de 58% no custo de localizações, levando portanto a uma melhora de qualidade de localização para os 56 casos de teste simulados para uma rede real.

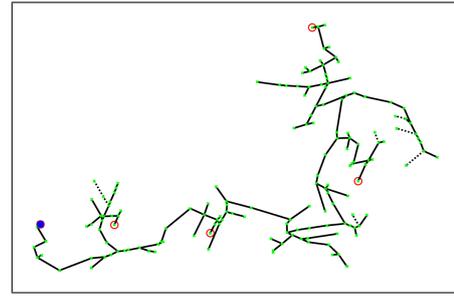


Figura 9. Rede Real + 4 remotas: melhor agrupamento
Solução por método BAPE + Busca Local, *CT*: 126

6. CONCLUSÃO

Este artigo discute uma técnica baseada em heurísticas para o posicionamento ótimo de remotas para a localização de faltas em redes de distribuição. Demonstra-se que a adição de remotas segundo a técnica proposta melhora o desempenho do localizador de faltas levando em consideração custos de distância de rota ótima e de inspeção. Entende-se que sua aplicação em redes reais pode levar à localização de faltas de forma mais eficiente do que o emprego exclusivo de um único ponto de medição.

REFERÊNCIAS

- Barreto, J. and Pereira, C. (2011). *Método Computacional para Localização de Faltas em Redes de Distribuição Utilizando o Circuito Sobreposto: Metodologia e Validação*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Carta, A., Locci, N., Muscas, C., and Sulis, S. (2008). A flexible gps-based system for synchronized phasor measurement in electric distribution networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(11), 2450–2456. doi:10.1109/TIM.2008.924930.
- Chen, K., Huang, C., and He, J. (2016). Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods. *High Voltage*, 1(1), 25–33. doi:10.1049/hve.2016.0005.
- Javadian, S.A.M., Nasrabadi, A.M., Haghifam, M., and Rezvantalab, J. (2009). Determining fault's type and accurate location in distribution systems with dg using mlp neural networks. In *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, 284–289.
- M. Gendreau, J.P. (2009). *Handbook of Metaheuristics*. Berlin: Springer US.
- Orlowski, R. (2006). *Fault Detection and Location on 22kV and 11kV Distribution Feeders*. Victoria University (Melbourne, Vic.).
- Pereira, C. (2015). *Redes Elétricas no Domínio da Frequência*. Artliber.
- Pereira, C. and Valadão, R.L. (2005). Sisloc - nova versão de sistema localizador de faltas para linhas e redes de distribuição e sua aplicação a casos reais e simulados. *Anais do XVIII SNPTEE*.
- Ravindra, M. and Rayapudi, R. (2017). Sensitive constrained optimal pmu allocation with complete observability for state estimation solution. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 7.
- Reis, D.C.S. (2012). *Alocação De Monitores De Qualidade De Energia E Unidades De Medição Fatorial Usando Programação Dinâmica Aproximada*. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.