

Alocação Otimizada de Medidores para Localização de Falhas utilizando Medições de Tensão[★]

Paulo E. T. Martins^{*} Mário Oleskovicz^{**}

^{*} Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, (e-mail:
pauloetm@usp.br).

^{**} Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, (e-mail:
olesk@sc.usp.br)

Abstract: This work presents a Binary Integer Linear Programming (BILP) formulation for the problem of optimal allocation of meters, considering two objectives: minimizing the number of meters and maximizing the number of identifiable faults. The problem was tested on a 15-bus European Medium Voltage System of CIGRÉ, considering the inclusion of a distributed generator and the possibility of operating the system as a weakly meshed network. Instances with solid single-phase A-ground faults were generated, uniformly distributed throughout the system. The optimization problem was solved through the Algorithm for Bicriteria Discrete Optimization (ABCDO) and the Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), obtaining solutions with 1 and 2 meters. The meter allocations obtained were used to feed a fault locating algorithm based on voltage measurements. The results showed a reduction of multiple fault estimation regions, which is interesting for application in modern distribution networks.

Resumo: Este trabalho apresenta uma formulação de Programação Linear Inteira Binária (PLIB) para o problema de alocação ótima de medidores, considerando dois objetivos: a minimização da quantidade de medidores e a maximização do número de falhas identificáveis. O problema foi testado em um sistema de média tensão europeu do CIGRÉ de 15 barras, considerando também a inclusão de um gerador distribuído e a possibilidade de operação do sistema de forma malhada. Foram geradas instâncias com falhas monofásicas Fase A-terra francas, uniformemente distribuídas ao longo do sistema. O problema de otimização foi resolvido por meio do *Algorithm for Bicriteria Discrete Optimization* (ABCDO) e do *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II), obtendo soluções com 1 e 2 medidores. As alocações de medidores obtidas foram utilizadas para alimentar um algoritmo localizador de falhas baseado em medições de tensão. Os resultados evidenciaram uma redução das regiões de múltipla estimação de falta, sendo interessantes para a aplicação em redes de distribuição modernas.

Keywords: Power Quality Meters; Fault Location; Short-circuits; Voltage Sags; Allocation of Meters.

Palavras-chaves: Medidores de Qualidade de Energia Elétrica; Localização de Falta; Curtos-circuitos; Afundamentos de Tensão; Alocação de Medidores.

1. INTRODUÇÃO

Com a modernização dos sistemas elétricos de potência e a inserção de recursos energéticos distribuídos, muito tem-se preocupado com relação à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) (López-Martín et al., 2018).

Dentre os distúrbios que afetam a QEE um dos mais preocupantes é o afundamento de tensão, o qual está dentro da classe dos distúrbios conhecidos como Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). O afundamento de tensão é definido como a redução no valor eficaz da tensão

entre 0,9 e 0,1 p.u., durante desde meio ciclo até 1 minuto (Dugan et al., 2012).

Os afundamentos de tensão podem impactar em equipamentos sensíveis ao nível de tensão, fazendo com que eles apresentem mau funcionamento, podendo inclusive parar um processo industrial. Isso é totalmente indesejável, levando em conta o tempo para se reiniciar o processo e o prejuízo financeiro associado (Zambrano et al., 2017).

Esses distúrbios são causados por acionamento de grandes blocos de carga, mas principalmente por situações de falta. Sendo que estas ocorrem de maneira aleatória sobre o sistema elétrico, é de interesse das concessionárias desenvolver planos de monitoramento permanente, de maneira

^{*} O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

que esses eventos sejam sempre monitorados (Eldery et al., 2004).

Na instalação de medidor permanente está envolvido um alto custo, que engloba não só o preço do equipamento de medição, mas também transformadores de instrumentação e toda a infraestrutura de comunicação com uma central de tratamento de dados, geralmente instalada na subestação (Martins et al., 2019). Em razão disso, muitos esforços tem sido feitos no sentido de desenvolver metodologias para a escolha dos melhores pontos para instalação de medidores, de forma a utilizar o menor número possível, e ainda a manter o sistema observável (Olguin et al., 2006; Espinosa-Juárez et al., 2009; Oleskovicz et al., 2012; Kempner et al., 2017; Martins et al., 2019).

Além disso, os dados lidos de tensão durante a ocorrência de uma falta podem ser utilizados para determinar o seu local. Um dos maiores problemas encontrados na localização de faltas em sistemas de distribuição é a múltipla estimação, ou seja, quando um algoritmo localizador estima mais de um ponto provável para a ocorrência da falta (Trindade et al., 2014).

Portanto, esse trabalho apresenta uma modelagem de Programação Linear Inteira Binária (PLIB) para o problema de alocação ótima de medidores, considerando a redução da quantidade de medidores e também a redução das múltiplas estimativas da localização da falta. Além disso, é considerada a inclusão de geração distribuída e a possibilidade de operação malhada do sistema de distribuição. Por fim, foi escolhido um método de localização de faltas que utiliza medições de tensão para verificar a redução das múltiplas estimativas.

Além dessa introdução, esse artigo está dividido em mais 5 seções. Na Seção II é apresentada a metodologia e a formulação do problema de alocação de medidores. Na Seção III são mostrados de forma breve os métodos de otimização escolhidos para resolver o problema de PLIB. A Seção IV apresenta o método de localização de faltas, e os resultados são discutidos na Seção V. Por último, na Seção VI, são delimitadas algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

2. METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE MEDIDORES

Este trabalho considera a existência de faltas simétricas ocorrendo no sistema, ou seja, duas faltas i e \bar{i} , em posições totalmente distintas, que produzem a mesma (ou quase a mesma) tensão remanescente em uma barra j dentre as N barras do sistema. Essa simetria impossibilita a diferenciação dessas duas faltas entre si, fato que dificulta a localização de faltas no sistema, e está diretamente relacionado ao problema de múltipla estimação da falta (Martins et al., 2019).

O problema de otimização foi descrito como um problema de PLIB, com dois objetivos: minimizar a quantidade de medidores e maximizar a identificação de faltas. O segundo objetivo está ligado ao problema de localização de faltas, no sentido de que a identificação de um determinado evento i é atingida quando se consegue diferenciar este evento de todos os demais, dentro de um conjunto E de faltas simuladas (Martins et al., 2019).

A restrição de observabilidade de afundamentos de tensão decorrentes de faltas foi incluída no modelo matemático. Ela garante que todas as faltas do conjunto E são observadas por pelo menos um medidor (Olguin et al., 2006; Martins et al., 2019). A observabilidade de uma falta i é descrita por meio do parâmetro binário $mo(i, j)$, que vale 1 caso o valor da tensão remanescente na barra j é inferior a um limiar τ predefinido. A Equação (1) representa matematicamente essa definição, onde o parâmetro $mtdf(i, j)$ contém o valor da tensão na barra j durante a falta i .

$$mo(i, j) \equiv \begin{cases} 1, & \text{caso } mtdf(i, j) \leq \tau \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

As situações de simetria entre combinações de faltas i e \bar{i} simuladas são descritas por meio do parâmetro binário $\sigma(j, i, \bar{i})$, que vale 0 quando as faltas i e \bar{i} são simétricas com relação à barra j , e 1 caso contrário (Martins et al., 2019). Essa definição é representada por (2).

$$\sigma(j, i, \bar{i}) \equiv \begin{cases} 1, & \text{em caso de as faltas } i, \bar{i} \in E \text{ não serem} \\ & \text{simétricas com relação à barra } j \in N \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

A identificação de uma falta i é obtida quando esta não possui simetria com nenhuma outra falta \bar{i} , considerando um conjunto de medidores instalados (Martins et al., 2019). Portanto, a *quebra* de simetria entre duas faltas i e \bar{i} ocorre ao se instalar um medidor em uma barra j cujo valor de $\sigma(j, i, \bar{i})$ é igual a 1.

A identificação de uma falta i é representada por meio da variável $y(i)$, que obtém valor 1 quando a falta i é identificável, e 0 caso contrário (3).

$$y(i) \equiv \begin{cases} 1, & \text{se a falta } i \in E \text{ é identificável} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

A variável de decisão que representa a decisão de instalação de um medidor em uma barra j é $x(j)$, que vale 1 caso se deseje instalar um medidor na barra j , e 0 caso contrário (4).

$$x(j) \equiv \begin{cases} 1, & \text{caso se deseje instalar um PQM} \\ & \text{na barra } j \in N \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

Então, o problema de otimização pode ser representado matematicamente por meio do seguinte modelo de PLIB:

$$\min \sum_{j \in N} x(j) \quad (5)$$

$$\max \sum_{i \in E} y(i) \quad (6)$$

s.a.:

$$\sum_{j \in N} mo(i, j) \cdot x(j) \geq 1 \quad \forall i \in E \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N} \sigma(j, i, \bar{i}) \cdot x(j) \geq y(i) \quad \forall i, \bar{i} \in E, i \neq \bar{i} \quad (8)$$

$$x(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$y(i) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E \quad (10)$$

As Expressões (5) e (6) representam os objetivos de minimização da quantidade de medidores e maximização do número de faltas identificáveis, respectivamente. A Expressão (7) descreve a restrição de observabilidade aos afundamentos de tensão (decorrentes de situações de falta), e (8) visa garantir a existência de quebra de simetria entre todas as combinações de faltas i e \bar{i} no conjunto E de faltas simuladas. Por fim, (9) e (10) definem o domínio das variáveis $x(j)$ e $y(i)$.

Para se resolver o problema de otimização e obter as posições dos medidores é necessário definir o conjunto de parâmetros de entrada para o algoritmo de solução, ou seja, todos os parâmetros $mo(i, j)$ e $\sigma(j, i, \bar{i})$ incluídos no modelo. Esse conjunto foi construído por meio de simulações de faltas, aplicadas de forma analítica de acordo com (Espinosa-Juárez et al., 2009).

3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

O modelo de PLIB foi resolvido por meio do algoritmo ABCDO (*Algorithm for Bi-criteria Discrete Optimization*) e do NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*). O ABCDO foi implementado assim como a versão original, reportada em (Sayin and Kouvelis, 2005). O NSGA-II também foi mantido como apresentado em (Deb et al., 2002). Porém, uma mudança foi feita no passo de geração da população de filhos: somente indivíduos novos foram permitidos. Isto preveniu que descendentes idênticos a outros já existentes fossem adicionados à nova população. Essa modificação foi necessária para este tipo de problema (codificação binária), pois a existência de muitos indivíduos idênticos pode causar problemas de não-convergência para o algoritmo.

A restrição de observabilidade (7) foi tratada por meio da abordagem do torneio restrito (Deb et al., 2002). Portanto, o princípio da dominância-restrita foi usado no NSGA-II. A geração dos descendentes utilizou versões binárias dos operadores de cruzamento e mutação. Foi utilizado um tamanho de 50 indivíduos para a população e 50 gerações como critério de parada, sendo estes valores fixos para todos os testes.

4. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS UTILIZANDO MEDIÇÃO DE TENSÃO

O localizador de faltas apresentado nessa seção combina medições de tensão de pontos diferentes do sistema para apontar o local estimado da falta (Liao, 2009). Dessa

forma, cada medidor apresenta um conjunto de estimativas de locais de falta e um processo decisório aponta o local estimado final. Nesta seção são apresentados os cálculos para se estimar a posição d de faltas monofásicas do tipo Fase A-terra utilizando medições de tensão em uma barra m , que pode estar distante da falta. O parâmetro d (entre 0 e 1) define a que porcentagem do trecho ocorreu a falta, e uma barra fictícia p simboliza o ponto da falta.

Os componentes de sequência da tensão na fase A são apresentados em (11)–(13) (Liao, 2009).

$$V_{a1}^m = V_{pre}^m - Z_{m,p}^1 \cdot I_{a1} \quad (11)$$

$$V_{a2}^m = -Z_{m,p}^2 \cdot I_{a2} \quad (12)$$

$$V_{a0}^m = -Z_{m,p}^0 \cdot I_{a0} \quad (13)$$

Em (11) V_{a1}^m é o componente de sequência positiva da tensão na barra m , V_{pre}^m é a tensão pré-falta na barra m , $Z_{m,p}^1$ é o elemento (m, p) da matriz impedância de barras de sequência positiva, após ter sido adicionada a barra fictícia p , e I_{a1} é o componente de sequência positiva da corrente de falta. Essas definições são análogas para as variáveis das demais sequências.

Considerando que $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$ para esse tipo de falta, ao se dividir (12) por (13) obtém-se o parâmetro h (14).

$$\frac{V_{a2}^m}{V_{a0}^m} = \frac{Z_{m,p}^2}{Z_{m,p}^0} = h \quad (14)$$

O termo $Z_{m,p}^i$ (onde i representa o componente de sequência) está relacionado com a distância d da falta de acordo com (15) (Liao, 2009).

$$Z_{m,p}^i = B_m^i + C_m^i \cdot d \quad (15)$$

Os termos B_m^i e C_m^i são constantes e calculados com base nos termos da matriz impedância de barras (Liao, 2009). Supondo que a falta ocorreu no trecho entre as barras j e k esses termos são dados por (16) e (17).

$$B_m^i = Z_{j,m}^i \quad (16)$$

$$C_m^i = Z_{k,m}^i - Z_{j,m}^i \quad (17)$$

Portanto, substituindo os termos $Z_{m,p}^i$ (15) em (14) é possível obter h em função de d (18).

$$h = \frac{B_m^2 + C_m^2 \cdot d}{B_m^0 + C_m^0 \cdot d} \quad (18)$$

Ao se resolver (18) para d obtém-se uma expressão para a posição da falta (19).

$$d = \frac{B_m^2 - h \cdot B_m^0}{h \cdot C_m^0 - C_m^2} \quad (19)$$

Então, o localizador de falta utiliza as tensões medidas na barra m , e procura em todos os trechos pelo ponto de falta, obtendo um conjunto de estimativas (Liao, 2009). Caso esse conjunto possua um único elemento, a falta pode

ser localizada. Ao se utilizar 2 ou mais medidores, o autor propõe calcular a interseção entre os conjuntos de estimativas. Sendo a cardinalidade dessa interseção unitária, o algoritmo aponta essa estimativa como o provável local da falta.

Na prática, esse localizador de falta pode estar implementado na subestação de distribuição ou em uma central da concessionária. Os medidores podem ser medidores inteligentes (*smart meters*) com um canal de comunicação unidirecional para transmitir as medições de tensão para a central. Então, todas as medições são processadas e são calculados conjuntos de estimativas para cada medidor. Ao final, o processo decisório calcula a interseção dos conjuntos e informa a resposta final para a localização da falta. Nesse esquema, as medições não precisam estar sincronizadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um conjunto de situações de falta foi gerado e utilizado para alimentar o algoritmo de otimização. A partir das posições escolhidas para os medidores, suas medições de tensão foi utilizadas para alimentar o algoritmo de localização de faltas descrito. O sistema em análise é o Sistema Europeu de Média Tensão proposto pelo CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), o qual está representado na Fig. 1. Essa rede de distribuição opera em 20 kV e em uma frequência de 50 Hz. Os dados detalhados desse sistema podem ser encontrados em (CIGRE Task Force C6.04, 2014). Foi considerada a presença de um gerador distribuído conectado na barra 12 do sistema. Esse gerador se trata de uma máquina síncrona acionada por uma turbina a vapor, tendo potência de 5 MVA e tensão nominal 6,6 kV, conectada na média tensão por meio de um transformador elevador (Moura, 2011).

Inicialmente considerou-se que o gerador síncrono estava desconectado do sistema. Então, simulou-se faltas monofásicas A-terra uniformemente distribuídas ao longo do sistema, segundo um passo de simulação igual a 1/3 da impedância do menor trecho do sistema. O conjunto resultou em um total de 187 faltas simuladas.

Para esta situação, o ABCDO encontrou uma fronteira de Pareto contendo apenas um ponto, sendo que com 2 medidores é possível identificar todas as 187 faltas. A solução correspondente a esse ponto do Pareto indica a instalação de medidores nas barras 11 e 14. Não pode existir nenhum ponto na fronteira de Pareto com 3 ou mais medidores, pois ao se piorar um dos objetivos (aumentar a quantidade de medidores) não é mais possível obter ganho no outro objetivo (maximizar a quantidade de eventos identificáveis), que já corresponde ao total de faltas consideradas. Por outro lado, também não é possível uma solução com 1 único medidor devido ao fato de não importando a sua posição ocorre sempre violação da restrição de observabilidade (7), sendo portanto uma solução infactível.

Apesar de existir apenas um ponto ótimo no espaço objetivo, podem existir vários pontos no espaço de solução que levem a esse mesmo ponto na fronteira de Pareto. Em outras palavras, existe mais de uma forma de alocar esses 2 medidores na rede, de forma a ainda garantir a

identificação das 187 faltas. O ABCDO retorna apenas uma solução, mas garante encontrar a fronteira de Pareto exata. O NSGA-II não garante encontrar a fronteira de Pareto exata, mas ele pode ser usado para encontrar outras soluções para o problema. A Tabela 1 mostra outras possíveis soluções obtidas pelo NSGA-II.

Tabela 1. Soluções alternativas para o problema de alocação e suas respectivas taxas de acerto ao se empregar o método de localização de faltas

Número da solução	Posição dos medidores	Ponto do Pareto (obj. 1, obj. 2)	Taxa de acerto na localização (%)
1	9, 13	(2, 187)	44,38
2	9, 14	(2, 187)	61,49
3	9, 15	(2, 187)	71,66
4	10, 13	(2, 187)	48,13
5	10, 14	(2, 187)	65,24
6	10, 15	(2, 187)	75,40
7	11, 13	(2, 187)	49,73
8	11, 14	(2, 187)	66,84
9	11, 15	(2, 187)	79,68
10	12, 13	(2, 187)	57,22
11	12, 14	(2, 187)	74,33
12	12, 15	(2, 187)	84,49

A Tabela 1 apresenta a solução encontrada pelo ABCDO e, além dela, outras 11 soluções encontradas pelo NSGA-II. Todas as 12 soluções correspondem ao mesmo ponto no espaço objetivo, como mostra a coluna 3 da Tabela 1. Cada uma das 187 faltas foram aplicadas ao localizador de faltas utilizando as medições de cada solução obtida. A porcentagem das faltas corretamente localizadas, sem múltipla estimação, é mostrada na coluna 4 da Tabela 1.

A Fig. 1 ilustra os segmentos não-observáveis ao se considerar medições da barra 9 e 13. Esses segmentos correspondem às regiões onde as faltas não foram corretamente localizadas. As barras onde estão alocados os medidores estão marcadas com um triângulo azul ao lado da numeração da barra, e os trechos não-observáveis estão destacados com uma linha mais espessa na cor verde.

Um primeiro resultado encontrado é o fato de somente um dos medidores gerar um conjunto de estimativas, ou seja, para certas faltas o localizador consegue estimar apenas a partir da barra 9, e para as outras faltas apenas a partir da barra 13. Isso pode ser explicado por o localizador de faltas utilizar apenas as tensões de sequência negativa e zero. Como os transformadores da subestação possuem ligação em delta-estrela-aterrado, para faltas no alimentador 1, o medidor localizado no alimentador 2 mede uma tensão de sequência zero nula. Da mesma forma, para faltas no alimentador 2, o medidor do alimentador 1 mede tensão de sequência zero nula. Assim, no cálculo do parâmetro h aparece uma divisão por zero, levando ao método não fornecer nenhuma estimativa. Portanto, as faltas localizadas nos segmentos não-marcados na Fig. 1 foram localizadas utilizando apenas uma das duas medições.

Para qualquer falta entre as barras 4 e 7 o localizador estima erroneamente a falta sobre a barra 4. Isso acontece

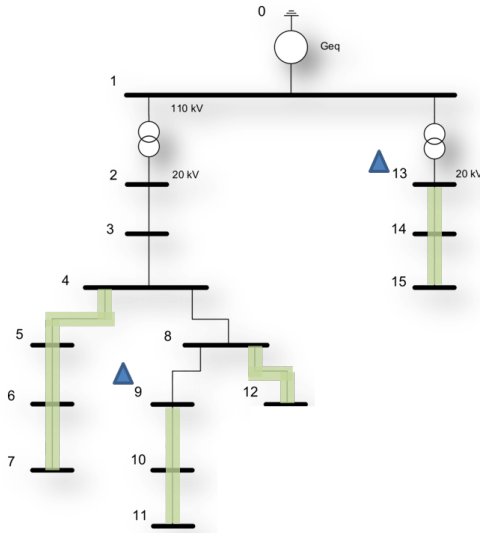


Figura 1. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 9 e 13 considerando o GD desconectado do sistema.

porque a tensão lida pelo medidor na barra 9 durante a falta é sempre igual à tensão na barra 4, devido à radialidade do sistema. O mesmo acontece para as faltas no trecho entre as barras 8 e 12, onde os pontos de falta são sempre estimados sobre a barra 8.

Uma outra observação é que todas as faltas localizadas à jusante do medidor na barra 9 também não foram localizadas. A razão disso também está na formulação do localizador aplicado a um sistema radial. Para essas faltas o cálculo dos parâmetros C_m^0 e C_m^2 resultam sempre em zero. Isso ocorre porque os elementos $Z_{9,9}^i$, $Z_{9,10}^i$ e $Z_{9,11}^i$ são sempre iguais para sistemas radiais. Isso resulta novamente em uma indeterminação matemática nos cálculos, levando ao método não conseguir localizar a falta.

A Fig. 2 mostra a análise de observabilidade das faltas utilizando as medições nas barras 11 e 15.

Observa-se que a área de não-observabilidade reduziu, devido ao fato de os medidores estarem agora localizados nas extremidades do sistema. Os erros de estimação ocorrem apenas para faltas entre as barras 4 e 7, e entre as barras 8 e 12.

Um segundo cenário foi estudado, considerando a mesma quantidade de faltas simuladas (187), porém considerando o gerador síncrono conectado à rede de fornecimento principal. O ABCDO retornou apenas um ponto na fronteira de Pareto, contendo 2 medidores que identificam todas as 187 faltas. Os medidores foram alocados nas barras 12 e 14. A Tabela 2 mostra soluções alternativas obtidas pelo NSGA-II e as respectivas taxas de acerto na localização das faltas.

A Tabela 2 demonstra um acréscimo na taxa de acerto do localizador de faltas para soluções comuns ao primeiro cenário. Isso já era esperado, devido ao fato de o gerador distribuído formar uma malha com a subestação passando pelo terra. Essa malha faz com que os elementos das matri-

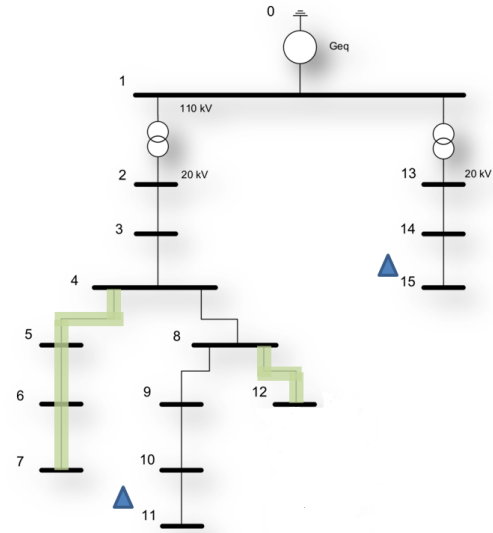


Figura 2. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 11 e 15 considerando o GD desconectado do sistema.

Tabela 2. Soluções alternativas para o problema de alocação e suas respectivas taxas de acerto ao se empregar o método de localização de faltas considerando a presença de geração distribuída

Número da solução	Posição dos medidores	Ponto do Pareto (obj. 1, obj. 2)	Taxa de acerto na localização (%)
1	3, 14	(2, 187)	18,18
2	3, 15	(2, 187)	28,88
3	4, 14	(2, 187)	65,24
4	4, 15	(2, 187)	75,94
5	5, 14	(2, 187)	68,45
6	5, 15	(2, 187)	79,14
7	6, 14	(2, 187)	71,12
8	6, 15	(2, 187)	81,82
9	7, 14	(2, 187)	79,14
10	7, 15	(2, 187)	89,84
11	8, 14	(2, 187)	63,10
12	8, 15	(2, 187)	73,80
13	9, 14	(2, 187)	64,71
14	9, 15	(2, 187)	75,40
15	10, 14	(2, 187)	68,45
16	10, 15	(2, 187)	79,14
17	11, 14	(2, 187)	70,05
18	11, 15	(2, 187)	80,75
19	12, 14	(2, 187)	69,52
20	12, 15	(2, 187)	80,21

zes impedância de barras sejam recalculados (via redução de Kron) durante a construção dessas matrizes. Assim, se reduz os elementos que poderiam levar a indeterminações matemáticas, o que reduz os erros de estimação.

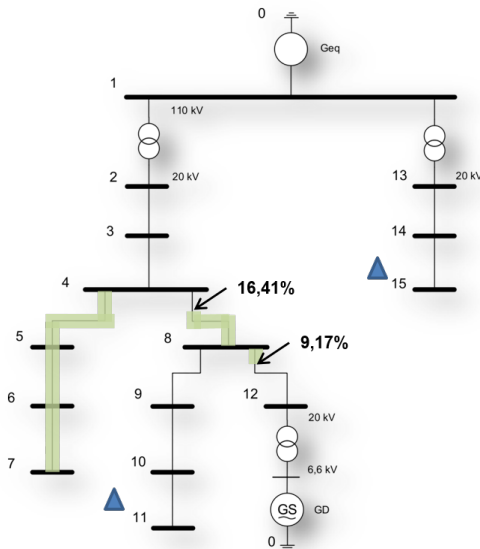


Figura 3. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 11 e 15 considerando o GD conectado ao sistema.

A Fig. 3 mostra os segmentos do sistema não-observáveis com os medidores nas barras 11 e 15, com uma pequena área de múltipla estimação entre as barras 4 e 12. Comparado com o cenário 1, observa-se uma grande porção do sistema entre as barras 8 e 12 que é observável.

Por último, foi considerado um terceiro cenário, mantendo o gerador síncrono conectado e fechando os dois alimentadores do sistema. Assim, adiciona-se mais uma malha no sistema estudado. Os resultados mostraram uma redução na quantidade de medidores. A solução no Pareto encontrada sugere a instalação de um único medidor na barra 7 (Fig. 4).

A Fig. 4 mostra que com um único medidor grande parte do sistema é observável. Grande parte do trecho entre as barras 4 e 12 também foi mantido observável. Além disso, mesmo o medidor estando localizado no alimentador 1, todas as faltas entre as barras 13 e 15 foram corretamente localizadas. Devido à imprevisibilidade das variações de topologia investigadas, sugere-se a instalação dos medidores nas barras 7 e 15, que atende ao cenário 3 e ainda apresenta a maior taxa de acerto na Tabela 2 (89,84%).

6. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma formulação multi-objetivo para o problema de alocação ótima de medidores em sistemas de distribuição. Nesta modelagem os afundamentos de tensão decorrentes das faltas devem ser não só observados, mas também unicamente identificados, de maneira a amenizar o problema das múltiplas estimações da localização da falta. Portanto, o modelo possui dois objetivos: minimizar o número de medidores e maximizar a quantidade de faltas identificadas.

A alocação foi feita no sistema teste europeu de média tensão do CIGRÉ de 15 barras, considerando faltas monofásicas do tipo Fase A-terra. Foram considerados 3

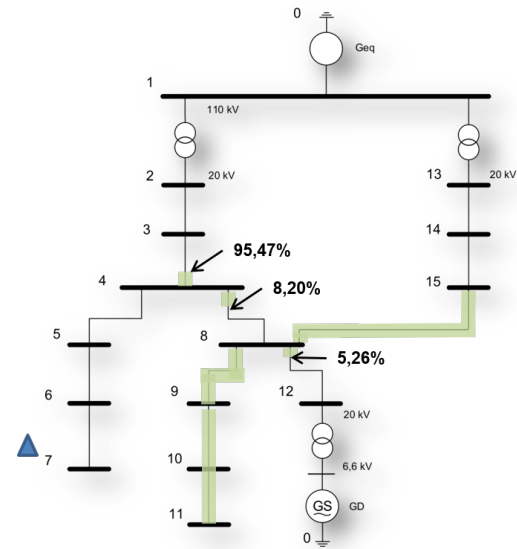


Figura 4. Segmentos não-observáveis utilizando uma única medição na barra 7 e considerando o GD conectado ao sistema, juntamente com a chave que liga os alimentadores 1 e 2 fechada.

cenários distintos: um primeiro onde o sistema opera de forma radial, um segundo com a inclusão de um gerador distribuído, e um terceiro considerando (além do gerador) o fechamento dos dois alimentadores do sistema. Um localizador de faltas baseado em medições de tensão foi utilizado para avaliar a redução das múltiplas estimações.

Os resultados mostraram que a introdução de malhas no sistema permitiu uma melhor identificação das faltas, reduzindo assim as regiões de múltipla estimação de falta. Além disso, observou-se algumas limitações do método de localização de faltas quando aplicado a sistemas de distribuição essencialmente radiais, devido à sua dependência das matrizes impedância de barras e às particularidades dessas matrizes para sistemas radiais. A introdução de malhas no sistema comprovou a eficácia do método para sistemas com malhas.

Por fim, a metodologia para a alocação de medidores foi capaz de proporcionar soluções com 1 ou 2 medidores, resultando em taxas de acerto na localização próximas a 90%. Além disso, os resultados evidenciaram posições ótimas para os medidores independente de variações repentinas na topologia do sistema.

REFERÊNCIAS

- CIGRE Task Force C6.04 (2014). Technical Brochure 575: Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, New York, third edition.
- Eldery, M.A., El-Saadany, E.F., and Salama, M.M.A. (2004). Optimum number and location of power quality

- monitors. In *Proc. of 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 50–57. IEEE, Lake Placid, United States.
- Espinosa-Juárez, E., Hernández, A., and Olguin, G. (2009). An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(4), 2034–2042.
- Kempner, T.R., Oleskovicz, M., and Gomes, D.P. (2017). Optimal monitoring of voltage sags through simultaneous analysis of short-circuits in distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(7), 1801–1808.
- Liao, Y. (2009). Fault location observability analysis and optimal meter placement based on voltage measurements. *Electric Power Systems Research*, 79(7), 1062–1068.
- López-Martín, V.M., Azcondo, F.J., and Pigazo, A. (2018). Power quality enhancement in residential smart grids through power factor correction stages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(11), 8553–8564.
- Martins, P.E.T., Zvietcovich, W.G., de Oliveira, T.A.S., and de Oliveira, F.B. (2019). Multi-objective approach for power quality monitor allocation with symmetry in short-duration voltage variations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 430–437.
- Moura, F.A.M. (2011). *Geração distribuída - impactos e contribuições para a qualidade da energia elétrica e dinâmica dos sistemas elétricos - uma análise através do ATP-EMTP*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Oleskovicz, M., Branco, H.M.G.C., da Silva, R.P.M., Coury, D.V., and Delbem, A.C.B. (2012). A compact genetic algorithm structure used for the optimum allocation of power quality monitors based on electrical circuit topology. In *Proc. of 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 34–39. IEEE, Hong Kong, China.
- Olguin, G., Vuinovich, F., and Bollen, M.H.J. (2006). An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(1), 378–384.
- Sayin, S. and Kouvelis, P. (2005). The multiobjective discrete optimization problem: A weighted min-max two-stage optimization approach and a bicriteria algorithm. *Management Science*, 51(10), 1572–1581.
- Trindade, F.C.L., Freitas, W., and Vieira, J.C.M. (2014). Fault location in distribution systems based on smart feeder meters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(1), 251–260.
- Zambrano, X., Hernández, A., Izzeddine, M., and de Castro, R.M. (2017). Estimation of voltage sags from a limited set of monitors in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 656–665.