

# Alocação Multi-objetivo 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 paper 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 weekly meshed network. The optimization problem was solved through the Algorithm for Bicriteria Discrete Optimization (ABCDO), to obtain an exact Pareto Front. Next, the Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) was used to find different equivalent solutions for each Pareto Front point. The meter allocations obtained were used to feed a fault locating algorithm based on voltage measurements. The results presented allocations with one or two meters, reaching hit rates in the fault location close to 90%. Further, this work found optimal positions for the meters regardless of the topology variations, which is interesting for the 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. O problema de otimização foi resolvido por meio do *Algorithm for Bicriteria Discrete Optimization* (ABCDO), a fim de se encontrar a fronteira de Pareto exata. Em seguida, um *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) foi utilizado para encontrar diferentes soluções equivalentes a cada ponto da fronteira de Pareto. As alocações de medidores obtidas foram utilizadas para alimentar um algoritmo localizador de falhas baseado em medições de tensão. Os resultados apresentaram alocações com um ou dois medidores, chegando a taxas de acerto na localização próximas a 90%. Além disso, esse trabalho encontrou posições ótimas para os medidores independente das variações de topologia, 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

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

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., durando 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 apresentem mau funcionamento, podendo inclusive parar um processo industrial. Isso é totalmente indesejável, levando-se em conta o tempo para se reiniciar o processo e o prejuízo financeiro associado (Zambrano et al., 2017).

Esses distúrbios podem ser causados pelo acionamento de grandes blocos de carga, mas são causados principalmente por situações de falta. Sendo que as faltas ocorrem de maneira aleatória sobre o sistema elétrico, é de interesse das concessionárias desenvolver planos de monitoramento permanente, de maneira que esses eventos sejam sempre monitorados (Eldery et al., 2004).

Para a instalação permanente de um medidor está envolvido um alto custo, que está associado a vários requisitos: o próprio equipamento de medição, 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 do alto custo para se instalar um medidor, é desejável utilizar o menor número possível, ainda mantendo todo o sistema observável. Várias metodologias focaram na escolha de pontos estratégicos para a instalação dos medidores, que permitem minimizar a quantidade requerida de medidores (Olguin et al., 2006; Espinosa-Juárez et al., 2009; Junqueira et al., 2019; Martins et al., 2019; Martins and Oleskovicz, 2022).

Além disso, os dados lidos de tensão durante a ocorrência de uma falta podem ser utilizados para determinar a sua localização. 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, este 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 estimações 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 estimações.

Além da introdução, este artigo está dividido em mais 5 seções. Na Seção 2 é apresentada a metodologia e a formulação do problema de alocação de medidores. Na Seção 3 são mostrados, de forma breve, os métodos de otimização escolhidos para resolver o problema de PLIB. A Seção 4 apresenta o método de localização de faltas, e os resultados são discutidos na Seção 5. Por último, na Seção 6, são delineadas algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

## 2. METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO DE MEDIDORES

Este trabalho considera a existência de faltas simétricas ocorrendo no sistema de potência, 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 alocação de medidores 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 também 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  $j$  seja inferior a um limiar  $\tau$  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).

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

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. Esses objetivos são conflitantes, visto que ao se reduzir a quantidade de medidores (melhorando o primeiro objetivo - (5)) o número de faltas identificáveis também se reduz (piorando o segundo objetivo - (6)), e vice-versa. Qualquer tentativa de se melhorar um dos objetivos implica em piorar o outro objetivo. 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 (Espinoza-Juárez et al., 2009).

### 3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

O modelo de PLIB foi resolvido por meio do algoritmo ABCDO (*Algorithm for Bicriteria Discrete Optimization*) e do NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*). O ABCDO foi implementado em acordo com a versão original, reportada em (Sayin and Kouvelis, 2005). O NSGA-II também foi implementado como a versão apresentada em (Deb et al., 2002). Porém, uma mudança foi feita no passo de geração da população de filhos: somente indivíduos novos foram permitidos. Essa mudança preveniu que descendentes idênticos a outros já existentes fossem adicionados à nova população. Como os indivíduos foram modelados segundo uma codificação binária, essa modificação foi necessária, pois a existência de muitos indivíduos idênticos pode causar problemas de convergência prematura do algoritmo para uma fronteira de Pareto de má qualidade.

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 nesta 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 de 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 de 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  $d$ , tal como apresentado em (18).

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

Ao isolar  $d$  em (18) obtém-se uma expressão para a posição da falta, de acordo com (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 que seja calculada 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 faltas simuladas foi utilizado para o processo de alocação dos medidores. A partir das posições escolhidas para os medidores, suas medições de tensão foram 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 (GD) conectado na barra 12 do sistema. Esse gerador trata-se 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 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, independente de sua posição,

sempre haverá violação da restrição de observabilidade (7), sendo portanto uma solução ineficaz.

Associado a esse 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 o algoritmo 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

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
<b>9</b>	<b>11, 15</b>	<b>(2, 187)</b>	<b>79,68</b>
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 (solução 8) 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 estimativa, 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 (solução 1). Esses segmentos correspondem às regiões onde as faltas não foram corretamente localizadas. Essa solução apresentou o pior desempenho na localização de faltas, de acordo com a Tabela 1. Na Fig. 1 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 observado é o fato de somente um dos medidores gerar um conjunto de estimativas, ou seja, para certas faltas o localizador consegue estimar apenas utilizando medições da barra 9, e para as outras faltas apenas utilizando a 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 (barra 13) mede uma tensão de sequência zero nula. Da

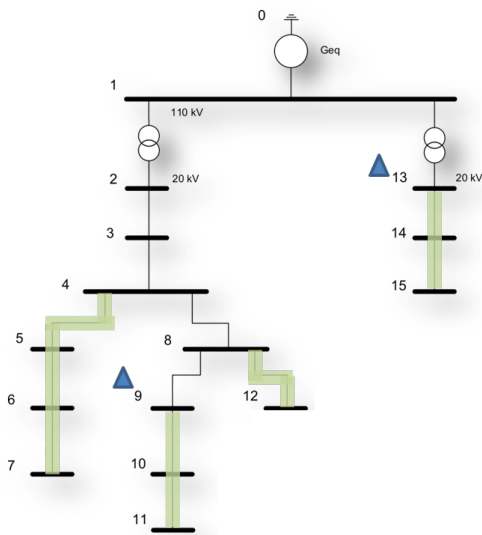


Figura 1. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 9 e 13 considerando o GD desconectado do sistema.

mesma forma, para faltas no alimentador 2, o medidor do alimentador 1 (barra 9) mede tensão de sequência zero nula. Assim, no cálculo do parâmetro  $h$  aparece uma divisão por zero, levando o método a não fornecer nenhuma estimativa. Portanto, as faltas localizadas nos segmentos não-marcados na Fig. 1 foram localizadas utilizando apenas uma das duas medições.

Neste caso, para qualquer falta entre as barras 4 e 7 o localizador estima erroneamente a falta sobre a barra 4. Isso acontece 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. 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 o método a não conseguir localizar a falta.

A Fig. 2 mostra a análise de observabilidade das faltas utilizando as medições nas barras 11 e 15 (solução 9). Essa solução está destacada em negrito na Tabela 1.

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. A Tabela 1 confirma essa redução da área de não-observabilidade ao apresentar um aumento na taxa de acerto de 44,38% (solução 1) para 79,68% (solução 9).

Um segundo cenário foi estudado, considerando a mesma quantidade de faltas simuladas (187), porém com o GD conectado à rede de fornecimento principal. O ABCDO

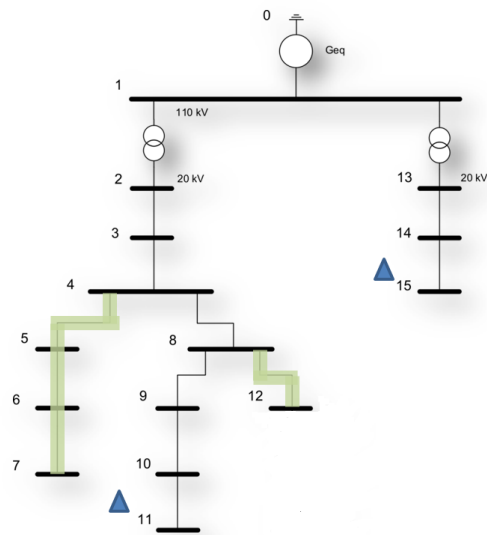


Figura 2. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 11 e 15 considerando o GD desconectado do sistema.

retornou um ponto na fronteira de Pareto, contendo 2 medidores que identificam todas as 187 faltas. Os medidores foram alocados nas barras 12 e 14 (solução 19). A Tabela 2 mostra soluções alternativas obtidas pelo NSGA-II e as respectivas taxas de acerto na localização das faltas.

Tabela 2. Soluções alternativas para o problema de alocação 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
<b>10</b>	<b>7, 15</b>	<b>(2, 187)</b>	<b>89,84</b>
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
<b>18</b>	<b>11, 15</b>	<b>(2, 187)</b>	<b>80,75</b>
19	12, 14	(2, 187)	69,52
20	12, 15	(2, 187)	80,21

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 matrizes 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.

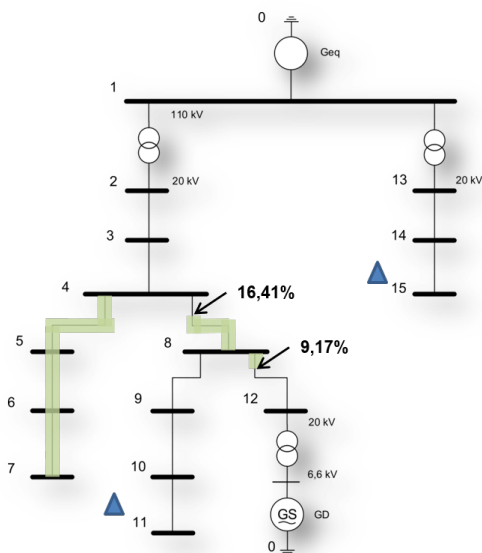


Figura 3. Segmentos não-observáveis utilizando as medições das barras 11 e 15 considerando o GD conectado ao sistema.

A Fig. 3 mostra os segmentos do sistema não-observáveis com os medidores nas barras 11 e 15 (solução 18), com uma pequena área de múltipla estimação entre as barras 4 e 12. O local indicado pela ponta de cada flecha na Fig. 3 corresponde à porcentagem (associada a cada flecha na Fig. 3) da impedância do trecho. Comparado com o cenário 1, existe uma grande porção do sistema entre as barras 8 e 12 que é observável (90,83% do trecho). Esse trecho é bem maior (em extensão) do que o entre as barras 4 e 8, e a observabilidade ganha entre as barras 8 e 12 compensa a região de não-observabilidade que surgiu entre as barras 4 e 8 (83,59% do trecho) após a conexão do GD. De fato, as Tabelas 1 e 2 mostram um aumento na taxa de acerto de 79,68% para 80,75%.

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 na curva de Pareto encontrada sugere a instalação de um 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

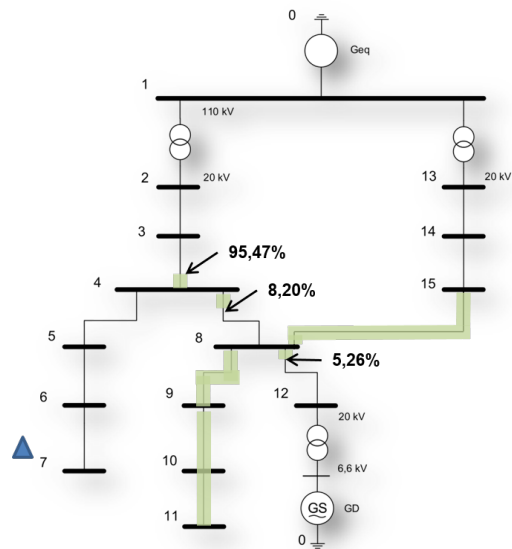


Figura 4. Segmentos não-observáveis segundo a medição na barra 7, considerando o GD conectado ao sistema e a chave que liga os alimentadores 1 e 2 fechada.

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 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. Como consequência, a quantidade de medidores necessária para cobrir todo o sistema reduziu. Além disso, as extremidades do sistema provaram serem as melhores posições para se alocar os medidores.

Por fim, a metodologia para a alocação de medidores foi capaz de proporcionar soluções com baixíssimo número de medidores (1 ou 2 medidores), resultando em taxas de acerto na localização próximas a 90%. Além disso, os resultados apresentaram posições ótimas para os medi-

dores independente de variações repentinas na topologia do sistema. Esse resultado é muito importante, visto que as concessionárias podem não serem capazes de prever essas variações, que é o caso da conexão de geradores distribuídos de pequeno porte.

#### 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.
- Junqueira, C.M.d.S., Brito, N.S.D., de Souza, B.A., Coelho, R.d.A., and Lima, É.M. (2019). An Algorithm for Optimal Placement of Voltage Sag Monitors. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30(2), 266–276.
- 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.
- Martins, P.E.T. and Oleskovicz, M. (2022). Multi-Objective Optimization Aiming to Minimize the Number of Power Quality Monitors and Multiple Fault Estimations in Unbalanced Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(2), 1315–1323.
- 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.
- 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.