



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Campus João Monlevade



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

Trabalho de Conclusão de Curso

Alocação de medidores visando Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência

Gabriel Figueiredo Machado

João Monlevade, MG

2022

Gabriel Figueiredo Machado

**Alocação de medidores visando Estimação de Estados em Sistemas Elétricos
de Potência**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof^o Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

João Monlevade, MG

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Figueiredo Machado

Alocação de medidores visando Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Elétrico

Aprovada em 24 de março de 2022

Conforme previsto no § 3º do artigo 5º da Resolução Coee nº11/2018, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

De acordo

Wilingthon Guerra Zvietcovich, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/03/2022



Documento assinado eletronicamente por **Wilingthon Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2022, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0299223** e o código CRC **000E383D**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003605/2022-63

SEI nº 0299223

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3808-0818 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo carinho, e incentivo nos estudos. De forma especial, agradeço aos meus amigos, Adeilson Gonçalves, Flávio Quiel, Guilherme Lima, Gustavo Araújo e Lorrán Marcos, que sempre estiveram comigo em toda caminhada no curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço à Deus, por ter me dado sabedoria e conhecimento para conseguir o título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Agradeço ao meu orientador, Dr Wilington Guerra Zvietcovich pela paciência e apoio nos estudos.

RESUMO

Neste trabalho será apresentado a implementação da metaheurística Busca em Vizinhança Variável (VNS, do inglês “*Variable Neighborhood Search*”) para solucionar o Problema de Alocação Ótima de Medidores (PAOM) em sistemas elétricos de potência (SEP), sendo este problema enquadrado da programação matemática inteira mista e resolvida na literatura através de técnicas não exatas. Os medidores possuirão diferentes canais de medição (tensão, potência e fluxo de potência) os quais serão utilizados na Estimação de Estado (EE) do SEP. Para isso é utilizado os conceitos de EE pelo método de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) visando avaliar a função objetivo do problema de otimização. Foi implementado passo a passo a metodologia, assim como suas estratégias, com a finalidade de encontrar melhores resultados. Uma vez encontrada uma configuração de alocação de medidores que atenda a incerteza pré-estabelecida, o número de canais de medição é reduzido até encontrar o menor número de canais e medição e, conseqüentemente, menor número de medidores. Para testar a metodologia foi utilizada a rede do IEEE de 14 barras e 30 barras, onde foram obtidos resultados satisfatórios.

Palavras chave: Estimação de Estados, Alocação de medidores, Busca em Vizinhança Variável

ABSTRACT

This work will present the implementation of the Variable Neighborhood Search (VNS) meta-heuristic to solve the Optimum Meter Allocation Problem (PAOM) in electrical power systems (SEP), this problem being framed in the mixed mathematical programming and solved in the literature through non-exact techniques, as are the meta-heuristics. The meters will have different measurement channels (voltage, power and power flow) which will be used in the SEP State Estimation (EE). For this, the concepts of EE are used by the method of Weighted Least Squares (MQP) in order to evaluate the objective function of the optimization problem. The methodology was implemented step by step, as well as its own strategies, in order to find better results. Once a meter allocation configuration has been found that meets the pre-established uncertainty, the number of measurement channels is reduced until a minimum number of channels and measurement is found and, consequently, a smaller number of meters. To test the methodology, the IEEE network with 14 bus and 30 bus was used, where satisfactory results were obtained.

Keywords: State Estimation, Measurers allocation, Variable Neighborhood Search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arranjos de canais de medições na rede de 14 barras.	24
Figura 2: Estruturas de vizinhanças dentro do espaço de solução S	27
Figura 3: Processo de busca em vizinhança.	29
Figura 4: Fluxograma VNS aplicado ao PAOM.	34
Figura 5: Convergência do VNS na obtenção da solução intermediária da rede de 30 barras	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de um vetor solução.....	31
Tabela 2: Exemplo troca de parâmetros em $k=2$	32
Tabela 3: Exemplo de um vetor solução x''	33
Tabela 4: Número de canais de medição que podem ser alocados em cada sistema de teste da metodologia.....	35
Tabela 6: Resumo da execução na rede de 14 barras.....	36
Tabela 7: Resultados da metodologia para testes na rede de 14 barras	36
Tabela 8: Localização dos canais de medição na solução final para a rede de 14 barras	37
Tabela 9: Valores de tensão obtidos via EE para a solução final encontrada para a rede de 14 barras	37
Tabela 10: Resultados da metodologia para testes na rede de 30 barras	38
Tabela 11: Localização dos canais de medição na solução final para a rede de 30 barras	39
Tabela 12: Alocação de canais de medição considerando todos os pontos e considerando a solução final da rede de 30 barras	39
Tabela 13: Valores de tensão obtidos via EE para a solução final encontrada para a rede de 30 barras.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS

EE – Estimação de Estados

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

MQP – Método dos Quadrados Ponderados

PAOM – Problema de Alocação Ótima de Medidores

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

SDEE- Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

SEP – Sistema Elétrico de Potência

VNS – Busca em Vizinhança Variável (do inglês, “*Variable Neighborhood Search*”)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivos específicos	13
1.2. Divisão do trabalho	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Estimação de Estados	18
3. MODELAGEM DO PROBLEMA	24
3.1. Descrição do Problema de Alocação Ótima de Medidores PAOM	24
3.2. Modelo matemático	25
3.3. Busca em Vizinhança Variável (VNS).....	27
3.3.1. Estruturas de vizinhanças	27
3.3.2. Procedimento de agitação (shaking procedure).....	28
3.3.3. Busca local.....	28
3.3.4. Critério de parada	28
3.3.5. Algoritmo Busca em Vizinhança Variável simples.....	29
4. BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1. Testes utilizando a rede de 14 barras.....	35
5.2. Testes utilizando a rede de 30 barras.....	38
6. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

O SEP deve ser analisado e controlado para assegurar a operação dentro de faixas de segurança e atender normas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), para tanto, equipamentos de medições são instalados visando monitorar alguns parâmetros do SEP os quais auxiliam aos operadores na tomada de decisões dos operadores. Na literatura se encontram trabalhos que indicam que através das informações obtidas destes medidores e informações próprias do sistema de potência é possível monitorar a rede toda através de conceitos de EE e, desta forma, atender exigências de segurança e de QEE (Atănăsoae; Pentiuc, 2014).

Com o decorrer do tempo, o avanço de tecnologias de medição e comunicação atrelados à redução de custos, foi possível instalar medidores nos SEPs, os quais possuem diferentes canais de medição (tensões, potências e fluxos de potência) permitindo desenvolver sistemas de monitoramento, associadas às técnicas de Inteligência Artificial com a finalidade de monitorar estes SEPs com uma quantidade muito menor ao número total de parâmetros (tensões, potências e fluxo de potência) que os SEPs possuem, viabilizando economicamente a implementação destes sistemas de monitoramento (GRAINGER; STEVENSON, 1996).

A metodologia de EE permite estimar as variáveis de estados da rede, isto é, módulo das tensões nas barras de potencial e seus ângulos de fase. Para obter as respostas, são utilizados os valores encontrados nos medidores instalados na rede como dados de entrada, para que, através de cálculos computacionais, sejam estimados os fasores de tensão em todas as barras, dados importantes para analisar o estado o qual a rede opera no momento (GRAINGER; STEVENSON, 1996).

Neste contexto, é possível estimar os parâmetros de um SEP utilizando um conjunto de medições, as quais possuem incerteza (ruído) própria dos medidores e da comunicação, através de um método amplamente utilizado na literatura, denominado MQP, que realiza o melhor ajuste das informações medidas ao relacionar duas ou mais quantidades, permitindo estimar o estado do SEP em qualquer instante de operação, normal, emergencial, restaurativo e diante a ocorrência de contingências. O MQP conceitua as variáveis de estado, o módulo e fase das tensões nas barras, as quais devem ser estimadas e a partir delas são calculados os demais parâmetros do SEP (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Por questões econômicas não seria viável a alocação de medidores em todas as barras e linhas. Surge o desafio, de alocar em alguns pontos estratégicos do SEP visando monitorar toda a rede elétrica utilizando algum método de otimização. Várias técnicas de otimização são estudadas para verificar a melhor configuração possível para obter os valores das variáveis de estados tão próximas quanto as que seriam encontradas em uma situação ideal onde todos os medidores fossem alocados.

1.1. Objetivos

A EE utiliza informações do SEP, sendo uma destas, os registros de medidores alocados em diversos pontos da rede elétrica. A quantidade mínima de medidores alocados pode ser determinada aplicando conceitos de otimização e conseqüentemente se obtém uma redução do investimento em um sistema de monitoramento.

O processo de reduzir a quantidade de medidores é conhecido como o Problema de Alocação Ótima de Medidores (PAOM), portanto neste trabalho é utilizada a metaheurística VNS para encontrar o arranjo com o menor número de canais de medição que garanta o monitoramento do SEP.

1.1.1. Objetivos específicos

Será desenvolvido um modelo matemático que atenda à solução do problema deste trabalho, Assim como a implementação computacional da metodologia.

O algoritmo do VNS será adaptado ao PAOM visando encontrar soluções de boa qualidade. Para isso será utilizadas estratégias próprias.

1.2. Divisão do trabalho

O trabalho será apresentado em 5 seções. Na seção 1 – “*Introdução*”, descreve a motivação e justificativa do problema, destacando os objetivos, importância no meio acadêmico e o seu contexto na engenharia elétrica.

A seção 2 – “*Revisão Bibliográfica*”, aborda os trabalhos recentes de outros autores que utilizam o mesmo tema que este trabalho foi desenvolvido.

A seção 3 – “*Modelagem do Problema*”, apresenta a metodologia utilizada para a formatação do PAOM e apresenta a técnica metaheurística VNS.

A seção 4 – “*Busca em Vizinhaça Variável para o Problema de Alocação Ótima de Medidores*”, detalha a metodologia VNS adaptada para resolução do PAOM, descrevendo o passo a passo do algoritmo.

Na seção 5 – “*Resultados e Discussões*”, é apresentado os resultados obtidos após as execuções do algoritmo VNS para alocação ótima de medidores na rede de 14 barras e 30 barras do IEEE, através de tabelas e gráficos.

Finalmente, na seção 6 – “*Conclusão*”, apresenta a conclusão evidenciando a relevância do estudo para o meio acadêmico e para o setor de engenharia elétrica em geral.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção objetiva apresentar o estado atual de conhecimento a respeito de alocação de medidores e implementação de algoritmos de otimização nos SEPs. A exemplo de implementação de algoritmo de otimização com objetivo de melhorar o desempenho da EE quando há mudanças de no arranjo de medidores, destaca-se Muscas et al. (2008), no qual os autores propõem um algoritmo de otimização baseado em técnicas de programação dinâmica, objetivando escolher o número e a posição ótima dos dispositivos de medição, levando em consideração a incerteza dos dispositivos, garantindo o custo mínimo e a precisão dos dados medidos. A metodologia foi testada em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) para mostrar a validade da abordagem proposta.

Em Abbasy e Ismail (2009) foi definida a localização e o número ótimo de Unidades de Medidas Fasoriais (PMUs, do inglês “*Phasor Measurement Unit*”) que tornam o sistema observável podendo ser utilizado para EE no SEP. A metodologia consiste em utilizar uma Programação Linear Inteira Binária (BILP, do inglês “*Binary Integer Linear Programming*”), em que as variáveis 0 e 1 determinam se deve instalar um medidor em cada barra do SEP, preservando a observabilidade do sistema e reduzindo o investimento do sistema de medição. Os resultados foram validados utilizando redes de 14, 30, 57 e 118 barras do IEEE.

Farsadi et al. (2009) foram implementados vários algoritmos de alocação de PMUs em SEP, os resultados são comparados seus resultados. São testados 7 algoritmos diferentes dos quais podemos citar: “*Depth First*”, “*Graph Theoretic Procedure*”, “*Annealing Method*” e “*Spanning Tree*”. Todos os algoritmos foram implementados no MATLAB e foram testados em redes do IEEE de 14 e 57 barras. Os resultados mostraram boa redução do número de PMUs alocados na rede.

Em Jeong et al. (2009) se apresentou o algoritmo “*Particle Swarm Optimization*” (PSO) utilizando processamento paralelo baseado no “*PC cluster system*” para encontrar a solução ótima da EE em sistemas elétricos de potência reduzindo custos computacionais. O algoritmo apresentado pelos autores foi testado na rede de 118 barras do IEEE, onde obtiveram bons resultados que torna o algoritmo PSO paralelo aplicável para EE em sistemas elétricos de potência.

No trabalho realizado por Singh et al (2011), é apresentado o PAOM em sistemas de distribuição. Neste trabalho é proposto uma técnica baseada na otimização ordinal para buscar um

conjunto de localizações de medidores que minimizam a probabilidade de que o valor de pico dos erros relativos das variáveis de estado exceda o limite especificado. A redução dos erros relativos é ilustrada por meio de simulações envolvendo um modelo de rede de distribuição do “*United Kingdom Generic Distribution System*” (UKGDS) de 95 barramentos.

Com o objetivo de minimizar o custo total de instalação dos PMUs mantendo boa observabilidade nos sistemas de transmissão AC/DC na situação normal de operação e em caso de contingência, Aminifar et.al (2013) propõem uma metodologia de posicionamento ideal de PMUs utilizando programação linear inteira mista. As análises foram feitas em sistemas de testes padrão do IEEE e em sistema de grande escala, e os resultados foram satisfatórios.

Em Chakraborty et al. (2014) foi apresentado um algoritmo de otimização que determina os locais no SEP para alocação de PMUs tornando possível calcular os ângulos de fase usando apenas os PMUs de modo que os valores computados, também referidos como pseudo-medições, possam gerar melhor estimativa do “*swing model*”, especialmente considerando a existência de erros nas medições. Para tratar erros nas medições, foi proposta a metodologia “*Cramer-Rao Bound*” (CRBs) para as estimativas desses parâmetros desconhecidos e mostrar que os limites (do inglês “*bounds*”) são funções das localizações dos PMUs e da contribuição de cada variável de medição.

No trabalho apresentado por Xiang et al. (2014), foi realizada uma abordagem probabilística para otimizar a alocação e o número mínimo de medidores visando à EE em SDEE. Para isso foi utilizado o critério de Simulação de Monte Carlo (SMC). Também foi considerado requisitos mínimos para atividades operacionais, isto é, obter boa observabilidade da rede de distribuição a partir da EE. Os resultados se mostraram viáveis e foram obtidos dos testes em uma rede de distribuição típica europeia.

Em Hu et al. (2015), aplicou-se o algoritmo “*Kalman Filter*” (KF) ao problema de EE, levando em consideração os impactos dos PMUs. O objetivo deste trabalho é implementar PMUs ao desenvolver a Estimção de Estado Dinâmica. O algoritmo proposto foi aplicado para fazer a EE de SEPs tradicionais e em sistemas com presença de PMUs, considerando a perda de dados probabilísticos. Simulações foram feitas em sistemas 14 barras do IEEE e os resultados mostraram uma grande melhoria de performance em relação ao método tradicional KF.

Em Kandasamy e Hussain (2015), com o objetivo de proporcionar total observabilidade do sistema de potência, foi proposta a alocação ótima de PMUs utilizando

Programação Linear Inteira (ILP, do inglês “*Integer Linear Programming*”). Essa metodologia evidencia maior adaptabilidade em termos de modelagem de rede com a presença de PMUs. Os resultados da simulação em redes de 14 e 30 barras do IEEE são validados e comparados com outros métodos de otimização apresentados no artigo.

Em Possagnolo (2015) foram utilizadas metodologias baseadas na metaheurística de VNS para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Para os testes, foram desenvolvidos quatro estratégias de implementação do VNS, os quais foram testados em os sistemas de 33, 84, 136 ,415 e 10477 barras. Foram obtidos bons resultados, pois a metodologia apresentou bom desempenho e permitiu encontrar soluções iguais ou melhores do que da literatura.

Neto (2016) também explora outros problemas envolvendo a EE. Neste trabalho, o autor aborda formas de lidar com diferentes conexões de transformadores utilizando o estimador com base nas correntes mantendo o desacoplamento de fases. Para estimar as tensões, foi proposto um método de combinação ótima de variáveis de estado de modo a contornar o acoplamento gerado no modelo matemático. Os testes foram realizados em sistemas IEEE onde foi avaliado o desempenho do algoritmo.

No trabalho apresentado por Raposo (2016), o autor propõe melhorar o desempenho computacional de metodologias existentes para alocação de medidores sem prejudicar a qualidade da precisão do estado estimado. Neste trabalho são propostas duas técnicas probabilísticas distintas para realizar os testes, a utilização da SMC e outra técnica que consiste em usar uma fórmula analítica fechada para determinar os riscos com base no modelo linearizado.

É apresentado em Yuehao et al. (2016) um método de EE para sistemas de distribuição. No método, as tensões e as fases nas barras no alimentador são tratadas como condicionais enquanto a tensão medida, corrente e potência na carga são tratadas como variáveis de medição para complementar as medições dos Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) a fim de melhorar a redundância e precisão do algoritmo do estimador. A metodologia proposta é aplicada em sistemas IEEE13 e IEEE34, onde foram obtidos resultados que indicaram que a metodologia é aplicável e eficaz.

Xygkis e Korres (2017) apresentam um método para alocação de sistemas de medição em SDEE levando em conta os aspectos de observabilidade e precisão na EE. A abordagem proposta explora “*M-optimal experimental design technique*” para formular o problema como

“*mixed integer semidefinite programming model*”. A eficácia da abordagem proposta em termos de otimização e velocidade de convergência foi verificada por meio de simulações em uma rede de distribuição de 95 barras.

Bottura et al. (2019) propuseram uma metodologia de alocação ótima de medidores de qualidade de energia em média tensão em sistemas de distribuição, considerando a presença de harmônicos. O método usa “*Harmonic Resonance Mode Analysis*” (HRMA) para calcular impedâncias e identificar frequências de ressonância harmônicas. Testes foram feitos na rede de 34 barras e os resultados mostraram que 4 medidores PQ são necessários para monitorar completamente as potenciais frequências de ressonância harmônicas nos testes em SDEE.

A partir dos trabalhos encontrados na literatura se propõe este trabalho de conclusão de curso, no qual será abordado uma técnica de otimização adaptada a EE, sendo esta, a metaheurística VNS, amplamente aplicado em problemas de otimização da operação e expansão de SEP (QI et al., 2014; ZHAO et al., 2019; ZVIETCOVICH et al., 2013). Detalha-se neste trabalho o passo a passo da implementação desta técnica para solucionar o PAOM.

2.1. Estimação de Estados

Os SEPs operam de acordo ao nível de carregamento do sistema e da ocorrência de contingências, dividindo-se em três situações, normal, emergencial e restaurativo. Nestas três situações (pontos) é necessário conhecer valores das grandezas elétricas (tensões, correntes, perdas entre outros) para auxiliar aos estudos de operação e da expansão dos SEPs. O ponto de operação da rede pode ser obtido a partir do modelo da rede e as tensões complexas em todos as barras do sistema (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Conhecer estas grandezas faz parte do problema de EE, onde as variáveis de estado (módulo e fase das tensões nas barras) podem ser estimadas através de cálculos. Para isso é utilizado medidores em tempo real, dessa forma, é possível estimar o estado em um ponto de operação na qual o SEP opera. A EE tem o papel de processar estes dados e calcular os fasores de tensão, similar à ideia do fluxo de potência, entretanto são utilizados cálculos mais complexos (GRAINGER; STEVENSON, 1996).

Na prática, o número real de canais de medição é bem maior que os dados de entrada necessários para a análise de fluxo de potência. Como consequência, vão existir muito mais

equações para serem resolvidas do que o número de variáveis de estado desconhecidas. Esta redundância é necessária pois as medições algumas vezes apresentam erros grosseiros ou não estão disponíveis no SCADA.

As equações de medições em sistemas de potência CA não são lineares e as soluções iterativas são necessárias, como ocorre na resolução do fluxo de potência Newton-Raphson.

As equações de medição são representadas pelas Equações (2.1) e Equação (2.2) (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$[e^{(k)}] = [z] - [h(x_1, x_2)^{(k)}] \quad (2.1)$$

$e^{(k)}$: vetor de resíduo,

z : vetor com valores das medições,

$h(x_1, x_2)^{(k)}$: vetor com valores calculados em função das variáveis de estado,

$$h = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k \\ P_k \\ Q_k \\ P_{km} \\ Q_{km} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

V_k : tensão na barra k ,

P_k : potência ativa injetada na barra k ,

Q_k : potência reativa injetada na barra k ,

P_{km} : fluxo de potência ativa na linha entre as barras k e m ,

Q_{km} : fluxo de potência reativa na linha entre as barras k e m .

Segundo Mohan (2016), as equações de potências ativa e reativa líquida injetada nas barras são dadas por:

$$P_k = V_k \sum_m^{m=n} V_m [G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \sin(\theta_{km})], \quad k = 1, n. \quad (2.3)$$

$$Q_k = V_k \sum_m^{m=n} V_m [G_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \text{cos}(\theta_{km})], \quad k = 1, n. \quad (2.4)$$

As equações de fluxo de potência nas linhas entre dois barramentos do sistema, onde k é o barramento de origem e m é barramento destino, são descritas pelas equações (2.5) e (2.6):

$$P_{km} = G_{km} V_k^2 - V_k V_m [G_{km} \text{cos}(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.5)$$

$$Q_{km} = B_{km} V_k^2 - b_{shunt} V_k^2 - G_{km} V_k V_m \text{sen}(\theta_k - \theta_m) + B_{km} V_k V_m \text{cos}(\theta_k - \theta_m) \quad (2.6)$$

O vetor $h(x_1, x_2)^{(k)}$ é função não linear dependente das variáveis de estado x_1 e x_2 , que por sua vez são desconhecidas e precisam ser estimadas a partir das medições presentes no vetor de medições z .

Para isso, o primeiro passo é a formação dos erros através da soma ponderada dos mínimos quadrados (WLS) com pesos w_j escolhidos iguais ao inverso das variações de erro correspondentes σ_j^2 (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$f = \sum_{j=1}^k \frac{e_j^2}{\sigma_j^2} \quad (2.7)$$

Para encontrar as variáveis x_1 e x_2 é preciso solucionar a Equação (2.8) através de um método iterativo, como no fluxo de potência Newton-Raphson.

$$H_x^T R^{-1} \{ [z] - [h(x_1, x_2)^{(k)}] \} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

H_x^T : trasposta do Jacobiano,

R^{-1} : inversa da matriz diagonal das variâncias.

A matriz jacobiana H_x é obtida utilizando derivadas parciais da função h , como pode-se observar pela Equação (2.9) (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$H_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial h_3}{\partial x_1} & \frac{\partial h_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial h_4}{\partial x_1} & \frac{\partial h_4}{\partial x_2} \\ \frac{\partial h_5}{\partial x_1} & \frac{\partial h_5}{\partial x_2} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Sabendo que x_1 e x_2 são variáveis de estado do sistema, ou seja, ângulo de fase θ e módulo de tensão $|V|$ nas barras respectivamente, H_x fica da seguinte forma (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$H_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta} & \frac{\partial P_k}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_k}{\partial |V|} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{km}}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial |V|} \\ 0 & \frac{\partial |V_k|}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

A matriz inversa das variâncias R^{-1} é dada por:

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_3^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_4^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_5^2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Deve-se obter a matriz de ganhos G_x através da Equação (2.12) (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$G_x = H_x^T R^{-1} H_x \quad (2.12)$$

Para encontrar as variáveis de estado, deve-se aplicar a Equação (2.13) (GRAINGER; STEVENSON, 1996):

$$\begin{bmatrix} x_1^{(k+1)} \\ x_2^{(k+1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \end{bmatrix} = G_x^{-1} H_x^T R^{-1} e^{(k)} \quad (2.13)$$

A Equação (2.13) assume a forma iterativa generalizada:

$$x^{(k+1)} - x^{(k)} = G_x^{-1} H_x^T R^{-1} e^{(k)} \quad (2.14)$$

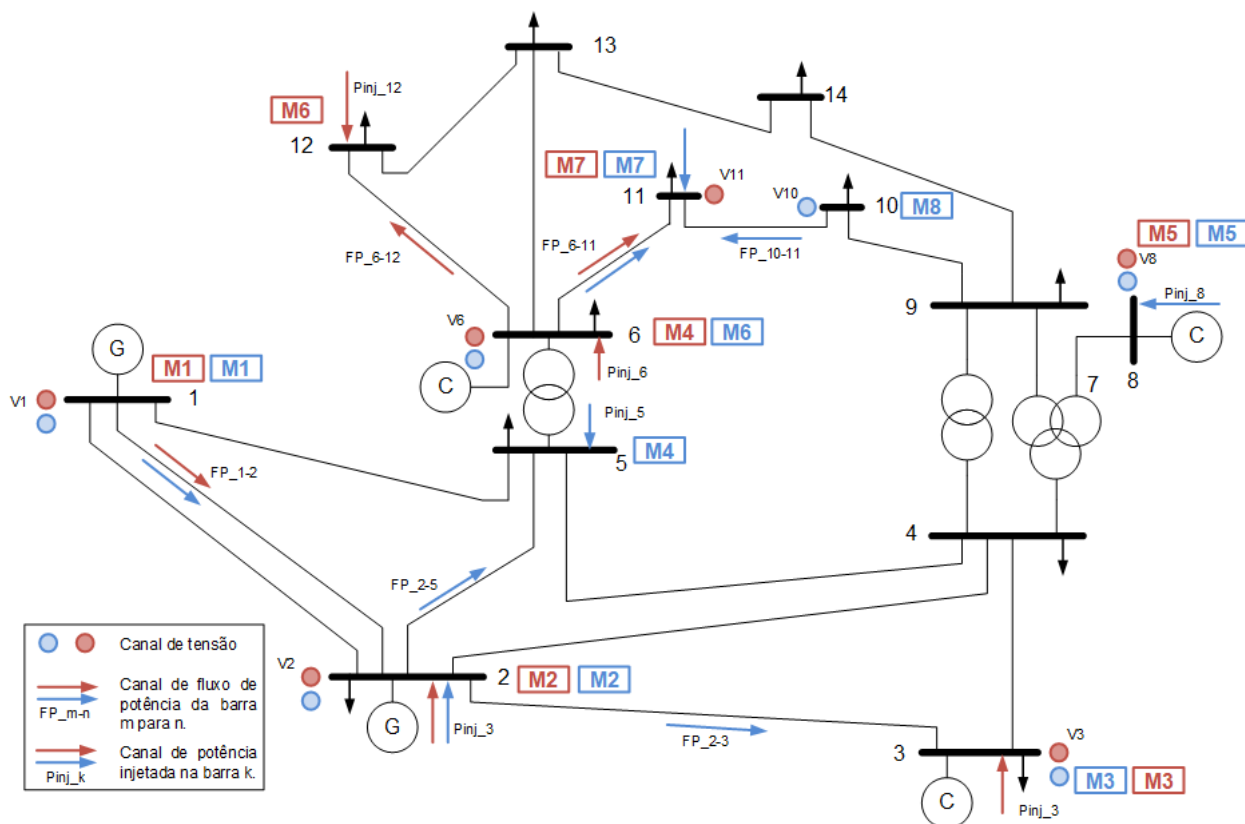
Lembrando que quando $|x^{(k+1)} - x^{(k)}| < \varepsilon$, ou seja, quando diferença entre o valor obtido na iteração atual e da iteração anterior, em módulo, for menor que a tolerância especificada ε , o programa já convergiu para resultados precisos suficientes para não haver novas iterações.

3. MODELAGEM DO PROBLEMA

3.1. Descrição do Problema de Alocação Ótima de Medidores PAOM

O PAOM consiste em alocar uma quantidade pré-determinada de medidores no SEP, visando encontrar um arranjo de alocações de medidores os quais monitorem as grandezas tensões do SEP avaliado. Neste trabalho os medidores possuem canais de medição convencionais (valores eficazes) de tensão, de potência ativa e/ou de potência reativa.

Figura 1: Arranjos de canais de medições na rede de 14 barras.



Fonte: Do autor

A Figura 1 ilustra um SEP com dois sistemas de monitoramento distintos, um na cor vermelha e outro na cor azul. O primeiro sistema de monitoramento, indicado pela cor vermelha, dispõe de 7 medidores e 13 canais de medições. Cada medidor possui 1 ou mais canais de medições, por exemplo: O medidor M4 vermelho possui 4 canais de medições (um canal para

medição do módulo da tensão na barra 6, um canal de potência ativa injetada na barra 6 e dois canais para medição de fluxo de potência ativa e reativa na saída do trecho barra 6 – barra 11 e do trecho barra 6 – barra 12).

Já o segundo sistema de monitoramento, indicado pela cor azul, é composto por 8 medidores e 15 canais de medições. Como o arranjo de canais de medidores neste sistema é diferente, a execução da EE para esse cenário gera erros diferentes se comparados com o sistema de monitoramento cor vermelha.

Observa-se na Figura 1 que é possível obter muitas combinações de alocação de medidores. Em redes de grande porte, esta quantidade de combinações pode chegar a milhares de combinações, não sendo possível analisar cada uma destas combinações.

Desta forma, para obter a melhor alocação de medidores, utilizam-se de técnicas de otimização, que neste caso, técnicas metaheurísticas. Já a utilização de técnicas exatas para este problema seria complexa quanto ao modelo matemático e quanto ao tempo de solução, inviabilizando a utilização.

3.2. Modelo matemático

O problema pode ser representado de forma matemática através da função indicada na Equação (5.1), a qual consiste em minimizar a diferencia de valores entre aqueles encontrados via EE e valores registrados pelos medidores, utilizando a regra de Mínimos Quadrados.

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (5.1)$$

$$F_1 = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \sqrt{(V_{m_i} - V_{c_i})^2} \quad (5.2)$$

$$\frac{1}{N_{Pinj}} \sum_{i=1}^{N_{Pinj}} \sqrt{(Pinj_{m_i} - Pinj_{c_i})^2 + (Qinj_{m_i} - Qinj_{c_i})^2} \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{N_{FP}} \sum_{i=1}^{N_{FP}} \sqrt{(FPP_{m_k} - FPP_{c_k})^2 + (FPQ_{m_k} - FPQ_{c_k})^2} \quad (5.4)$$

F_1, F_2, F_3 : Funções referentes aos medidores de Tensão, de potência líquida injetada nas barras e de fluxo de potência nos trechos respectivamente;

N_v : Número de canais de tensão;

N_{Pinj} : Número de canais de potência líquida ativa e reativa nas barras;

N_{FP} : Número de canais de potências ativa e reativa nas linhas;

V_{mm_i} : Tensão registrada pelo medidor na barra i ;

V_{c_i} : Tensão estimada na barra i ;

$Pinj_{m_i}$: Potência ativa injetada registrada na barra i ;

$Pinj_{c_i}$: Potência ativa injetada estimada na barra i ;

$Qinj_{m_i}$: Potência reativa injetada registrada na barra i ;

$Qinj_{c_i}$: Potência reativa injetada estimada na barra i ;

FPP_{m_k} : Fluxo de potência ativa registrada na linha k ;

FPP_{c_k} : Fluxo de potência ativa estimada na linha k ;

FPQ_{m_k} : Fluxo de potência registrada na linha k ;

FPQ_{c_k} : Fluxo de potência estimada na linha k ;

Foi considerado um total de $N_{medidores}$ medidores. Sendo:

$$N_v + N_{Pinj} + N_{FP} = N_{medidores} \quad (5.2)$$

s.a.

$$G^i(x^i, u^i) = 0; \quad (5.6)$$

$$H^i(x^i) \leq 0; \quad (5.7)$$

Sendo

$G^i(x^i, u^i) = 0$ equações de fluxo de carga do sistema em função das variáveis de estado

x_i e de controle u_i ;

$H^i(x^i) \leq 0$ as restrições de operação do sistema que, neste trabalho, representam os limites dos módulos de tensão das barras.

3.3. Busca em Vizinhança Variável (VNS)

A metaheurística Busca em Vizinhança Variável (do inglês: Variable Neighborhood Search VNS) foi utilizada para resolver problemas de otimização com características combinatórias, cuja ideia básica é fazer buscas de soluções mudando sistematicamente vizinhanças dentro das quais se faz buscas locais (MLADENOVIC; HANSEN, 1997). Este trabalho propõe a utilização dessa técnica para solucionar o problema apresentado nesse trabalho de alocação ótima de medidores no SEP o qual auxilia à EE.

3.3.1. Estruturas de vizinhanças

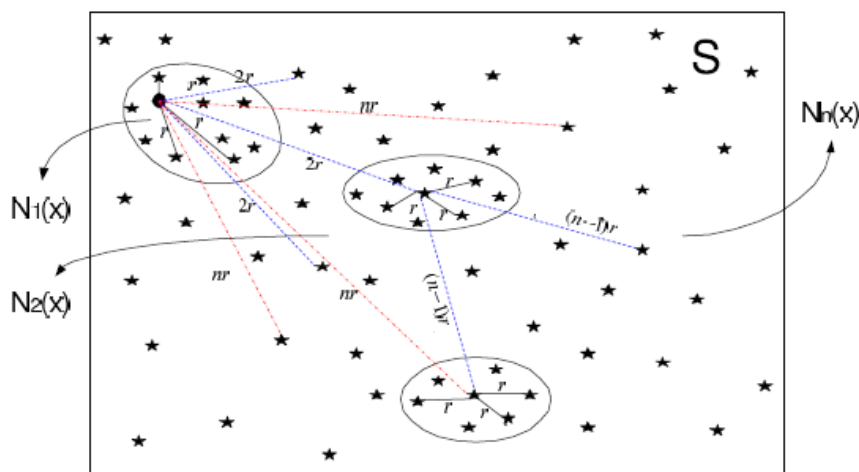
O problema de otimização, de forma geral, é descrito como (HANSEN et al., 2006):

$$\min\{f(x) | x \in X \subseteq S\}$$

Onde S denota o espaço de solução, X um conjunto viável, x uma solução viável e f uma função objetivo com valor real.

Sabendo que S é o espaço de solução e x uma solução viável, definimos uma estrutura de vizinhança como $N(x)$ que corresponde a soluções em torno de x (HANSEN et al., 2006). Na Figura 2 é possível observar as estruturas de vizinhanças inseridas no espaço de solução S .

Figura 2: Estruturas de vizinhanças dentro do espaço de solução S .



Fonte: Zvietcovich (2006)

3.3.2. Procedimento de agitação (shaking procedure)

O procedimento de gerar soluções em torno de uma solução x é conhecido como “procedimento de agitação”, sendo este usado utilizando dentro da metodologia do VNS. Seja $N(x) = \{N_1(x), \dots, N_{kmax}(x)\}$ um conjunto de estruturas de vizinhanças de modo que cada estrutura $N_k(x), 1 \leq k \leq kmax$ representa a vizinhança da solução x . O procedimento simples de agitação consiste em selecionar uma solução aleatória x' da k -ésima estrutura de vizinhança, $N_k(x)$. Sendo assim, $x' \in N_k(x)$ (HANSEN et al., 2006).

3.3.3. Busca local

Segundo Hansen et al. (2006), uma heurística de busca local está baseada na exploração de soluções dentro de uma estrutura de vizinhança $N(x)$ a partir de uma solução incumbente x . Em outras, palavras, a partir de x , a cada iteração, se seleciona uma solução melhor do que x (se houver) na estrutura pré-definida de vizinhança $N(x)$ e a define como a nova solução incumbente x . Uma heurística de busca local termina seu trabalho alcançando uma solução incumbente x considerada como ótimo local dentro da vizinhança $N(x)$.

3.3.4. Critério de parada

Para que o problema seja considerado como resolvido, é preciso que seja definido um critério finalização da metodologia utilizando um indicador de qualidade. Os critérios de parada típicos podem ser (HANSEN et al., 2006):

- Número máximo de iterações ou trocas de soluções;
- Número máximo de iterações sem melhoria;
- Tempo máximo permitido do CPU.

3.3.5. Algoritmo Busca em Vizinhança Variável simples

De acordo com Mladenovic e Hansen (1997), são definidas finitas estruturas de vizinhança pré-selecionadas com N_K ($k = 1, \dots, K_{m\acute{a}x}$), sendo $N_K(x)$ soluções da k -ésima vizinhança de x . Abaixo é apresentado os passos do algoritmo VNS versão simple.

Algoritmo Busca em Vizinhança Variável

Passo 1: Selecione o conjunto de estruturas de vizinhança N_k , $k = 1, \dots, k_{m\acute{a}x}$, que será utilizado na busca; encontre uma solução inicial x ; defina um critério de parada;

Passo 2: Gera uma solução x' na k – ésima vizinhança N_k da solução inicial x ;

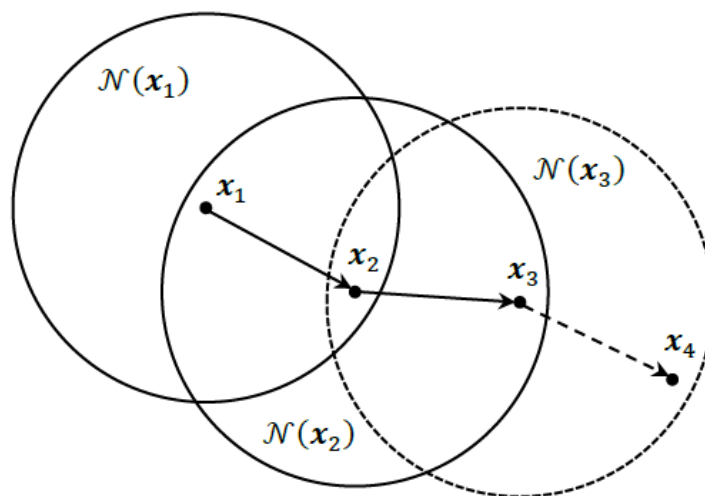
Passo 3: Uma busca local em torno da solução gerada x' é realizada, obtendo uma nova solução x'' ;

Passo 4: Se a solução x'' é melhor que a incumbente x , mova ($x \leftarrow x''$) e continue a busca em N_1 ($k \leftarrow 1$); caso contrário faça $k \leftarrow k + 1$;

Passo 5: **If** $k < k_{m\acute{a}x}$: retorna para passo 2; **Else:** **End VNS**

A Figura 3 descreve o processo de busca em vizinhança:

Figura 3: Processo de busca em vizinhança.



Fonte: Possagnolo (2015)

Na Figura 3 se observa o processo de exploração de soluções no espaço de vizinhança, a qual indica que $N(x_1)$ é a primeira estrutura de vizinhança ($k=1$), $N(x_2)$ é a segunda estrutura de vizinhança ($k=2$) e assim por diante.

Inicialmente é gerada uma solução inicial x_1 , e a partir desta solução se define uma estrutura de vizinhança $N(x_1)$. Em seguida, uma solução x_2 é gerada dentro da vizinhança $N(x_1)$. Após gerar a solução x_2 , uma busca local é realizada em torno desta solução, isto é, uma busca dentro da vizinhança $N(x_2)$, onde é obtida uma solução melhorada em comparação com x_1 . O ótimo local encontrado em torno de x_2 é visto como uma nova solução inicial e, se o número máximo de estruturas de vizinhanças não foi atingido ($k < k_{máx}$), gera-se uma nova solução x_3 dentro da vizinhança $N(x_2)$. A solução x_3 define uma estrutura de vizinhança $N(x_3)$ onde é encontrada a solução x_4 . Uma busca local é realizada em torno de x_4 , entretanto a busca não encontra soluções melhores que x_3 , portanto o algoritmo encerra as buscas.

4. BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES

Antes de desenvolver a metodologia é necessário representar uma solução para o problema alocação de medidores visando à EE através de um vetor indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Exemplo de um vetor solução.

Tipo de medição	Tensão nas barras			Fluxo de potência nas linhas		Injeção de potência nas barras			
	V1	V10	V14	FPP LT02	FPQ LT02	Pinj3	Qinj3	Pinj6	Qinj6
Valores em p.u.	1,1	1,03	1,02	1,57	-0,2	-0,94	0,04	-0,11	0,05

Fonte: Do autor

O vetor de solução é composto por dados de canais de medição que serão utilizados pela EE. No vetor apresentado na Tabela 1, cada elemento representa um canal de medição. Na metodologia, foram considerados canais de medição da magnitude de tensão nas barras (V_i , onde $i \in 1, 2, \dots, n_v$); canais de potência ativa e reativa injetada na barra ($Pinj_k, Qinj_k$, onde $k \in 1, 2, \dots, n_{pinj}$) e fluxo de potência ativa e reativa que flui na linha (FPP_j, FPQ_j onde $j \in 1, 2, \dots, n_{FPP}$).

No caso da solução apresentada na Tabela 1, observam-se 6 medidores, que em conjunto, vão ter 7 canais de medição. Dos canais de medição dessa solução, são 3 os canais de medição de tensão, 2 de fluxo de potência e 2 canais de potência injetada.

Para realizar a busca pela solução ótima, o algoritmo VNS foi adaptado ao PAOM. No caso dessa metodologia, o algoritmo vai realizar trocas de canais de medição, ou seja, a vizinhança de uma solução será composta por outra solução que consiste em um vetor de solução semelhante ao da Tabela 1, porém com o arranjo de canais de medição diferentes. A continuação será detalhada a seguir:

Passo 1: É definido o valor de $k_{máx} = 2$ e gerada uma solução inicial aleatória com número muito reduzido de canais de medição, ao ponto de não ser possível estimar as variáveis de estado. É adicionado, aleatoriamente, um canal de medição por vez até que o programa de EE consiga estimar as variáveis (não retornar erro na EE). Considere esta solução com n_{total} de medições aleatórias (arranjo de canais de medição) como inicial ou solução incumbente x e avalie-se a função objetivo indicada na Equação (5.1).

Como critério de saída de uma estrutura de vizinhança (busca local) foi definido o número máximo de iterações na qual não se produz melhoria ($Max_{vistas} \times k$). Como critério de convergência, definiu-se o número máximo de visitas na busca local ($Max_{visitas} * k$). A título de exemplo, considera-se a solução indicada na Tabela 1 como solução inicial x .

Passo 2: Gera-se uma solução x' na k -ésima vizinhança N_k a partir da solução incumbente x . Para isso, altera-se k posições de canais de medição de forma aleatória. Por exemplo, na Tabela 2, em $k=2$, troca-se dois canais de medição (um de tensão na barra 14 e outro de injeção de potência na barra 3) por outros dois canais de medição não existentes em x (um canal de fluxo de potência na linha LT04 e outro de potência injetada na barra 7). Desta forma uma nova solução x' é gerada.

Canais de medição de tensão na barra de referência e nas barras de geração são fixos, assim como canais de injeção de potência nas barras de geração são fixos.

Tabela 2: Exemplo troca de parâmetros em $k=2$.

$x =$	V1	V10	V14	FPP LT02	FPQ LT02	Pinj3	Qinj3	Pinj6	Qinj6	
	1.1	1.03	1.02	1.57	-0.19	-0.94	0.044	-0.11	0.05	
$x' =$	V1	V10	FPP LT02	FPQ LT02	FPP LT04	FPQ LT04	Pinj6	Qinj6	Pinj7	Qinj7
	1.1	1.03	1.57	-0.19	1.25	-0.23	-0.11	0.05	-0.99	0.056

Fonte: Do autor

Passo 3: Uma busca local em torno da solução gerada x' é realizada, obtendo uma nova solução x'' . Para isso, troca-se só um canal de medição de forma aleatória por outro canal de medição que não exista na solução x' . Continuando com o exemplo, troca-se um canal de medição (um de tensão na barra 10) por outro canal de medição não existente em x' (um de potência injetada na barra 5) como ilustra a Tabela 3.

Tabela 3: Exemplo de um vetor solução x'' .

x'	V1	V10	FPP LT02	FPQ LT02	FPP LT04	FPQ LT04	Pinj6	Qinj6	Pinj3	Qinj3	
=	1.1	1.03	1.57	-0.2	1.25	-0.23	-0.11	0.05	-0.99	0.0567	
x''	V1	FPP LT02	FPQ LT02	FPP LT04	FPQ LT04	Pinj6	Qinj6	Pinj7	Qinj7	Pinj5	Qinj5
=	1.1	1.57	-0.19	1.25	-0.23	-0.11	0.05	-1	0.0567	-0.81	0.043

Fonte: Do autor

Passo 4: Avalia-se a função objetivo da solução x'' aplicando a Equação (5.1). Caso x'' tenha melhor valor de função objetivo que a solução incumbente x , move-se ($x \leftarrow x''$) e reinicia-se a busca em N_k ($k=1$); caso contrário faça $k = k + 1$.

Para cada solução encontrada no VNS se calcula a EE na qual se indica um erro de EE. Se este erro é menor que um erro pré-estabelecido $ERRO_{pré-estabelecido}$ o VNS encontrou a solução procurada e finaliza. Para depois, reduzir a solução em um canal de medição e a metodologia começa de novo, até não encontrar uma solução que atenda o $ERRO_{pré-estabelecido}$.

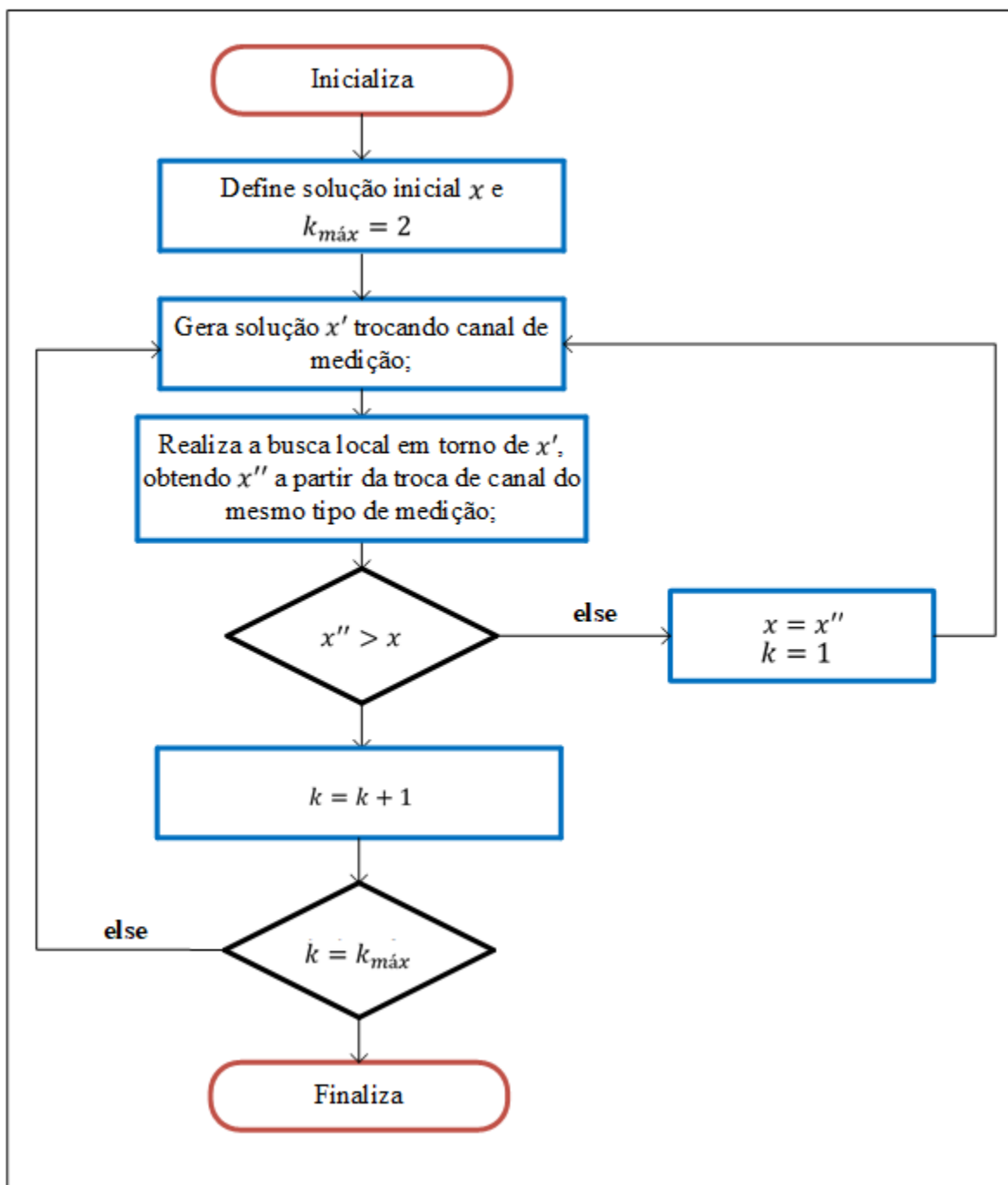
Para o exemplo, a busca local, considerando $k = 1$, criam-se 20 soluções aleatórias x'' em torno de x' e 40 soluções aleatórias se $k = K_{máx}$. Na busca local, as trocas de medidores só ocorrem entre canais de medição do mesmo tipo.

Foi limitado o número de trocas de arranjos de medidores, pois existem um número muito grande de possíveis soluções dentro de um conjunto de vizinhanças. O programa só realiza trocas de arranjos de medidores quando observa que a solução gerada x'' tem valor de FO menor que da solução inicial x , resultando em decréscimo do erro obtido a cada troca. Após várias

trocas, o erro não varia com tanta intensidade e já se mostra suficientemente pequeno em relação ao erro inicial, portanto o programa finaliza sem precisar testar todas as possíveis soluções.

Para auxiliar a visualização do algoritmo proposto, observe o fluxograma da Figura 4:

Figura 4: Fluxograma VNS aplicado ao PAOM



Fonte: Do autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia proposta neste trabalho foi aplicada em duas redes de 14 barras (ver Figura 1) e de 30 barras (Figura 2), ambas do IEEE, disponível em LaPSEE (2021). A implementação computacional foi realizada em Matlab™.

A Tabela 4 detalha informações a respeito dos sistemas de teste que foram utilizados na metodologia. Cada rede tem um número de barramentos e de linhas que possibilitam um número diferente de canais de medição que podem ser alocados.

Tabela 4: Número de canais de medição que podem ser alocados em cada sistema de teste da metodologia

Descrição do canal de medição	Rede de 14 barras	Rede de 30 barras
Número de canais de medição de tensão nas barras	14	30
Número de canais de medição de potência ativa e reativa nas barras	14	30
Número de canais de medição de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas	20	40
Número total de canais de medição	48	100

Fonte: Do autor

Na seção 5.1 a seguir será detalhado os resultados obtidos com os testes da metodologia na rede de 14 barras do IEEE.

5.1. Testes utilizando a rede de 14 barras

As tabelas de resultados a seguir correspondem aos testes realizados para a rede de 14 barras do IEEE.

A Tabela 5 indica o resumo do número de canais de medição encontrados após a execução do VNS para a rede comparando com o número máximo de canais de medição. A tabela evidencia também algumas características da execução, como $k_{máx}$ e o número máximo de visitas durante a busca local.

Tabela 5: Resumo da execução na rede de 14 barras

Paramêtros	14 barras
Nº máximo de canais de medição	48
Nº de canais de medição encontrado pelo VNS	18
Nº de medidores	12
$k_{máx}$	2
Nº máximo de visitas	$20 \times k$

Fonte: Do autor

A melhor solução obtida pelo VNS foi um arranjo de 18 canais de medição (12 medidores), representando apenas 37,5% do número máximo de canais de medição.

A Tabela 6 indica três soluções diferentes encontradas pelo VNS para esta rede. A solução final é definida como a melhor solução encontrada. Na tabela é possível ver o valor da função objetivo FO para cada solução e o número de fluxos de EE utilizados.

Tabela 6: Resultados da metodologia para testes na rede de 14 barras

Parâmetros de Desempenho	Respostas		
	Inicial	Intermediaria	Final
Nº de solução			
Número de medições	29	24	18
FO da solução	0,0008	0,0007	0,0015
Número de fluxos de EE utilizados	3991	2081	81

Fonte: Do autor

É possível observar que para a solução com menor número de medições, o valor da FO se elevou, como esperado, pois, a quantidade de dados interfere diretamente na precisão das variáveis estimadas na EE. Embora o valor da FO tenha sido aumentado, é visto como aceitável pois está na ordem de 10^{-3} , tornando essa configuração como a mais viável e, conseqüentemente, mais econômica para o sistema de medições.

Na Tabela 7 a seguir, são indicadas as localizações dos canais de medição da melhor solução obtida com os testes no SEP de 14 barramentos.

Tabela 7: Localização dos canais de medição na solução final para a rede de 14 barras

Solução final para rede de 14 barras			
Canais de Medição	Tipo de elemento	Elementos	Total de canais
Tensão (V_i)	Barra	1;2;3;6;8;10	6
Fluxo de potência $FPP - LT_j$ e $FPQ - LT_j$	Linha	1-2;4-5;4-9;6-13;7-9;10-11;13-14	7
Injeção de potência $Pinj_k$ e $Qinj_k$	Barra	4;5;7;11;13	5

Fonte: Do autor

Dos 18 canais de medição dessa solução, 6 medições são de módulo da tensão nos barramentos, 7 medições para obtenção de fluxo de potência nas linhas e 5 medições que foram utilizadas para obtenção de potência injetada no barramento.

Os resultados estimados comparados com os resultados medidos para o SEP de 14 barras são detalhados na Tabela 8. Como existem canais de medição de tensão que não foram ativados, o valor da FO é obtido apenas entre os valores de tensão estimados nas barras que possuem canais de medição de tensão.

Tabela 8: Valores de tensão obtidos via EE para a solução final encontrada para a rede de 14 barras

Barra	V estimado [p.u]		V [p.u] medido	Erro
	V	Φ		
1	1,0604	0,000	1,060	0,0004
2	1,0446	-4,972	1,045	0,0004
3	1,0101	-12,917	1,010	0,0001
4	1,0145	-10,241	-	-
5	1,0174	-8,749	-	-
6	1,0704	-14,381	1,070	0,0004
7	1,0502	-13,083	-	-
8	1,0846	-12,962	1,090	0,0054
9	1,0330	-14,663	-	-

10	1,0355	-15,002	1,033	0,0025
11	1,0479	-14,810	-	-
12	1,0541	-15,242	-	-
13	1,0476	-15,274	-	-
14	1,0216	-16,037	-	-

Fonte: Do autor

Com esses resultados, é possível observar a precisão entre os módulos de tensão estimados e medidos. Em algumas barras o erro de medição foi mais elevado como na barra 8 que atingiu 0,0054. Porém foram obtidos valores mais precisos como é o caso da barra 3, onde o erro foi de 0,0001. O valor da FO para esse cenário, considerando os erros individuais entre resultados medidos e estimados, foi de 0,0015, que pode ser observado na quarta linha da Tabela 5.

5.2. Testes utilizando a rede de 30 barras

As tabelas de resultados a seguir correspondem aos testes realizados para a rede de 30 barras do IEEE. Os testes realizados na rede de 30 barras foram feitos de forma análoga aos testes realizados na rede de 14 barras.

A Tabela 9 indica três soluções distintas, sendo a primeira solução a execução com maior número de medidores alocados, a segunda solução a execução com um número intermediário de medidores alocados e, por fim, a última solução que representa a melhor solução com o menor número de medidores alocados.

Tabela 9: Resultados da metodologia para testes na rede de 30 barras

Parâmetros de Desempenho	Respostas		
	Inicial	Intermediaria	Final
N° de solução			
Número de medições	69	61	39
FO da melhor solução	0,0007	0,0010	0,0030
Número de fluxos de EE utilizados	2741	2941	21

Fonte: Do autor

Nota-se que a metodologia encontrou 39 canais de medição como quantidade mínima, o que representa uma redução de 61% quando comparado com a situação onde há medições em todos os pontos da rede elétrica (100 medições).

A Tabela 10 ilustra os locais dos pontos de medição indicados pela melhor solução (39 canais). De forma a complementar os resultados da Tabela 10, tem-se a Tabela 11 que apresenta um paralelo entre os pontos de medições da solução obtida com o cenário considerando todos os pontos de medição (100 canais de medição).

Tabela 10: Localização dos canais de medição na solução final para a rede de 30 barras

Solução final para rede de 30 barras			
Canais de Medição	Tipo de elemento	Elementos	Total de canais
Tensão (V_i)	Barra	1;2;5;8;10;11;13;21;30;	9
Fluxo de potência $FPP - LT_j$ e $FPQ - LT_j$	Linha	1-2;2-4;2-5;3-4;6-8;10-20;10-21;10-22;12-14;12-15;16-17;19-20;25-27;28-27	14
Injeção de potência $Pinj_k$ e $Qinj_k$	Barra	4;5;6;9;11;12;14;15;16;18;21;24;26;27;28;29	16

Fonte: Do autor

Tabela 11: Alocação de canais de medição considerando todos os pontos e considerando a solução final da rede de 30 barras

Med.	100 Medições			39 Medições		
	V	$Pinjk/Qinjk$	FPP/FPQ	V	$Pinjk/Qinjk$	FPP/FPQ
1	1	1	1-2;1-3	1	-	1-2
2	2	2	2-4;2-5;2-6	2	-	2-4;2-5
3	3	3	3-4;	-	-	3-4
4	4	4	4-6;4-12	-	4	-
5	5	5	5-7;	5	5	-
6	6	6	6-7;6-8;6-9;6-10;6-28	-	6	6-8
7	7	7	-	-	-	-
8	8	8	8-28	8	-	-
9	9	9	9-10;9-11	-	9	-

10	10	10	10-17;10-20;10-21;10-22	10	-	10-20;10-21;10-22
11	11	11	12-13;12-14;	11	11	-
12	12	12	12-13;12-14;12-15;12-16;	-	12	12-14;12-15
13	13	13	-	13	-	-
14	14	14	14-15	-	14	-
15	15	15	15-18;15-23	-	15	-
16	16	16	16-17	-	16	16-17
17	17	17	-	-	-	-
18	18	18	18-19	-	18	-
19	19	19	19-20	-	-	19-20
20	20	20	-	-	-	-
21	21	21	21-23	21	21	-
22	22	22	22-24	-	-	-
23	23	23	23-24	-	-	-
24	24	24	24-25	-	24	-
25	25	25	25-26;25-26	-	-	25-27
26	26	26	-	-	26	-
27	27	27	27-29;27-30	-	27	-
28	28	28	28-27	-	28	28-27
29	29	29	29-30	-	29	-
30	30	30	-	30	-	-

Fonte: Do autor

A Tabela 12 ilustra valores de tensão em p.u. da melhor solução (39 canais) encontrados pela metodologia. A última coluna indica os erros entre valores estimados e medidos. Assim como visto na Tabela 7, existem canais de medição de tensão que não foram medidos, portanto o valor da FO é obtido apenas entre os valores de tensão estimados nas barras que possuem canais de medição de tensão.

Tabela 12: Valores de tensão obtidos via EE para a solução final encontrada para a rede de 30 barras

Barra	V estimado		V Medido	Erro
	V	Φ		
1	1,0632	0,0000	1,0600	0,0032
2	1,0454	-5,3122	1,0430	0,0024

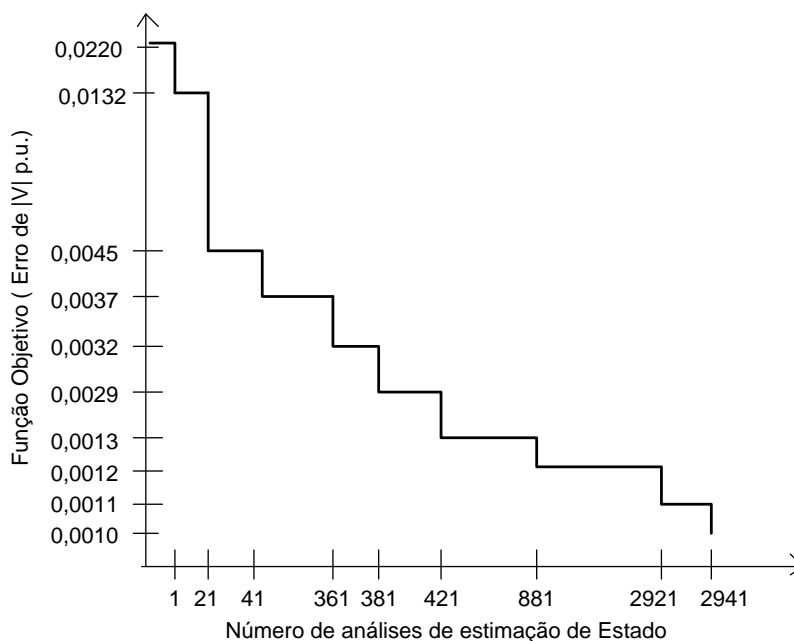
3	1,0206	-7,4543	-	-
4	1,0113	-9,2033	-	-
5	1,0100	-14,0802	1,0100	0,0000
6	1,0099	-10,9604	-	-
7	1,0009	-12,7458	-	-
8	1,0102	-11,7196	1,0100	0,0002
9	1,0369	-13,9859	-	-
10	1,0237	-15,5993	-	-
11	1,0685	-13,9859	1,0820	0,0135
12	1,0517	-15,0570	-	-
13	1,0736	-15,0780	1,0710	0,0026
14	1,0342	-15,9297	1,0320	0,0022
15	1,0273	-15,9358	-	-
16	1,0327	-15,5550	-	-
17	1,0212	-15,7968	1,0188	0,0024
18	1,0137	-16,5298	-	-
19	1,0089	-16,6873	-	-
20	1,0118	-16,4735	-	-
21	1,0105	-16,1428	1,0082	0,0023
22	1,0142	-15,9101	-	-
23	1,0109	-16,1541	-	-
24	1,0008	-16,1830	-	-
25	1,0033	-15,8195	-	-
26	0,9854	-16,2513	-	-
27	1,0146	-15,4045	-	-
28	1,0081	-11,6016	-	-
29	0,9950	-16,5907	-	-
30	0,9838	-17,4155	0,9828	0,0010

Fonte: Do autor

Dos resultados obtidos é possível notar a proximidade entre valores do módulo de tensão estimados e módulo de tensão medidos. O erro obtido entre valores estimados e medidos se encontra entre 10^{-3} e 10^{-4} , evidenciando a boa precisão dos estados estimados. O valor da FO para esse cenário, considerando os erros individuais entre resultados medidos e estimados, calculado segundo a Equação (5.1) foi de 0,0015, que pode ser visto na quarta linha da Tabela 5.

Com o objetivo de ilustrar a convergência do VNS no processo de otimização, tem-se a Figura 5 foi construída para a obtenção da solução intermediária com 61 medições (rede de 30 barras).

Figura 5: Convergência do VNS na obtenção da solução intermediária da rede de 30 barras



Fonte: Do autor

Nota-se o comportamento decrescente da função objetivo à medida que ocorreram as iterações. A solução inicial desta execução apresentou valor de FO de 0,0220 enquanto a solução encontrada com 61 medições registrou um valor de FO de 0,0010, o que corresponde a uma redução de 95,5% do erro calculado.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia para encontrar um número reduzido de medidores, os quais são utilizados na EE de um SEP. Para isso, foi utilizada a técnica metaheurística de otimização VNS, em conjunto com a metodologia de Estimação de Estados.

Foram realizados testes na rede de 14 barras e 30 barras do IEEE onde foram obtidos bons resultados, pois o algoritmo implementado foi capaz de encontrar melhores soluções com arranjos de medidores diferentes.

Nos testes realizados, a solução que obteve o menor número de medições foi considerada como melhor solução para ambas as redes testadas. Embora essas soluções tenham apresentado valor mais elevado de FO, quando comparadas com as soluções com maiores números de canais de medição, os resultados das variáveis de estado estimados atenderam o valor pré-estabelecido que avalia a qualidade de EE. Com o arranjo de canais de medição obtido nesse trabalho, é possível tornar a operação do SEP mais econômica.

A partir dos testes, observou-se que à medida que a quantidade de canais de medição diminui, é reduzido também o número de iterações e análises de EE para encontrar a solução procurada, porque o espaço de soluções é reduzido.

Na sequência da pesquisa, como trabalho futuro, pretende-se avaliar a metodologia em redes elétricas de maior porte, com a finalidade de conferir a redução percentual de pontos de medição. Além de se utilizar PMUs na metodologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASY, N. H.; ISMAIL, H. M. A unified approach for the optimal pmu location for power system state estimation. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 806–813, 2009.

ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. Power system state estimation: theory and implementation. [S.l.]: CRC press, 2004.

AMINIFAR, F. et al. Observability of hybrid ac/dc power systems with variable-cost pmus. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 29, n. 1, p. 345–352, 2013.

ATANASOAE, P.; PENTIUC, R. Indices for the power quality monitoring in the romanian power transmission system. In: IEEE. *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.], 2014. p. 68–71.

BOTTURA, F. B. et al. Optimal positioning of power quality meters for monitoring potential conditions of harmonic resonances in a mv distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 34, n. 5, p. 1885–1897, 2019.

CHAKRABORTTY, A.; MARTIN, C. F. Optimal measurement allocation algorithms for parametric model identification of power systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 1801–1812, 2014.

FARSADI, M.; GOLAHMADI, H.; SHOJAEI, H. Phasor measurement unit (pmu) allocation in power system with different algorithms. In: IEEE. *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009*. [S.l.], 2009. p. I–396.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power system analysis & design, SI version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.

HANSEN, P. et al. Variable neighborhood search: basics and variants. *EURO Journal on Computational Optimization*, Springer, v. 5, n. 3, p. 423–454, 2017.

HU, L. et al. A constrained optimization approach to dynamic state estimation for power systems including pmu and missing measurements. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 703–710, 2015.

JEONG, H.-M.; LEE, H.-S.; PARK, J.-H. Application of parallel particle swarm optimization on power system state estimation. In: IEEE. *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*. [S.l.], 2009. p. 1–4.

JR, W. S.; GRAINGER, J. *Power system analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994.

JUNGKLASS, M. S. P. et al. *MemOpt: Automated Memory Distribution for Multicore Microcontrollers with Hard Real-Time Requirements*. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9781728127699.

KANDASAMY, D.; HUSSAIN, A. R. Enhancement of power system observability by optimal allocation of phasor measurement unit. In: IEEE. *2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*. [S.l.], 2015. p. 1–4.

LaPSEE (2021). Repositório de testes. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>. Acesso em: Fev. 2021.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.

MUSCAS, C. et al. Optimal allocation of multichannel measurement devices for distribution state estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 58, n. 6, p. 1929–1937, 2008.

NETO, I.; SALEM, M. *Estimação de estado para redes de distribuição de energia elétrica avançadas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

QI, J.; SUN, K.; KANG, W. Optimal pmu placement for power system dynamic state estimation by using empirical observability gramian. *IEEE Transactions on power Systems*, IEEE, v. 30, n. 4, p. 2041–2054, 2014.

RAPOSO, A. A. M. et al. Alocação de medidores para a estimação de estado em redes elétricas inteligentes. Universidade Federal do Maranhão, 2016.

SINGH, R. et al. Meter placement for distribution system state estimation: An ordinal optimization approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2328–2335, 2011.

VIGLIASSI, M. P. et al. Algoritmo evolutivo multi-objetivo para redução de custos na alocação de medidores scada e pmu para efeito de estimação de estado. In: *Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.: s.n.], 2016.

XIANG, Y.; RIBEIRO, P. F.; COBBEN, J. F. Optimization of state-estimator-based operation framework including measurement placement for medium voltage distribution grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 6, p. 2929–2937, 2014.

XYGKIS, T. C.; KORRES, G. N. Optimized measurement allocation for power distribution systems using mixed integer sdp. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, IEEE, v. 66, n. 11, p. 2967–2976, 2017.

YUEHAO, Y. et al. A distribution network state estimation method based on power user electric energy data acquisition system. In: IEEE. *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.], 2016. p. 1–4.

ZHAO, Z. et al. Optimal placement of pmus and communication links for distributed state estimation in distribution networks. *Applied Energy*, Elsevier, v. 256, p. 113963, 2019.

ZVIETCOVICH, W. G. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.

ZVIETCOVICH, W. G.; CARDOSO, E. M.; MANSO, J. C. G. Optimal allocation of meters for monitoring voltage sags and swells using the grasp-vns optimisation algorithm. In: IEEE. *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*. [S.l.], 2013. p. 1–5.