

ALOCAÇÃO DE MEDIDORES VISANDO À ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NA OPERAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

G. F. Machado **W. G. Zvietcovich** **F; R. A. C. Baracho**
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP - MG, Brasil
gabriel.machado2@aluno.ufop.edu.br wilingthon@ufop.edu.br f_baracho@ufop.edu.br

Abstract – This work illustrates the implementation of the Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic to solve the problem of allocation of monitors in Electric Power Systems (SEP). This problem is framed in the mathematical programming and solved in the literature by non-exact technique. The monitors have different reference channels (voltage, active and reactive power) registering effective values, which are used in the SEP State Estimation (EE). For this, the EE concepts are used by the Weighted Least Squares method. The methodology was implemented step by step, as well as their own strategies in the application of this problem, with the goal to find better results. The objective is to find the minimum number of monitors and the configuration with this minimum numbers of monitors that generates the smallest error between estimated and measured values. To test the methodology used, two IEEE networks, the 14-bar and the 30-bar network, found satisfactory results.

Keywords – State Estimation, Meter Allocation, VNS, SEPs.

Resumo – Este trabalho ilustra a implementação da metaheurística Variable Neighborhood Search (VNS) para solucionar o problema de alocação de medidores em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Sendo este problema enquadrado na programação matemática inteira mista e resolvida na literatura através de técnicas não exatas. Os medidores possuem diferentes canais de medição (tensão, potência ativa e reativa) registrando valores eficazes, os quais serão utilizados na Estimação de Estado (EE) do SEP. Para isso, conceitos de EE via método de Mínimos Quadrados Ponderados são utilizados. Implementou-se a metodologia passo a passo, assim como estratégias próprias na aplicação deste problema, com a finalidade de encontrar melhores resultados. O objetivo é encontrar simultaneamente uma quantidade mínima de medidores e a configuração com esta mínima quantidade de medidores que gere o menor erro entre valores estimados e valores medidos. Para testar a metodologia foram utilizadas duas redes do IEEE, uma de 14 barras e a outra de 30 barras, encontrando resultados satisfatórios.

Palavras chave – Estimação de Estados, Alocação de Medidores, VNS, SEPs.

1 Introdução

A operação de um SEP deve ser monitorada em tempo real, visando conhecer os parâmetros os quais auxiliam a tomada de decisão dos operadores em relação a diferentes aspectos, sendo alguns deles referentes à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), confiabilidade e segurança adequados. A partir destes valores, o desenvolvimento de ações e/ou medidas irá propiciar uma melhor adequação à operação do SEP a estes níveis indicados pelas normas, Atănăsoae; Pentiu (2014).

Com o decorrer do tempo e o avanço das tecnologias de medição e comunicação, atrelado à redução dos custos destes equipamentos, foi possível instalar medidores que possuem diferentes canais de medição nos SEPs (tensões, correntes e fluxos de potência). Neste contexto, viabilizou-se o desenvolvimento de sistemas de monitoramento associados às técnicas de Inteligência Artificial, a fim de monitorar uma quantidade de parâmetros, muito menor do que o número total de parâmetros possíveis no SEP, sendo estes parâmetros, tensão, potência líquida e fluxo de potência. Desta forma, reduzindo o número de canais de medição, a implementação destes sistemas de monitoramento torna-se viável economicamente, Grainger; Stevenson (1994).

É possível estimar os parâmetros de um SEP utilizando um conjunto de medições, as quais possuem incertezas próprias dos medidores e da comunicação. Esta estimação é realizada através de um método amplamente utilizado na literatura, Grainger; Stevenson (1994), denominado Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), o qual processa estas medidas de forma a estimar valores para a tensão complexa em todas as barras e, desta forma, permite estimar as demais grandezas necessárias

para a análise e monitoramento do SEP em qualquer instante de operação normal, emergencial ou restaurativo Costa et al. (2016).

Neste trabalho, a EE é utilizada como uma ferramenta matemática para avaliar o modelo matemático do Problema de Alocação Ótima de Medidores (PAOM) proposto.

Na literatura, foram encontrados trabalhos voltados para a determinação de um número mínimo de medidores (canais de medição) que fazem com que a EE seja mais precisa. Raposo (2016) propõe uma melhoria do desempenho computacional de técnicas existentes para alocação de medidores preservando a precisão da EE e utilizando a Simulação de Monte Carlo, além de usar fórmulas analíticas para determinar os riscos, os quais são baseados em modelos linearizados.

Em Kandasamy; Hussain (2015), os autores propõem um modelo matemático enquadrado na programação linear inteira, com o objetivo de monitorar os SEPs através de um índice de observabilidade, utilizando unidades de medição fasorial (do inglês: PMU). Também em Jeong et al. (2009), os autores utilizam PMUs para monitorar os SEPs utilizando a programação linear inteira binária.

Em Abbasy; Ismail (2009), o algoritmo Particle Swarm Optimization em um ambiente de processamento paralelo baseado no PC Cluster System é utilizado, com a finalidade de reduzir custos computacionais e encontrar a solução ótima da EE nos SEPs.

Em Singh et al. (2011), os autores apresentam o problema de alocação de medidores para estimação de estados em sistemas de distribuição. Apresenta-se, neste trabalho, 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.

Em Muscas et al. (2008), é proposto um algoritmo de otimização baseado em técnicas de programação dinâmica, objetivando escolher o número e a posição ótima dos dispositivos de medição, garantindo o custo mínimo para a obtenção dos dados medidos com precisão.

De forma complementar ao que existe na literatura, propõe-se, então, este trabalho, que consiste em implementar a técnica metaheurística Variable Neighborhood Search (VNS), Mladenović; Hansen (1997) para resolver o PAOM utilizando medidores convencionais, os quais registram valores eficazes, tratando o PAOM dentro da programação inteira mista.

Para verificar a eficácia da metodologia apresentada, foram realizados testes utilizando as redes de 14 e 30 barras do IEEE.

2 Formulação do problema

De acordo com Angel (2015), o PAOM utilizando medidores convencionais é análogo a um problema clássico de otimização combinatória chamado de cobertura, no qual o objetivo é observar todos os vértices de um grafo a partir de um número mínimo de observações alocados nos vértices. Traduzindo para o PAOM, significa monitorar (observar) as tensões complexas em todas as barras a partir de um conjunto mínimo de medições alocadas em alguns pontos do SEP. Para isso, a ferramenta matemática de EE e o método dos MQP são empregados, Grainger; Stevenson (1994).

Como indicado no item 1, seria inviável instalar medidores ou medições em todos os pontos (barras, linhas e cargas) do SEP, pois significaria um custo muito oneroso. A partir desta limitação, surgem as seguintes perguntas: quantas unidades mínimas de medidores são necessárias para atender aos requisitos de EE? Quais seriam os canais de medição e onde devem ser instalados? Responder a estas perguntas significa solucionar o PAOM, que possui natureza combinatória, pois do contrário as possíveis soluções (configuração de medições) de um SEP poderiam chegar a centenas ou milhares.

A título de exemplo, tem-se a Figura 1, na qual dois sistemas de monitoramento foram instalados, com cores vermelha e azul. O primeiro sistema de monitoramento (cor vermelha), dispõe de 7 medidores e 13 canais de medição. Cada medidor possui 1 ou mais canais de medição, como por exemplo: o medidor M4 vermelho possui 4 canais de medição (um de tensão na barra 6; um de injeção de potência na barra 6; um de fluxo de potência ativa e reativa na linha 6-11).

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

Pode-se observar que é possível obter muitos arranjos de alocação de medidores e canais de medição. Em redes de grande porte, a quantidade de arranjos (combinações) pode chegar a milhares, não sendo possível analisar cada um destes arranjos.

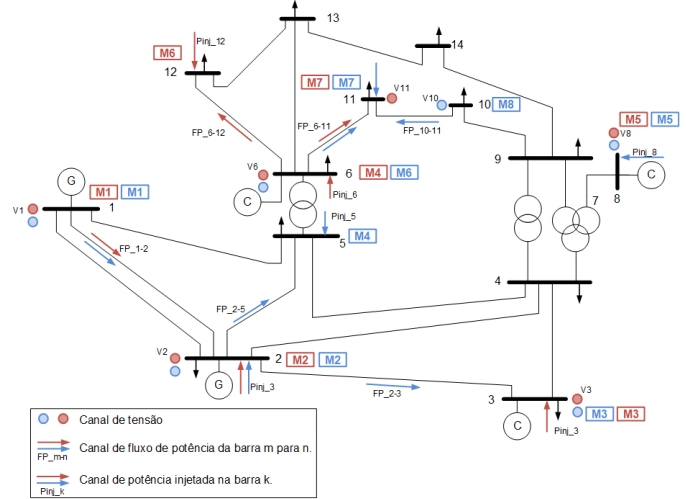


Figura 1. Diagrama unifilar da rede teste IEEE de 14 barras.

2.1. Representação do modelo matemático

O PAOM é representado de forma matemática através da função indicada da equação (1), que minimiza o erro quadrático entre os valores de parâmetros registrados pelos canais de medição (dos medidores) e os valores estimados via EE.

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \sqrt{(V_{m_k} - V_{E_k})^2} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{1}{N_{Pinj}} \sum_{k=1}^{N_{Pinj}} \sqrt{(Pinj_{m_k} - Pinj_{E_k})^2 + (Qinj_{m_k} - Qinj_{E_k})^2} \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{1}{N_{FP}} \sum_{i=1}^{N_{FP}} \sqrt{(FPP_{m_i} - FPP_{E_i})^2 + (FPQ_{m_i} - FPQ_{E_i})^2} \quad (4)$$

F_1, F_2, F_3 : Funções referentes aos medidores de Tensão, potência líquida injetada nas barras e 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 ou reativa nas linhas;

V_{m_k} : Tensão registrada pelo medidor na barra k ;

V_{E_k} : Tensão estimada na barra k ;

$Pinj_{m_k}$: Potência ativa injetada registrada na barra k ;

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

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

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

FPP_{m_i} : Potência ativa registrada na linha i ;

FPP_{E_i} : Potência ativa estimada na linha i ;

FPQ_{m_i} : Potência reativa registrada na linha i ;

FPQ_{E_i} : Potência reativa estimada na linha i ;

s.a.

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

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

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 nas barras.

Quanto aos canais de medição, foram considerados a existência de três tipos: tensão nas barras N_v ; potência líquida ativa e reativa nas barras N_{pinj} e fluxo de potência ativa e reativa nas linhas N_{FP} . Desta forma:

$$N_v + N_{pinj} + N_{FP} = N_{canais} \quad (5)$$

Neste trabalho, foi considerado apenas erros dos canais de tensão, tendo em vista que estes medidores de tensão possuem menor erro quando comparados com medidores de potência.

3 Variable Neighborhood Search

A técnica meta-heurística Variable Neighborhood Search (VNS) proposta por Mladenović; Hansen (1997), é amplamente utilizada para resolver problemas de natureza combinatória em diferentes áreas do conhecimento, como em Ramli; Boucekara (2020), Liang et al. (2007). É baseada em um princípio simples, de mudar de estrutura de vizinhança N_k (k é a estrutura de vizinhança) no processo de busca de melhores soluções no espaço de soluções S , visando sair dos ótimos locais, como ilustra a Figura 2. na qual se observa N_1 e N_2 , que são as estruturas de vizinhança 1 e 2, respectivamente. Caso não encontre uma melhor solução em N_1 , procura-se em N_2 .

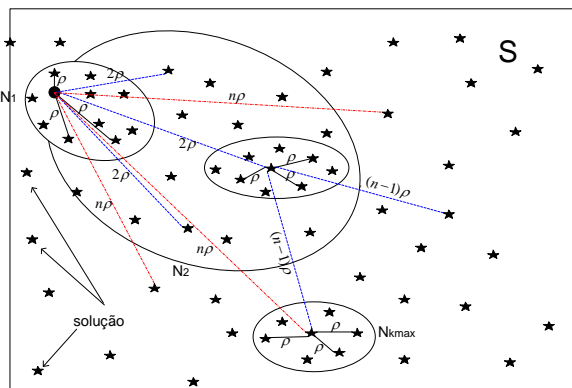


Figura 2. Geração de estruturas de vizinhança no VNS

O algoritmo aplicado neste trabalho é a versão VNS simples, apresentado por Mladenović; Hansen (1997), é descrito a seguir:

Algoritmo Variable Neighborhood Search

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 convergência;

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 solução incumbente x , mova ($x \leftarrow x''$) e continue a busca em N_1 ($k \leftarrow 1$); caso contrário continue a busca local. Após atingir $VIST_{max}$ de visitas faça $k \leftarrow k + 1$;

Passo 5: Se $k < k_{m\acute{a}x}$: retorna para passo 2; Caso Contrário: Fim VNS

4 Aplicação do VNS no POAP

Antes de ilustrar a aplicação da metodologia do VNS, é necessário definir a solução x , a qual é representada por um vetor de tamanho n_{canais} (número de canais de medição), ilustrado na Tabela 1, onde cada elemento indica o valor do canal de medição.

TABELA 1.
Exemplo de solução x

Tipo de medição	Tensão em barras			Fluxo de potência em linhas		Injeção de potência na barras			
	V1	V10	V14	FPP LT02	FPQ LT02	P inj3	Qinj3	P inj6	Qinj6
Valores em p.u.	1,06	1,03	1,02	1,57	-0,19	-0,942	0,044	-0,11	0,05

O detalhamento da aplicação do VNS no PAOM é descrito a seguir.

Passo 1: Define-se o valor de $k_{m\acute{a}x} = 2$ para este problema e gera-se uma solução (arranjo) aleatória viável com um número de canais de medição (n_{total}) elevado. Avalia-se a função objetivo indicada em (1). 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). 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 de geração de x' para $k=2$

$x =$	V1	V10	V14	FPP LT02	FPQ LT02	P inj3	Qinj3	P inj6	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	P inj6	Qinj6	P inj7	Qinj7
	1,1	1,03	1,57	-0,19	1,25	-0,23	-0,11	0,05	-0,99	0,056

Passo 3: Uma busca local em torno da solução gerada x' é realizada, obtendo uma nova solução x'' . Para isso, troca-se 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 geração de x'' (busca local)

x'	V1	V10	FPP LT02	FPQ LT02	FPP LT04	FPQ LT04	P inj6	Q inj6	P inj3	Q inj3
	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	P inj6	Q inj6	P inj7	Q inj7	P inj5	Q inj5
	1,1	1,57	-0,19	1,25	-0,23	-0,11	0,05	-1	0,0567	-0,81	0,043

Passo 4: Avalia-se a função objetivo da solução x'' aplicando (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 $k = k + 1$.

Caso no processo de busca do VNS seja encontrado uma solução com valor de função objetivo menor do que um valor pré-estabelecido *ERRO_{pré-estabelecido}*, finaliza o algoritmo e reduz um canal de medição na solução incumbente x . Em seguida, o algoritmo é novamente reiniciado, até encontrar um arranjo com menor número de canais de medição.

5 Resultados

A metodologia proposta foi testada em uma rede 14 barras do IEEE mostrada na Figura 1 e em outra rede de 30 barras do IEEE com dados obtidos em LaPSEE (2021). A implementação computacional foi realizada no Matlab™ em um computador equipado com Intel® Core™ i5 4440, 3,1GHz. A Tabela 4 indica informações destas redes elétricas.

A solução inicial foi gerada de forma aleatória com um elevado número de canais de medição, k_{max} igual a 2, N_{max_vist} igual a $20 \times k$ para as redes testadas. Já os erros dos medidores foram considerados para valores de tensão e potência igual a 1% e 2% respectivamente.

TABELA 4.
Canais de medição das redes testadas

Tipo de canais/Rede	14 barras	30 barras
Tensão nas barras (V)	14	30
Potência ativa e reativa nas barras (P inj, Q inj)	14	30
Fluxo de potência ativa e reativa nas linhas (FPP, FPQ)	20	40
Nº máximo de canais de medição (Solução inicial)	48	100

5.1. Rede de 14 barras

Como indicado, a metodologia inicia com uma elevada quantidade de canais de medição até encontrar uma mínima quantidade de canais de medição, que neste caso foram 18 canais. A Tabela 5 ilustra os resultados do processo de otimização para um valor inicial, intermediário e final de quantidade de canais de medição.

TABELA 5.
Resultados da metodologia – Rede de 14 barras

Parâmetros de Desempenho	Respostas		
	Inicial	Intermediária	Final
Nº de solução			
Número de medições	32	27	18
Erro da melhor solução	0,0008	0,0007	0,0015
Número de fluxos de EE utilizados	3991	2081	81

TABELA 6.
Canais de medição para a solução inicial e final

Barra	48 Medições (total de medições)			18 Medições (arranjo da solução)		
	V	P injk/Q injk	FPP/FPQ	V	P injk/Q injk	FPP/FPQ
1	1	1	1-2;1-5	1	-	1-2
2	2	2	2-3;2-4;2-5	2	-	-
3	3	3	3-4	3	-	-
4	4	4	4-5;4-7;4-9	-	4	4-5;4-9
5	5	5	5-6	-	5	-
6	6	6	6-11;6-12;6-13	6	-	6-13
7	7	7	7-8;7-9	-	7	7-9
8	8	8	-	8	-	-
9	9	9	9-10;9-14	-	-	-
10	10	10	10-11	10	-	10-11
11	11	11	10-11	-	11	-
12	12	12	12-13	-	-	-
13	13	13	13-14	-	13	13-14
14	14	14	-	-	-	-

A Tabela 6 detalha os canais de medição e os pontos de medição da solução encontrada pela metodologia (18 medições) e daquela solução considerando que o SEP possui canais de medição em todos os pontos (48 medições). A partir destes dados, é possível notar que houve uma redução de 62% do número de canais de medição.

A Tabela 7 ilustra os resultados das tensões da solução encontrada (18 medições) e dos valores registrados pelos medidores, além do erro deste parâmetro.

TABELA 7.

Valores de tensão estimado na solução final – Rede de 14 barras

Barra	V estimado		V Medido	Erro	Barra	V estimado		V Medido	Erro
	V	Φ				V	Φ		
1	1,0604	0,000	1,060	0,0004	8	1,0846	-12,962	1,090	0,0054
2	1,0446	-4,972	1,045	0,0004	9	1,0330	-14,663	-	-
3	1,0101	-12,917	1,010	0,0001	10	1,0355	-15,002	1,033	0,0025
4	1,0145	-10,241	-	-	11	1,0479	-14,810	-	-
5	1,0174	-8,749	-	-	12	1,0541	-15,242	-	-
6	1,0704	-14,381	1,070	0,0004	13	1,0476	-15,274	-	-
7	1,0502	-13,083	-	-	14	1,0216	-16,037	-	-

5.2. Rede de 30 barras

De forma similar ao formato apresentado dos resultados para a rede de 30 barras, a Tabela 8 indica três soluções. Sendo que a metodologia encontrou 39 canais de medição como quantidade mínima.

TABELA 8.

Resultados da metodologia – Rede de 30 barras

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

A Tabela 9 ilustra os pontos de alocação dos canais de medição da solução (39 canais) encontrada pela metodologia. Observa-se que houve uma redução de 61% em relação a alocação de medições em todos os pontos da rede do SEP.

TABELA 9.

Alocação de canais de medição da solução final – Rede de 30 barras

Solução final para rede de 30 barras			
Canais de Medição	Tipo de elemento	Elementos	Total de canais
Tensão (Vi)	Barra	1;2;5;8;10;11;13;21;30;	9
Fluxo de potência FPP-LTj e FPQ-LTj	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 Pinjk e Qinjk	Barra	4;5;6;9;11;12;14;15;16;18;21;24;26;27;28;29	16

Finalmente a Tabela 10 ilustra valores de tensão estimadas a partir da solução obtida (39 canais) e comparada com valores registrados pelos medidores.

TABELA 10.

Valores de tensão estimado na solução final – Rede de 30 barras

Barra	V estimado		V Medido	Erro	Barra	V estimado		V Medido	Erro
	V	Φ				V	Φ		
1	1,0632	0,0000	1,0600	0,0032	16	1,0327	-15,5550	-	-
2	1,0454	-5,3122	1,0430	0,0024	17	1,0212	-15,7968	1,0188	0,0024
3	1,0206	-7,4543	-	-	18	1,0137	-16,5298	-	-
4	1,0113	-9,2033	-	-	19	1,0089	-16,6873	-	-
5	1,0100	-14,0802	1,0100	0,0000	20	1,0118	-16,4735	-	-
6	1,0099	-10,9604	-	-	21	1,0105	-16,1428	1,0082	0,0023
7	1,0009	-12,7458	-	-	22	1,0142	-15,9101	-	-
8	1,0102	-11,7196	1,0100	0,0002	23	1,0109	-16,1541	-	-
9	1,0369	-13,9859	-	-	24	1,0008	-16,1830	-	-
10	1,0237	-15,5993	-	-	25	1,0033	-15,8195	-	-
11	1,0685	-13,9859	1,0820	0,0135	26	0,9854	-16,2513	-	-
12	1,0517	-15,0570	-	-	27	1,0146	-15,4045	-	-
13	1,0736	-15,0780	1,0710	0,0026	28	1,0081	-11,6016	-	-
14	1,0342	-15,9297	1,0320	0,0022	29	0,9950	-16,5907	-	-
15	1,0273	-15,9358	-	-	30	0,9838	-17,4155	0,9828	0,0010

Com a finalidade de ilustrar a convergência do VNS no processo de otimização, foi construída a Figura 3 na obtenção da solução intermediária com 61 medições (rede de 30 barras).

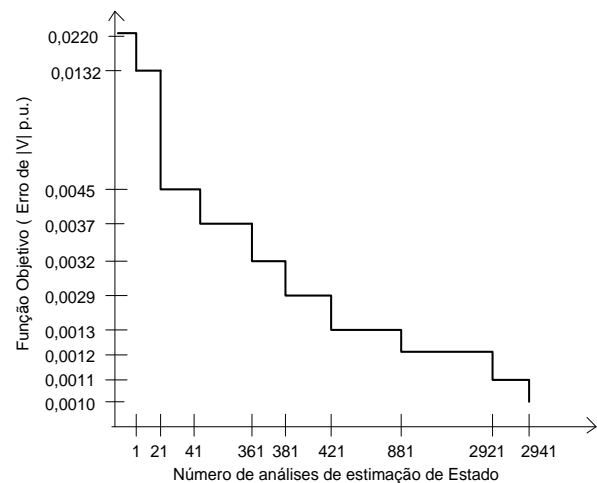


Figura 3. Convergência do VNS na obtenção da solução intermediária – Rede de 30 barras

6 Conclusões

Este trabalho apresenta a implementação de metaheurística Variable Neighborhood Search (VNS) aplicada ao problema de alocação ótima de medidores convencionais visando a Estimação de Estado.

Para avaliar o desempenho da metodologia foram utilizados sistemas de transmissão, sendo viável a aplicação deste trabalho em sistemas de distribuição considerando as particularidades, principalmente quanto ao maior tamanho destas redes elétricas.

Dos resultados, depreende-se que a metodologia conseguiu reduzir em mais de 60% a quantidade de pontos de medição,

quando comparado com o cenário onde todos os pontos do SEP possuíam medição.

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

Na sequência da pesquisa, como trabalho futuro, pretende-se avaliar a metodologia em redes elétricas de maior porte, reformular o modelo matemático considerando a perda de dados e/ou erros grosseiros no registro de algum medidor. Além de se utilizar PMUs na metodologia.

7 Referências

Atănăsoae, P.; Pentiu R. (2014) Indices for the power quality monitoring in the Romanian power transmission system, in 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), IEEE.

Grainger, J. J.; Stevenson, D. JR. W. (1994), Power system analysis. McGraw-Hill.

Costa, A. S.; Salgado, R. S.; Machado, L. J. B. (1999). Análise de Segurança de Sistemas de Potência - Apostila, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFSC.

Raposo, A. A. M. (2016). Alocação de medidores para a estimação de estado em redes elétricas inteligentes, Dissertação de Mestrado, UFMA.

Kandasamy, D.; Hussain, A. R. (2015). Enhancement of power system observability by optimal allocation of phasor measurement unit, in 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, IEEE.

Jeong, H.-M.; Lee, H.-S.; Park, J.-H. (2009). Application of parallel particleswarm optimization on power system state estimation, in 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, IEEE.

Abbasy, N. H.; Ismail, H. M. (2009). A unified approach for the optimal pmu location for power system state estimation, IEEE Transactions on power systems, vol. 24, no. 2.

Singh, R.; Pal, B. C.; Jabr R. A.; Vinter, R. B. (2011). Meter placement for distribution system state estimation: An ordinal optimization approach, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4.

Muscas, C.; Pilo, F.; Pisano, G.; Sulis S. (2008). Optimal allocation of multichannel measurement devices for distribution state estimation, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 6.

Mladenović, N.; Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search, Computers & operations research, vol. 24, no. 11.

Angel, D. (2015). A breadth first search approach for minimum vertex cover of grid graphs, in 2015 IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), IEEE.

Ramli, M. A.; Bouchekara, H. R. (2020). Solving the problem of large-scale optimal scheduling of distributed energy resources in smart grids using an improved variable neighborhood search," IEEE Access, vol. 8.

Liang, Y.-C.; Lo, M.-H.; Chen Y.-C. (2007). Variable neighbourhood search for redundancy allocation problems, IMA Journal of Management Mathematics, vol. 18, no. 2.

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