

Meta-heurística busca local iterada para o dimensionamento de uma microrrede para alimentação de uma estação de carregamento autônoma de veículos elétricos

Dayara P. Basso*, John F. Franco*, Matheus Holzbach*, Lucas Teles Faria**

* Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Professor José Carlos Rossi, 1370, Câmpus 3, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil (e-mails: dayara.pereira@unesp.br, fredy.franco@unesp.br, matheus.holzbach@unesp.br).

** Faculdade de Engenharia e Ciências, Departamento de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Rosana, Av. dos Barrageiros, 1881, Rosana, São Paulo, Brasil (e-mail: lucas.teles@unesp.br)

Abstract: Electric vehicles (EVs) are being increasingly adopted to carry out goods delivery, technical maintenance and medical visits; however, its use is scarce in remote communities (RCs) that are far from urban centers, due to their limited autonomy and constant need to visit charging stations. Thus, this work seeks to explore the gap of remote communities and proposes an optimization method based on the Iterated Local Search meta-heuristic for the sizing of a hybrid microgrid with photovoltaic energy and batteries to power an autonomous EV charging station that provide services in CRs. The developed algorithm applies successive operations of local search and perturbations to find a solution that, in addition to the sizing of the microgrid, defines the EV route. The method was tested in CRs with 9 clients, finding an efficient solution with a reduced computational effort.

Resumo: Veículos elétricos (VEs) estão sendo cada vez mais adotados para realizar entrega de mercadorias, manutenções técnicas e visitas médicas; entretanto, seu emprego é escasso em comunidades remotas (CRs) que estão distantes de centros urbanos, devido a sua limitada autonomia e necessidade constante de visitas às estações de carregamento. Dessa forma, este trabalho busca explorar a lacuna de comunidades remotas e propõe um método de otimização baseado na meta-heurística Busca Local Iterada para o dimensionamento de uma microrrede híbrida conformada por energia fotovoltaica e baterias para a alimentação de uma estação de carregamento autônoma de VEs que prestam serviços em CRs. O algoritmo desenvolvido aplica operações sucessivas de busca local e perturbações para encontrar uma solução que, além do dimensionamento da microrrede, define a rota do VE. O método foi testado em CRs com 9 clientes, encontrando uma solução eficiente com um reduzido esforço computacional.

Keywords: Electric Vehicles; Iterated Local Search; Microgrid; Photovoltaic Generation.

Palavras-chaves: Busca Local Iterada; Geração Fotovoltaica; Microrrede; Veículos Elétricos.

1. NOMECLATURA

A. Índices

τ	Índice para indicar o tempo t_{aux} em escala horária
m	Nó atual de visita
n	Próximo nó de visita
s	Cenários de irradiação solar
B. Parâmetros	
α	Fator de penalização para o tempo de carga
β	Fator de penalização para o tempo de atraso de atendimento dos clientes
λ	Fator de bonificação para o carregamento do módulo de baterias pelos painéis fotovoltaicos
π	Probabilidade para cada cenário
$custo_{BAT}$	Custo de cada módulo de bateria
$custo_{PV}$	Custo de cada painel fotovoltaico
d	Matriz de distância entre os nós
ec	Nó que corresponde a estação de carregamento
FF	Fator de forma - eficiência da célula fotovoltaica
k	Fator para perturbar o número de painéis fotovoltaicos e baterias
L	Autonomia do veículo elétrico

$N_{BAT_{MÁX}}$	Número máximo de módulos de baterias para o dimensionamento da microrrede
$\eta_{descarga}$	Eficiência de carga e descarga do módulo de baterias
$N_{PV_{MÁX}}$	Número máximo de painéis fotovoltaicos para o dimensionamento da microrrede
pen	Penalização para infactibilidade
P_{BAT}	Potência de cada módulo de bateria
P_{VE}	Potência da bateria do veículo elétrico
P_{VEM}	Potência máxima de carregamento do veículo elétrico
t	Tempo médio para percorrer os clientes
T_{max}	Tempo máximo de atendimento dos clientes
C. Variáveis	
δ	Variável de penalização na função objetivo para infactibilidade
d_{falta}	Distância que resta para o veículo elétrico percorrer quando está parado na estação de carregamento
$d_{percorrida}$	Distância percorrida pelo veículo elétrico
E_{PV}	Energia fotovoltaica disponível
f_o	Função objetivo
I_C	Corrente fornecida pela célula fotovoltaica
N	Número de nós da rota, incluindo a saída e a chegada do centro de distribuição

N_{BAT}	Número de módulos de baterias
N_{PV}	Número de painéis fotovoltaicos
P_{CBAT}	Potência de carga do módulo de baterias
P_{DBAT}	Potência de descarga do módulo de baterias
SOC	Estado da bateria do veículo elétrico (<i>state of charge</i>)
SOC_{falta}	Estado de carga faltante para completar o percurso, a d_{falta}
t_{aux}	Tempo de percurso do veículo elétrico
t_{carga}	Tempo usado para carregar o veículo elétrico
T_C	Temperatura na célula fotovoltaica
V_C	Tensão fornecida pela célula fotovoltaica

2. INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos (VEs) surgiram como uma alternativa aos veículos a combustão convencionais e estão se tornando populares na mobilidade urbana e nas empresas de transporte (LIU *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2022). Seu emprego tem se tornado comum dado seus benefícios econômicos e ambientais, pois, além de ser mais eficiente em termos de consumo de energia por quilômetro, possuem emissões zero. Entretanto, seus custos ainda são altos e a tecnologia da bateria está em desenvolvimento, com autonomia limitada e necessidade constante de visitas às estações de carregamento de VEs (ECVEs) (POULLIKKAS, 2015; SANGUESA *et al.*, 2021). Essas adversidades se tornam ainda mais desafiadoras no contexto de comunidades remotas (CR), que estão caracterizadas por um fornecimento de insumos pouco confiável, como os serviços de eletricidade e água, consequentemente, o acesso à eletricidade para carregar as baterias é instável e a população destas CR fica declinada dos serviços ofertados. Em vista disso, uma maneira de sanar os desafios de atendimento destas CR e promover o uso de veículos de forma sustentável seria aproveitando os recursos naturais, como a energia solar e instalar uma microrrede para alimentar uma ECVE (AZIZ BAIG *et al.*, 2021).

Por conseguinte, é imprescindível que se definam estratégias de planejamento de sistemas elétricos, isto é, microrredes e estações de carregamento, para que VEs sejam empregados na realização de serviços em CR. Assim, trabalhos recentes vêm sendo desenvolvidos na área de planejamento e dimensionamento de ECVEs para operar em modo ilhado, podendo ser conferido nos trabalhos de Wang *et al.* (2020); Chae *et al.* (2020); Zainab *et al.* (2023); Shaaban *et al.* (2019). Outros trabalhos têm sido investigados nesta linha de ECVEs, porém, sem dar enfoque a CR e microrredes operando em modo isolado. Geralmente são empregadas modelagens estocásticas para lidar com incertezas e o problema modelado com programação linear e não linear. Os métodos de solução variam entre meta-heurísticas e *solvers* comerciais. Não obstante, poucos trabalham buscam determinar o dimensionamento da microrrede levando em consideração o problema de roteamento do VE. Dessa forma, este trabalho emprega a meta-heurística Busca Local Iterada (conhecida no inglês como *Iterated Local Search* – ILS) para dimensionar uma microrrede baseada em energia fotovoltaica e baterias para alimentação de uma ECVE, cujos VEs prestam serviços em um CR. Um ponto positivo de se empregar meta-heurísticas como método de solução se trata da velocidade de encontrar uma boa solução para um problema complexo, que é o caso deste trabalho, porém, essas técnicas não garantem a

otimalidade da solução. As principais contribuições deste trabalho são:

- Formulação de um problema que engloba o roteamento de VEs e o dimensionamento de uma microrrede com energia renovável e armazenamento de energia (baterias);
- Emprego da ILS na resolução do problema proposto, técnica pouco investigada na literatura no contexto do dimensionamento de microrredes;
- Proposta de um método que encontra soluções voltadas para a lacuna de CRs e com baixo esforço computacional.

A organização deste trabalho segue uma breve introdução e contextualização do estudo, conforme apresentado no capítulo 2; define formulação e as restrições do problema no capítulo 3 e em 4 explica o método proposto baseado na meta-heurística ILS. Por fim, os capítulos 5 e 6 trazem uma discussão acerca dos resultados obtidos e as conclusões, respectivamente.

3. O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA ECVE DE UMA COMUNIDADE REMOTA

O esquema proposto envolve o dimensionamento de uma microrrede composta por painéis fotovoltaicos e baterias para compor uma ECVE de uma CR. Basicamente, busca-se desenvolver um método que seja capaz de determinar o número de painéis e de baterias, de forma que a energia requerida para o VE completar a rota seja fornecida pela microrrede. Assim, VEs que prestam serviços nesta CR, como veículos de entrega de mercadorias, visitas técnicas e médicas, ônibus circular e até mesmo caminhões coletores, podem obter eletricidade para carregar a bateria, atender os clientes e retornar ao depósito, integralmente abastecidos por fontes limpas e minimizando os impactos ao meio ambiente que seriam gerados pelos veículos a combustíveis fósseis.

A seguir são apresentadas as estratégias para representar as propostas de solução, geração de vizinhos, restrições do problema e cálculo da função objetivo.

3.1 Codificação da proposta de solução

A codificação de um problema de otimização é a forma de representar uma proposta de solução do problema no espaço de soluções. Neste trabalho, a codificação da proposta de solução será composta por um vetor com as primeiras posições definindo a rota do VE e as duas últimas posições definindo o dimensionamento da microrrede – número de painéis fotovoltaicos e de baterias.

3.2 Penalizações na Função Objetivo

Geralmente, na formulação do problema são incorporadas algumas restrições para que a solução seja factível. As restrições adotadas neste trabalho que limitam a factibilidade do problema são:

- Se a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos somada à energia dos módulos de baterias for incapaz de carregar a energia que falta para o VE completar a rota;
- Se a energia fotovoltaica disponível ao longo de todo o dia não for suficiente para carregar o módulo de baterias;
- Se o estado de carga do VE for menor do que um mínimo permitido, isto é, quando o VE está sem autonomia.

Caso alguma dessas restrições sejam violadas por uma solução, deve ser adicionado penalização na função objetivo por meio da variável δ , para caracterizar soluções infactíveis.

3.3 Cálculo da Função Objetivo

Para o cálculo da função objetivo é necessário que seja determinado alguns parâmetros como a distância entre os clientes, nó correspondente à estação de recarga, tempo máximo de atendimento aos clientes etc. Além disso, a energia fotovoltaica deve ser calculada assim como as potências de carga e descarga dos módulos de bateria que vão compor a microrrede.

Através da equação (1) calcula-se a energia fotovoltaica fornecida pelos painéis, E_{PV} . Os parâmetros técnicos e o cálculo de variáveis como o fator de forma, FF , corrente e tensão fornecida pela célula fotovoltaica, I_c e V_c respectivamente, foram retirados do trabalho de Tabares *et al.* (2020). Assim, tem-se a energia fotovoltaica em kWh, de acordo com o número de painéis:

$$E_{PV} = \frac{N_{PV} \cdot FF \cdot V_c \cdot I_c}{1000} \quad (1)$$

A partir das equações (2) e (3) calcula-se a distância que falta percorrer pelo VE ao chegar ao nó da estação de carregamento e a energia necessária (SOC_{falta}) para percorrer essa distância.

$$d_{falta} = d_{falta} + d(\text{rota}_j, \text{rota}_{j+1}) \quad (2)$$

$$SOC_{falta} = d_{falta} \cdot \frac{P_{VE}}{L} \quad (3)$$

A equação (4) calcula a potência de descarga dos módulos de baterias da microrrede, isto é, a potência que será usada para carregar o VE além da disponível pelos painéis fotovoltaicos, sempre respeitando a potência de carga máxima do VE, P_{VE_M} .

$$P_{D_{BAT}} = P_{VE_M} - E_{disp}(\tau) \quad (4)$$

A equação (5) calcula a potência de carga da bateria, ou seja, a potência que a bateria carregou pelos painéis. Em (6) é calculado a energia da bateria, composta pelo produto das potências de carga e descarga com a eficiência de descarga.

$$P_{C_{BAT}} = E_{PV}(\tau) - (SOC_{falta} - SOC) \quad (5)$$

$$E_{BAT}(\tau) + \left(\frac{P_{C_{BAT}}}{\eta_{descarga}} \right) - (P_{D_{BAT}} \cdot \eta_{descarga}) \quad (6)$$

Com esta energia disponível pelos painéis e pela bateria, calcula-se o SOC carregado com a equação (7).

$$SOC = SOC + E_{disp}(\tau) + P_{D_{BAT}} \cdot \eta_{descarga} \quad (7)$$

Quando o VE não está na ECVE e se há possibilidade de as baterias carregarem, logo, o montante da energia das baterias receberá a energia disponível pelos painéis naquele momento, E_{PV} , à uma eficiência de descarga, conforme a equação (8):

$$E_{BAT}(hora) = E_{BAT}(hora - 1) + E_{PV}(hora) \cdot \eta_{descarga} \quad (8)$$

Após carregar o VE, são atualizados o tempo de percurso e o tempo de carga, por meio das equações (9) e (10).

$$t_{aux} = \tau - \frac{SOC - SOC_{falta}}{E_{disp}(\tau - 1) + E_{BAT}(\tau - 1)} \quad (9)$$

$$t_{carga} = t_{aux} - t_{carga} \quad (10)$$

As equações de (11) a (13) atualizam a distância, o tempo de percurso e o SOC em cada nó da rota, inclusive aqueles que não forem da estação de carregamento. Esses cálculos para o próximo nó consideram o montante obtido até o nó anterior, como mostra o acúmulo das variáveis. O termo m representa o índice atual da ordem da rota, isto é, qual o cliente que está sendo visitado e o próximo cliente é representado por n , ($n = m + 1$).

$$d_{percorrida} = d_{percorrida} + d_{m,n} \quad (11)$$

$$t_{aux} = t_{aux} + t_{m,n} \quad (12)$$

$$SOC = SOC - \left(d_{m,n} \cdot \frac{P_{VE}}{L} \right) \quad (13)$$

Finalmente, a partir da equação (14) calcula-se a função objetivo, onde o primeiro termo representa o custo de investimento, isto é, o custo de cada painel fotovoltaico multiplicado pela sua quantidade, assim como o produto entre o custo de cada módulo de baterias e sua quantidade. O segundo termo da equação é uma somatória que fornece o valor esperado da função objetivo para cada um dos cenários de irradiação. Essa somatória é composta por uma probabilidade para cada cenário s , π_s . O primeiro termo dentro do somatório representa o produto entre o fator de penalização para o tempo de carga α e o tempo de carga em si, t_{carga} . Em seguida, há o produto entre um fator de penalização para atraso no atendimento de clientes β e o tempo de atraso (diferença entre o tempo de percurso t_{aux} ao final da rota e tempo máximo de atendimento dos clientes T_{max}). O terceiro termo representa a variável de penalização para a função objetivo, δ , que recebe valor não nulo de penalização se foram violadas restrições do problema. Por fim, há o produto entre o fator de bonificação λ e a potência de carga das baterias, isto é, o quanto carregou as baterias pelos painéis fotovoltaicos.

$$fo = N_{PV} \cdot custo_{N_{PV}} + N_{BAT} \cdot custo_{N_{BAT}} + \sum_s \pi_s \left[(\alpha \cdot t_{carga}) + (\beta \cdot (t_{aux} - T_{max})) + \delta - (\lambda \cdot P_{C_{BAT}}) \right] \quad (14)$$

O valor da equação (14) é dado em dólares (\$) e a contribuição dos termos dentro da somatória é um incentivo para que a rota termine mais rapidamente dado por um fator multiplicador de variáveis de decisão do problema, que retorna um valor em dólares para ser somado ao custo de investimento. Nesse sentido, busca-se encontrar uma solução que minimize o valor dessa função objetivo.

4. MÉTODO PROPOSTO

A meta heurística ILS que foi proposta neste trabalho se baseia na aplicação sucessiva da heurística de busca local e operações de perturbação visando sair de ótimos locais. A seguir serão discutidas as etapas.

4.1 Estrutura de vizinhança

A estrutura de vizinhança da rota foi definida como a troca de posição da rota, de forma que todas as trocas de índices sejam testadas e encontrada a melhor solução. No algoritmo, são trocados o nó de posição i para posição j , ($j = i + 1$) e vice-versa, até que se percorra todos os elementos do vetor que compõem a rota. Para cada rota vizinha da rota corrente é

calculado o valor da função objetivo, caso a rota vizinha tenha valor da função objetivo menor do que a rota corrente, atualiza-se a rota vizinha para rota corrente e define-se este novo valor da função objetivo como incumbente.

Já na estrutura de vizinhança da microrrede (que é composta pelo número de painéis fotovoltaicos e pelo número de baterias) os vizinhos mais próximos são definidos pela adição ou subtração de uma unidade, limitado a um número de painéis/baterias aos parâmetros máximos $N_{PV_{MÁX}}$ e $N_{BAT_{MÁX}}$, e maior ou igual a zero. Se ao analisar os vizinhos próximos do número de baterias/painéis não houver melhoria na função objetivo, retorna-se ao valor corrente.

4.2 Busca Local

A busca local é o processo heurístico que vai aplicar iterativamente os algoritmos de geração de vizinhança e analisar o valor da função objetivo, até encontrar a melhor solução local. Este processo vai testar separadamente cada termo que compõe o vetor solução: a rota, o número de painéis fotovoltaicos e o número de baterias.

Inicialmente, o método inicializa as variáveis como a solução corrente e entra em um laço de repetição para testar os três tipos de geração de vizinhos mencionados anteriormente, verificando sempre qual gera a menor função objetivo. O processo é repetido enquanto houver melhoria, atualizando os valores que compõem a nova solução e iniciado novamente o ciclo com a nova solução como a corrente, analisando os vizinhos dessa nova solução corrente.

4.3 Perturbação

Para o processo de perturbação da solução, foi implementada uma operação para troca de pares da rota, frequentemente utilizada no problema comum de roteamento de veículos. Além disso, também foi proposta uma perturbação para alterar os valores que compõem o dimensionamento da microrrede a partir de um limiar. São aplicadas aleatoriamente quatro operações de perturbação na solução ótima local, visando dar um salto entre o espaço das vizinhanças. A primeira perturbação aumenta o número de painéis fotovoltaicos atual por um fator k ; a segunda aumenta o número de módulos de baterias atual por um fator k ; a terceira aplica uma troca de pares de índices na rota corrente; e por último, são aplicadas as três perturbações anteriores na solução corrente simultaneamente.

Vale ressaltar que quando apenas uma variável do vetor solução é alterada, as outras continuam com o mesmo valor de entrada (o valor corrente). Também se observa que muitas vezes a solução perturbada pode ser infactível.

4.4 Busca Local Iterada (ILS)

A busca local iterada é uma meta-heurística que tem como base a heurística de busca local, com o adicional de operações de perturbações para fugir de ótimos locais.

De uma maneira geral, a ILS perturba os pontos ótimos locais para diversificar e visitar outros espaços de soluções. Neste método é gerada uma solução inicial arbitrária, s_0 , sendo está submetida a uma busca local para encontrar s e as operações

de perturbação definidas anteriormente são aplicadas para definir s_1 . Essa solução perturbada é submetida novamente à busca local até o critério de parada ser atendido e definido a melhor solução, a incumbente s^* (BARROS JUNIOR, 2020; FREITAS, 2022; REGO; GLOVER, 2007). O critério de parada definido para este trabalho foi a atualização da incumbente até que não haja mais melhorias na busca local e um número máximo de 20 iterações de perturbações para a ILS. Por fim, o algoritmo retorna um vetor solução, v_{sol} , composto pela melhor rota encontrada, quantidade de painéis fotovoltaicos e de baterias e o valor da função objetivo para essa solução. Este esquema pode ser verificado na Fig. 1.

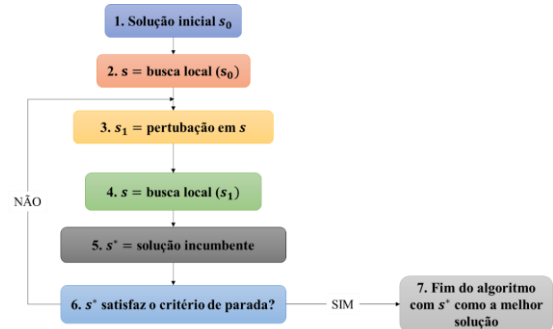


Fig. 1 Fluxograma de funcionamento de um algoritmo de busca local iterada. Fonte: Adaptado de LEMOS (2015).

O processo completo para encontrar uma boa solução tem uma execução veloz, com ordem de segundos, mas o tempo computacional pode aumentar conforme o tamanho da instância de clientes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados, onde foi aplicada uma instância com 9 clientes no método proposto. A região analisada refere-se a um município do interior do Oeste Paulista, conforme Fig. 2. Estas cidades estão distantes aproximadamente 200 km de uma cidade mais populosa e possuem CRs ainda menores e afastadas do centro urbano. A Tabela 1 apresenta a distância em km entre os nós e a Fig. 3 mostra os três perfis de irradiação solar adotados. Na Tabela 2 estão os parâmetros que foram adotados neste trabalho. Os dados técnicos dos painéis fotovoltaicos e das baterias foram baseados no trabalho de Tabares *et al.* (2020); O estudo foi modelado como um problema de otimização linear inteiro misto e resolvido utilizando a meta-heurística ILS, por meio de implementações no MATLAB com um processador AMD Ryzen 7, 5700G, 3.80 GHz e 32 GB de RAM instalada.



Fig. 2 Topologia dos nós da região do interior do Oeste Paulista analisada. Fonte: Google Maps.

Tabela 1. Matriz de distância em km entre os nós.

d(km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	14	7	20	25	28	32	19	2
2	14	0	20	33	38	41	50	32	16
3	7	20	0	22	27	30	24	11	9
4	20	33	22	0	4	14	25	25	22
5	25	38	27	4	0	8	21	28	25
6	28	41	30	14	8	0	18	33	30
7	32	50	24	25	21	18	0	15	33
8	19	32	11	25	28	33	15	0	21
9	2	16	9	22	25	30	33	21	0

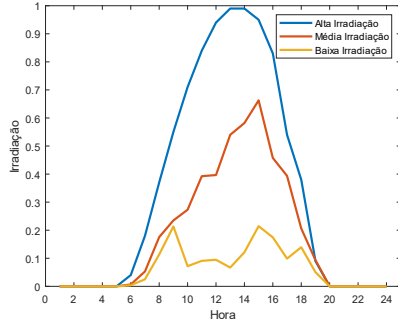


Fig. 3 Perfis de irradiação solar utilizados neste trabalho.

Tabela 2. Parâmetros adotados no método.

Parâmetros do Veículo Elétrico		
P_{VF}	Potência da bateria do veículo elétrico	40 kW
P_{VEM}	Potência máxima de carregamento do veículo elétrico	10 kW
Outros Parâmetros		
α	Fator de peso para o tempo de carga	\$10
β	Fator de peso para o tempo de atraso no atendimento dos clientes	\$100
λ	Fator de bonificação para o carregamento das baterias pelos painéis fotovoltaicos	80%
k	Fator para perturbar o número de painéis fotovoltaicos e baterias	50%
δ	Penalização na função objetivo para infactibilidade e	$\$ 1 \cdot 10^6$
π_s	Probabilidade para cada cenário	1/3
T_a	Temperatura ambiente	30 °C
$t_{rota_{s_1}}$	Hora de partida do VE do depósito	8h
L	Autonomia do VE	100 km
t	Tempo médio para percorrer os nós	$t = 1,5 \cdot d$

O algoritmo encontra como melhor solução a rota e o dimensionamento da microrrede apresentados na Tabela 3. Por se tratar de uma instância com poucos nós, 18 painéis fotovoltaicos e 3 módulos de baterias seriam suficientes para carregar o VE o bastante para visitar os clientes, assim como os painéis são suficientes para recarregar os módulos de baterias. Vale ressaltar a solução encontrada foi aquela que apresentou o menor valor na função objetivo em 100 execuções do algoritmo ILS, entretanto, não se pode garantir que esta seja a solução ótima global do problema. A Fig. 4 apresenta o valor da função objetivo de todas as soluções encontradas pela ILS, sejam elas factíveis ou não. Pode ser observado que o primeiro ponto deste gráfico, representando a solução inicial gerada pelo algoritmo, é uma solução infactível, este valor diminui conforme vizinhos de melhor qualidade são encontrados. Também é importante mencionar que uma característica da ILS é a presença de picos no gráfico de avaliação do espaço de soluções. Estes picos representam quando a solução corrente é submetida a uma operação de perturbação, fazendo com que outros espaços de busca sejam

visitados e garantindo que a solução encontrada não seja apenas um ótimo local.

Tabela 3. Melhor solução encontrada.

Rota	[1 4 5 6 7 8 3 9 2 1]
Valor da função objetivo	\$6654
Distância total percorrida	109 km
Número de painéis fotovoltaicos:	18 unidades
Número de módulos de baterias	3 unidades
Tempo de execução	0,1062 s
Número de vizinhos analisados	389
Número de iterações realizadas	173

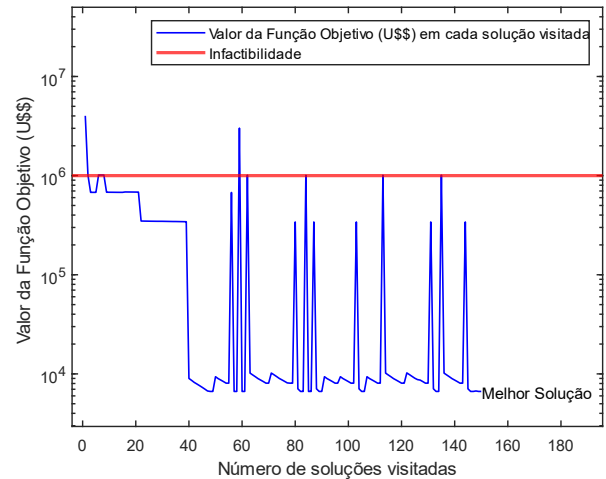


Fig. 4 Valor da função objetivo em todas as soluções visitadas em uma execução do algoritmo ILS proposto.

Outra análise que pode ser considerada a respeito da solução encontrada pode ser vista na Fig. 5, onde é demonstrado o SOC do veículo ao longo de suas visitas. Na visita 8 o VE está na EC, recarrega o necessário para retornar ao depósito e retorna. Ao aplicar o algoritmo a um teste de desempenho, isto é, executá-lo um número de vezes repetidamente para analisar o valor médio das soluções e do tempo computacional necessário, foram obtidos os valores da Tabela 4, com 100 execuções da ILS. Como pode ser visto, o valor médio da função objetivo é bem maior do que o valor da solução encontrada; entretanto, o valor médio para o dimensionamento da microrrede se aproxima do valor da melhor solução. Isso ocorre devido às diversas vezes em que as perturbações aplicadas na solução corrente geram valores infactíveis para a função objetivo, elevando o valor médio desta variável. Além disso, destaca-se o tempo computacional necessário, o que para cada iteração teve média de 0,1 s, enquanto para executar o algoritmo 100 vezes utilizou em torno de 14 s.

Tabela 4. Valores médios das variáveis e médias de desempenho do algoritmo para 100 execuções.

Valor médio da função objetivo	\$197.680
Número médio de iterações	231
Número médio de vizinhos analisados	394
Tempo de execução total	13,54 s
Tempo médio	0,14 s

Na Fig. 6 é analisado o dimensionamento da microrrede em função da execução de verificação. Observa-se que o número de baterias varia de cerca de 10 unidades, enquanto o número de painéis fotovoltaicos possui uma variação bem maior. Além disso, este gráfico mostra que à medida em que o número de painéis fotovoltaicos aumenta, o número de baterias diminui.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2021/14389-3 e 2017/02831-8, também ao CNPq, processos nº 313047/2017-0 e 409359/2021-1.

REFERÊNCIAS

AZIZ BAIG, M. J.; IQBAL, M. T.; JAMIL, M.; KHAN, J. Design and analysis of an isolated DC-microgrid for a remote community in Pakistan. *In: 2021 IEEE 12TH ANNUAL UBIQUITOUS COMPUTING, ELECTRONICS & MOBILE COMMUNICATION CONFERENCE (UEMCON), 2021, [s. l.], . Anais [...]. [S. l.]: IEEE, 2021. p. 0712–0716.*

BARROS JUNIOR, A. A. de. **Engenharia de Produção: produtividade e competitividade**. 2ªed. [S. l.]: Editora Conhecimento Livre, 2020. 2020.v. II.

CHAE, S. H.; KIM, G. H.; CHOI, Y.-J.; KIM, E.-H. Design of isolated microgrid system considering controllable EV charging demand. *Sustainability*, [s. l.], v. 12, n. 22, p. 9746, 2020.

FREITAS, G. M. de. **Otimização do problema de expansão de longo prazo de sistemas de transmissão através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2022. - Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira - SP 2022.

LEMO, R. A. **Meta-heurísticas para o problema de planejamento de expansão da rede de transmissão de energia elétrica considerando restrições de segurança**. 2015. - Tese (Doutorado) - UNESP, Ilha Solteira 2015.

LIU, L.; ZHANG, Y.; DA, C.; HUANG, Z.; WANG, M. Optimal allocation of distributed generation and electric vehicle charging stations based on intelligent algorithm and bi-level programming. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, [s. l.], v. 30, n. 6, 2020.

POULLIKKAS, A. Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 41, p. 1277–1287, 2015.

REGO, C.; GLOVER, F. Local search and metaheuristics. *In: THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM AND ITS VARIATIONS, COMBINATORIAL OPTIMIZATION. [S. l.]: Springer, 2007. v. 12, p. 309–368.*

SANGUESA, J. A.; TORRES-SANZ, V.; GARRIDO, P.; MARTINEZ, F. J.; MARQUEZ-BARJA, J. M. A review on electric vehicles: technologies and challenges. *Smart Cities*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 372–404, 2021.

SHAABAN, M. F.; MOHAMED, S.; ISMAIL, M.; QARAQE, K. A.; SERPEDIN, E. Joint planning of smart EV charging stations and DGs in eco-friendly remote hybrid microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 5819–5830, 2019.

TABARES, A.; MARTINEZ, N.; GINEZ, L.; RESENDE, J. F.; BRITO, N.; FRANCO, J. F. Optimal capacity sizing for the integration of a battery and photovoltaic microgrid to supply auxiliary services in substations under a contingency. *Energies*, [s. l.], v. 13, n. 22, p. 6037, 2020.

WANG, Y.; KAZEMI, M.; NOJAVAN, S.; JERMSITTIPARSERT, K. Robust design of off-grid solar-powered charging station for hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 45, n. 38, p. 18995–19006, 2020.

WU, Y.; WANG, Z.; HUANGFU, Y.; RAVEY, A.; CHRENKO, D.; GAO, F. Hierarchical operation of electric vehicle charging station in smart grid integration applications — An overview. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [s. l.], v. 139, p. 108005, 2022.

ZAINAB, F.; NAZ, K.; MEHMOOD, K. K.; BUKHARI, S. B. A.; WADOOD, A.; KHALID, H. A.; PARK, H. An optimal joint planning of DGs and electric vehicle charging stations in grid-connected and islanded microgrids. *IET Renewable Power Generation*, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1623–1634, 2023.

Por fim, uma análise do valor da função objetivo na execução de verificação e dos vizinhos e das iterações obtidas em cada execução do algoritmo da ILS é apresentada nas Fig. 7 e Fig. 8. Na Fig. 7 mostra o valor da função objetivo para 100 execuções da ILS, onde há frequentes soluções com valores perto da infactibilidade ($\$1 \times 10^6$), enquanto poucas soluções são de boa qualidade ou perto da melhor solução, que está próxima a $\$1 \times 10^4$. Na Fig. 8 se observa o número de vizinhos e de iterações que são encontrados nas execuções do ILS. Novamente destaca-se o desempenho do algoritmo, que visita cerca de 400 soluções e calcula rapidamente a função objetivo e executa cerca de 200 iterações de busca local.

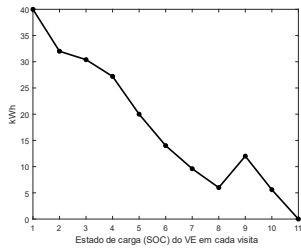


Fig. 5 Estado de carga do VE (SOC) em kWh em cada visita.

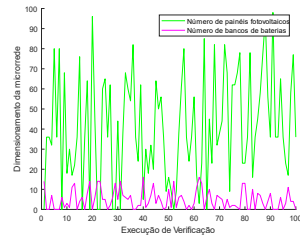


Fig. 6 Dimensionamento da microrrede na execução de verificação.

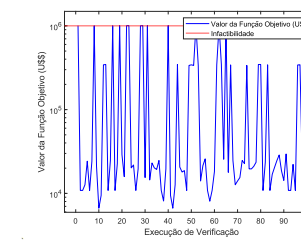


Fig. 7 Valor da função objetivo na execução de verificação.

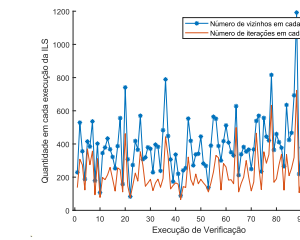


Fig. 8 Quantidade de vizinhos e iterações na execução de verificação.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo foi desenvolvido um método de otimização baseado na meta-heurística busca local iterada (ILS) para o dimensionamento de uma microrrede para abastecimento de uma estação de carregamento de veículos elétricos (ECVEs) que prestam serviços em comunidades remotas (CR). Aplicou-se o método onde os clientes estão alocados em CR e rurais. Com esse caso foi possível observar que veículos elétricos (VEs) podem ser empregados por empresas de entregas, ônibus circular ou ainda caminhões de lixo. Assim, ao dimensionar a microrrede para alimentar a ECVE obteve-se uma solução com 18 painéis fotovoltaicos e 3 baterias e um investimento de cerca de \$7000. O tempo computacional médio foi 0,14 s. Por fim, conclui-se que o método proposto é eficiente na proposta de soluções utilizando baixo tempo computacional, no entanto, há cabíveis melhorias em sua formulação. Destaca-se que a formulação do problema – modelar as restrições e a função objetivo – foi o principal desafio deste trabalho, dado a necessidade de combinar o roteamento do VE e o dimensionamento da microrrede. Como melhorias para trabalhos futuros, planeja-se aumentar o número de perturbações na solução corrente, aplicar outras estruturas de vizinhança e de perturbações, além de verificar a penalização que está sendo empregada para diferenciar as soluções, para que o método tenha uma melhor convergência.