

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL PARA ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE CONCENTRADORES INTELIGENTES SEM FIO EM REDES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO ^{*}

Cristoercio A. Silva ^{*} Gian C. Garcia. ^{**} Renzo Vargas. ^{***}
Ivan R. S. Casella ^{****} Joel D. Melo [†]

^{*} Universidade Federal do ABC, Santo André, SP,
Brasil, (e-mail:cristoercio.silva@ufabc.edu.br).

^{**} Universidade Federal do ABC, Santo André, SP,
Brasil, (e-mail:carlos.garcia@ufabc.edu.br).

^{***} Universidade Federal do ABC, Santo André, SP,
Brasil, (e-mail:renzo.vargas@ufabc.edu.br)

^{****} Universidade Federal do ABC, Santo André, SP,
Brasil, (e-mail:ivan.casella@ufabc.edu.br)

[†] Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil,
(e-mail:joel.melo@ufabc.edu.br)

Abstract: As part of the modernization of distribution systems, distribution companies install wireless smart concentrators in low-voltage electrical networks to communicate with smart meters installed in final consumers. Such concentrators record information that the distribution companies can use in their planning and operation studies. However, in extensive electrical networks, the installation of these concentrators requires a high investment on the part of distribution companies. To assist in the study of optimized allocation of wireless smart concentrators, the computational intelligence techniques genetic algorithm, particle swarm and variable neighborhood search are analyzed in this work, as they present a rapid convergence within the search space. The objective function of the problem considers the minimization of the number of installed concentrators to maintain the coverage of all the nodes of the electrical network. Additionally, as the extensive low voltage feeders cover regions with different radio propagation characteristics and each wireless communication technology has a different range, a mathematical model was used that considers that each concentrator may have a different coverage radius, depending on the type of communication device used and the urban obstacles that are in its surroundings. Thus, in the optimization process, the availability of two different communication systems based on ZigBee technology was considered, according to the signal range, propagation characteristics in the study area and operation and maintenance costs.

Resumo: Como parte da modernização dos sistemas de distribuição, as concessionárias de energia elétrica estão instalando concentradores inteligentes sem fio nas redes elétricas de baixa tensão para se comunicar com os medidores inteligentes instalados nos consumidores finais. Tais concentradores registram informações que podem ser utilizadas pelas concessionárias em seus estudos de planejamento e operação. No entanto, em redes elétricas extensas, a instalação desses concentradores exige um alto investimento por parte das concessionárias. Para auxiliar no estudo de alocação otimizada de concentradores inteligentes sem fio, neste trabalho são analisadas as técnicas de inteligência computacional, algoritmo genético, enxame de partículas e busca de vizinhança variável, por apresentarem uma rápida convergência dentro do espaço de busca. A função objetivo do problema considera a minimização do número de concentradores instalados para manter a cobertura dos medidores inteligentes. Adicionalmente, como os alimentadores extensos de baixa tensão percorrem regiões com diferentes características de radiopropagação e cada tecnologia de comunicação sem fio apresenta um alcance distinto, foi desenvolvido um modelo matemático que considera que cada concentrador pode apresentar um raio de cobertura diferente, dependendo do tipo de dispositivo de comunicação usado e dos obstáculos urbanos que estão no seu entorno. Assim, no processo de otimização, foi considerada a disponibilidade de dois sistemas de comunicação distintos baseados na tecnologia ZigBee, de acordo com o alcance de sinal, características de propagação na área de estudo e custos de operação e manutenção. A comparação dos resultados obtidos mostra que a técnica de busca de vizinhança variável apresenta um menor esforço computacional.

Keywords: Low voltage networks; Wireless smart concentrators; Communication Technologies; Genetic Algorithm; Particle Swarm; Variable Neighborhood Search.

Palavras-chaves: Redes de baixa tensão; Concentradores inteligentes sem fio; Tecnologias de comunicação; Algoritmo genético; Enxame de partículas; Busca em vizinhança variável.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a forma de planejar e operar as redes de distribuição de baixa tensão está passando por mudanças por causa da inserção de geração distribuída com fontes intermitente e novos padrões de consumo de energia elétrica (Iria et al., 2020; López González and Garcia Rendon, 2022). Essas mudanças trazem desafios aos operadores das redes elétricas e requerem, normalmente, a instalação de uma arquitetura avançada de medição (Su et al., 2020; Zhen et al., 2019). No caso de redes elétricas extensas, essa arquitetura pode apresentar altos custos de instalação e manutenção (Gao et al., 2022).

Em diversas cidades da América Latina e Europa, a instalação de uma arquitetura de medição se torna um desafio por causa de seus altos custos (Liao et al., 2019). Uma solução para a redução desses custos pode ser obtida pela instalação de concentradores inteligentes sem fio (CISF) em alguns locais específicos da rede elétrica. Os CISF tem a capacidade de estabelecer comunicação com os medidores inteligentes sem fio (MISF) instalados nos consumidores finais (Kong, 2016; Zhen et al., 2019).

Nos últimos anos, algumas metodologias têm sido propostas para definir os locais de instalação dos CISF e obter informações que auxiliem na operação das redes elétricas (Gallardo et al., 2021; Parol et al., 2020). Em Bhattarai et al. (2017), a técnica GA (*Genetic Algorithm*) é utilizado para otimizar a alocação de concentradores e criação de equivalentes elétricos de rede de um alimentador de baixa tensão da Dinamarca. Igualmente, em Fattahi et al. (2018), um algoritmo diferencial evolutivo é apresentado para resolver o problema de alocação de CISF nas redes elétricas.

Por outro lado, em Nguyen and Le (2018) é apresentado um método para determinar os pontos de instalação dos CISF, a fim de minimizar os custos de operação das usinas virtuais para o gerenciamento da demanda. Igualmente, um método para alocação de concentradores em redes de baixa tensão utilizando GA é apresentado em Marszal-Pomianowska et al. (2020). Tal método procura realizar uma alocação de concentradores que disponibilize informações às concessionárias de energia para o gerenciamento de demanda.

Em Palate et al. (2021) é proposta uma metodologia que realiza a alocação otimizada de concentradores e agregação de cargas elétricas, criando grupos de consumidores com

demandas líquidas homogêneas. Esse recurso melhora a caracterização da curva de carga média do grupo de consumidores em cada nó onde os concentradores estão instalados. A técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*) foi a utilizada na busca da solução do problema, apresentando um menor esforço computacional em relação ao GA.

Um novo método de alocação de medidores inteligentes nos alimentadores de distribuição é proposto em Zhou et al. (2021). Nessa abordagem são usados sistemas multiestado com séries temporais para análise de confiabilidade da taxa de comunicação entre os medidores inteligentes instalados em redes de distribuição.

Dentre os trabalhos supracitados que tratam de tecnologias de comunicação sem fio, pode-se verificar que a tecnologia ZigBee (ZB) foi uma das mais utilizadas para a comunicação entre os CISF e MISF em redes elétricas extensas. O ZB apresenta algumas vantagens em relação a outras tecnologias sem fio como uma taxa de dados adequada, boa robustez a interferências e baixo consumo de energia (Tiwari and Pindoriya, 2022). Igualmente, observa-se que a maioria das técnicas disponíveis na literatura consideram o uso de apenas um único tipo de dispositivo ZB e um único raio de cobertura para os CISF. Entretanto, existem diferenças de desempenho e do raio de cobertura dependendo do tipo de dispositivo ZB utilizado. Adicionalmente, como as redes de baixa tensão podem percorrer longas distâncias e passar por regiões com diferentes características de propagação (e.g. diferentes relevos, edificações etc), mesmo usando um único tipo de dispositivo ZB, o raio de cobertura pode ser bastante diferente de um CISF para outro (Dymora et al., 2021). Essas colocações devem ser consideradas no processo de alocação otimizada dos CISF.

Neste contexto, com o intuito de auxiliar o estudo do problema de alocação de CISF em redes extensas de baixa tensão, este trabalho apresenta uma comparação entre três técnicas de inteligência computacional que possuem uma rápida convergência dentro do espaço de busca do problema. Além das técnicas GA e PSO, também será analisada a técnica VNS (*Variable Neighborhood Search*), que tem sido recentemente aplicada a problemas onde a penetração dos recursos energéticos não é homogênea ao longo da rede elétrica, apresentando melhor desempenho do que outras técnicas (Papadimitrakis et al., 2021).

Neste trabalho, a função objetivo definida para o problema de alocação visa minimizar a quantidade de CISF a ser instalada. Em tal minimização se considera os custos de operação e manutenção envolvidos para que todos os MISF sejam cobertos por pelo menos um CISF. O modelo matemático desenvolvido considera que o raio de cobertura de cada CISF varia de acordo com o tipo de dispositivo ZB utilizado e as características de propagação da região de alocação.

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a caracterização do problema,

* Este trabalho contou com os seguintes auxílios financeiros: da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Projeto Universal nº 422044/2018 0, 408898/2021-6, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); processo nº 2021/08832-1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); Projeto Prioritário e Estratégico ANEEL N°001/2016, código ANEEL PEE-00390-1062/2017 - P&D-00390-1083-2020-UFABC, ANEEL 001-2016; e INCT-INERGE.

incluindo as restrições que devem ser consideradas na alocação de CISF em redes extensas de baixa tensão. A Seção 3 mostra as recomendações para a implementação das técnicas PSO, GA e VNS no problema de alocação de CISF. A Seção 4 apresenta a alocação realizada pelas três técnicas de inteligência computacional para um alimentador da Dinamarca. Por fim, a Seção 5 apresenta as principais conclusões do trabalho.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A solução do problema de alocação de CISF em redes extensas de baixa tensão é um conjunto de nós da rede elétrica que atende as restrições das arquiteturas de comunicação (Huynh and Lee, 2016). Adicionalmente, essa solução deve apresentar o menor investimento para cobrir todos os nós da rede elétrica, levando em consideração que o raio de alcance muda em função das edificações urbanas do entorno (O. P. Moyolema et al., 2020).

2.1 Tecnologia de Comunicação ZB

A tecnologia de comunicação ZB é uma das mais estudadas para aplicações em redes inteligentes devido à sua disponibilidade, taxa de dados, robustez a interferências, alcance e preço de mercado (De Almeida Oliveira and Godoy, 2016; Dymora et al., 2021). Assim, como ilustrado na Figura 1, os dispositivos ZB Xbee S2C e Xbee Pro S2C, cujas principais características são apresentadas na Tabela 1 (Zhao and Xu, 2022) serão os utilizados nas análises apresentadas neste trabalho. Os custos apresentados nessa tabela, consideram a cotação de dólar de R\$ 5,6162.

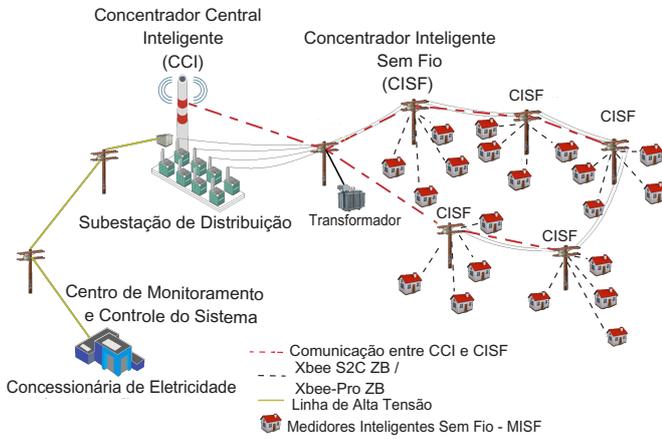


Figura 1. Agrupamento de Medidores Inteligentes.

Conforme descrito em O. P. Moyolema et al. (2020), o relevo, as edificações e demais elementos presentes em um dado ambiente urbano podem influenciar a região de cobertura de cada CISF e o alcance do sistema de comunicação. Além das características do ambiente, a potência de transmissão, a sensibilidade de recepção, a taxa de transmissão de dados e a faixa de frequência de operação também podem influenciar no alcance. Dessa forma, na próxima subseção será mostrado o modelo matemático considerado neste estudo para estimativa da região de cobertura de cada CISF.

Tabela 1. Características dos tipos de ZB analisados.

Tecnologias	Xbee-S2C	Xbee-Pro
Taxa de dados	RF 250 kbps serial ate 1 Mbps	RF 250 kbps serial ate 1 Mbps
Potência de transmissão	3,1 mW(+5 dBm)/ 6,3mW (+8dBm) modo boost	63 mW (+18 dBm)
Faixa de frequência	ISM 2,4 GHZ	ISM 2,4 GHZ
Sensibilidade de recepção (1/100 PER)	-100 dBm/ -102 dBm modo boost	-101 dBm
Canais	16	15
Custo aquisição	R\$ 257,34	R\$ 316,03
Custo manutenção	R\$ 2.573,4	R\$ 3.160,3

2.2 Formulação matemática

Neste trabalho, considera-se a minimização do custo de instalação e operação de CISFs, considerando como função objetiva (FO) a expressão dada em (1):

$$FO = \min \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^N ((IC_{i,z} + OC_{i,z}) CS_{i,z}) \quad (1)$$

Em que: $IC_{i,z}$ é o custo de aquisição do CISF do tipo z instalado no nó i ; $OC_{i,z}$ é o custo de operação e manutenção do CISF do tipo z instalado no nó i ; $CS_{i,z}$ é uma variável binária para representar se o CISF tipo z foi instalado no nó i , no caso de instalação, o valor de $CS_{i,z}$ é igual a 1, caso contrário, é igual a 0; N é o número de nós da rede de baixa tensão e Z é a quantidade de tipos de CISF diferentes disponíveis, de acordo com a tecnologia sem fio empregada. Na definição dos nós de instalação dos CISF na rede de distribuição de baixa tensão, deve-se considerar as restrições relacionadas à tecnologia ZB para que todos os MISF sejam cobertos por pelo menos um CISF. Essas restrições estão relacionadas ao tipo de tecnologia ZB empregada e às características de propagação no entorno do nó analisado. As restrições do problema são apresentadas em (2) e (3).

$$\sum_{i=1}^N (CS_{i,z}) \leq Z_{z,max} \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq RCS_{j,z} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Em que: $Z_{z,max}$ é o número máximo de CISFs do tipo z que a concessionária de energia elétrica está disposta a instalar; X_{ij} é a distância entre o consumidor i com MISF e o CISF instalado no nó j ; $RCS_{j,z}$ é o raio de alcance do CISF tipo z instalado no nó j . Tal raio pode ser determinado através de (4), como mostrado em O. P. Moyolema et al. (2020):

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{RCS_{j,z}}\right)^\gamma \quad (4)$$

Sendo que: P_r é a potência do sinal ZB recebido, P_t é a potência do sinal ZB transmitido, G_t é o ganho da antena de transmissão, G_r é o ganho de antena de recepção, λ é o comprimento de onda, γ é o coeficiente de propagação. $RCS_{j,z}$ é a maior distância de comunicação entre um CISF tipo z instalado no nó j e um MISF, considerando um ambiente com um dado γ . Desta forma, a restrição

(2) limita o número de CISF instalados na rede elétrica de baixa tensão a um valor máximo predefinido pelo planejador. A restrição (3) estabelece que pelo menos um MISF deve ser coberto por um CISF instalado no nó j . A Equação (4) permite calcular o valor do $RCS_{j,z}$ em uma região com um dado γ , que atenda à sensibilidade de recepção (O. P. Moyolema et al., 2020). Para regiões de espaço-livre, o valor de γ é 2, enquanto para regiões urbanas, usualmente, o valor de γ varia entre 3 e 4. Assim, quanto maior o valor de γ , menor é o raio de cobertura. Independentemente do valor de γ , todos os nós da rede devem estar dentro do raio de cobertura de pelo menos um CISF.

3. TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL PARA ALOCAÇÃO DE CISF

Diferentemente de O. P. Moyolema et al. (2020), neste trabalho, é considerado no processo de otimização, além da possibilidade do uso de mais de um tipo de ZB ao longo da rede elétrica, que as regiões de alocação de CISF podem apresentar características de propagação distintas. Adicionalmente, os desempenhos das técnicas PSO, GA e VNS, no processo de alocação de CISF, são comparados.

As técnicas propostas para alocação de CISF têm como objetivo a minimização da função objetivo apresentada em (1), utilizando como dados de entrada, as distâncias entre os nós da rede, o preço de instalação e manutenção de CISF em cada nó, e o valor do coeficiente de propagação em cada nó da rede elétrica. Desta forma, o problema de alocação de CISF é formulado como um problema de programação não-linear inteira mista, e resolvido utilizando as técnicas de inteligência computacional GA, PSO e VNS.

O GA e o PSO são técnicas que utilizam populações iniciais e possuem algumas características semelhantes que permitem a mesma codificação do vetor solução do problema. Por outro lado, o VNS é uma técnica não populacional que tem apresentado diversas vantagens em problemas de alocação de equipamentos nas redes elétricas (Papadimitrakis et al., 2021). Diversas bibliotecas de *software* disponibilizam funções meta-heurísticas, como o *software* R (Muenchow et al., 2017), utilizado neste trabalho.

No processo de otimização do problema de alocação, foi considerado que o vetor solução tem um tamanho igual à quantidade máxima de CISF que serão instalados na rede, sendo que em cada posição desse vetor será armazenado o nó de alocação de um dos CISF. Por exemplo, para a alocação de 4 CISF em uma rede de baixa tensão com 15 nós, o vetor solução (S) teria o formato de um vetor com quatro colunas. Desta forma, cada posição do vetor solução é preenchida com um nó candidato para instalar um CISF. Nesse caso, após o processo de otimização, um resultado possível seria $S = [4, 3, 9, 0]_{1 \times 4}$, representando que o menor valor da função objetivo pode ser obtido com a instalação de três CISF, nos nós 4, 3 e 9.

3.1 Aplicação do GA na alocação de CISF

A meta-heurística GA é inspirada na evolução biológica e leva em conta os processos de seleção natural, cruzamento e mutação (Nguyen and Le, 2018). Os parâmetros que

devem ser calibrados são os números máximos de iterações, tamanho da população, probabilidade de mutação e probabilidade de cruzamento. Tais parâmetros devem ser ajustados para que o algoritmo obtenha a mesma solução na maioria de vezes que for executado. Devido ao modelo matemático considerar que o aumento de γ resulta na redução do raio de cobertura dos CISF, neste trabalho, foi necessário aumentar o tamanho da população e número máximo de iterações do GA em comparação aos utilizados na técnica baseada em PSO para obter a solução ótima.

3.2 Aplicação do PSO na alocação de CISF

O algoritmo PSO é uma técnica baseada em movimentos de aves (Parizy et al., 2019; Choi, 2019). Esta técnica tem 4 parâmetros a serem calibrados, sendo: o número de interações, tamanho da população, velocidade máxima, coeficiente geral, coeficiente individual e inércia. Após diversas simulações e seguindo o mesmo critério de calibração de parâmetros adotado no GA para resultar na mesma solução na maioria de vezes, observou-se que o PSO tem uma rápida convergência em poucas iterações quando o coeficiente de inércia é menor que a metade do valor do coeficiente individual e geral.

3.3 Aplicação do VNS na alocação de CISF

O algoritmo desta técnica de inteligência computacional busca ótimos locais por meio de buscas em regiões vizinhas (García-Guarín et al., 2019). O processo de busca inclui uma troca sistemática de estruturas de vizinhança realizada em conjunto com um algoritmo de busca local. O objetivo desta estratégia é aumentar o espaço de busca da solução para que o valor ótimo seja encontrado. Desta forma, a técnica VNS não segue trajetórias, mas explora vizinhanças cada vez mais distantes, permitindo substituir soluções incumbentes previamente encontradas por soluções melhores. Tal forma de exploração permite sair de soluções ótimas locais e encontrar a solução ótima global (Hansen and Mladenović, 2003).

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

As técnicas de PSO, GA e VNS foram aplicadas para a alocação otimizada de CISF em um alimentador de baixa tensão da Dinamarca com 45 consumidores, mostrado na Figura 2 (Bhattarai et al., 2017). Esse alimentador foi adotado por apresentar características semelhantes aos alimentadores de baixa tensão em zonas urbanas de cidades de médio porte (López González and Garcia Rendon, 2022).

Na Figura 2, a rede de baixa tensão é sobreposta por um mapa de calor com a distribuição do valor de γ na região de estudo. Ambientes urbanos com uma grande densidade de prédios altos e muitos obstáculos entre CISF e MISF são representados por $\gamma = 4$. Já, ambientes com uma menor quantidade de prédios e com menos obstáculos são representados por $\gamma = 3$. Enquanto, um ambiente de propagação de espaço-livre é representado por $\gamma = 2$. Dessa forma, na Figura 2, os tons mais escuros representam ambientes com $\gamma = 4$ e, à medida que os tons vão ficando mais claros, representam, respectivamente, ambientes com $\gamma = 3$ e $\gamma = 2$.

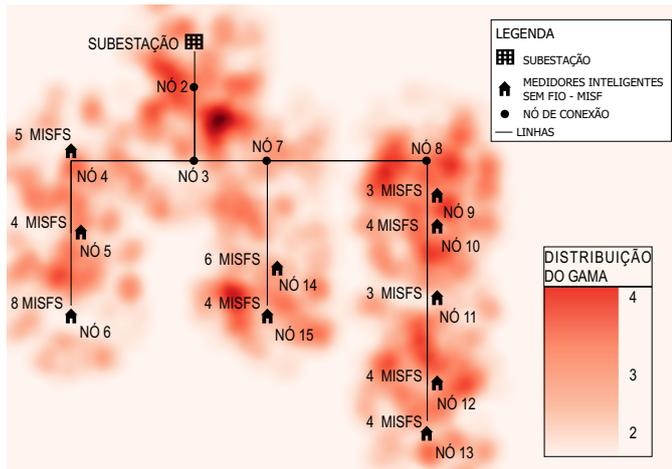


Figura 2. Sobreposição da rede elétrica adotada na distribuição de γ na região de estudo.

As técnicas PSO e GA utilizadas se encontram disponíveis na biblioteca do metaheurísticoOpt (Septem Riza et al., 2019) do *software* R (Muenchow et al., 2017). Por outro lado, a técnica VNS se encontra disponível na biblioteca MEIGOR (Egea et al., 2014) do mesmo *software*. Após diversos testes, os parâmetros dessas técnicas são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4. Tais valores foram selecionados para que as técnicas apresentem o mesmo valor de FO.

Tabela 2. Parâmetros do GA.

Tamanho da População	200
Número máximo de iterações	250
Probabilidade de mutação	0,5
Probabilidade de crossover	0,2

Tabela 3. Parâmetros do PSO.

População	10
Máximo de Iterações	17
Velocidade máxima	0,5
Coefficiente de Inercia	0,8
Coefficiente Individual	1,5
Coefficiente Geral	1,7

Tabela 4. Parâmetros do VNS.

Número de avaliações	400
Tipo de busca local	1
Decomposição	1
Máxima distancia	0,8
Máximo tempo	1800

Neste trabalho, dois tipos de dispositivos ZB são considerados para serem instalados nos nós da rede de baixa tensão apresentada na Figura 2, o Xbee S2C e Xbee Pro. O raio de cobertura de cada um desses dispositivos é definido de acordo com o valor de γ na região analisada para alocação do CISF. Resolvendo a Equação (4) para as regiões com $\gamma = 4$, pode-se verificar que o raio de cobertura é de 41,62 m e 93,19 m para o Xbee S2C e Xbee Pro, respectivamente. Por outro lado, para as regiões com $\gamma = 3$, o raio de cobertura é 211,75 m e 422,50 m para o Xbee S2C e Xbee

Pro, respectivamente. O menor custo encontrado pelas três técnicas meta-heurísticas apresentadas para resolver o problema de alocação foi o mesmo, R\$ = 839,01, considerando a instalação de CISF com dispositivos Xbee Pro nos nós 6, 7 e 11, como mostrado na Figura 3 e na Tabela 5. Na Figura 3 é possível visualizar as regiões de cobertura de cada CISF a ser instalado. Salienta-se que, por causa da distribuição de valores de γ na área em estudo, mais de um vetor solução foi obtido. A solução de nós de instalação de CISF apresentada na Figura 3 é aquela que tem mais nós de carga. Tal solução foi escolhida para resultar na menor distância entre o CISF e os MISF.

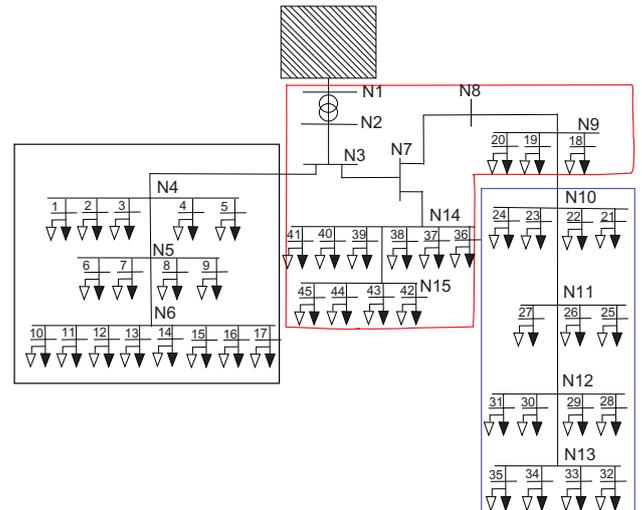


Figura 3. Agregação de MISF decorrente da alocação otimizada de CISF, considerando a variação de γ e a disponibilidade de 2 tipos de dispositivos ZB.

Na Tabela 6 é apresentado o tempo total de processamento para a realização de 20 execuções de cada uma das técnicas analisadas em um processador Intel R, Corel (TM) i3-7100 CPU @ 3.90GHz, 32Gb de RAM, com sistema operacional Windows 10 Pro – 64 bits. Considerando essa quantidade de execuções, foi possível concluir que o vetor solução é dado pelos nós 6, 7 e 11.

Tabela 5. Alocação otimizada de CISF determinada pelas três técnicas analisadas e a quantidade de MISF cobertos considerando a variação de γ e 2 tipos de dispositivos ZB.

Nó a instalar o CISF	Tecnologia do ZB	Nós cobertos com carga	Número de MISF cobertos
6	Xbee Pro	4-5-6	17
7	Xbee Pro	9-10-14-15	13
11	Xbee Pro	11-12-13	15

Tabela 6. Tempo de execução das técnicas analisadas considerando a variação de γ e 2 tipos de dispositivos ZB.

Técnica de meta-heurística	Tempo (s)
PSO	38
GA	42
VNS	23

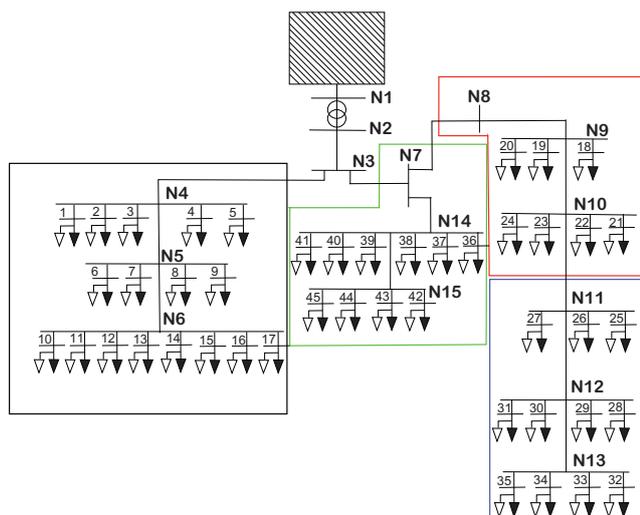


Figura 4. Agregação de MISF decorrente da alocação otimizada de CISF de acordo com O. P. Moyolema et al. (2020) considerando 2 tipos de dispositivos ZB.

Com o intuito de analisar os resultados encontrados neste trabalho, os resultados da primeira etapa da metodologia apresentada por O. P. Moyolema et al. (2020), que define os locais para instalar CISF, foram inseridos como solução inicial para as técnicas de PSO, GA e VNS. A partir dessa solução, encontra-se os tipos de dispositivos ZB que atendem o modelo definido pelas Equações (1) – (4) para a distribuição de valores γ mostrados na Figura 2. Na Figura 4 e Tabela 7 são apresentados os resultados de agregação de MISF decorrentes da alocação otimizada de CISF apresentada em O. P. Moyolema et al. (2020). O custo de instalação e manutenção dos 4 CISF mostrados na Tabela 7 é de R\$ 1098,93, ou seja, R\$ 259,92 mais caro que o custo apresentado pela configuração da Tabela 5.

Tabela 7. Alocação otimizada de CISF proposta por O. P. Moyolema et al. (2020) considerando 2 tipos de dispositivos ZB.

Nó a instalar o CISF	Tipo de ZB	Nós cobertos com carga	Número de MISFs cobertos
4	Xbee Pro	4-5-6	17
7	Xbee Pro	14-15	10
8	Xbee Sc	9-10	7
11	Xbee Pro	11-12-13	11

Tabela 8. Alocação otimizada de CISF obtida pelas técnicas analisadas considerando $\gamma = 3$ e 2 tipos de dispositivos ZB.

Nó a instalar o CISF	Tipo de ZB	Nós cobertos com carga	Número de MISFs cobertos
4	Xbee Pro	4-5-6	17
9	Xbee Pro	9-10-11-12-13-14-15	18

Como mencionado neste trabalho, a maioria dos métodos disponíveis na literatura especializada tem considerado um único tipo de ZB com um único raio de alcance. Com o intuito de mostrar a diferença quando considerado um único γ na região de estudo ao invés da distribuição mostrada na Figura 2, a seguir, será apresentada uma análise para $\gamma = 3$ em toda a região.

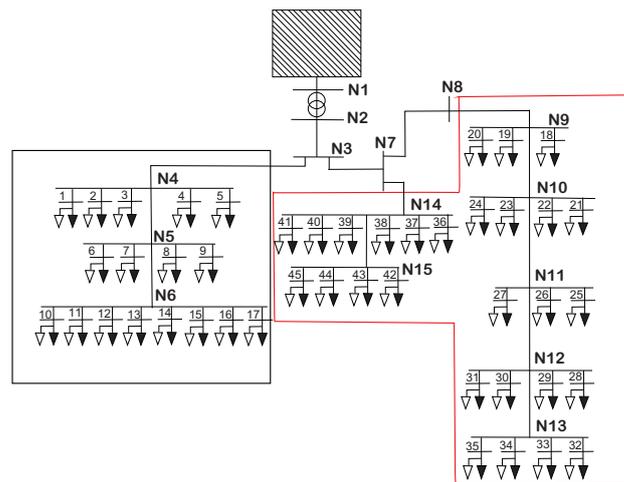


Figura 5. Agregação de MISF decorrente da alocação otimizada de CISF para $\gamma = 3$.

Tabela 9. Tempo de execução das técnicas analisadas considerando $\gamma = 3$ e 2 tipos de dispositivos ZB.

Técnica de meta-heurística	Tempo (s)
PSO	33
GA	32
VNS	21

Para este novo cenário de estudo, como mostrado na Figura 5 e na Tabela 8, a alocação otimizada corresponde à instalação de CISF com dispositivos Xbee Pro nos nós 4 e 9. O menor custo de instalação obtido pelas 3 técnicas analisadas foi de R\$ 638,38. Embora, o custo de instalação seja menor que aquele encontrado para a distribuição da Figura 2, essa alocação não irá permitir um funcionamento adequado caso a região coberta apresente variações de γ , principalmente em áreas com piores condições de propagação, onde os valores de γ sejam maiores que 3, como no entorno do nó 9.

Adicionalmente, analisando a Tabela 9, pode-se observar que, uma distribuição homogênea de valores de γ dentro da região de estudo, faz com que as técnicas PSO e GA apresentem tempos de convergência para a solução ótima muito próximos (considerando 20 execuções de cada técnica). Comparando os tempos mostrados na Tabela 6 e Tabela 9, pode-se verificar que mesmo para uma distribuição não-homogênea de γ , o esforço computacional das duas técnicas é muito próximo. Por outro lado, o VNS foi a técnica que apresentou a convergência mais rápida em ambas condições.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados três métodos de alocação de CISF em redes extensas de distribuição de baixa tensão, baseados nas técnicas de inteligência computacional GA, PSO e VNS. Tais métodos levam em consideração as características de propagação da região de cobertura e a disponibilidade de dois tipos diferentes de dispositivos ZB. Foi verificado que ambos métodos analisados convergem para as mesmas soluções de alocação, mas o

método baseado na técnica VNS requer um menor tempo computacional.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC) e à Empresa de Distribuição Enel - São Paulo, que tem financiado o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, intitulado “Potencialidade da Geração Solar Fotovoltaica para Melhoria no Fornecimento de Energia Elétrica nas Redes de Distribuição” Chamada ANEEL de Projeto Prioritário e Estratégico N°001/2016, código ANEEL PEE-00390-1062/2017 - P&D-00390-1083-2020-UFABC, ANEEL 001-2016. Adicionalmente, este trabalho contou com os seguintes auxílios financeiros: da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Projeto Universal n° 422044/2018 0, 408898/2021-6, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); processo n° 2021/08832-1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); e INCT-INERGE.

REFERÊNCIAS

- Bhattacharai, B.P., Myers, K.S., Bak-Jensen, B., de Cerio Mendaza, I.D., Turk, R.J., and Gentle, J.P. (2017). Optimum aggregation of geographically distributed flexible resources in strategic smart-grid/microgrid locations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 92, 193–201.
- Choi, S.H. (2019). Application of Resampling Method based on Statistical Hypothesis Test for Improving the Performance of Particle Swarm Optimization in a Noisy Environment. 28(4), 21–32.
- De Almeida Oliveira, T. and Godoy, E.P. (2016). ZigBee Wireless Dynamic Sensor Networks: Feasibility Analysis and Implementation Guide. *IEEE Sensors Journal*, 16(11), 4614–4621.
- Dymora, P., Mazurek, M., and Smalara, K. (2021). Modeling and fault tolerance analysis of zigbee protocol in IoT networks.
- Egea, J.A., Henriques, D., Cokelaer, T., Villaverde, A.F., MacNamara, A., Danciu, D.P., Banga, J.R., and Saez-Rodriguez, J. (2014). MEIGO: an open-source software suite based on metaheuristics for global optimization in systems biology and bioinformatics. *BMC Bioinformatics*, 15(1), 136.
- Fattahi, A., Nahavandi, A., and Jokarzadeh, M. (2018). A comprehensive reserve allocation method in a micro-grid considering renewable generation intermittency and demand side participation. *Energy*, 155, 678–689.
- Gallardo, J.L., Ahmed, M.A., and Jara, N. (2021). Clustering algorithm-based network planning for advanced metering infrastructure in smart grid. *IEEE Access*, 9, 48992–49006.
- Gao, J., Wang, X., and Yang, W. (2022). SPSO-DBN based compensation algorithm for lackness of electric energy metering in micro-grid. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4585–4594.
- García-Guarín, P.J., Cantor-López, J., Cortés-Guerrero, C., Guzmán-Pardo, M.A., and Rivera, S. (2019). Implementación del algoritmo VNS-DEEPSO para el despacho de energía en redes distribuidas inteligentes. *INGE CUC*, 15(1).
- Hansen, P. and Mladenović, N. (2003). A Tutorial on Variable Neighborhood Search. *Groupe D'études et de Recherche en Analyse des Décisions*, 26.
- Huynh, C.K. and Lee, W.C. (2016). An efficient channel selection and power allocation scheme for TVWS based on interference analysis in smart metering infrastructure. *Journal of Communications and Networks*.
- Iria, J., Scott, P., and Attarha, A. (2020). Network-constrained bidding optimization strategy for aggregators of prosumers. *Energy*, 207, 118266.
- Kong, P.Y. (2016). Wireless Neighborhood Area Networks With QoS Support for Demand Response in Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(4), 1913–1923.
- Liao, Y., Weng, Y., Liu, G., and Rajagopal, R. (2019). Urban MV and LV Distribution Grid Topology Estimation via Group Lasso. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(1), 12–27.
- López González, D.M. and Garcia Rendon, J. (2022). Opportunities and challenges of mainstreaming distributed energy resources towards the transition to more efficient and resilient energy markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157(December 2021).
- Marszal-Pomianowska, A., Widén, J., Le Dréau, J., Heiselberg, P., Bak-Jensen, B., and de Cerio Mendaza, I.D. (2020). Operation of power distribution networks with new and flexible loads: A case of existing residential low voltage network. *Energy*, 202, 117715.
- Muenchow, J., Schratz, P., and Brenning, A. (2017). RQ-GIS: Integrating R with QGIS. *The R Journal*, 9(2), 409–428.
- Nguyen, H.T. and Le, L.B. (2018). Bi-Objective-Based Cost Allocation for Cooperative Demand-Side Resource Aggregators. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 4220–4235.
- O. P. Moyolema, B., A. Silva, C., R. S. Casella, I., and D. M. Trujillo, J. (2020). Otimização do posicionamento de concentradores Inteligentes em redes elétricas de baixa tensão baseados Em tecnologia zigbee . In *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020*. sbse.
- Palate, B.O., Guedes, T.P., Grilo-Pavani, A., Padilha-Feltrin, A., and Melo, J.D. (2021). Aggregator units allocation in low voltage distribution networks with penetration of photovoltaic systems. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 130, 107003.
- Papadimitrakakis, M., Giamarelos, N., Stogiannos, M., Zois, E.N., Livanos, N.A., and Alexandridis, A. (2021). Metaheuristic search in smart grid: A review with emphasis on planning, scheduling and power flow optimization applications.
- Parizy, E.S., Bahrami, H.R., and Choi, S. (2019). A Low Complexity and Secure Demand Response Technique for Peak Load Reduction. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 3259–3268.
- Parol, M., Wójtowicz, T., Księżyk, K., Wenge, C., Balischewski, S., and Arendarski, B. (2020). Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 119(December 2019), 105886.
- Septem Riza, L., Lip, Prasetyo Nugroho, E., Adi Prabowo, M.B., Junaeti, E., and Abdullah, A.G. (2019). Package ‘metaheuristicOpt’.

- Su, J., Lie, T., and Zamora, R. (2020). A rolling horizon scheduling of aggregated electric vehicles charging under the electricity exchange market. *Applied Energy*, 275, 115406.
- Tiwari, A. and Pindoriya, N.M. (2022). Automated Demand Response in Smart Distribution Grid: A Review on Metering Infrastructure, Communication Technology and Optimization Models. *Electric Power Systems Research*, 206, 107835.
- Zhao, L. and Xu, Y. (2022). Artificial intelligence monitoring system using zigbee wireless network technology in warehousing and logistics innovation and economic cost management. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022.
- Zhen, T., Elgindy, T., Alam, S.S., Hodge, B.M., and Laird, C.D. (2019). Optimal placement of data concentrators for expansion of the smart grid communications network. *IET Smart Grid*, 2, 537–548.
- Zhou, J., Wu, Z., Sciences, Z.Y.A., and undefined 2021 (2021). Research on the Reliability Allocation Method of Smart Meters Based on DEA and DBN. *mdpi.com*, 11.