

OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE CONCENTRADORES INTELIGENTES EM REDES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO BASEADOS EM TECNOLOGIA ZIGBEE

Byron O. P. Moyolema*. Cristoercio A. Silva**. Ivan R. S. Casella***. Joel D. M. Trujillo****.

University Federal of ABC, Santo André, SP, 09210-580,

** Brazil, (Tel: 11-98893-4881; e-mail: byron.palate@ufabc.edu.br).*

*** Brazil (Tel: 11-96214-6974; e-mail: cristoercio@hotmail.com)*

**** Brazil (e-mail: ivan.casella@ufabc.edu.br)*

***** Brazil (Tel: 11-4996-0145; e-mail: joel.melo@ufabc.edu.br)*

Abstract: In the current scenario of modernization of distribution systems, the penetration of distributed generation (e.g. wind, solar) has motivated the installation of Smart Wireless Concentrators (CISF) along the electrical grid. Such concentrators are elements that allow the remote collection of information related to network operation. CISF allow operators and planners of the distribution companies to have greater monitoring and control of electrical variables within their service area. In extensive low voltage networks with photovoltaic solar generators, the planners must adequately define the installation locations of these concentrators on the power network in order to obtain useful information for planning and operating the distribution system. In this work, a methodology based on Particle Swarm Optimization (PSO) and Graph Aggregation (AG) techniques is presented to determine the locations for installing the CISF and to group the Smart Wireless Meters (MISF), both employing Zigbee (ZB) communication technologies, for monitoring low voltage networks with distributed generation. ZB technologies are one of the most used in the market due to its low acquisition cost, low latency and suitable data transmission rate for this type of application. The results of this work can help electrical network planners by defining the best ZB technology to be used for better signal coverage, reduction of the number of wireless meters at lower deployment cost, for different radio propagation conditions (different environments).

Resumo: No atual cenário de modernização dos sistemas de distribuição, a penetração da geração distribuída (e.g. eólica, solar) tem motivado a instalação de Concentradores Inteligentes Sem Fio (CISF) ao longo da rede elétrica. Tais concentradores são elementos que permitem a coleta remota de informações relacionadas à operação da rede. Os CISF permitem que os operadores e planejadores da concessionária tenham um maior monitoramento e controle das variáveis elétricas dentro de sua área de concessão. Em redes extensas de baixa tensão com geradores solares fotovoltaicos, os planejadores devem definir adequadamente os locais de instalação destes concentradores na rede energética, a fim de obter informações úteis para o planejamento e operação do sistema de distribuição. Neste trabalho, é apresentada uma metodologia baseada nas técnicas de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e de Agrupamento por Grafos (AG) para determinar os locais para instalação dos CISF e agrupar os Medidores Sem Fio Inteligentes (MISF), ambos empregando tecnologias de comunicação Zigbee (ZB), para monitoramento de redes de baixa tensão com geração distribuída. A tecnologia ZB é uma das mais utilizadas no mercado devido ao seu baixo custo de aquisição, baixa latência e taxa de transmissão de dados adequada para este tipo de aplicação. Os resultados deste trabalho poderão auxiliar os planejadores das redes elétricas na definição da melhor tecnologia ZB a ser usada para uma melhor cobertura de sinal, redução do número de concentradores inteligentes sem fio e os medidores inteligentes sem fio a menor custo de implantação, para diferentes condições de radiopropagação (diferentes ambientes).

Keywords: Load aggregation; low voltage grid; smart concentrator; wireless; ZigBee.

Palavras-chaves: Agregação de carga; rede de baixa tensão; concentrador inteligente; sem fio; ZigBee.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, os sistemas de distribuição de energia estão mudando devido à inserção de geração distribuída intermitente e novos padrões de consumo. Tais mudanças resultam em novos desafios para a operação das redes de distribuição, sendo necessário instalar dispositivos de medição em diversos pontos da rede elétrica. Em redes

extensas de baixa tensão, uma estrutura de medição e controle inteligente que abrange todos os consumidores tem um custo de instalação e manutenção muito alto. Assim, em diversos países, é comum utilizar concentradores inteligentes que agreguem as informações individuais do consumo de energia e demanda elétrica, provenientes de grupos de medidores inteligentes nos pontos de consumo. (Gu et al., 2019; Murugesan, Gunasekar, Rathinadurai Louis, Atla, &

Shanmugham, 2015), (Zhen, Elgindy, Alam, Hodge, & Laird, 2019). Os concentradores devem preferencialmente permitir a troca bidirecional de informações entre os medidores no ponto de consumo final e o centro de controle para possibilitar, além dos serviços de monitoramento de consumo e falhas, serviços de controle de cargas e reposição da demanda.

Em geral, a tecnologia de comunicação bidirecional empregada nos concentradores inteligentes limita a distância entre os concentradores e os medidores instalados nos consumidores finais, tornando o melhor posicionamento dos concentradores ao longo da rede elétrica um problema complexo. Neste contexto, a tecnologia de comunicação sem fio tem se mostrado promissora para este tipo de aplicação por apresentar alta versatilidade, elevada granularidade, baixo custo de implantação e manutenção (Schulze & Jumar, 2018).

Dentre as tecnologias de comunicação sem fio disponíveis atualmente, a tecnologia ZigBee (ZB) tem se destacado por apresentar baixo custo, baixo consumo, bom desempenho em sistemas de longas distâncias, facilidade de operação e configuração, ampla gama de dispositivos de fácil aquisição, além de poder operar na faixa de ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4GHz, que é uma faixa de frequência de uso livre (Afaqui, Garcia-villegas, & Lopez-aguilera, 2016), (Yi, Iwayemi, & Zhou, 2011).

Nos sistemas de comunicação sem fio, como o ZB, a potência do sinal de Radiofrequência (RF) recebida por um dispositivo depende de vários fatores como, por exemplo, a potência de transmissão, a distância entre transmissor e receptor, o ganho das antenas de transmissão e recepção e as características de radiopropagação do ambiente. Dependendo da potência de RF recebida, os dados recebidos podem conter vários erros, gerando problemas no monitoramento e controle de cargas e, conseqüentemente, na operação do sistema (de Almeida Oliveira & Godoy, 2016; Tao, Yajuan, Hongke, & Syyen, 2016).

Por outro lado, diversas metodologias têm sido apresentadas para alocação de concentradores segundo as necessidades dos planejadores e/ou operadores das redes elétricas. Assim, as informações coletadas por esses concentradores têm ajudado em diversos estudos, tais como o cálculo de perdas elétricas, a previsão da demanda, e a comercialização de energia, entre outros (Parizy, Bahrami, & Choi, 2019). A seguir, são apresentadas algumas metodologias publicadas recentemente em revistas internacionais de grande fator de impacto e com alto número de citações.

Em (Bhattarai et al., 2017) é utilizado um método de alocação de concentradores em redes de baixa tensão utilizando algoritmos genéticos. Em (Nguyen & Le, 2018) é aplicado um método para determinar os pontos de instalação dos Concentradores Inteligentes Sem Fio (CISF), de modo a minimizar os custos de operação das usinas virtuais para o gerenciamento da demanda. Em (Tang et al., 2018) é apresentado um modelo agregado que permite monitorar as cargas residenciais e avaliar a capacidade de resposta da rede. O método aplicado utiliza o agrupamento hierárquico para agregar cargas. Deve-se considerar que nas referências encontradas na literatura especializada, os estudos não consideram a inserção de geração distribuída (GD) nas redes

elétricas de baixa tensão. A inserção de GD em alguns consumidores pode mudar a caracterização do comportamento da demanda dos consumidores finais, devido a uma redução da demanda líquida quando se tem uma inserção de GD. Por essa razão, no agrupamento dos medidores é normalmente considerada a potência líquida.

Diferentemente das metodologias supracitadas, neste trabalho se procura formar áreas de cobertura dos CISF com densidades de carga mais homogêneas. Nesta formação, considera-se a variação da demanda dos consumidores decorrente da GD instalada. Igualmente, na definição dos locais para instalação dos CISF, levam-se em consideração as restrições das tecnologias ZB existentes na qualidade do sinal recebido (Franceschinis, Pastrone, Spirito, & Borean, 2013; Orgon, Zagajec, & Schmidt, 2019).

2. MÉTODO PROPOSTO

O objetivo da metodologia proposta é determinar os pontos ótimos para instalar os CISF e agrupar os Medidores Sem Fio Inteligentes (MISF) ambos empregando tecnologias de comunicação ZB, para monitoramento de redes de baixa tensão com geração distribuída. Na proposta apresentada, calcula-se o raio de cobertura para um dado CISF de acordo com o tipo de tecnologia ZB escolhida pelo planejador. Esse cálculo é baseado na especificação da sensibilidade de recepção dos dispositivos ZB utilizados e da potência de RF recebida (P_r) nos CISF e MISF. Assim, a metodologia proposta procura determinar a melhor posição dos CISF para atender cada grupo de MISF correspondente (Vicentini, Casella, & Capovilla, 2018).

Para definir os locais de instalação dos CISF, torna-se necessário resolver um problema de otimização combinatória de modo a minimizar o custo de operação e instalação, levando em consideração a distância entre os CISF e MISF que possibilita uma comunicação com qualidade. Na Figura 1, é apresentada a arquitetura da rede de comunicação ZB proposta com agregação de cargas. Nesta figura, $MISF_{n,m}$ são os medidores inteligentes sem fio possíveis a pertencer a área de agregação n e $CISF_n$ são os concentradores inteligentes sem fio a instalar na rede elétrica. Sendo que n é o número máximo de áreas de cada CISF e m é o número máximo de MISF com cada área. Igualmente, observa-se o CCID que é o concentrador central inteligente de dados. A metodologia proposta é aplicada considerando todos os medidores que serão conectados com um CCID.

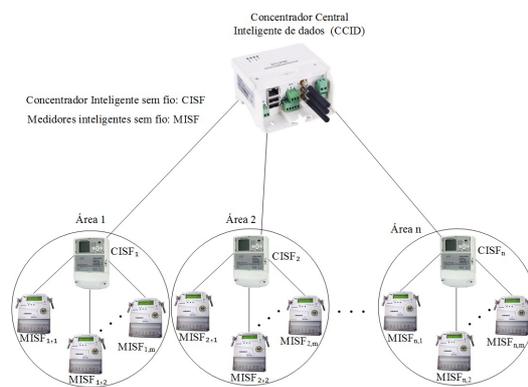


Fig. 1 Arquitetura da rede de comunicação ZB.

2.1. Informações de Entrada

A metodologia proposta considera algumas informações da rede de comunicação ZB como, por exemplo, a P_r , a potência de RF de transmissão (P_t), a sensibilidade de recepção (valor limite da P_r para o funcionamento adequado do dispositivo) e as características de radiopropagação do ambiente, especificadas pelo coeficiente de propagação (γ). Adicionalmente, para o agrupamento dos MISF é necessário a informação do georreferenciamento da rede elétrica e, para a alocação dos CISF, são necessários os fatores de ponderação da função objetivo a ser otimizada.

Uma das tecnologias sem fio bastante utilizadas em aplicações em redes inteligentes é o ZB, devido ao seu baixo custo de aquisição, baixa latência e taxa de transmissão de dados adequada para este tipo de aplicação (de Almeida Oliveira & Godoy, 2016).

O raio de alcance do ZB é utilizado para definir o agrupamento dos MISF, desde o ponto de sua instalação até o local onde foi instalado o CISF. No agrupamento dos MISF, se deve considerar as características de radiopropagação do ambiente para garantir a qualidade da transmissão da informação de monitoramento do sistema. Adicionalmente, tem-se que considerar os preços de cada dispositivo para encontrar uma solução técnica e economicamente viável.

Neste trabalho, os agrupamentos dos MISF serão analisados para duas tecnologias diferentes, o ZB convencional e o ZB Pro (Franceschinis et al., 2013; Iswandi, Nastiti, Praditya, & Mustika, 2017; Orgon et al., 2019). Na Tabela 1 são apresentadas as principais características técnicas relevantes de cada uma destas tecnologias e o módulo comercial correspondente, Digi Xbee* S2C e Digi Xbee-Pro* S2C (Zigbee, 2018). Para analisar a aplicação de cada tecnologia ao problema de agregação de cargas, foram definidos 3 cenários de estudo, conforme o módulo empregado e a P_t utilizada:

- Caso 1: Digi Xbee* S2C e P_t de 5dBm
- Caso 2: Digi Xbee* S2C e P_t de 8dBm
- Caso 3: Digi Xbee-Pro* S2C e P_t de 18dBm

Tabela. 1 Características técnicas do ZB.

Especificações	Digi Xbee* S2C	Digi Xbee-Pro* S2C
Preço	R\$ 80,24 (\$ 20,06)	R\$ 141,16 (\$ 35,29)
	Médio	Alto
Taxa de dados	RF 250 Kbps, serial até 1 Mbps	
Potência de transmissão	3,1 mW (5 dBm) / 6,3 mW (8 dBm) modo boost	63 mW (18 dBm)
Sensibilidade de recepção (1% PER)	-100 dBm / -102 dBm modo boost	-101 dBm
Faixa de frequência	ISM 2,4 GHz	
Canais	16	15

2.2. Topologia de Comunicação

A coordenada geográfica do local de instalação de cada concentrador é o centroide da zona de cobertura, como mostrado na Figura 1. A partir desta coordenada, é possível obter o raio de cobertura de cada CISF. Tal raio define a distância máxima possível entre um CISF e um MISF para que o sistema funcione adequadamente. A partir desta distância, pode-se definir os agrupamentos dos MISF, de modo a garantir a qualidade de comunicação do sistema.

2.3. Formulação Matemática das Tecnologias Zigbee

Na metodologia proposta, se considera as limitações de alcance das tecnologias ZB analisadas. Tais limitações não foram consideradas, por exemplo, no modelo apresentado em (Palate, Feltrin, & Melo, 2019).

Para determinar os pontos de instalação dos CISF na rede de distribuição de baixa tensão para o agrupamento dos MISF, torna-se necessário levar em consideração às restrições impostas pelo uso das tecnologias ZB analisadas quanto à máxima distância entre cada CISF e os MISF cobertos por ele (máximo raio de cobertura de cada CISF). Esta distância pode ser estimada pela equação de espaço-livre modificada (Yi et al., 2011):

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^\gamma \quad (1)$$

Sendo, G_t o ganho de antena de transmissão, G_r o ganho de antena de recepção; d é o raio de cobertura (distância entre o CISF e o MISF mais afastado), λ o comprimento de onda e γ o coeficiente de propagação.

O valor de P_r deve ser maior ou igual ao valor da sensibilidade de recepção para cada dispositivo ZB analisado. A partir deste valor, pode-se determinar o raio máximo de cobertura para diferentes valores de P_t e condições de radiopropagação (e.g. variando γ).

2.4. Modelo de Otimização para Alocação de Concentradores Inteligentes.

A metodologia proposta está dividida em duas etapas. A primeira é responsável pela alocação dos CISF e a segunda é responsável pelos agrupamentos dos MISF correspondentes. Cada etapa leva em consideração as limitações da tecnologia ZB analisada. O algoritmo da proposta se deve executar para cada CISF que terá comunicação com um CCID.

2.4.1. Alocação de Concentradores de Energia

Os raios de cobertura calculados através Equação (1) para diferentes ambientes de propagação permitem determinar os pontos ideais para instalação dos CISF, considerando que esses pontos sejam equidistantes entre si. Portanto, para alocar os CISF é necessário minimizar os custos relacionados a sua instalação e operação, definidos por uma função objetivo.

Na metodologia proposta, a função objetivo considera a distância entre os pontos de instalação dos CISF e os custos de instalação e operação envolvidos. A formulação

matemática deste problema de otimização é baseada no método apresentado em (Bhattarai et al., 2017).

Portanto, o problema de alocação de CISF pode ser representado por:

$$\min(p_1 \cdot Obj_1 + p_2 \cdot Obj_2) \quad (2)$$

Onde, p_1 e p_2 são os pesos da função objetivo. A primeira parte da função objetivo Obj_1 minimiza a distância entre os nós candidatos para instalação dos CISF e a distância entre o concentrador central CCID e os nós a instalar os CISF, através da Equação (3):

$$Obj_1 = \min \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} [b_1 \cdot (1 - b_{i\pm 1}) \cdot (1 - b_j)] \cdot X_{ij} \cdot b_i \cdot Y_{iT} \quad (3)$$

Sendo, i e j índices para representar a localização de nó de carga, N_d é o total de nós da rede elétrica, X_{ij} é a distância do medidor i até o nó do concentrador j , Y_{iT} representa a distância do concentrador central na posição T até o nó do concentrador local i , e b_i é uma variável auxiliar binária para representar a instalação do concentrador no nó i . Portanto, $b_i = 1$ se o nó i for propício à instalação do concentrador e $b_i = 0$ se nenhum concentrador deve ser instalado nesse nó.

No processo da busca, por exemplo, se já houver um concentrador alocado na vizinhança do nó i ao nó j , o produto $b_1 \cdot (1 - b_{i\pm 1}) \cdot (1 - b_j)$ resultará em zero. Uma condição especial, relacionada aos valores de i e j , deve ser considerada na Equação (3), quando $i < j$, o termo b_{i+1} deve ser usado na expressão, caso contrário b_{i-1} deve ser utilizado.

A segunda função Obj_2 minimiza os custos de instalação e operação do concentrador através da Equação (4):

$$Obj_2 = \min \sum_{j=1}^{N_d} [b_1 \cdot (IC_j + OC_j)] \quad (4)$$

Na qual IC_i são os custos de instalação do concentrador, OC_i são os custos de operação do CISF, que podem ser o mesmo para todos os nós.

Os objetivos supracitados estão sujeitos as restrições apresentadas nas Equações (5) e (6), respectivamente:

$$X_{ij} \leq d \quad \forall i, j \in N_d \quad (5)$$

$$\sum b_i \leq N_{\max} \quad \forall i \in N_d \quad (6)$$

A restrição apresentada pela Equação (5) é limitada pelo valor de d , sendo que esse valor define o raio de alcance ou cobertura do CISF. A restrição dada pela Equação (6) limita o número de CISF a ser instalados na rede de distribuição de baixa tensão.

Como o problema de otimização descrito é não-linear e de difícil solução, devido a Equação (3), será utilizada neste trabalho a técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*), apresentada em (Palate et al., 2019), para a alocação dos CISF.

2.4.2. Criação das Áreas de Cobertura

Nesta etapa, os agrupamentos de MISF são criados para cada CISF, empregando as técnicas de agrupamentos de grafos

(AG) e considerando o menor valor de uma função de custo que pondera o valor de d e a densidade de carga para cada área do CISF. Esse menor valor permitirá gerar curvas de carga mais homogêneas para cada grupo de consumidores. O valor de d é estimada a partir da Equação (1).

O método de AG permite determinar o menor valor de funções objetivo ou de custo. Nesta pesquisa, se considerou a função mostrada na Equação (7). O menor valor dessa função permitirá definir os MISF que devem ter uma comunicação com cada CISF (Melo, Zambrano-asanza, & Padilha-feltrin, 2017).

$$C_{p,q} = \frac{d_{p,q}}{d_{max_{u,v}}} + \frac{DC_p}{DC_s} \quad (7)$$

Sendo $C_{p,q}$ o valor do custo para comunicar o concentrador CISF no local p e o medidor no local q que se encontra dentro do raio de cobertura, $d_{p,q}$; $d_{max_{u,v}}$ é a máxima distância, considerada desde a subestação u à carga v mais afastada conectada à rede elétrica em km; DC_p a densidade de carga calculada no centroide da áreas de cobertura do CISF no local p em kVA/km²; DC_s a densidade de carga total permitida para uma zona residencial de baixa densidade expressada em kVA/km².

3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA E RESULTADOS

O método proposto foi aplicado em uma rede de distribuição de baixa tensão adaptada da Dinamarca (Bornholm, Constantin, Lazar, & Kjær, 2012), (Bhattarai et al., 2017), como se mostra na Figura 2. Na aplicação, considerou-se um dia de máxima demanda de energia e a alocação de GD na rede elétrica segundo explicado (Palate et al., 2019). A carga considerada tem 35% de consumidores com veículos elétricos e 60% de aquecedores elétricos. Os preços do ZB para a análise da alocação e a criação dos agrupamentos foram tomados do provedor (Zigbee, 2018). A rede de distribuição é composta por 15 nós, conectados a um transformador de distribuição, com 45 consumidores finais de baixa tensão com a inserção de GD. A parte alta do transformador de distribuição é conectada à rede primária de média tensão e o lado de baixa está conectada à rede secundária, onde será feito o estudo. Para a aplicação da metodologia proposta, torna-se necessário a determinação do raio de cobertura de cada CISF. Para efeito de investigação, o raio de cobertura foi obtido para todos os valores possíveis de P_i dos módulos analisados e para diferentes condições de propagação (de modo a determinar o raio para diferentes ambientes como urbano, rural etc). Esta formulação é aplicada com o objetivo de evitar problemas de comunicação entre o CISF e os MISF instalados nos consumidores finais.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros do PSO utilizados na metodologia proposta para alocar os concentradores. O método proposto apresenta menor esforço computacional a diferença do método apresentado no (Bhattarai et al., 2017), pois o PSO converge em 5 iterações das 50 propostas.

A metodologia proposta foi executada em um computador com processador Intel R, Xeon, CPU E3-1240 v6 @ GHz, 32 Gb de RAM, sistema operacional Windows 10 Pro – 64 bits. O cálculo da distância e o algoritmo do PSO foram

implementados no MATLAB 2017b, e a construção das áreas de cobertura foi realizada utilizando o programa estatístico R.

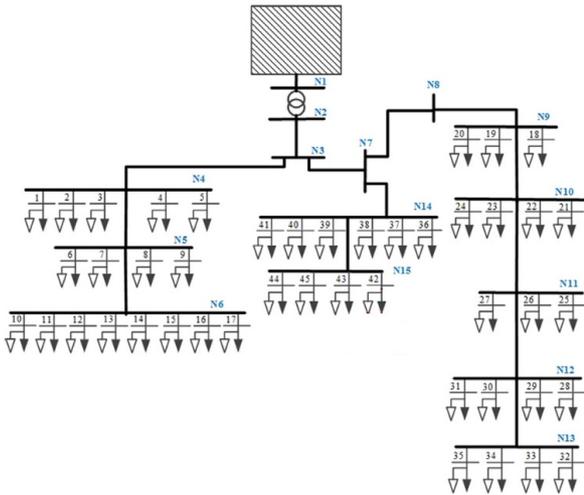


Fig. 2 Rede elétrica teste adaptada de (Bhattarai et al., 2017).

Tabela. 2 Parâmetros do algoritmo PSO

Coeficientes de aceleração	C1	1
	C2	1,5
Fator de inércia	Wmax	0,9
	Wmin	0,4
Número de partículas		15
Número máximo de iterações		50
Espaço da busca	Xmax	15
	Xmin	1

3.1. Cenários De Comunicação

Neste artigo serão analisados 2 tipos de tecnologia de comunicação ZB: o ZB convencional e o ZB Pro. Além disto, serão consideradas diferentes condições de propagação, conforme o ambiente analisado (e.g. urbano, rural etc). Desta forma, o método proposto agrupará diferentes MISF, considerando como limiar a mínima P_r pelo dispositivo ZB utilizado para seu correto funcionamento (sensibilidade de recepção). A proposta utiliza o método AG para agrupar os MISF a um CISF considerando a tecnologia ZB analisada (Calderon, Tinoco-Martínez, & Carranza-Madrigal, 2013). O agrupamento consiste em determinar o menor valor da Equação (7) para selecionar os MISF para cada posição de um determinado CISF, determinada pela técnica PSO.

A incorporação das restrições da tecnologia ZB na metodologia proposta ajudará as concessionárias para ter uma estimativa dos problemas que podem surgir no sistema de comunicação entre os MISF dos consumidores finais e os CISF da concessionária da energia. Desta forma, pode-se caracterizar melhor a qualidade do fluxo de informações trocadas na rede de comunicação.

3.2. Desempenho do Sistema de Comunicação

No problema estudado, deseja-se determinar os pontos de instalação dos CISF na rede de distribuição de baixa tensão para o agrupamento dos consumidores finais. Para isso, torna-se necessário determinar primeiramente, a cobertura máxima possível de cada CISF instalado.

Neste trabalho, a máxima cobertura de cada CISF é estimada através da Equação (1) para diferentes condições de radiopropagação (variando o valor de γ), levando em consideração as diferentes especificações da P_t e sensibilidade de recepção (P_{sen}) de cada dispositivo ZB analisado (Xbee S2C e Xbee Pro S2C). O cálculo do raio de cobertura em função de P_r e da sensibilidade de recepção dos módulos ZB analisados permite que o CISF possa enviar e receber dados sem problemas (Gu et al., 2019; Vicentini et al., 2018).

Na Figura 3 são apresentados os valores de P_r em função de d , para diferentes valores de γ , considerando uma rede ZB convencional baseada no dispositivo Xbee S2C. Como pode-se verificar, a medida que d aumenta, P_r diminui e este efeito é intensificado à medida que γ aumenta, como explicado em (de Almeida Oliveira & Godoy, 2016). Considerando γ igual a 2,0, que representa uma situação ideal de espaço-livre (sem obstáculos entre transmissor e receptor), tem-se que o raio de cobertura máximo para garantir a sensibilidade de recepção é de 1732,8 metros. Considerando γ igual a 4,0, que representa uma situação de ambiente densamente urbano (bastante obstáculos entre transmissor e receptor), tem-se que o raio de cobertura máximo para garantir a sensibilidade de recepção é de 41,62m.

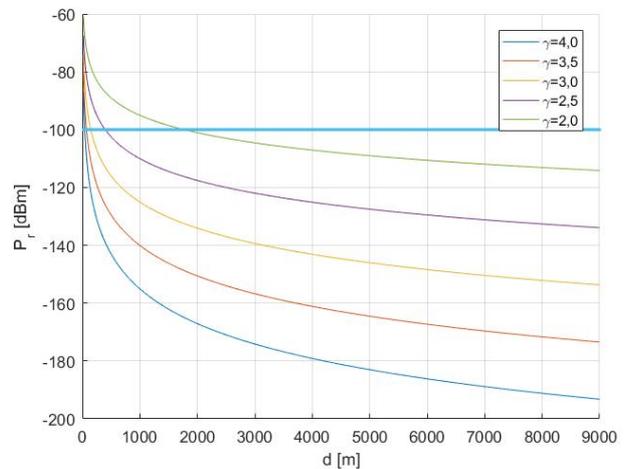


Fig. 3 Variação de P_r em função de d e γ (Xbee S2C).

Na Figura 4 são apresentados os valores de P_r em função de d para diferentes valores de γ , considerando uma rede ZB Pro baseada no dispositivo Xbee Pro S2C. Nessa figura, observa-se que a medida que d aumenta, P_r diminui e este efeito é intensificado à medida que γ aumenta. Considerando γ igual a 2,0, que representa uma situação de espaço-livre, tem-se que o raio de cobertura máximo para garantir a sensibilidade de recepção é de 8684,5 metros. Considerando γ igual a 4,0, que representa uma situação de ambiente densamente urbano com muitos prédios, tem-se que o raio de cobertura máximo para garantir a sensibilidade de recepção é de 93,19m.

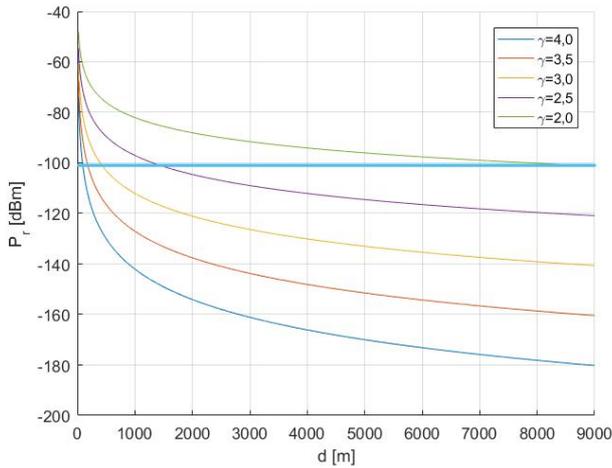


Fig. 4 Variação de P_r em função de d e γ (Xbee Pro S2C).

Nas Figuras 3 e 4, a linha reta horizontal representa a sensibilidade de recepção dos módulos analisados (-100dBm para o Xbee S2C e -101dBm para o Xbee Pro S2C, respectivamente). Assim, o ponto do cruzamento das curvas com a linha reta representa a o raio de cobertura dos CISF para cada condição de propagação.

A Tabela 3 apresenta os raios de cobertura dos CISF para cada tecnologia ZB analisada para um ambiente de propagação em espaço-livre (γ igual a 2,0) e urbano (γ igual a 3,0). Cada raio de cobertura foi obtido pela metodologia proposta para a criação de agrupamentos, sendo que a maior área de cobertura dos agrupamentos corresponde ao ambiente de espaço-livre com γ igual a 2,0, onde não há edificações ou árvores no caminho. Para o caso de estudo da rede elétrica de distribuição foi considerado uma condição de propagação para zonas urbanas com grandes construções (médio-alto), considerando um valor de γ igual a 3,0, o que resultou em um raio de cobertura de 144,26 m.

Os raios de cobertura mostrados na Tabela 3 foram calculados a partir da Equação (1). Estas distâncias foram, então, utilizadas na Equação (5) para determinar os diferentes agrupamentos possíveis para cada condição de propagação para os dispositivos Xbee S2C e Xbee Pro.

Na Tabela 4, são apresentados os pontos de instalação dos CISF na rede de distribuição e os agrupamentos dos MISF correspondentes, considerando o menor raio de cobertura apresentado na Tabela 3 (situação mais crítica), que corresponde ao uso de módulos ZB Xbee S2C transmitindo a uma P_t de 5dBm, em um ambiente urbano com γ igual a 3,0. Assim, é necessário criar uma área de cobertura para cada CISF determinado pelo PSO. Portanto, na Tabela 3, apresentam-se 4 áreas de cobertura, devido aos 4 concentradores CISF que foram instalados.

Os nós de instalação dos CISF determinados pela metodologia proposta são os nós 4, 7, 8 e 11, enquanto que, pelo método apresentado em (Bhattacharai et al., 2017), seriam os nós 5, 10, 12 e 14. O algoritmo da metodologia proposta tem um tempo de execução de 21,82 segundos, sendo mais rápido que o método apresentado em (Bhattacharai et al., 2017),

que precisou em média 810 segundos para encontrar os nós onde se instalará os CISF. A principal diferença entre o método proposto e o apresentado em (Bhattacharai et al., 2017) é que as áreas de cobertura determinadas pelo método proposto levam em consideração as limitações da tecnologia ZB e a inserção de GD. Portanto, a metodologia proposta caracteriza melhor a implementação de sistemas comunicação em redes de distribuição extensas de baixa tensão, mostrando como tais sistemas definem áreas de cobertura para coletar as informações dos consumidores finais.

Tabela. 3 Raios de cobertura para diferentes casos de estudo.

Dispositivo	γ	Pt [dBm]	Psen [dBm]	Raio [m]
Xbee S2C ZigBee	2	5	-100	1732,82
Xbee S2C ZigBee		8	-102	3081,43
Xbee Pro Digi Xbee S2C ZigBee		18	-101	8684,57
Xbee S2C ZigBee	3	5	-100	144,2658
Xbee S2C ZigBee		8	-102	211,753
Xbee Pro Digi Xbee S2C ZigBee		18	-101	422,5034

Tabela. 4 Pontos de instalação dos CISF e áreas de cobertura

Nós de CISF e Áreas de Agrupamento	Metodologia (Bhattacharai et al., 2017)	Metodologia Proposta
Nós alocados para os CISF	5-10-12-14	4-7-8-11
Nós que formam parte da Área 1	4-5-6	4-5-6
Nós que formam parte da Área 2	9-10-11	8-9-10
Nós que formam parte da Área 3	12-13	11-12-13
Nós que formam parte da Área 4	14-15	7-14-15

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicada uma metodologia para alocação de CISF e agrupamento de MISF em redes elétricas de distribuição de baixa tensão, considerando as limitações da tecnologia de comunicação sem fio ZB e ZB Pro.

A análise das limitações da tecnologia ZB empregando os dispositivos comerciais Xbee S2C e Xbee Pro S2C permite caracterizar o alcance e a qualidade da transmissão de dados entre os CISF e os MISF em diferentes ambientes de propagação encontrados pelo planejador da rede de energia.

Dentro da aplicação em redes inteligentes, a metodologia proposta determina o local de agregação para calcular curvas de demanda média com menor desvio em relação ao valor médio da demanda de grupo de consumidores finais. Tal agregação deve caracterizar adequadamente a demanda de grupos de consumidores, para que os operadores da concessionária possam analisar o comportamento do sistema elétrico. Além de melhorar a observabilidade e operação da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- Afaqui, M. S., Garcia-villegas, E., & Lopez-aguilera, E. (2016). *IEEE 802.11ax: Challenges and requirements for future high efficiency Wi-Fi*. (January 2018). <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1600089WC>
- Bhattarai, B. P., Myers, K. S., Bak-Jensen, B., de Cerio Mendaza, I. D., Turk, R. J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.05.005>
- Bornholm, C., Constantin, A., Lazar, R. D., & Kjær, S. B. (2012). Voltage control in low voltage networks by Photovoltaic Inverters. *DANFOSS*, (December).
- Calderon, F., Tinoco-Martínez, S. R., & Carranza-Madrigal, J. (2013). Un algoritmo basado en grafos para la detección automática la luz arterial en imágenes ultrasonográficas. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 10(4), 423–433. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.05.011>
- de Almeida Oliveira, T., & Godoy, E. P. (2016). ZigBee Wireless Dynamic Sensor Networks: Feasibility Analysis and Implementation Guide. *IEEE Sensors Journal*, 16(11), 4614–4621. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2542063>
- Franceschinis, M., Pastrone, C., Spirito, M. A., & Borean, C. (2013). On the performance of ZigBee Pro and ZigBee IP in IEEE 802.15.4 networks. *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2013.6673344>
- Gu, F.-C., Lu, S.-D., Wu, J.-X., Kuo, C.-L., Lin, C.-H., & Chen, S.-J. (2019). Interruptible Power Estimation and Auxiliary Service Allocation Using Contract Theory and Dynamic Game for Demand Response in Aggregator Business Model. *IEEE Access*, 7, 129975–129987. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2940628>
- Iswandi, Nastiti, H. T., Praditya, I. E., & Mustika, I. W. (2017). Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network's node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI). *Proceedings - 2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer, ICST 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2016.7877347>
- Melo, J. D., Zambrano-asanza, S., & Padilha-feltrin, A. (2017). A local search algorithm to allocate loads predicted by spatial load forecasting studies. *Electric Power Systems Research*, 146, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.020>
- Murugesan, K., Gunasekar, K., Rathinadurai Louis, J., Atla, N. R., & Shanmugham, S. (2015). Effective utilisation and efficient maximum power extraction in partially shaded photovoltaic systems using minimum-distance-average-based clustering algorithm. *IET Renewable Power Generation*, 10(3), 319–326. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0316>
- Nguyen, H. T., & Le, L. B. (2018). Bi-Objective-Based Cost Allocation for Cooperative Demand-Side Resource Aggregators. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 4220–4235. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2653060>
- Orgon, M., Zagajec, L., & Schmidt, I. (2019). XBee technology: Complex evaluation of radio parameters. *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*. <https://doi.org/10.1109/ICUMT48472.2019.8970753>
- Palate, B. O., Feltrin, P., & Melo, J. (2019). Optimum Allocation of Energy Aggregators in Electrical Distribution Networks. *Latin-America Congress on Electricity Generation and Transmission-CLAGTEE 2019*, 1–6.
- Parizy, E. S., Bahrami, H. R., & Choi, S. (2019). A Low Complexity and Secure Demand Response Technique for Peak Load Reduction. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 3259–3268. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2822729>
- Schulze, D., & Jumar, U. (2018). Controller Concept for an Automated Coexistence Management. *IFAC-PapersOnLine*, 51(10), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.234>
- Tang, Y., Chen, Q., Ning, J., Wang, Q., Feng, S., & Li, Y. (2018). Hierarchical control strategy for residential demand response considering time-varying aggregated capacity. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 97(51577030), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.001>
- Tao, Z., Yajuan, Q. I. N., Hongke, Z., & Syyen, K. U. O. (2016). Adaptive Power Control for Mutual Interference Avoidance in Industrial Internet-of-Things. *Network Evolution and Programmability*, 1, 124–131.
- Vicentini, R., Casella, I., & Capovilla, E. (2018). *Modelagem e Análise Computacional de Sistemas ZIGBEE Sob Interferência de Redes WIFI*. Universidade Federal do ABC.
- Yi, P., Iwayemi, A., & Zhou, C. (2011). *Developing ZigBee Deployment Guideline Under WiFi Interference for Smart Grid Applications*. 2(1), 110–120.
- Zhen, T., Elgindy, T., Alam, S. M. S., Hodge, B.-M., & Laird, C. D. (2019). Optimal placement of data concentrators for expansion of the smart grid communications network. *IET Smart Grid*, 2, 537–548. <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0006>
- Zigbee, D. X. (2018). FOR OEMS DIGI XBEE® AND DIGI XBEE-RPO ZIGBEE. In *DIGI Service and Support*. Retrieved from <https://www.digikey.com>