



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700 - copeseq@unifal-mg.edu.br
Tel/Fax: (35) 3701-9260 - www.unifal-mg.edu.br/prppg



COBERTURA E CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES SEM FIO UTILIZANDO SENSORES HETOGÊNEOS

Relatório Final apresentado à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação por exigência do término do projeto de Iniciação Científica – PIBICT/FAPEMIG – referente ao período de: 11 de outubro de 2022 a 10 de outubro de 2023

Augusto Vieira de Oliveira

Bacharelado em Ciência da Computação

6º Período

Iago Augusto de Carvalho

Universidade Federal de Alfenas

Alfenas, outubro de 2023



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. METAHEURÍSTICAS EM REDES DE SENSORES SEM FIO	3
3. METODOLOGIA	4
3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	5
3.2. HARMONY SEARCH	6
3.3. ADAPTAÇÃO DO HARMONY SEARCH	8
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
4.1. CONFIGURAÇÕES DA REDE	10
4.2. COMPARAÇÕES	10
5. CONCLUSÕES	13
6. REFERÊNCIAS	13



1. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (em inglês, *Wireless Sensors Network* – WSN) têm se estabelecido como instrumentos essenciais em uma série de domínios, incluindo o monitoramento ambiental, a agricultura e a detecção de ameaças [2], devido à sua capacidade de coletar e transmitir informações de ambientes específicos em tempo real. Dentro deste contexto, a questão de como aprimorar a cobertura de uma área de interesse usando o menor número possível de sensores torna-se de importância primordial. Isso não apenas maximiza a eficiência da rede, mas também minimiza os custos associados à implantação de sensores.

Os sensores, que são tipicamente pequenos dispositivos dotados de subsistemas de detecção, processamento e comunicação, têm a capacidade de monitorar pontos de interesse (em inglês, *points of interest*, POI) - alvos específicos que precisam ser vigiados. Um POI é considerado "coberto" por um sensor, se a distância euclidiana entre eles é menor ou igual ao alcance de cobertura do sensor. Além disso, a comunicação entre os dispositivos é vital para garantir a conectividade da rede, o que significa que um sensor pode receber e transmitir informações coletadas para outro sensor, mesmo que não esteja monitorando diretamente um POI, fazendo parte da conectividade da rede.

O desafio central dessa pesquisa é abordar o Problema de Maximizar a Cobertura de uma WSN, caracterizado por um conjunto de sensores S e um conjunto de POIs P . Neste contexto, cada ponto p pertence a P e cada sensor s em S são definidos por coordenadas x e y , estando assim localizados em uma malha bidimensional de dimensões $M \times N$. A tarefa essencial é identificar um subconjunto S' de S tal que, para cada sensor s em S' , suas coordenadas $s.x$ e $s.y$ estejam respectivamente nos intervalos $[0, M]$ e $[0, N]$. A eficácia de uma solução é quantificada pela proporção de POIs cobertos por ao menos um sensor em relação ao total de POIs. Com isso, tentaremos determinar a disposição ótima destes sensores em um ambiente bidimensional, de modo a alcançar a máxima cobertura possível, ao mesmo tempo em que se reduz a quantidade total de sensores necessários. Considerando a complexidade exponencial associada a este problema, e que soluções determinísticas em tempo polinomial são inalcançáveis, é imprescindível buscar heurísticas e metaheurísticas para a sua solução.

Neste trabalho, inspirados pela eficácia da metaheurística proposta por [Alia & Al-Ajouri, 2016], buscamos desenvolver uma versão aprimorada do algoritmo para abordar a questão da



otimização da cobertura em redes de sensores sem fio. O foco recaiu sobre a adaptação do algoritmo para considerar a instalação eficiente dos sensores, levando em conta tanto a maximização da cobertura quanto a redução dos custos associados.

Esta pesquisa está estruturada da seguinte maneira: a seção seguinte discute trabalhos relacionados e fornece uma revisão literária do tema. A seção 3 detalha o desenvolvimento do algoritmo proposto. A seção 4 apresenta os experimentos computacionais realizados e os resultados obtidos, enquanto a última seção conclui o trabalho, apresentando perspectivas futuras e possíveis direções para pesquisas subsequentes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As tecnologias emergentes e os avanços na área de ciência de dados têm permitido otimizações em diversas áreas de pesquisa, dentre as quais, o problema de maximização da cobertura em ambientes monitorados por sensores ocupa uma posição de destaque. Esta seção delinea estudos fundamentais sobre otimização em sistemas de monitoramento e suas respectivas abordagens para abordar os desafios associados.

A otimização do monitoramento não se limita apenas às redes de sensores sem fio, mas expande-se para outros domínios, como vigilância e sistemas de rastreamento. Em todas essas aplicações, a meta é frequentemente a mesma: maximizar a eficiência de observação com o mínimo de recursos. Em um estudo clássico, [\[Sahu & Gupta, 2012\]](#) abordaram a otimização com foco em estratégias convencionais. Eles exploraram abordagens como técnicas baseadas em força bruta, em grid e em geometria computacional. Essas abordagens têm suas origens em problemas similares e serviram como fundamentos para estudos subsequentes em WSN. Dentro das abordagens baseadas em geometria computacional, o Diagrama de Voronoi foi destacado como uma técnica promissora, segmentando o espaço ao redor de cada sensor.

2.1. METAHEURÍSTICAS EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Dada a natureza complexa do problema de cobertura em WSN, as metaheurísticas têm sido a solução preferida devido à sua capacidade de fornecer soluções aproximadas em um tempo de execução aceitável. Uma das abordagens mais notáveis é a *Harmony Search* (HS), proposta por [\[Alia & Al-Ajouri, 2016\]](#), que se inspira no processo de improvisação musical para



otimizar problemas complexos. A HS possui uma memória que chamada *Harmony Memory* (HM), que armazena as soluções ao longo do processo de busca. Esta memória é inicializada com valores gerados aleatoriamente e a cada iteração, a HS aperfeiçoa as soluções, criando uma nova através de três operadores. Quando uma nova solução é gerada e se mostra melhor do que a pior solução presente na HM, esta última é removida e a nova solução é colocada no lugar, garantindo uma constante evolução das soluções armazenadas. A abordagem demonstrou superioridade em comparação com algoritmos genéricos, levando a considerações sobre sua adaptabilidade e eficácia em cenários heterogêneos.

Posteriormente, [\[Hanh et al., 2019\]](#) introduziram um algoritmo genético avançado chamado MIGA. Esse método visava otimizar o Problema de Maximizar a Cobertura de uma WSN com sensores de alcances variados, superando métodos anteriores como o IGA. Os resultados obtidos pelo MIGA foram notavelmente superiores quando comparados a outras heurísticas reconhecidas na literatura, consolidando sua posição como uma abordagem promissora para a maximização da cobertura em redes de sensores sem fio.

3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste trabalho inicia-se com a definição precisa do problema que se busca solucionar: a maximização da cobertura em uma rede de sensores sem fio heterogêneos, garantindo ao mesmo tempo a conectividade entre os sensores. Com o problema claramente estabelecido, partimos para um aprofundamento teórico e prático acerca das particularidades e desafios que ele apresenta.

O ponto de partida para as nossas investigações e experimentações foi a implementação do algoritmo *Harmony Search* (HS), escolhido por sua capacidade de explorar o espaço de soluções de maneira eficiente e por sua flexibilidade para adaptações. A versão do HS utilizada como linha de base foi baseada no modelo proposto por [\[Alia & Al-Ajouri, 2016\]](#), o qual já se mostrou eficaz em contextos similares. Para tal implementação, optamos por utilizar a linguagem de programação C++ 14 e o compilador GNU GCC 8.1.0.

Com o HS implementado e operacional, nos concentramos em entender suas nuances e particularidades, identificando oportunidades de adaptação e aprimoramento que pudessem torná-lo ainda mais apto a lidar com as especificidades das redes de sensores sem fio heterogêneos. Este processo de adaptação e personalização do algoritmo foi pautado por



experimentações e análises, sempre buscando equilibrar a busca pela solução ótima com a necessidade de manter um tempo de execução razoável.

Ao final deste percurso metodológico, nosso objetivo é não apenas apresentar uma solução viável e eficiente para o problema de maximização de cobertura em redes de sensores sem fio heterogêneos, mas também contribuir para o corpo de conhecimento na área, oferecendo insights, análises e ferramentas que possam ser úteis para pesquisas e aplicações futuras.

3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Estamos diante do desafio de maximizar a cobertura de uma área específica, definida por um conjunto de pontos de interesse (POIs) distribuídos em um *grid* $M \times N$, utilizando uma rede de sensores S , enquanto mantemos a rede conectada. Os pontos de interesse são determinados com base em um valor de tamanho de célula, que define quadrados idênticos por todo o *grid*, sendo cada POI localizado no centro de um desses quadrados.

Cada sensor na rede possui um raio R de alcance e um valor de incerteza Re , sendo este último definido como a metade do raio de alcance. Além disso, há constantes associadas às características dos sensores, incluindo α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , e *Coverage Threshold*. O objetivo central é garantir que cada ponto de interesse esteja dentro do raio de alcance de pelo menos um sensor.

Para cada sensor si e cada POI pj , definimos uma probabilidade $cov(si, pj)$ de si cobrir pj . Essa probabilidade é calculada por meio da seguinte fórmula:

$$Pcov(si, pj) = \begin{cases} 1 & \text{se } dist(si, pj) \leq R - Re \\ \exp\left(-\frac{\alpha_1 \lambda_1^{\beta_1}}{\lambda_2^{\beta_2}} + \alpha_2\right) & \text{se } R - Re < dist(si, pj) < R + Re \\ 0 & \text{se } dist(si, pj) \geq R + Re \end{cases}$$

Onde a distância entre um sensor e um POI é calculado através da distância Euclidiana. Já os valores de λ_1 e λ_2 são definidos através da seguinte fórmula:

$$\lambda_1 = Re + R - dist(si, pj)$$

$$\lambda_2 = Re - R + dist(si, pj)$$

Este modelo de detecção leva em consideração as regiões de sobreposição, nas quais um POI pj encontra-se sob a área de cobertura de múltiplos sensores simultaneamente. Isso é



representado pelo conjunto Sov de sensores que compartilham uma região de cobertura comum, potencialmente aumentando a probabilidade de um POI estar efetivamente coberto. A probabilidade de cobertura conjunta em tal região de sobreposição é denotada por $P_{sov}(pj)$, e é calculada conforme a seguinte fórmula:

$$P_{sov}(pj) = 1 - \prod_{si \in Sov} 1 - P_{cov}(si, pj)$$

Um ponto de interesse é considerado efetivamente coberto se o valor calculado de $P_{sov}(pj)$ exceder o limite predefinido estabelecido pelo parâmetro *Coverage Threshold*. Isso assegura que a cobertura de um POI seja robusta, mesmo em situações onde a contribuição individual de um único sensor pode não ser suficiente para garantir a detecção. Por fim, através das dimensões de largura e altura (MxN), e os raios de alcance e incerteza, definimos o máximo e mínimo de sensores para uma solução, calculados a seguir:

$$MinS = \left\lceil \frac{Largura}{2 \times (R + R_e)} \times \frac{Altura}{2 \times (R + R_e)} \right\rceil$$

$$MaxS = \left\lceil \frac{Largura}{2 \times (R - R_e)} \times \frac{Altura}{2 \times (R - R_e)} \right\rceil$$

A compreensão das dinâmicas envolvendo os pontos de interesse, o alcance dos sensores, a incerteza associada e a importância das regiões de sobreposição são fundamentais para criar uma estrutura robusta de análise. Esta seção forneceu um esclarecimento detalhado sobre as condições do problema e estabeleceu os critérios necessários para considerar um POI como efetivamente coberto. De forma simplificada podemos dizer que as entradas principais do problema são as dimensões MxN, o raio de alcance dos sensores e tamanho das células.

3.2. HARMONY SEARCH

O algoritmo HS recebe como entradas não apenas os parâmetros intrínsecos ao problema, mas também uma série de parâmetros específicos que guiam o processo de busca. Entre eles, destacam-se: o tamanho da *Harmony Memory*, o número de iterações, e as taxas que definem



a forma na qual acontecerão as melhorias das soluções. Estas taxas incluem a *Harmony Memory Consideration Rate* (HMCR), definida como 0.9, a *Pitch Adjustment Rate* (PAR), definida como 0.3, e a *Bandwidth* (BW), definida como 0.2.

Entre as funções com papel crucial para o funcionamento da HS, destaca-se a função objetivo, pois é ela quem quantifica o quão boa é uma solução encontrada. Neste contexto, ela é composta pela quantidade de sensores utilizados na solução (S), a taxa de cobertura, uma constante K para evitar valores muito próximos de zero, e o MinDist, que é a razão entre a menor distância entre sensores da solução e a maior distância possível entre dois sensores. Porém, apesar de utilizar o número de sensores e a taxa de cobertura, que são os valores que queremos otimizar, apenas tentar encontrar um bom valor para esta função não será eficiente para a otimização do problema, como será mostrado nos resultados obtidos. A fórmula da função objetivo pode ser vista abaixo:

$$Obj = \frac{1}{S} \times \text{Taxa cobertura} \times MinDist \times K$$

Com a definição da função objetivo e dos parâmetros do algoritmo, inicia-se o processo da *Harmony Search*. A *Harmony Memory* é inicializada de forma aleatória, e cada solução é representada por um vetor de sensores, possuindo N ($MinS \leq N \leq MaxS$) sensores ativos espalhados pelo *grid*, e outros $MaxS - N$ sensores serão desativados. Além disso, cada solução possui um valor objetivo calculado conforme a função objetivo definida.

Em cada iteração do algoritmo, um novo vetor de solução é gerado por meio de três operadores principais:

1. *Harmony Memorization*: Com probabilidade HMCR, seleciona valores do novo vetor de solução a partir das soluções presentes na HM.
2. *Pitch Adjustment*: Com probabilidade PAR, realiza ajustes locais em um sensor selecionado, buscando refinamentos na solução.
3. *Random Consideration*: Com probabilidade $1 - HMCR$, adiciona um sensor de forma aleatória ao vetor de solução, incentivando a exploração do espaço de soluções.

Após a criação do novo vetor, ele é comparado com a pior solução presente na HM. Se o novo vetor possuir um valor objetivo melhor, ele substitui a pior solução na HM. Este processo é repetido até que o critério de parada seja atingido, definido pela quantidade de iterações. Ao final, a melhor solução encontrada estará presente na HM.



3.3. ADAPTAÇÃO DO HARMONY SEARCH

No intuito de aprimorar o desempenho do algoritmo Harmony Search, introduzimos algumas modificações significativas na representação e armazenamento dos vetores de solução na *Harmony Memory*. Propusemos uma abordagem de comprimento adaptável para cada vetor de solução, possibilitando a codificação de um número variável de localizações dos nós sensores em cada vetor.

Para representar as soluções, adotamos uma estratégia de dois vetores: o primeiro vetor representa as posições dos sensores na rede, enquanto o segundo é um vetor binário que indica o estado de ativação de cada sensor. Através dessa metodologia, introduzimos uma nova variável denominada *Sensor Flip Probability* (SFP), que desempenha um papel crucial no processo de otimização.

O SFP é responsável por determinar a probabilidade de um sensor em uma nova solução ter seu estado de ativação alterado, contribuindo assim para a dinâmica e adaptabilidade do algoritmo. Em nossas experimentações, estabelecemos o valor de SFP em 0.05, implicando que cada sensor tem 5% de chance de ter seu estado de ativação modificado. A figura abaixo ilustra esse processo:

$$sensor.ativacao = \begin{cases} alternarEstado() & \text{se } rand(0, 1) \leq SFP \\ manterEstado() & \text{se } rand(0, 1) > SFP \end{cases}$$

Esta abordagem promove uma convergência mais acelerada do algoritmo em direção às soluções ótimas, expandindo simultaneamente o espectro de soluções possíveis que podem ser exploradas. A capacidade de variar o número de sensores ativos em cada solução, juntamente com a probabilidade adaptável de alteração do estado de ativação, confere ao algoritmo uma flexibilidade notável, permitindo uma exploração mais eficaz do espaço de soluções e uma adaptação mais rápida às mudanças no cenário da rede de sensores.

Adicionalmente, implementamos uma modificação refinada na função objetivo, preservando sua estrutura fundamental, mas introduzindo pesos nas variáveis componentes. Essa alteração se fez necessária após observarmos o comportamento da metaheurística apresentada por [\[Alia & Al-Ajouri, 2016\]](#) ao operar sem uma fixação prévia no número de



sensores, permitindo assim que o próprio algoritmo otimizasse a função previamente definida. Contrariando as expectativas e afirmações presentes no artigo mencionado, percebemos que o algoritmo não realizava uma busca efetiva pela quantidade ótima de sensores.

A inclusão dos pesos nas variáveis da função objetivo foi submetida a uma série extensiva de testes em diversos cenários distintos, com o intuito de validar sua eficácia e garantir que os resultados positivos obtidos não se limitassem a casos específicos. Essa abordagem proporcionou uma melhoria significativa na performance do algoritmo, assegurando uma busca mais precisa e confiável pelo número ideal de sensores, ao mesmo tempo que mantinha a qualidade da cobertura da rede.

Além das modificações previamente mencionadas, promovemos uma última atualização significativa na estrutura do algoritmo, habilitando-o a lidar eficientemente com redes que apresentem obstáculos em seu interior. Essa característica é particularmente útil em cenários nos quais a área de interesse para monitoramento não configura um quadrilátero perfeito ou possui regiões internas onde a presença de pontos de interesse (POI) é inviável ou indesejada.

Para adaptar o algoritmo a essas condições, focamos na manipulação das bordas da rede monitorada, utilizando-as como insumos para o processo de otimização. Vale ressaltar que essa alteração incidiu mais sobre aspectos estruturais do algoritmo do que sobre a criação de novos conceitos per se. No entanto, essa capacidade adicional amplia significativamente a aplicabilidade e utilidade do algoritmo, tornando-o mais versátil e apto a atender uma gama mais diversificada de cenários práticos em monitoramento de redes de sensores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem como objetivo mostrar a eficiência e eficácia do algoritmo proposto neste trabalho para tratar o problema da cobertura da rede de WSN. Esta seção está dividida em quatro partes, conforme segue: A primeira parte fornece a configuração da rede simulada. A segunda parte foi projetada para estudar a importância e a influência da distância mínima entre os sensores no desempenho da função objetivo proposta. A terceira parte examina o desempenho do algoritmo proposto na busca de melhor cobertura de rede com menor custo e compara seus resultados com outros algoritmos de implantação baseados em metaheurísticas.



4.1. CONFIGURAÇÃO DA REDE

Para a realização dos experimentos e geração dos resultados associados ao algoritmo HS, adotamos os mesmos casos de teste e parâmetros utilizados no artigo [\[Alia & Al-Ajouri, 2016\]](#), que são: $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$, $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0,5$; dimensões da área de monitoramento igual a 50m x 50m; tamanho da Memória de Harmonia (HM) igual a 30; taxa de Consideração de Memória de Harmonia (HMCR) igual a 0.90; taxa de Ajuste de Tom (PAR) igual a 0.3; Largura de Banda (BW) igual a 0.2 e um total de 60.000 iterações. Todos os experimentos foram conduzidos por meio de mais de 30 execuções independentes para assegurar a robustez dos resultados obtidos.

4.2. COMPARAÇÕES

Antes de iniciarmos a análise comparativa entre o algoritmo proposto neste trabalho e o algoritmo *Harmony Search* tradicional, optamos por destacar a evolução das soluções obtidas a partir da população inicial pela heurística aqui desenvolvida. O gráfico subsequente ilustra os resultados utilizando parâmetros específicos: uma grade de 50x50, um raio de alcance para os sensores de 10 e um tamanho de célula também de 10.

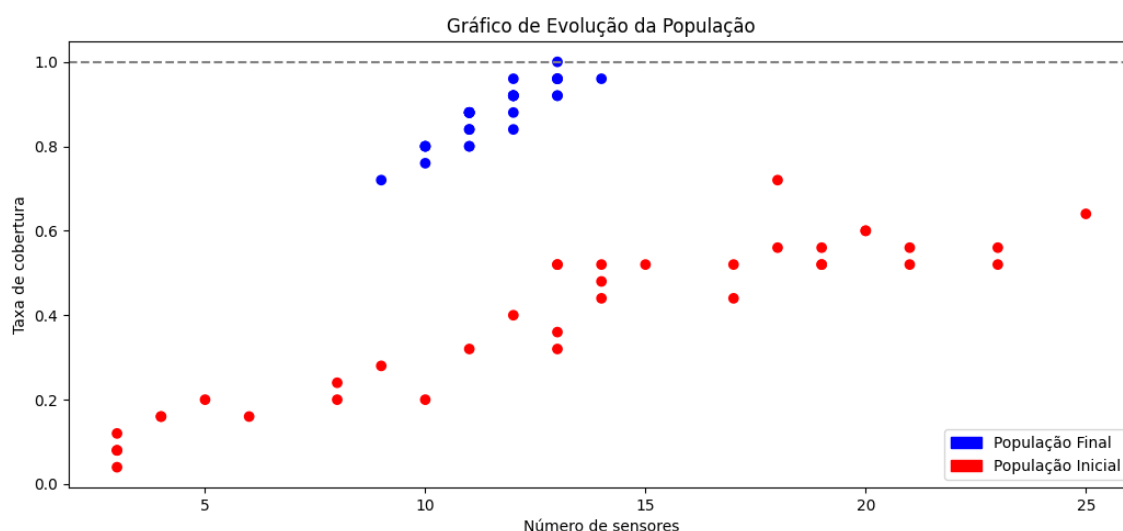


Gráfico 1: Evolução da população do algoritmo implementado

A partir da análise do gráfico, observa-se que o algoritmo implementado tende consistentemente a maximizar a cobertura da rede, empregando o menor número possível de



sensores. Vale ressaltar que, uma vez atingida a cobertura total da rede – 100% –, o algoritmo deixa de gerar soluções com uma quantidade de sensores superior à necessária para alcançar tal cobertura. Isso é evidenciado quando se observa que, com apenas 13 sensores, obtivemos a cobertura completa da rede. Esses resultados indicam que o algoritmo proposto apresenta uma evolução positiva, alcançando soluções eficientes para ambos os objetivos de forma simultânea.

Prosseguindo, avaliamos a eficácia do algoritmo proposto em prover soluções eficientes para o desafio da cobertura de rede. Para tanto, categorizamos os experimentos em três grupos distintos, baseados no tamanho da célula e no alcance de detecção dos sensores. No primeiro cenário, ambos, o tamanho da célula e o alcance de detecção, são configurados para 10m. No segundo, o tamanho da célula é estabelecido em 10m, enquanto o alcance de detecção é de 5m. Por fim, no terceiro experimento, o tamanho da célula é de 5m e o alcance de detecção, 10m.

Tabela 1: Resultados de simulação do algoritmo propostos em relação ao tamanho da célula versus faixa de detecção

Tamanho da célula vs Alcance do sensor	Algoritmo proposto			Algoritmo HS		
	10 X 10	10 X 5	5 X 10	10 X 10	10 X 5	5 X 10
Melhor cobertura	100%	100%	93%	100%	96%	90%
Número de sensores usados	13	48	22	15	52	21
Número de sensores disponíveis	25	100	25	25	100	25
Proporção de sensores usados	52%	48%	88%	60%	52%	84%
Média de cobertura	89%	99%	88%	93%	91%	80%
Desvio padrão da cobertura	0.0663	0.0126	0.0270	0.0888	0.0465	0.0669

Conforme demonstrado na Tabela 1, o algoritmo proposto apresenta desempenho destacado quando o tamanho da célula é igual ou maior que o alcance de detecção do sensor, atingindo nesses casos uma taxa de cobertura de até 100%, ou seja, cobertura completa. Destaca-se ainda que, no primeiro cenário, 13 dos 25 sensores disponíveis foram utilizados, representando uma redução de 48% em relação ao número máximo de sensores. A Figura 1, apresentada a seguir, ilustra esse resultado, evidenciando a habilidade do algoritmo proposto em determinar as posições ótimas para os sensores.

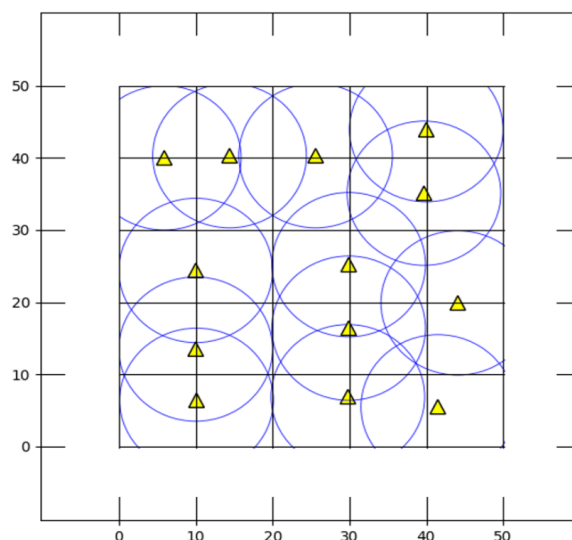


Figura 1: Resultado da implementação do algoritmo proposto com tamanho da célula e alcance de detecção iguais a 10m.

Além disso, no segundo cenário, conforme demonstrado na Tabela 1, o algoritmo também foi capaz de alcançar uma cobertura completa quando o tamanho da célula é maior que o alcance de detecção, utilizando 48% dos sensores disponíveis e obtendo um valor médio de taxa de cobertura após 30 execuções superior a 99%, enquanto o desvio padrão se manteve em apenas 0.0126. Isso atesta que, na grande maioria das execuções, o algoritmo proposto foi capaz de encontrar uma cobertura quase total, empregando o menor número possível de sensores.

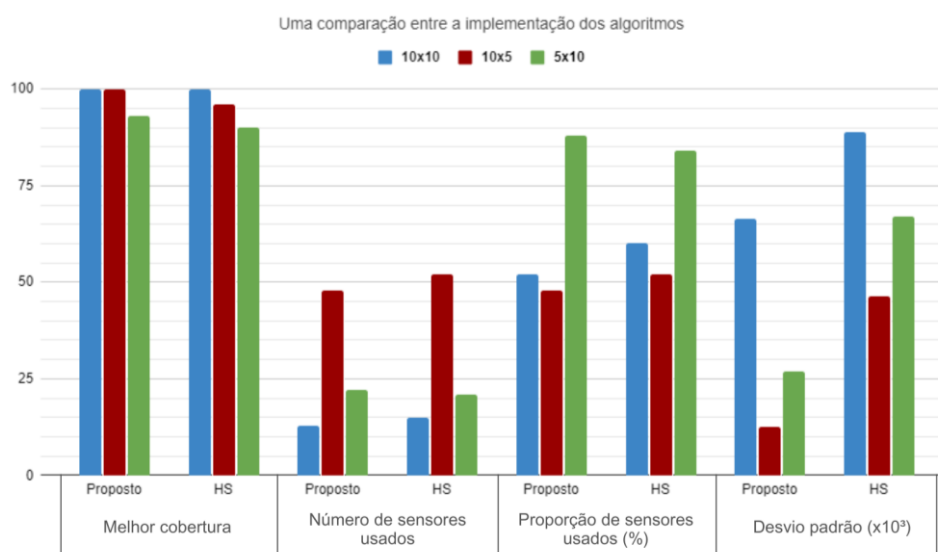


Gráfico 2: Comparação entre a implementação dos algoritmos com valores variados do tamanho da célula e alcance de detecção



Um aspecto que evidencia a superioridade do algoritmo proposto é a sua performance comparativa com a *Harmony Search* (HS). Na análise dos resultados, observa-se que o algoritmo proposto não só alcança a cobertura total em mais instâncias, mas também reduz o número de sensores empregados em comparação com a HS, mantendo, ao mesmo tempo, um desvio padrão ainda mais baixo. Esta estabilidade nos resultados destaca a consistência do algoritmo proposto. Tais métricas podem ser detalhadamente visualizadas e comparadas na Tabela 1 e no Gráfico 2, nos quais fica evidente a superioridade do algoritmo proposto em quase todas as variáveis analisadas, em relação ao método proposto por [Alia & Al-Ajouri, 2016].

5. CONCLUSÕES

Assim, ao concluir este estudo, constata-se que o objetivo inicialmente estabelecido de maximizar a cobertura em uma rede de sensores sem fio heterogênea foi atingido com êxito. As modificações implementadas para aprimorar a eficiência do algoritmo resultaram em desempenho superior, proporcionando soluções notavelmente eficazes.

Os experimentos realizados validaram a competência do algoritmo proposto em gerar soluções que alcançam taxas de cobertura de até 100%, enquanto minimizam a quantidade de sensores necessários. Adicionalmente, os resultados demonstram a superioridade do algoritmo em questão em comparação com a abordagem de implantação baseada no algoritmo *Harmony Search*.

Para pesquisas futuras, sugere-se explorar possíveis aprimoramentos e otimizações na implementação atual, bem como expandir o escopo para incluir outros objetivos relevantes para o projeto de redes de sensores, tais como a conectividade entre os sensores, a otimização da vida útil da rede e a adaptação para ambientes tridimensionais.

6. REFERÊNCIAS

[1] ALIA, Osama Moh'd; AL-AJOURI, Alaa. Maximizing Wireless Sensor Network Coverage With Minimum Cost Using Harmony Search Algorithm. **IEEE Sensors Journal**, vol. 17, p. 882-896, nov. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7762120>. Acesso em 17 de out de 2023.



[2] FARSI, Mohammed; ELHOSSEINI, Mostafa A.; BADAWY, Mahmoud; ARAFAT, Hesham; ELDIN, Hanaa Zain. Deployment Techniques in Wireless Sensor Networks, Coverage and Connectivity: A Survey. **IEEE Access**, v. 7, p. 28940-28954, fev. 2019. Disponível em: ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8653909. Acesso em 19 de out. 2023.

[3] HANH, Nguyen Thi; BINH, Huynh Thi Thanh; HOAI, Nguyen Xuan; PALANISWAMI, Marimuthu Swami. An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks. **Information Sciences**, vol. 488, p. 58-75, jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025519301823>. Acesso em 11 de out. 2023.

[4] SAHU, Pallavi; GUPTA, Sunil R.. Deployment Techniques in Wireless Sensor Networks. **International Journal of Soft Computing and Engineering**, v. 2, p.525-526, jul. 2012. Disponível em: <https://www.ijscce.org/wp-content/uploads/papers/v2i3/C0837062312.pdf>. Acesso em 11 de jun. de 2023.