

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE MÚLTIPLAS SMALL  
CELLS EM AMBIENTES OUTDOOR DA REGIÃO AMAZÔNICA  
UTILIZANDO ENXAME DE PARTÍCULAS E POLINIZAÇÃO DE  
FLORES.**

**FREDERICO GUILHERME SANTANA DA SILVA FILHO**

DM 01/2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FREDERICO GUILHERME SANTANA DA SILVA FILHO**

**OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE MÚLTIPLAS SMALL  
CELLS EM AMBIENTES OUTDOOR DA REGIÃO AMAZÔNICA  
UTILIZANDO ENXAME DE PARTÍCULAS E POLINIZAÇÃO DE  
FLORES.**

Dissertação de mestrado submetida a Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

Co-orientadora: Prof. Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araujo

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- D111o da Silva Filho, Frederico Guilherme Santana.  
Otimização do posicionamento de múltiplas smallcells em ambientes outdoor da região amazônica utilizando Ênxame de Partículas e Polinização de Flores. / Frederico Guilherme Santana da Silva Filho, . — 2019.  
72 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dr. Carlos Renato Lisboa Frances  
Coorientação: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araujo  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
1. algoritmo PSO. 2. algoritmo FPA. 3. smallcells,. 4. redes 5G. 5. modelos de propagação. I. Título.

CDD 621.31098115

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE MÚLTIPLAS SMALL CELLS EM AMBIENTES OUTDOOR DA REGIÃO AMAZÔNICA UTILIZANDO ENXAME DE PARTÍCULAS E POLINIZAÇÃO DE FLORES”**

**AUTOR: FREDERICO GUILHERME SANTANA DA SILVA FILHO**

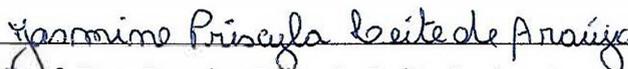
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 14/01/2019

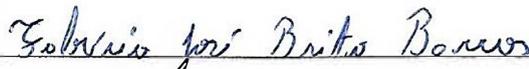
**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês  
(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araujo  
(Co-Orientadora – FCT/ITEC/UFPA)



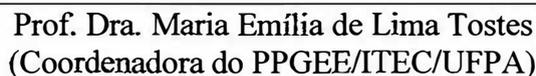
Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros

(Avaliador Interno ao Programa – PPGEE / UFPA)



Prof. Dr. Tássio Costa De Carvalho  
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST / UFPA)

**VISTO:**

  
Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que amo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus.

Agradeço à minha mãe, Nadia Alves Monteiro da Silva e ao meu irmão, Arthur Henrique Monteiro da Silva por todo o amor e apoio que sempre me deram.

Ao meu falecido pai e melhor amigo, Frederico Guilherme Santana da Silva que sempre foi um exemplo de vida, de luta e de superação. Me inspirou e inspira até hoje a ser um ser humano melhor e a lutar por meus objetivos de vida.

À minha avó Maria José que sempre acreditou em mim.

Agradeço à Natalia Osmar e Silva por segurar a minha mão e me mostrar que o infinito e além só é possível se estivermos juntos. Minhas conquistas são suas. Eu amo você.

Agradeço a minha Orientadora Prof(a). Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araujo pela imensa paciência, orientação, inspiração e pelo conhecimento repassado. Sem dúvida não teria chegado na metade do caminho sem ela.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Renato Frances, por acreditar em mim e me dar a oportunidade de mostrar todo meu potencial.

Aos amigos e em especial Anderson Souto, Rodrigo Dias Alfaia e Evelin Cardoso, que foram parceiros nessa caminhada e me deram todo o suporte necessário. Vocês são incríveis demais!

Agradeço pela amizade e por todas as contribuições dos meus amigos do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho da Universidade Federal do Pará.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE3) que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho. A Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS .....	10
RESUMO .....	11
ABSTRACT .....	12
1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	15
ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	16
1.3	16
2 TRABALHOS CORRELATOS .....	17
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	17
2.2 CORRELATOS .....	17
3 REFERENCIAL TEORICO .....	21
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS .....	22
3.2.1 RÁDIO PROPAGAÇÃO .....	22
3.2.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE .....	22
3.2.3 FENOMENOS DA PROPAGAÇÃO .....	23
3.2.4 AMBIENTES DE VEGETAÇÃO .....	26
3.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO .....	27
3.3.1 MODELOS TEÓRICOS .....	27
3.3.2 MODELOS EMPÍRICOS .....	27
3.3.3 MODELO OKUMURA-HATA .....	27
3.3.4 MODELO COST231-HATA .....	28
3.3.5 MODELO ECC-33 .....	29
3.3.6 MODELO SUI .....	30
3.3.7 MODELO WALFISCH-IKEGAMI .....	32
3.3.8 MODELO ERICSSON 999 .....	32
3.3.9 MODELO ABG .....	33
3.3.10 MODELO CI .....	33
3.4 ALGORITMOS BIOINSPIRADOS .....	34
3.4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	34
3.4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS .....	35
3.4.3 ALGORITMO DE POLINIZAÇÃO DAS FLORES (FPA) .....	36
4 METODOLOGIA .....	40
4.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	40
4.4 CENÁRIO E CAMPANHA DE MEDIÇÕES .....	40
4.5 OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS .....	41
4.6 ANÁLISE DA COBERTURA DO SINAL .....	42
4.7 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE <i>SMALLCELLS</i> UTILIZANDO PSO E FPA .....	43
4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
5 RESULTADOS .....	46

5.3	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	46
5.4	CARACTERIZAÇÃO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO EM MONO E MULTIFREQUÊNCIA .....	46
5.5	IMPLANTAÇÃO DAS SMALLCELLS .....	50
5.5.1	FREQUÊNCIA DE 3,5GHZ .....	51
5.5.2	FREQUÊNCIA DE 10GHZ .....	53
5.5.3	FREQUÊNCIA DE 24GHZ .....	55
5.5.4	FREQUÊNCIA DE 28GHZ .....	57
5.5.5	FREQUÊNCIA DE 60GHZ .....	59
5.5.6	FREQUÊNCIA 73GHZ .....	61
5.6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	63
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
6	CONCLUSÃO .....	65
6.3	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO .....	65
	REFERÊNCIAS .....	68

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Crescimento das redes móveis 3G/4G no mundo [2].....	13
Figura 2. Comparação entre as larguras dos feixes de onda milimétrica e microonda. [4].....	14
Figura 3. <i>Macrocells vs Smallcells</i> [7] .....	15
Figura 4. Fenômenos Básicos de propagação eletromagnéticas [11].....	24
Figura 5. Desvanecimento Lento e Rápido [12].....	25
Figura 6. Exemplo de Propagação Multipercurso [12].....	26
Figura 7. Pseudocódigo do algoritmo genético [24].....	35
Figura 8. Pseudocódigo Básico do PSO [24]. .....	36
Figura 9. Fluxograma do algoritmo de polinização de flores [24]. .....	39
Figura 10. Percurso da campanha de medição. Fonte: o Autor. ....	40
Figura 11. Percurso da campanha de medição PCT Guamá. Fonte: o Autor .....	41
Figura 12. Mapa gerado da Cobertura do Sinal recebido. Fonte: o Autor .....	42
Figura 13. Melhores Modelos de Propagação. Fonte: o Autor.....	46
Figura 14. Predição dos Modelos de Propagação em Monofrequencia. Fonte: o Autor.....	47
Figura 15. Modelo ABG otimizado com AG para multifrequencia. Fonte: o Autor. ....	48
Figura 16. Modelo CIF para multifrequencia. Fonte: o Autor .....	49
Figura 17. Mapa de cobertura 3.5GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor .....	51
Figura 18. Mapa de cobertura 3.5GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	51
Figura 19. Mapa de cobertura 3.5GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	52
Figura 20. Mapa de cobertura 3.5GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	52
Figura 21. Mapa de cobertura 10GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor .....	53
Figura 22. Mapa de cobertura 10GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	53
Figura 23. Mapa de cobertura 10GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	54
Figura 24. Mapa de cobertura 10GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	54
Figura 25. Mapa de cobertura 24GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	55
Figura 26. Mapa de cobertura 24GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	55
Figura 27. Mapa de cobertura 24GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	56
Figura 28. Mapa de cobertura 24GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	56
Figura 29. Mapa de cobertura 28GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	57
Figura 30. Mapa de cobertura 28GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	57
Figura 31. Mapa de cobertura 28GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor. ....	58
Figura 32. Mapa de cobertura 28GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	58
Figura 33. Mapa de cobertura 60GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.....	59
Figura 34. Mapa de cobertura 60GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	59
Figura 35. Mapa de cobertura 60GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.....	60
Figura 36. Mapa de cobertura 60GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	60
Figura 37. Mapa de cobertura 73GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.....	61
Figura 38. Mapa de cobertura 73GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	61
Figura 39. Mapa de cobertura 73GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.....	62
Figura 40. Mapa de cobertura 73GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.....	62
Figura 41. Tempo de execução dos algoritmos para o cálculo de cada Frente de Pareto Fonte: o Autor.....	63
Figura 42. Convergência dos Algoritmos FPA e PSO Fonte: o Autor.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese dos trabalhos correlatos.....	19
Tabela 2. Variáveis relacionadas ao tipo de terreno.....	31
Tabela 3. Variáveis relacionadas ao tipo de ambiente.....	33
Tabela 4. Parâmetros do PSO.....	44
Tabela 5. Parâmetros do FPA.....	44
Tabela 6. Modelos de propagação e o emq e desvio padrão. Fonte: o Autor.....	48
Tabela 7. Parâmetros do ABG, e CI para Uma Cenários sem visada direta para Monofrequência e ABG e CIF para multifrequência (f.) em relação à distância (d). Fonte: o Autor.....	49
Tabela 8. Modelos de Propagação Multifrequência: EMQ e Desvio Padrão. Fonte: o Autor..	50
Tabela 9. Percentual de cobertura obtido (FPA). Fonte: o Autor.....	50
Tabela 10. Percentual de cobertura obtido (PSO). Fonte: o Autor.....	50

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

IoT: Internet Das Coisas

5G: Quinta Geração Celular

PSO: Otimização por Enxame de Partículas

FPA: Algoritmo de Polinização de Flores

ITU: União Internacional de Telecomunicação

HetNets: Redes Heterogenias

LOS: Visada Direta

NLOS: Sem visada direta

GTD: Teoria Geométrica da Difração

UTD: Teoria Uniforme da Difração

FSPL: Perda no espaço Livre

ABG: Alfa-Beta-Gamma

CI: Close In

EMQ: Erro Medio Quadratico

SUI: Stanford University Interim

AG: Algoritmo Genetico

LTE: Long Term Evolution

## RESUMO

Com o crescente número de dispositivos conectados à internet, seja internet das coisas (IoT) ou de comunicação pessoal, como *smartphones* e *tablets*, e consumidores exigindo cada vez mais acesso a altas taxas de dados e qualidade de serviço, pesquisadores no mundo todo têm investido grandes esforços para desenhar as tecnologias da próxima geração celular (5G). Uma proposta promissora é a utilização das ondas milimétricas para os novos sistemas sem fio, tendo em vista principalmente a enorme quantidade de espectro disponível. Porém, isto implica na implantação de novos serviços em altas faixas de frequência. Apesar da expectativa de alcançar taxas de dados mais elevada e atrasos cada vez menores, o comprimento de onda nessas faixas faz dessa solução um enorme desafio. Isto porque a propagação do sinal nestas condições é bastante hostil. A maior exploração de *smallcells* também é vista como uma tecnologia chave para a evolução das redes móveis celulares para o 5G, porém a implantação dessas células neste tipo de cenário deve ser feita de forma otimizada para garantir a eficiência da rede. Nesta dissertação é proposta uma otimização do posicionamento de múltiplas *smallcells*, em um ambiente *outdoor* densamente arborizado, utilizando dois algoritmos bioinspirados: otimização por enxame de partículas (PSO) e o polinização de flores (FPA), combinados com dois modelos de propagação da próxima geração (5G): ABG e CI, simulados em diferentes faixas de frequência: 3.5 GHz, 10GHz, 24GHz, 28GHz, 60GHz e 73GHz. O ambiente estudado em questão é a praça Batista Campos, localizada na cidade de Belém do estado do Pará. Os resultados mostraram que ambos os algoritmos posicionaram de maneira eficiente as *smallcells*, garantido uma melhor cobertura na extensão da praça. Na avaliação de desempenho o PSO, apesar de executar em menor tempo, não converge para a solução ótima com as 1000 interações utilizadas nas simulações, necessitando assim de um maior número de interações, enquanto que o FPA tem maior tempo de execução, mas converge para a solução ótima com menos de 500 interações.

**Palavras-chave:** algoritmo PSO, algoritmo FPA, *smallcells*, redes 5G, modelos de propagação.

## ABSTRACT

With the increase of the number of devices connected to the Internet, by Internet of Things (IoT) or by personal communication, as smartphones and tablets, and consumers demanding even more access to high rates of data and quality of service, researchers all over the world have been investing great effort to draw the technologies of the next mobile generation (5G). A promising proposal is the utilization of millimeters waves to the new wireless systems, in view of, primarily, the enormous spectrum quantity available. However, it implies on the implantation of new services on high frequency bands. Despite of the expectation to reach even higher frequency rates with lower delays, the length of these waves makes this solution a huge challenge because the signal propagation in this condition is very hostile. The biggest smallcells exploration is also seen as a key technology to the evolution of the current mobile data to 5G, nevertheless the implantation of these cells in this type of scenery must be done in an optimized way to guarantee the data efficiency. This dissertation, is presented as a proposal of the optimization of multiple smallcells positioning in a densely wooded outdoor environment, using two bioinspired algorithms: Optimization by particle swarm (PSO) and Flower Pollination (FPA), combined with two propagation models of the next generation (5G): ABG e CI, simulated in different frequency bands: 3.5 GHz, 10 GHz, 24 GHz, 28 GHz, 60 GHz e 73 GHz. The specific analyzed environment is Batista Campos Square located in the city of Belem, in the State of Para. The results showed that both algorithms efficiently placed the smallcells, guaranteeing a better coverage on the extension of the square. In the OPS evaluation analysis, even though it executes in less time, it doesn't converge to the optimum solution with the 1000 interactions utilized in simulations, being necessary a greater number of interactions, while the FP has a higher execution time, but it converges to the optimum solution with less than 500 interactions.

**Keywords:** PSO Algorithm, FPA Algorithm, Network 5G, *smallcells*, Propagation Models.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A comunicação móvel sem fio experimentou um crescimento explosivo na última década, impulsionado pela popularidade dos dispositivos de comunicação pessoal. Em 2020, de acordo com a CISCO [1], é esperado que o tráfego móvel global alcance 30,6 exabytes por mês, contrastando com o valor medido em 2015: 3,7 por mês. Esses dados apontam um crescimento, nos próximos 5 anos, de um pouco mais que 800% nas trocas de informações em todo o mundo devido a conexão massiva de usuários e dispositivos, com o advento da internet das coisas, na rede. A Figura 1 ilustra o crescimento da utilização de redes móveis ao redor do globo.

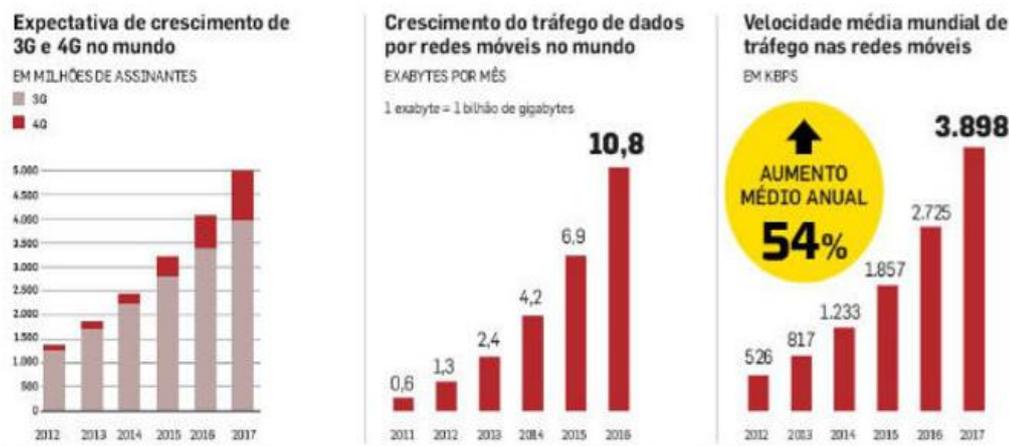
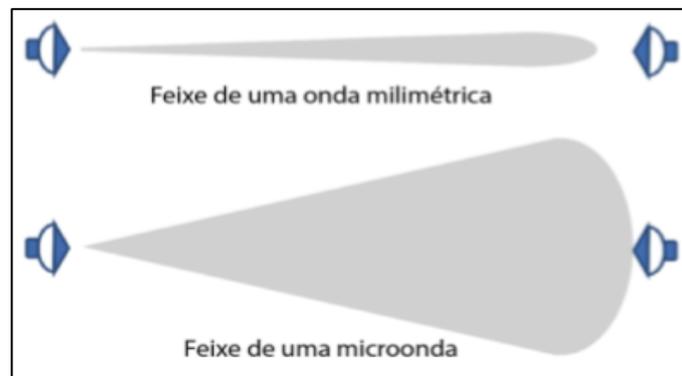


Figura 1. Crescimento das redes móveis 3G/4G no mundo [2].

Com o crescimento da demanda por dados móveis, as operadoras de redes necessitam realizar uma expansão de sua capacidade e escoamento de tráfego, com maiores taxas de transmissão e com soluções alternativas para fornecer uma melhor qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) para os usuários finais. Esse cenário tem motivado pesquisadores ao redor do mundo a propor e desenvolver tecnologias alternativas para a próxima geração celular (5G).

A utilização das ondas milimétricas é uma proposta promissora para o funcionamento da próxima geração celular. Pela definição da União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunications Union*), a banda das ondas milimétricas se estende de 30 a 300GHz. No entanto, a maioria dos pesquisadores e estudiosos também incluem as frequências vizinhas de 3,5 a 30 GHz, porque nessas faixas de frequências as ondas já apresentam uma propagação semelhante às ondas milimétricas [3]. O uso dessas faixas traria um enorme aumento a largura de banda disponível dos sistemas devido à alta disponibilidade espectral nessa faixa de frequência, o que diretamente aumentaria a taxa de dados disponíveis para o usuário final que poderia chegar a fazer *downloads* a uma taxa de dezenas de Gb/s [3].

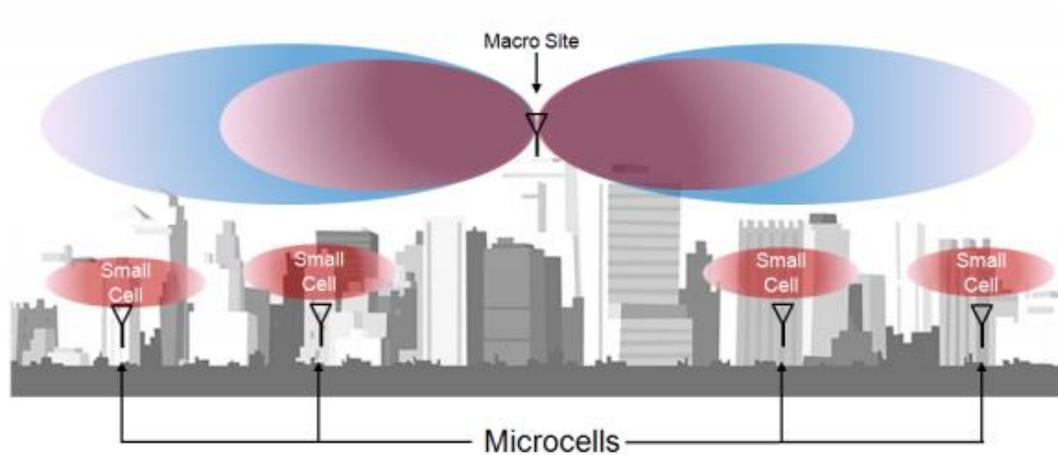
Uma onda de ordem milimétrica possui um feixe de onda bastante estreito se comparado a largura do feixe da microonda, conforme ilustrado na Figura 2, fazendo assim com que o sinal tenha uma maior atenuação em relação à distância, com isso a célula de comunicação milimétrica acaba tendo um alcance inferior do que as células dos sistemas atuais. Outro ponto a ser levado em consideração é a baixa difração dessas ondas, tornando o cenário sujeito ao sombreamento e reflexão.



**Figura 2. Comparação entre as larguras dos feixes de onda milimétrica e microonda. [4]**

Tendo em vista a grande perda de propagação que as ondas milimétricas apresentam, a implantação massiva de *smallcells* é vista como peça chave para o funcionamento dessa nova geração [5]. A combinação de grandes células de comunicação (*macrocells*) juntamente as pequenas células (*smallcells*) são chamadas de Redes Heterogêneas (HetNets, *Heterogeneous Network*) onde as *smallcells* possuem um menor raio de cobertura, mas a mesma ou até melhor *performance* comparado às *macrocells*, dependendo do cenário. Esta tecnologia consegue

aumentar em grande escala a capacidade da rede, principalmente quando existe uma densificação de *smallcells* [6]. Sua infraestrutura é mostrada na Figura 3.



**Figura 3. Macrocells vs Smallcells [7]**

Com o atual cenário apresentando, para que a eficiência da rede seja garantida a implantação das *smallcells* não pode ser feita de forma desordenada. Considerando as faixas de frequências das ondas milimétricas para a próxima geração 5G, este estudo propõe a otimização da implantação das *smallcells* em um cenário *outdoor* tipicamente amazônico, considerado hostil para a propagação do sinal por ser obstruído por prédios e possuir densa arborização. O presente estudo foi concentrando nas seguintes faixas de frequência: 3,5GHz, 10GHz, 24GHz, 28GHz, 60GHz e 73GHz.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é contruir uma metodologia flexível para o planejamento da implantação de *smallcells*, utilizando metaheurísticas, afim de melhorar a cobertura do sinal em áreas de grande obstrução para garantir uma boa qualidade de serviço aos usuários finais. A proposta é dividida em partes chaves, descritas mais especificamente abaixo:

- Efetuar a caracterização da perda de propagação do ambiente escolhido para o estudo, afim de definir o modelo de propagação ideal para as simulações;

- Realizar um amplo levantamento do estado da arte das áreas utilizadas nesta dissertação;
- A utilização de metaheurísticas para efetuar o posicionamento ótimo das *smallcells*;
- Avaliar o desempenho de duas metaheurísticas diferentes para definir a mais eficiente para a solução do problema;
- Simular a propagação do sinal após a implantação das *smallcells* na posição ótima com as diferentes faixas de frequência.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura deste documento está dividida em 8 capítulos. O atual capítulo descreve a introdução do trabalho englobando a motivação, contextualização e organização, enquanto que os demais são descritos a seguir:

Capítulo 2: Apresenta-se neste capítulo os trabalhos correlatos a esta dissertação.

Capítulo 3: Apresenta-se neste capítulo os referenciais teóricos utilizados na construção desta dissertação. Neste capítulo são apresentados os modelos de propagação existentes na literatura, os utilizados neste trabalho e sua importância. São apresentadas também as metaheurísticas utilizadas.

Capítulo 4: Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada no trabalho, desde as campanhas de medições para a aquisição dos dados iniciais às simulações.

Capítulo 5: São apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia empregada, havendo também duas análises comparativa: Uma entre os modelos de propagação testados e a outra entre as metaheurísticas utilizadas.

Capítulo 6: Neste capítulo, demonstram-se as considerações finais sobre os temas abordados na proposta do trabalho, apontando as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

## 2 TRABALHOS CORRELATOS

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta seção serão abordados alguns trabalhos correlatos que fizeram estudos relacionados a predição da perda de propagação, caracterização da perda de propagação em regiões específicas, que propuseram e otimizaram modelos de propagação, que utilizaram aplicativos para medição, que utilizaram algoritmos bioinspirados para o posicionamento ótimo de antenas em um determinado ambiente. Este capítulo traz nove importantes artigos para a confecção desta dissertação.

### 2.2 CORRELATOS

Para a construção de uma metodologia flexível para o planejamento de implantação de *smallcells* foi necessário a utilização de partes de diversos artigos da literatura que traziam um pouco de cada conteúdo necessário. Não foi encontrada uma referência direta abordando a implantação da mesma forma que esta dissertação, porém entra as referências utilizadas uma se mostrou mais próxima enquanto que as outras serviram para completar a metodologia.

De acordo com Lyra (2010) [8] existe a necessidade de adaptar modelos para regiões tropicais por suas características diferirem das características dos ambientes que geraram os modelos de propagação empíricos. O mesmo propõe um modelo para faixa de frequência de 5,8GHz baseado em medições de 335 clientes fixos, distribuídos entre 12 cidades através do programa de inclusão digital chamado Navega Pará e também medições no campus universitário da UFPA. Uma avaliação de desempenho é feita entre o modelo proposto e dois outros da literatura também utilizados nesta dissertação (Modelo SUI e COST231-Hata).

Araújo (2010) [27] propõe a utilização de AG para otimizar modelos de propagação nas frequências de 3.5GHz com o objetivo de melhorar consideravelmente a predição da perda para evitar problemas no planejamento e implementação de sistemas de comunicação sem fio e compara o desempenho dos modelos utilizados (SUI e ECC33). Efetua também extensas campanhas de medições com um sistema simplex de micro-ondas analógicos para TV e para recepção um analisador de espectro FSH6.

Rappaport (2016) [23] compara dois modelos de propagação em larga escala, fortes candidatos para a próxima geração 5G: o alfa-beta-gamma (ABG) e o Close-In (CI). O mesmo propõe uma tabela com diversos valores das variáveis para alguns tipos de ambientes em cenários LOS e NLOS considerando mono e múltiplas frequências.

Para Vilar e Silva (2016) [28] em sua pesquisa, é apresentada a simulação acerca do canal de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas. Esse extensivo estudo é efetuado na faixa de 60GHz onde é caracterizado o comportamento do canal para a mesma faixa no domínio do tempo e no domínio angular.

Tonini et al (2017) [29] considera a densificação de Estações Bases para auxiliar a demanda de trafico um gasto absurdo por exigir muitas conexões do *backhaul*. Como solução apresenta as HetNets e os benefícios da implantação de *smallcells* em redes densas da próxima geração, fazendo ainda um estudo do custo benefício da implantação de *smallcells* e otimização do *backhaul* com fibra.

Y. S. Meng et al (2009) [30] apresenta alguns modelos analíticos e empíricos de propagação focando o estudo na atenuação das ondas eletromagnéticas em ambientes com densa arborização. O artigo é uma revisão de estudos desde 1960 até 2009 e tem como objetivo servir como base para estudos futuros de redes sem fio de comunicação em áreas de floresta.

Em J. C. Silva et al (2018) [31] é proposto um modelo de propagação *outdoor* para ambientes com densa vegetação comuns em áreas suburbanos e rurais do Brasil. As frequências centradas do trabalho são entre as faixas de 700 e 800MHz e o modelo proposto é comparado a outros existentes da literatura.

David Chen (2015) [32] apresenta o SWNM, um *framework* de auto-organização e auto otimização para a implantação de *smallcells* em um determinado ambiente dando ênfase nos benefícios da utilização de sua metodologia em relação a otimização e resiliência da rede.

Kelly, Marvin G. (2016) [33] apresenta em sua tese de doutorado uma metodologia para implantação de antenas em um ambiente *indoor* utilizando PSO e modelos de propagação conhecidos da literatura. A Tabela 3 apresenta a síntese dos trabalhos correlatos discutidos neste capítulo.

**Tabela 1. Síntese dos trabalhos correlatos.**

Referencias	Lacunas Encontradas
Lyra (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O modelo proposto é comparado com o modelo Cost231-Hata em uma frequência superior a suportada pelo modelo Cost.</li> <li>- Para ser justo ao modelo SUI, um ajuste em seus parâmetros seria necessário levando em conta a região em que foi utilizado.</li> <li>- O modelo mais indicado para a comparação seria o ECC33</li> </ul>
Rappaport (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os parâmetros para os modelos definidos nas tabelas do artigo necessitam de uma correção quando utilizados em regiões urbanas densamente arborizadas.</li> </ul>
David Chen (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O framework utilizado em questão não é de fácil acesso.</li> </ul>
Kelly, Marvin G (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é feita uma comparação ou avaliação de desempenho no modelo proposto</li> <li>-O posicionamento é feito em uma área relativamente pequena e indoor.</li> <li>-Apenas um modelo de propagação é utilizado e não comparado com outros.</li> </ul>

Nesta dissertação se espera preencher algumas das lacunas encontradas nestes trabalhos fazendo a comparação entre diferentes modelos de propagação e Algoritmos Bioinspirados. Além da utilização de diferentes frequências. A utilização de um aplicativo acessível e um ambiente de propagação conhecido como o MATLAB.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais trabalhos correlatos utilizados para a confecção desta dissertação, onde foi possível perceber as contribuições e lacunas encontradas nas principais referencias. O capítulo seguinte abordará todo o referencial teórico necessário para a confecção desta dissertação.

### 3 Referencial Teorico

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo conceituar teoricamente todo o conhecimento necessário referente a propagação e os algoritmos utilizados :

- Canal de radio propagação para uma melhor compreensão da propagação em ambientes complexos. Em [14], por exemplo, indicou a necessidade de conhecer com precisão as características de propagação do ambiente antes de implementar projetos e efetuar o planejamento de sistemas de comunicação sem fio.
- Os modelos de propagação que realizam a predição da perda com base na utilização de diversos parâmetros relacionados ao ambiente onde o sinal se propaga. Podem ser levados em consideração, por exemplo, a presença de árvores, predios e outros obstáculos considerados candidatos potencialmetne influentes na atenuação do sinal em uma determinada faixa de frequência. Os modelos são divididos em dois grandes grupos: Modelos Teóricos e Modelos Empíricos.
- A computação evolutiva, área de pesquisa da Inteligência computacional, é um paradigma da computação baseada na teoria darwiniana da evolução através da seleção natural. Para os pesquisadores de computação evolutiva, os mecanismos da evolução são inspirados e adequados para soluções de problemas computacionais, tais como: a busca de um grande número de possibilidades de soluções, além da implementação de sistemas computacionais capazes de comparar dados complexos que são difíceis de programar manualmente [23]. Na computação evolutiva, as regras são tipicamente “seleção natural”, com variação devido aos processos de cruzamento e/ou mutação. O esperado comportamento emergente é o *design* de soluções de alta qualidade para problemas difíceis e a capacidade de adaptar estas soluções face a um ambiente em mudança. Os algoritmos nesse paradigma possuem características como auto-organização e comportamento adaptativo, são estocásticos, utilizam técnica de tentativa e erro para encontrar a otimização global. São iterativos, geram população inicial de forma aleatória e utilizam processamento paralelo para atingir um fim desejado. A computação evolutiva tem sido utilizada com sucesso em aplicações como, por

exemplo: Mineração de Dados, otimização combinatória, diagnóstico de falhas, classificação, agrupamento, programação e aproximação de series temporais. O presente capítulo introduzirá os três algoritmos bioinspirados utilizados para a otimização dos problemas abordados por esta dissertação: Algoritmos Genéticos, Otimização por Enxame de Partículas e o Algoritmo de Polinização de Flores.

## 3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

### 3.2.1 RÁDIO PROPAGAÇÃO

O fenômeno da propagação de ondas de rádio vem sendo estudado por décadas. A onda ao se propagar do transmissor para o receptor está sujeita a diversos fenômenos inerentes à natureza dos mecanismos de propagação. Antes de fazer uma abordagem a respeito dos fenômenos envolvidos na propagação, será explanado, primeiramente a propagação em espaço livre.

### 3.2.2 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

Quando o trajeto entre o emissor e o receptor é limpo e desobstruído é dito que esta onda se propaga em um espaço livre caracterizando um cenário de visada direta (LoS, *Line of sight*). O termo espaço livre pode ser aplicado à nível de estudo ou confecção de projetos iniciais, na caracterização da perda de propagação de ondas de rádio em meios desobstruídos, por se tratar da representação de um cenário ideal para propagação [8].

O cálculo da potência recebida em uma determinada distância é baseado em perdas de propagação no espaço livre, e estas, podem ser obtidas utilizando-se o modelo de propagação descrito pela Equação 1, também conhecida como equação do espaço livre de Friis [9].

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Onde:

$P_R(d)$  – Potência recebida em função da distância  $d$ , em Watts.

$P_T$  – Potência de transmissão, em Watts.

$G_T$  e  $G_R$  – Ganhos de transmissão e recepção, respectivamente, em metros.

$\lambda$  – Comprimento de onda, em metros.

$d$  – Distância entre o transmissor e receptor, em metros.

$L$  – Fator de perdas,  $L \geq 1$ .

Após obter a potência recebida utilizando a Equação 1 é possível calcular a perda de propagação do espaço livre ou a atenuação sofrida pelo sinal no percurso entre o transmissor e o receptor, dada a razão entre potência transmitida e potência recebida, como indica a Equação (2) [9].

$$\text{Perda no espaço Livre} = L = \frac{P_T}{P_R} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (2)$$

Na prática, porém, grande parte dos cálculos de projetos de cobertura utilizam fórmulas e valores em escalas logarítmicas. Sendo assim, a perda no espaço livre para um sinal com frequência em de transmissão na faixa de MHz (Mega-hertz) em uma distância de separação  $d$  (quilômetros) entre o transmissor e o receptor, é dada pela Equação 3 abaixo em unidade decibel (dB).

$$L = 32,44 - 10\log(G_T) - 10\log(G_R) + 10\log(f) + 20\log(d) \quad dB \quad (3)$$

### 3.2.3 FENOMENOS DA PROPAGAÇÃO

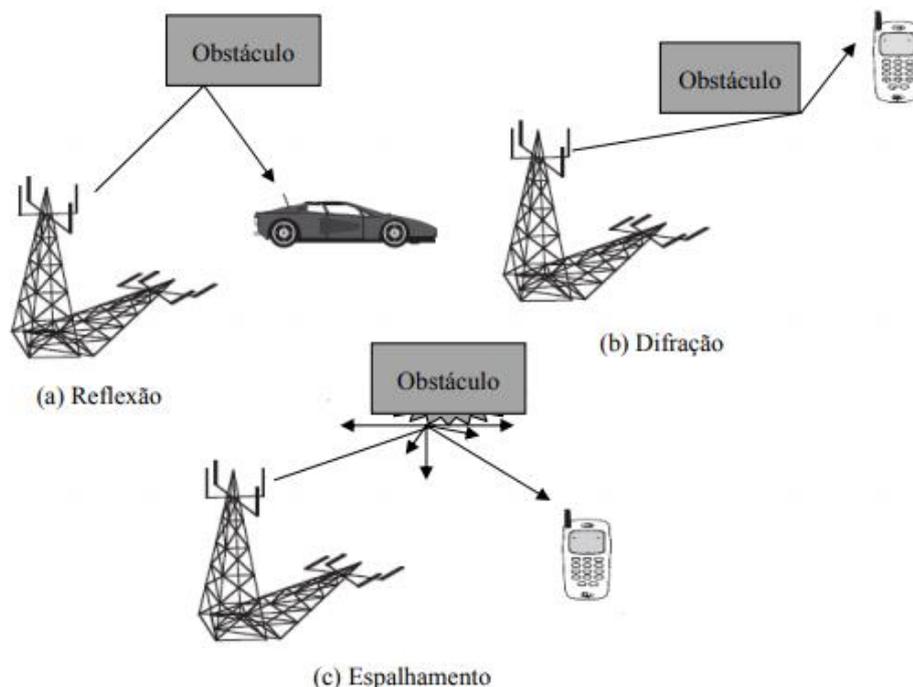
A predição da perda de propagação em ambientes *outdoor* é bastante difícil e complexa, devido às diferentes características observadas no ambiente encontrado entre o transmissor e o receptor, tais como: diferentes edificações, arborização variada, diferentes tipos de relevo, além

dos fenômenos básicos da propagação os quais as ondas eletromagnéticas estão sujeitas, como: espalhamento, reflexão e difração.

O espalhamento ocorre quando o meio de propagação é constituído por superfícies rugosas e pequenos objetos de dimensões inferiores ao comprimento de onda [10].

A difração é o fenômeno responsável por explicar a existência de campos eletromagnéticos em regiões de não visibilidade causada por obstáculos, também conhecidas como regiões de sombreamento. Obstáculos esses que podem ser naturais ou artificiais. Duas formulações matemáticas baseadas na ótica geométrica (Teoria Geométrica da Difração (GTD) e Teoria Uniforme da Difração (UTD)) são utilizadas para avaliar a atenuação por difração [11].

Por outro lado, a reflexão ocorre quando a onda incide em objetos com grandes dimensões se comparada ao comprimento de onda do sinal que se propaga. Situações mais comuns onde ocorre este fenômeno podem ser vistas por exemplo na incidência das ondas na superfície da Terra, prédios e paredes [11]. A Figura 4 ilustra tais fenômenos.

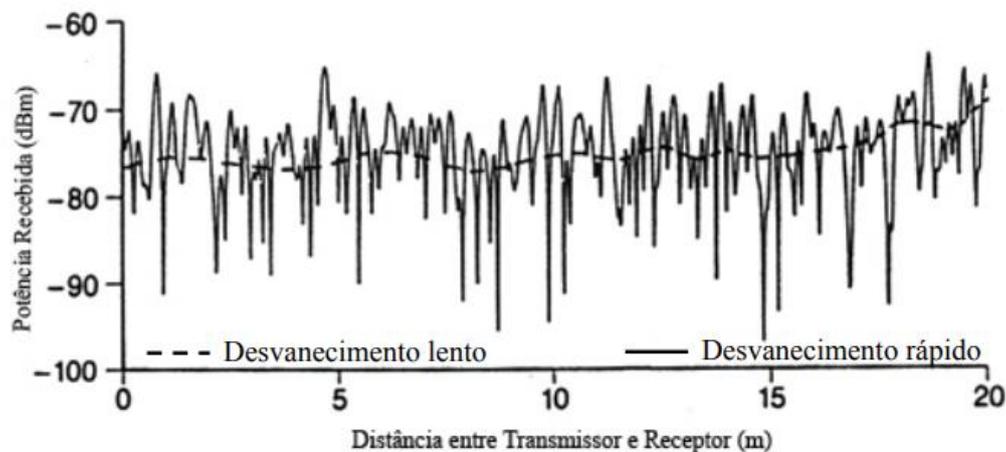


**Figura 4. Fenômenos Básicos de propagação eletromagnéticas [11]**

O multipercurso e o sombreamento são outros fenômenos muito importantes no estudo da propagação. O efeito de multipercurso é caracterizado pelo sinal recebido ser composto por inúmeras versões do sinal original transmitido, que percorre diferentes caminhos. Esses sinais, em grande parte, são gerados pelas múltiplas difrações e reflexões que o sinal original sofre até

chegar ao receptor. Já o sombreamento se manifesta através da flutuação do nível de sinal com o a distância, devido às obstruções apresentadas pelo relevo ou pelo homem. A redução do nível do sinal decorrente das flutuações é chamada de desvanecimento, que é classificado em três tipos: Desvanecimento Espacial, Desvanecimento Temporal e Desvanecimento Seletivo.

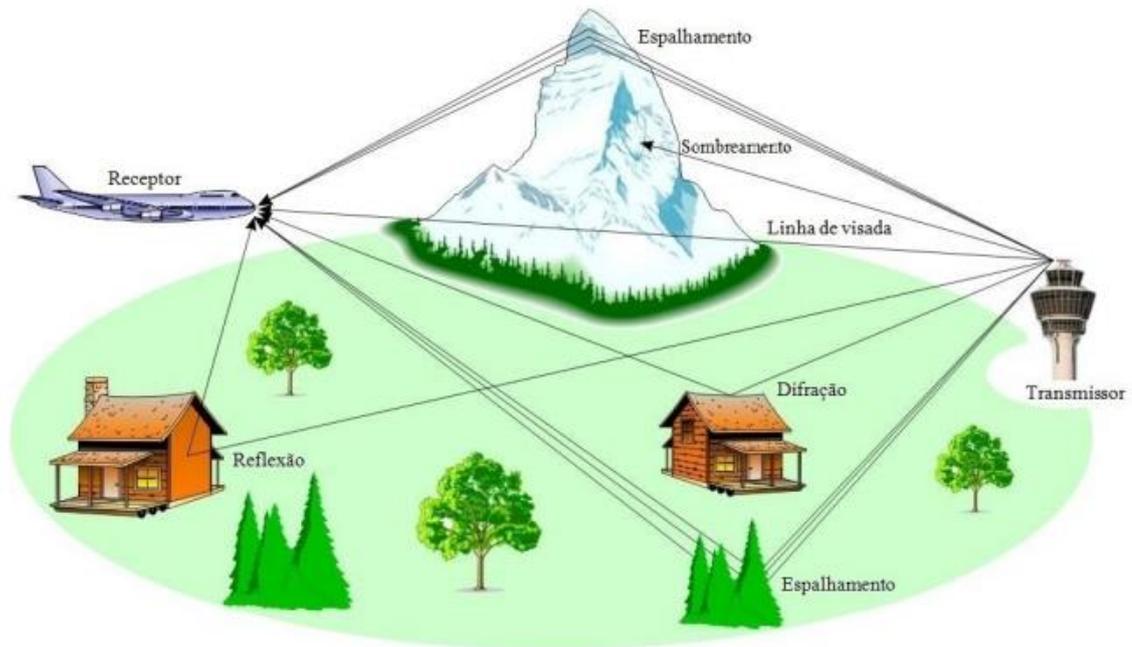
O desvanecimento espacial, é caracterizado por uma variação em função da distância, e apresenta duas versões: O desvanecimento Lento e Rápido como mostra a Figura 5.



**Figura 5. Desvanecimento Lento e Rápido [12].**

O desvanecimento temporal corresponde às flutuações decorrentes de causas diversas, principalmente com os movimentos do receptor e de objetos na vizinhança. Também influem nesse caso as mudanças de temperatura, umidade relativa, abertura e fechamento de portas.

O desvanecimento seletivo é causado principalmente pela ocorrência de propagação com multipercurso [12]. A Figura 6 reforça a demonstração dos fenômenos de propagação juntamente ao sombreamento.



**Figura 6. Exemplo de Propagação Multipercursa [12].**

### 3.2.4 AMBIENTES DE VEGETAÇÃO

A propagação em ambientes com densa vegetação é de extrema complexidade e de grande interesse em estudos de planejamento de redes sem fio. A propagação da onda está sujeita à absorção, atenuação por espalhamento e despolarização. Estes fenômenos estão intimamente relacionados com a frequência utilizada, condições atmosféricas, altura da antena e o tipo de vegetação encontrada no local [13].

Em áreas de grandes edificações, os prédios produzem variações dos sinais promovendo o espalhamento da onda. Em ambientes com vegetação, as árvores causam dois efeitos: a atenuação e o espalhamento da onda, que variam de grau dependendo de cada tipo da vegetação.

Devido à grande diversidade da vegetação, fazer a caracterização da mesma se torna de grande dificuldade. Em [13] é apresentada uma forma simplificada da caracterização da vegetação onde as áreas são divididas em praças nas quais é especificado a densidade da arborização e os tipos de árvores.

### 3.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

#### 3.3.1 MODELOS TEÓRICOS

São modelos baseados em formulações teóricas, fundamentados em suposições originadas de dados coletados ou em leis físicas. Muitos modelos teóricos não são utilizáveis para o planejamento de redes sem fio por desconsiderarem muitas características do ambiente em estudo. Existem, entretanto, alguns outros tipos de modelos teóricos que se baseiam na aquisição de bases de dados que descrevam detalhadamente as características do meio e na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, como exemplo temos a técnica Ray-Tracing [15].

#### 3.3.2 MODELOS EMPÍRICOS

São modelos baseados na realização de diversas medições e observações em ambientes reais de propagação. A equação que rege um modelo empírico é criada de tal maneira para se ajustar da melhor forma possível aos dados medidos. Para que um modelo empírico possa representar com eficiência as perdas de propagação em um determinado ambiente, o mesmo deve ter seus parâmetros derivados de características do local estudado, vinculados com a frequência de operação do sistema e alturas efetivas das antenas utilizadas para transmissão e recepção de sinais [16]. A seguir, serão apresentados alguns dos mais conhecidos modelos existentes na literatura e por fim dois modelos considerados fortes candidatos a próxima geração 5G.

#### 3.3.3 MODELO OKUMURA-HATA

Este modelo foi proposto a partir de gráficos com informações de perdas de percursos obtidas por Okumura em diversas medições da cidade de Tóquio, nas faixas de frequência entre 150MHz e 1500MHz. Este modelo é válido para estações base (transmissor) com alturas efetivas entre 30m e 200m e para alturas do receptor entre 1m e 10m. É muito utilizado e referenciado na literatura para planejamento de redes celulares. A perda em dB para áreas urbanas é expressa pela Equação 4:

$$L_v = 69,55 + 26,26 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (4)$$

Onde:

$f$  – Frequência de operação, em MHz;

$h_{te}$  – Altura da antenna de transmissão, em metros;

$h_{re}$  - Altura da antenna de recepção, em metros;

$a(h_{re})$  – Fator de correção para altura da antena em função do tipo de área, em dB.

De acordo com os ajustes feitos por Hata, este modelo pode ser aplicado para áreas rurais e urbanas utilizando as variações do termo  $a(h_{re})$  e os ajustes mostrados nas Equações 5, 6 e 7:

$$\text{Cidades pequenas e médias: } a(h_{re}) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_{te} - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad (5)$$

$$\text{Cidades Grandes: } a(h_{re}) = 8,29(\log(1,54 h_{re}))^2 - 1,1, f < 300\text{MHz} \quad (6)$$

$$a(h_{re}) = 3,2(\log(11,75 h_{re}))^2 - 4,97, f > 300\text{MHz} \quad (7)$$

Para o cálculo da perda total de percurso em uma área suburbana usa-se a Equação 8:

$$L = L_v - 2 \left( \log\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5,4 \quad (8)$$

Já a perda total em áreas rurais é encontrada utilizando-se a Equação 9:

$$L = L_v - 4,78 (\log(f))^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (9)$$

### 3.3.4 MODELO COST231-HATA

Este modelo foi proposto em [17] e é uma extensão do modelo Okumura-Hata, feito para abranger as bandas de frequência entre 1500 MHz e 2000MHz. A perda de propagação para este modelo é dada pela Equação 10:

$$L = 46,3 + 39,9 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) + C_m \quad (10)$$

Onde:

$C_m$  – 0 dB para áreas urbanas médias e suburbanas;

$C_m$  – 3 dB para centros Urbanos.

### 3.3.5 MODELO ECC-33

O modelo ECC33 é baseado na extrapolação de medidas realizadas por Okumura em Tóquio, na qual foi utilizada a classificação de cidades de grande porte e cidades de médio porte, com fatores de correção para áreas suburbanas ou abertas, de modo que o modelo seja aplicável a faixa de 3,4GHz a 3,8GHz [18]. A perda de percurso para o modelo ECC33, em dB, é dada pelas Equações 11, 12, 13 e 14:

$$PL_{ECC} = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad (11)$$

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (12)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83 \log(d) + 7,894 \log(f) + 9,56 (\log(f))^2 \quad (13)$$

$$G_b = \log\left(\frac{h_t}{200}\right) \{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\} \quad (14)$$

A Equação 15 é usada para cidades de médio porte:

$$G_r = [42,57 + 13,7 \log(f)] [\log(h_r) - 0,585] \quad (15)$$

E a Equação 16 para cidades de grande porte [16]:

$$G_r = 0,795(h_r) - 1,862 \quad (16)$$

Onde:

$A_{fs}$  – Atenuação no espaço livre: em dB;

$A_{bm}$  – Perda de percurso médio: em dB.

$d$  – Distancia: em Km.

$f$  – Frequência de Operação: em GHz

$G_b$  – Fator de ganho pela Altura da estação Rádio Base: em dB.

$h_t$  – Altura da estação base

$G_r$  - Fator de ganho pela altura do receptor

### 3.3.6 MODELO SUI

O modelo foi desenvolvido para padrões de sistemas banda larga operantes abaixo de 11GHz. A perda de propagação para ambientes suburbanos é calculada pelas Eequações 17, 18 e 19 e para valores tabelados [19], mostrados a seguir:

$$L_{SUI} = A + 10y \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + S, d > d_0 \quad (17)$$

$$A = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + S, d > d_0 \quad (18)$$

$$y = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (19)$$

Onde:

$d$  – Distancia: em metros;

$d_0$  – Distancia inicial:  $d_0 = 100 \text{ metros}$ ;

$\lambda$  - Comprimento de onda: em metros;

$y$  - Expoente de perdas;

$h_b$  - Altura da estação base:  $10 \leq h_b \leq 80m$ .

Os parâmetros a, b e c assumem valores que variam de acordo com o tipo de terreno [11], de acordo com a Tabela 1:

**Tabela 2. Variáveis relacionadas ao tipo de terreno**

Parâmetro do modelo	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

A variável  $S$  na equação (18) caracteriza o desvanecimento lento do sinal. Normalmente os valores do desvio padrão de  $S$  estão entre 8,2 e 10,6 dB, dependendo da morfologia do terreno ou vegetação [12].

O modelo apresentado pode ser aplicado para frequências próximas de 2GHz e alturas de recepção até 2m. Para se utilizar o modelo descrito em outras frequências e alturas de recepção entre 2m a 10m, é necessário usar a Equação 20 do modelo de propagação acrescido de fatores de correção:

$$L = L_{SUI} + \Delta PL_F + \Delta L_h \quad (20)$$

$$\Delta PL_F = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (21)$$

$$\Delta PL_h = -10,8 \log\left(\frac{h}{2}\right), \text{ terreno A e B} \quad (22)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right), \text{ terreno C} \quad (23)$$

Onde:

$\Delta PL_F$  – Fator de correção de frequência: em dB;

$\Delta PL_h$  – Fator de correção para altura de recepção: em dB;

$h$  – Altura de recepção: em metros.

### 3.3.7 MODELO WALFISCH-IKEGAMI

O modelo de propagação *outdoor* Walfisch – Ikegami leva em consideração a morfologia do terreno, altura de prédios, distância entre os mesmos, largura média e orientação das ruas em relação ao sentido de propagação das ondas e avalia os fenômenos de propagação, quando existe linha de visada entre a estação-base e o móvel, ou seja, situações onde encontramos uma visada direta e quando ocorre o caso de obstrução (NLOS, *Non Line of Sight*) na propagação das ondas no ambiente [19]. A equação 24 descreve a expressão para o cálculo da perda de propagação do modelo:

$$Pl (dB) = 42,6 + 26 \log(d) + 20\log(fc) \quad (24)$$

Para  $d \geq 0,00$  Km, temos a distância de referência em Km e a frequência da portadora em MHz.

### 3.3.8 MODELO ERICSSON 999

É uma extensão do modelo HATA, utilizado para frequências até 1900 MHz. Seus parâmetros são ajustados de acordo com o ambiente estudado [20]. A perda de propagação é dada pela Equação 25:

$$Pl = a_0 \log(d) + a_1 \log(d) + a_2 \log(hb) + a_3 \log(hb) \log(d) * 3,2(\log 11,752 * hr + g(f)) \quad (25)$$

Onde  $g(f)$  é dado pela Equação 26:

$$g(f) = 44,49 \log(f) - 4,78(f)^2 \quad (26)$$

Os valores de  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são constantes e são dadas de acordo com a Tabela 2 abaixo:

**Tabela 3. Variáveis relacionadas ao tipo de ambiente.**

Área/ Parâmetro	A0	A1	A2	A3
Urbano	36,2	30,2	12	01
Suburbano	43,2	68,93	12	01
Rural	45,9	100,6	12	01

### 3.3.9 MODELO ABG

O ABG é um modelo de perda de propagação estatístico proposto em [21] e possui quatro parâmetros para determinar a perda de propagação, como mostra a Equação (27).

$$PL^{ABG}(f, d)[dB] = 10\alpha \log_{10}\left(\frac{d}{1 \text{ m}}\right) + \beta + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{f}{1 \text{ GHz}}\right) + X_{\sigma}^{ABG} \quad (27)$$

Alpha e gama são coeficientes de sombreamento e denotam a dependência da perda de percurso em relação à distância e a frequência, respectivamente. Já o beta é um valor de *offset* para perdas de percurso, em dB.  $X_{\sigma}^{ABG}$  é uma variável aleatória de comportamento gaussiano e média zero, com desvio padrão medido em dB, que descreve o sombreamento presente no canal em função da distância e da frequência.

O modelo ABG permite o ajuste dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Ressalta-se que o parâmetro  $\gamma$  só é passível de ajuste no caso de multifrequência. Caso contrário, deve ser fixado em 0 ou 2

### 3.3.10 MODELO CI

A Equação 28 mostra o cálculo da perda de propagação utilizando o modelo CI, onde  $n$  denota o expoente de perda de propagação e  $X_{\sigma}^{CI}$  é uma variável aleatória de comportamento gaussiana e média zero. Utiliza-se  $10n$  para descrever a perda de propagação em termos de décadas de distância a partir de 1m e a variável  $d$  é a distância de separação entre o transmissor e o receptor. O termo  $FSPL(f, 1m)$  caracteriza a perda de propagação no espaço livre, medida

em dB, em uma distância de separação de 1 m entre o transmissor e o receptor na frequência da portadora  $f$ , com  $c$  equivalente à velocidade da luz, como mostra a equação 29 [22].

$$PL^{CI}(f, d)[dB] = FSPL(f, 1 \text{ m})[dB] + 10n \log_{10}(d) + x_{\sigma}^{CI} \quad (28)$$

$$FSPL(f, 1 \text{ m})[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right) \quad (29)$$

Como pode ser observado, o modelo CI tem apenas um parâmetro possível de ser ajustado: expoente de perdas  $n$ .

### 3.4 ALGORITMOS BIOINSPIRADOS

#### 3.4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AG) são uma das principais estratégias de busca e otimização da computação evolutiva, inspirado no princípio darwiniano de seleção natural e reprodução genética. Foram introduzidos por John Holland em 1975 e popularizados por um dos seus alunos, David Goldberg, em 1989. Tem como características a busca estocástica, paralelismo, generalidades e facilidade no uso de restrições [24].

Os algoritmos genéticos trabalham com uma população de soluções para um dado problema em vez de tratar cada solução individualmente. Esse conjunto de soluções passa por uma série de seleções, pareamentos e recombinações com o intuito de gerar novas soluções e de melhorar as aptidões dos indivíduos.

Os principais operadores de condução de um AG é a seleção (para modelar a sobrevivência do mais apto) e recombinação através da aplicação de um operador de cruzamento (para a reprodução do modelo) [25].

Os diversos estudos dos algoritmos genéticos possibilitaram inúmeras maneiras de implementação de tal algoritmo, mas todos seguindo os passos do AG Clássico. O primeiro passo é a geração aleatória de uma população inicial de cromossomos, durante o processo evolutivo, esta população é avaliada por uma função de avaliação, também conhecida como

função *fitness*, e cada cromossomo recebe uma aptidão. O segundo passo é a seleção, na qual serão selecionados os cromossomos mais aptos, os demais serão descartados. Os cromossomos selecionados podem sofrer recombinações em suas características fundamentais através dos operadores de cruzamento, também conhecido como *crossover*, e mutação, gerando descendentes para a próxima população, garantindo os passos três e quatro. Estes passos são repetidos até que uma solução satisfatória seja encontrada.

A forma genérica de um algoritmo genético é representada no pseudocódigo da Figura 7. Nesse pseudocódigo, o primeiro procedimento consiste na criação de uma população inicial de indivíduos  $pop(x=1)$ , em que  $x$  representa o contador de gerações. Cada indivíduo de  $pop(x)$  é uma solução candidata do problema. Logo, tem-se uma função de avaliação (*fitness*) ou aptidão da população  $pop(x)$ . Na continuação, tem-se um ciclo enquanto... faça (*while ... do*) em que nessa população de indivíduos será aplicada a operação de cruzamento (*crossover*), mutação e a função de avaliação para verificar se o critério de parada foi alcançado. O critério de parada pode ser, por exemplo, se o mínimo de uma função que a priori sabe-se deve ser zero foi alcançado para uma tolerância pré-especificada.

<b>Algoritmo genético</b>
Seja $Pop(x)$ a população de cromossomos da geração $x$
$x \leftarrow 0$
Inicializar $Pop(x)$
Avaliar $Pop(x)$
<b>Enquanto</b> o critério de parada não for satisfeito <b>faça</b>
$x \leftarrow x + 1$
Selecionar $Pop(x)$ a partir de $Pop(x - 1)$
Aplicar <i>crossover</i> sobre $Pop(x)$
Aplicar mutação sobre $Pop(x)$
Avaliar $Pop(x)$
<b>Fim Enquanto</b>

**Figura 7. Pseudocódigo do algoritmo genético [24].**

### 3.4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

A otimização por Enxame de Partículas é um algoritmo de otimização global usado para lidar com problemas nos quais uma melhor solução pode ser representada como um ponto

ou de superfície num espaço n-dimensional. Foi proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart [26], destinado primeiramente para simular o comportamento social, com uma representação estilizada do movimento de organismos em coletivo de pássaros e peixes.

O PSO é um procedimento de pesquisa de base populacional, onde os indivíduos, referidos como partículas, são agrupados em um enxame. Cada partícula do enxame representa uma solução candidata para o problema de otimização. Em um sistema de PSO, cada partícula “viaja” em um espaço de busca multidimensional, ajustando sua posição no espaço de busca de acordo com a sua própria experiência e na experiência de partículas vizinhas. Portanto uma partícula faz uso da melhor posição encontrado por si só e a melhor posição dos seus vizinhos a posicionar-se em direção a uma ótima solução. O desempenho de cada partícula é medido de acordo com uma função *fitness* pré-definida que está relacionada com o problema a ser resolvido [26].

Há diversas variações do PSO, em formas híbridas ou melhoradas, aumentando sua precisão na solução de problemas complexos, otimizando os resultados. Na Figura 8 tem-se uma representação do algoritmo PSO básico, em que  $P$  é uma população de partículas e  $p$  é uma partícula.

Algoritmo otimização por enxame de partículas
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determine o número de partículas <math>p</math> da população.</li> <li>2. Inicialize aleatoriamente a posição inicial (<math>x</math>) de cada partícula <math>p</math> de <math>P</math>.</li> <li>3. Atribua uma velocidade inicial (<math>v</math>) igual para todas as partículas.</li> <li>4. Para cada partícula <math>p</math> em <math>P</math> faça: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcule sua aptidão <math>f_p = f(p)</math>.</li> <li>• Calcule a melhor posição da partícula <math>p</math> até o momento (<math>pB</math>).</li> </ul> </li> <li>5. Descubra a partícula com a melhor aptidão de toda a população (<math>gB</math>).</li> <li>6. Para cada partícula <math>p</math> em <math>P</math> faça: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atualize a velocidade da partícula.</li> <li>• Atualize a posição da partícula.</li> </ul> </li> <li>7. Se condição de término não for alcançada, retorne ao passo 4.</li> </ol>

**Figura 8. Pseudocódigo Básico do PSO [24].**

### 3.4.3 ALGORITMO DE POLINIZAÇÃO DAS FLORES (FPA)

Todas as características do processo de polinização de flores foram consideradas para a elaboração do algoritmo. O FPA obedece às seguintes regras:

- Polinização biótica e cruzada são consideradas como um processo de polinização global com transportadores de pólen executando voos de *Levy* [31];
- Polinização abiótica e autopolinização são consideradas como polinização local;
- Lealdade de uma flor pode ser considerada como tendo uma probabilidade de reprodução proporcional à similaridade das duas plantas envolvidas;
- Polinização local e global são controladas por uma probabilidade  $\text{prob} \in [0,1]$ . Devido à proximidade física e outros fatores como o vento, a polinização local pode ter uma significativa parte nas atividades gerais da polinização.

Seguindo as regras especificadas, o algoritmo foi dividido em duas etapas, polinização local e polinização global. Considerando que só haja uma flor para cada planta e um pólen para cada flor, o algoritmo terá uma solução  $b_i$ .

Para a etapa de polinização global será encontrado o pólen mais apto, chamado  $g^*$ . O pólen mais apto é aquele que tem sua polinização e reprodução assegurada por suas características de sobrevivência aos transtornos do transporte, como a distância e o vento. Nessa etapa, será considerada a regra da lealdade a uma flor, representada matematicamente pela Equação (30) [24]:

$$b_i^{t+1} = b_i^t + L(b_i^t - g^*) \quad (4)$$

Onde  $b_i^t$  é o pólen  $i$  ou vetor solução  $b_i$  na iteração  $t$ , e  $g^*$  é a melhor solução atual encontrado entre todas as soluções. O parâmetro  $L$  é o tamanho do passo.

Na polinização biótica, sendo o mais comum tipo de polinização que ocorre na natureza, os organismos que visitam as flores para coletar pólen, néctar, óleos ou mesmo odores, são os responsáveis pela transferência de grãos de pólen das anteras de uma flor para o estigma da mesma flor ou de uma outra flor da mesma espécie. Para demonstrar o movimento (voos) destes organismos, tais como abelhas, vespas, borboletas, mariposas e formigas, pode-se utilizar a distribuição de *Levy*. Matematicamente, a distribuição de *Lévy* foi representada por (31) [24]:

$$L \sim \frac{\lambda \tau(\lambda) \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}{\pi} \cdot \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (s \gg s_0 > 0) \quad (31)$$

Em que,  $\tau(\lambda)$  é a função gama padrão válida para  $s > 0$ .

A segunda etapa representa a polinização local, ao qual é o modo incomum de polinização, que ocorre em apenas 10% nas plantas sem a ajuda dos animais. Matematicamente, este tipo de polinização pode ser representado por (32) [14].

$$b_i^{t+1} = b_i^t + \epsilon (b_j^t - b_k^t) \quad (32)$$

Em que,  $b_j^t$  e  $b_k^t$  imitam a lealdade a uma flor em um espaço limitado. Os índices  $j$  e  $k$  são escolhidos aleatoriamente (no caso utilizou-se a função `randperm` do MatLab) e pode ser comparada a operação de mutação do algoritmo: Evolução Diferencial (ED). O parâmetro  $\epsilon$  é um número aleatório que possui uma distribuição uniforme [0,1].

A Figura 9 ilustra o fluxograma do algoritmo de polinização de flores, onde  $N$  é o número de plantas,  $N\_iter$  é o número máximo de iterações,  $t$  é o contador de iterações,  $tol$  é uma tolerância para encontrar a melhor solução dada pelo absoluto `fmin`. O termo `fmin` refere-se a melhor solução encontrada.

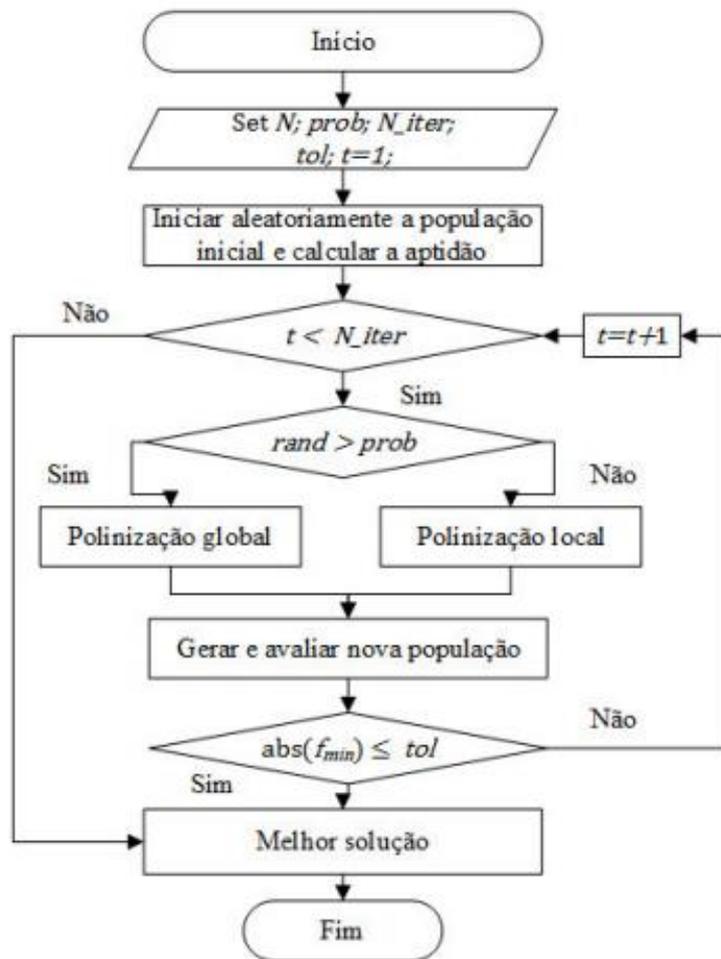


Figura 9. Fluxograma do algoritmo de polinização de flores [24].

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado todo o referencial teórico que a metodologia desta dissertação faz uso. A seguir no capítulo 4 a metodologia proposta é apresentada, aplicando toda a teoria exemplificada no capítulo 3.

## 4

## 4 METODOLOGIA

## 4.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é descrito todo o passo a passo das técnicas utilizadas nesta dissertação desde as configurações das campanhas de medições até as simulações do posicionamento das *smallcells*.

## 4.4 CENÁRIO E CAMPANHA DE MEDIÇÕES

A campanha de medições foi realizada na Praça Batista Campos, localizada na cidade de Belém do Pará, região norte do Brasil. Este local é cercado por prédios altos, ruas largas e seu interior possui uma densa arborização. O percurso das medições foi realizado em toda a extensão da praça, como mostra a Figura 10. Onde cada ponto verde é um dado coletado contendo: a posição de latitude, longitude e potência recebida do sinal.



**Figura 10. Percurso da campanha de medição. Fonte: o Autor.**

Com o objetivo de comprovar a utilização do modelo ABG e CI para múltiplas frequências, foram efetuadas também campanhas de medições em outra localidade com frequência diferente a encontrada na praça. O percurso da outra região é mostrado na Figura 11.



**Figura 11. Percurso da campanha de medição PCT Guamá. Fonte: o Autor.**

Para a medição foi escolhida uma das quatro maiores operadoras celular do Brasil, mediante prévia autorização. A operadora forneceu os dados das antenas que cobrem os dois locais. Na praça a estação rádio base servidora possui uma antena com potência de transmissão de 43dBm e ganho 17,6 dBi com frequência centrada em 18,6GHz instalada a uma altura de 60m. No PCT Guamá a estação rádio base servidora possui uma antena com potência de transmissão de 40 dBm e ganho 15,4 dBi com frequência centrada em 2,6GHz instalada a uma altura de 60m.

Para a medição do nível de sinal recebido em dBm foi utilizado o aplicativo móvel G-Net Track Pro, versão 12.5, disponível em [35] para sistema Android em um aparelho celular da marca Motorola. O *software* foi configurado para obter amostras com intervalos de 1 segundo e calibrado para captar a potência de sinal da rede LTE ao longo do percurso definido para as campanhas. Ao todo foram coletados mais de mil pontos, dentre os quais foram utilizados 700 para o PCT e 240 para a praça.

#### 4.5 OTIMIZAÇÃO DOS MODELOS

O ajuste dos parâmetros do modelo ABG foi realizado por meio do algoritmo NSGA II [36]. Trata-se de uma técnica de otimização multiobjetivo com controle de elitismo, baseada em algoritmos genéticos, a qual divide a população em diferentes frentes de Pareto, utilizando critério de dominância. Ou seja, indivíduos da frente  $n$  são melhores do que indivíduos da frente

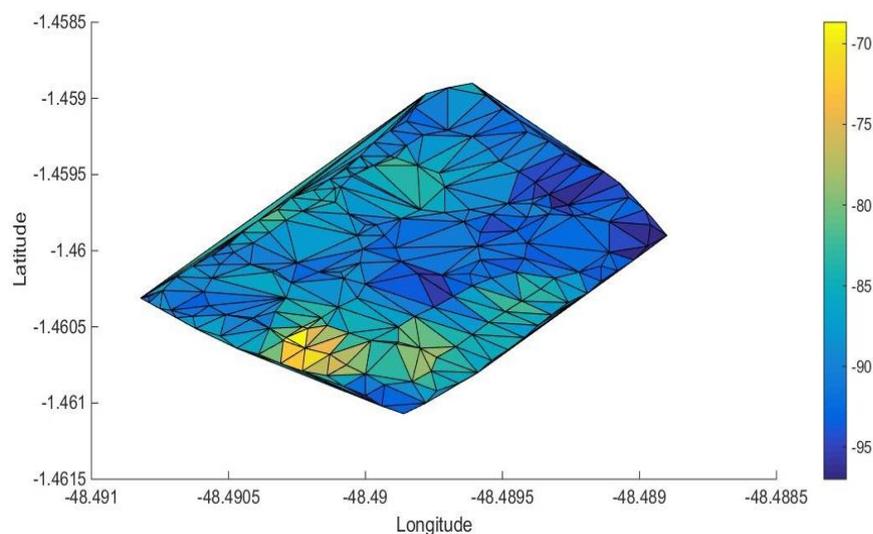
n+1. Todos os algoritmos e modelos de propagação foram implementados no *software* Matlab (Versão 2017).

Nas simulações, o número total de gerações e o tamanho da população foram definidos como 100 e 200, respectivamente, probabilidade de cruzamento de 80% e probabilidade de mutação de 50%. Para a otimização do modelo ABG, fixou-se o gama em 2, por não se tratar de um cenário multifrequência. Assim, os genes foram representados pelos parâmetros alfa e beta, e juntos formaram um cromossomo. Alfa pode assumir valores entre 1 e 5, enquanto beta assume valores entre -5 e 100, de acordo com os resultados encontrados em [22]. A qualidade dos cromossomos foi avaliada em torno do Erro Médio Quadrático (EMQ) entre os dados medidos e os preditos com o modelo em questão. Em média, a convergência do algoritmo decresce rapidamente de 15,8 para aproximadamente 5,91 em apenas sete iterações.

O ajuste do modelo CI se deu em torno da escolha do valor do n, sintonizado em 3.712 através de regressão linear, conforme os dados medidos na região de estudo.

#### 4.6 ANÁLISE DA COBERTURA DO SINAL

Os dados geográficos (Latitude e Longitude) obtidos a partir da campanha de medições foram triangulados, onde a área de cada triângulo foi preenchida com a média da potência do sinal recebido em três pontos. A Figura 12 demonstra o mapa de cobertura média do sinal baseada nos dados medidos no qual a potência do sinal da praça varia em torno de -70 dBm até -95 dBm.



**Figura 12.** Mapa gerado da Cobertura do Sinal recebido. Fonte: o Autor

De acordo com a padronização do 3GPP [34] para se ter uma boa qualidade de canal a potência do sinal deve estar compreendida entre -30dBm, que é o sinal mais forte que o usuário pode chegar a receber, até -70dBm, que é considerado o mínimo de potência para conseguir usufruir de qualquer serviço da rede. Visivelmente é possível perceber que a Praça Batista Campos não oferece uma média aceitável da cobertura do sinal em toda a sua extensão, prevalecendo em sua maior parte valores de -80dBm até -95dBm, não garantindo assim uma boa experiência para o usuário ao utilizar o serviço.

Como a instalação ou realocação de torres tem um alto custo e mão de obra ostensiva as *smallcells* se mostram mais viáveis para conseguir melhorar a qualidade do sinal na área estudada, porém a sua implantação deve ser feita de forma otimizada para que seja garantida a melhora da rede.

#### 4.7 OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE *SMALLCELLS* UTILIZANDO PSO E FPA

Como proposta para a otimização do posicionamento das *smallcells*, os algoritmos bioinspirados PSO e FPA foram utilizados a fim de encontrar a melhor posição para a implantação de seis *smallcells* no perímetro da praça. Após as melhores posições de ambos serem escolhidas uma simulação é rodada variando os modelos de propagação. Foram plotados gráficos para mostrar como ficou a qualidade do sinal após a implantação das *smallcells*, também fazendo uso das Frentes de Pareto.

Ambos os algoritmos possuem duas funções objetivos (Obj1 e Obj2). A primeira é para garantir que a potência do sinal na área estudada fique em uma média menor que -75dBm e a segunda é para minimizar o número de *smallcells* implantadas. As equações a seguir ajudam a descrever o algoritmo implementado.

A Equação 33 depende diretamente do cálculo do Obj1 e Obj2 para definição da melhor solução.  $w$  é o valor médio da solução de  $N$  Paretos.

$$Z = Obj1 + w(1 - w) * Obj2 \quad (33)$$

A equação 34 descreve o cálculo do percentual de cobertura ( $P_c$ ) levando em consideração o Índice de Cobertura ( $I_c$ ) e o Tamanho total da cobertura  $T_c$ .

$$Pc = \sum_{i=1}^3 \frac{Ic}{Tc} * 100 \quad (34)$$

Na Equação 35, o obj1 é para garantir o maior percentual de cobertura (Pc) do sinal.

$$obj1 = | Pc - 100 | \quad (35)$$

Na Equação 36, o Obj2 é para variar o número de *smallcells* na praça para encontrar as configurações ótimas para diferentes números de *smallcells* implantadas.

$$obj2 = Naps \quad (36)$$

A seguir, nas Tabelas 4 e 5 são mostradas as variáveis de entrada dos algoritmos PSO e FPA, respectivamente.

**Tabela 4. Parâmetros do PSO.**

Tamanho da População	25
Fator de Aceleração C1 e C2	1.8
Número de Interações	1000
Número Máximo de <i>Smallcells</i>	6

**Tabela 5. Parâmetros do FPA.**

Tamanho da População	25
Probabilidade de Troca	0.8
Número de Interações	1000
Número Máximo de <i>Smallcells</i>	6

Ressalta-se que a partir do momento que os algoritmos retornam o vetor com o posicionamento das *smallcells*, estes dados são usados para simular a cobertura do sinal na praça variando os modelos de propagação e as frequências escolhidas. A potência de transmissão considerada para as *smallcells* é de 23dBm e as frequências variam entre 3.5GHz, 10GHz, 24GHz, 28GHz, 60GHz e 73GHz.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia aplicada nesta dissertação mostrando como ela pode ser flexível e as demais configurações efetuadas para geração dos resultados utilizando o aplicativo *G-NetTrack pro* e os algoritmos bioinspirados. O próximo capítulo apresentará os resultados obtidos a partir da utilização da metodologia proposta.

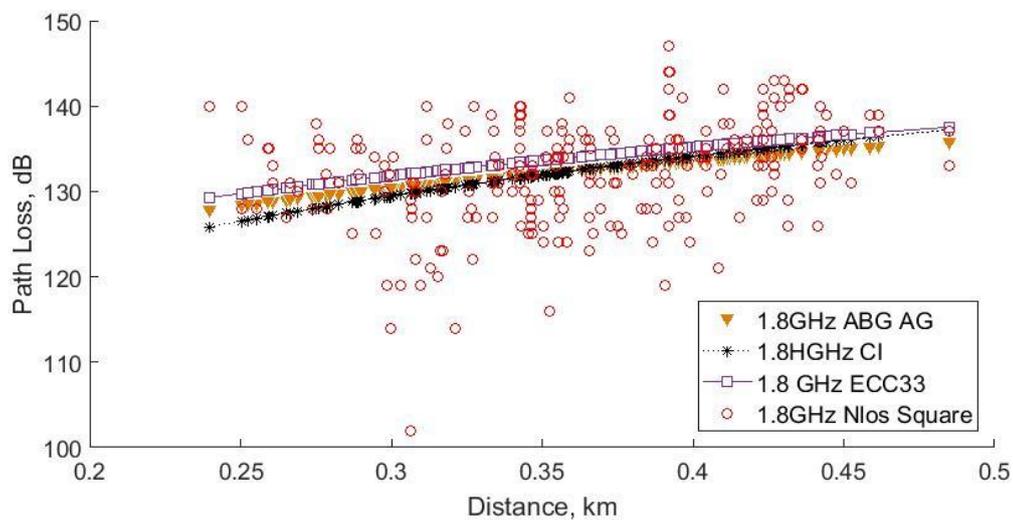
## 5 RESULTADOS

### 5.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados, incluindo a caracterização da perda de propagação no ambiente escolhido, o posicionamento das *smallcells* e o comportamento da propagação em diferentes faixas de frequência. No final é mostrado a avaliação de desempenho entre os algoritmos utilizados.

### 5.4 CARACTERIZAÇÃO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO EM MONO E MULTIFREQUÊNCIA

Com o objetivo de validar a eficiência dos modelos, os resultados da predição da perda de propagação foram analisados a partir do erro médio quadrático e o desvio padrão de cada modelo. Os melhores modelos obtidos em monofrequência são mostrados na Figura 13.

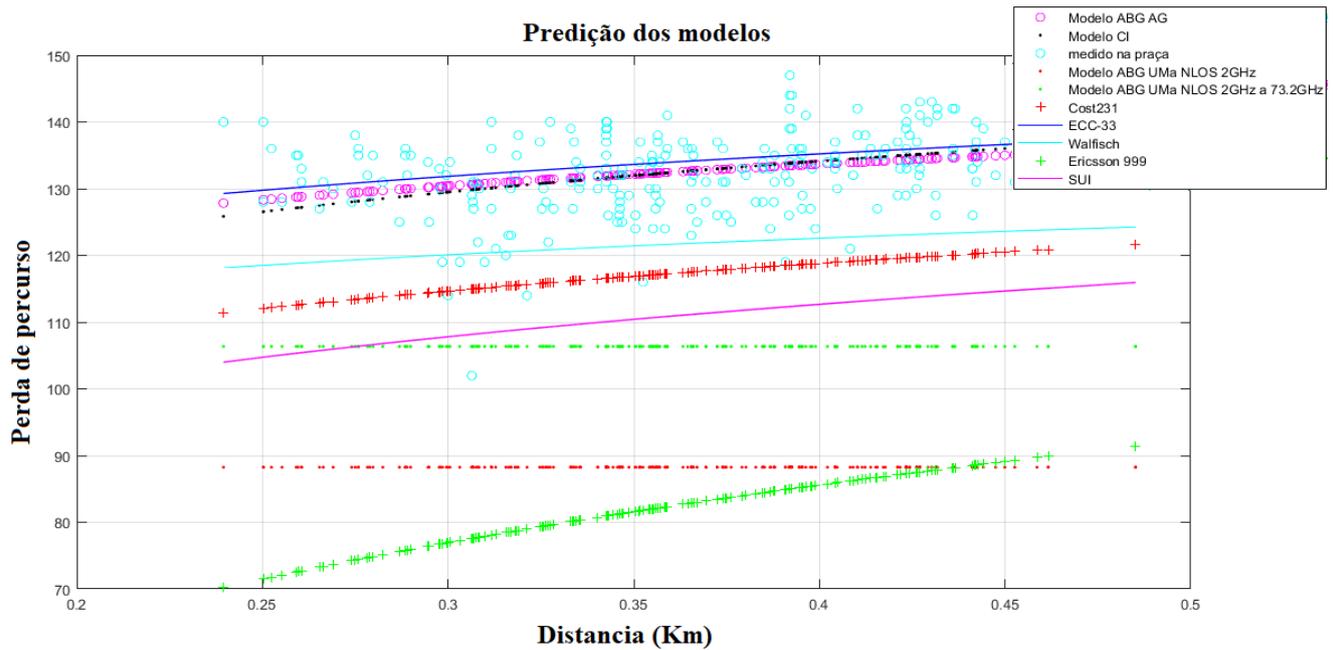


**Figura 13. Melhores Modelos de Propagação. Fonte: o Autor.**

Esses três modelos apresentaram EMQ menor do que 6 e desvio padrão abaixo de 9, demonstrando forte aproximação com os dados medidos, sendo apontados como bons candidatos à predição de perda de propagação nesse tipo de ambiente. Todos os demais modelos apresentaram menor correspondência com os dados medidos.

O novo parâmetro alfa e beta do modelo ABG na frequência de 1.8 GHz obtidos com a otimização foram de 2,59 e 61, respectivamente. Observa-se que o novo beta está muito acima dos valores do modelo original proposto em [22], o que demonstra o alto grau de obstrução do sinal nesta região.

A Figura 14 mostra o resultado da predição da perda de propagação na frequência de 1.8GHz para todos os modelos utilizados em monofrequencia.



**Figura 14 Predição dos Modelos de Propagação em Monofrequencia. Fonte: o Autor**

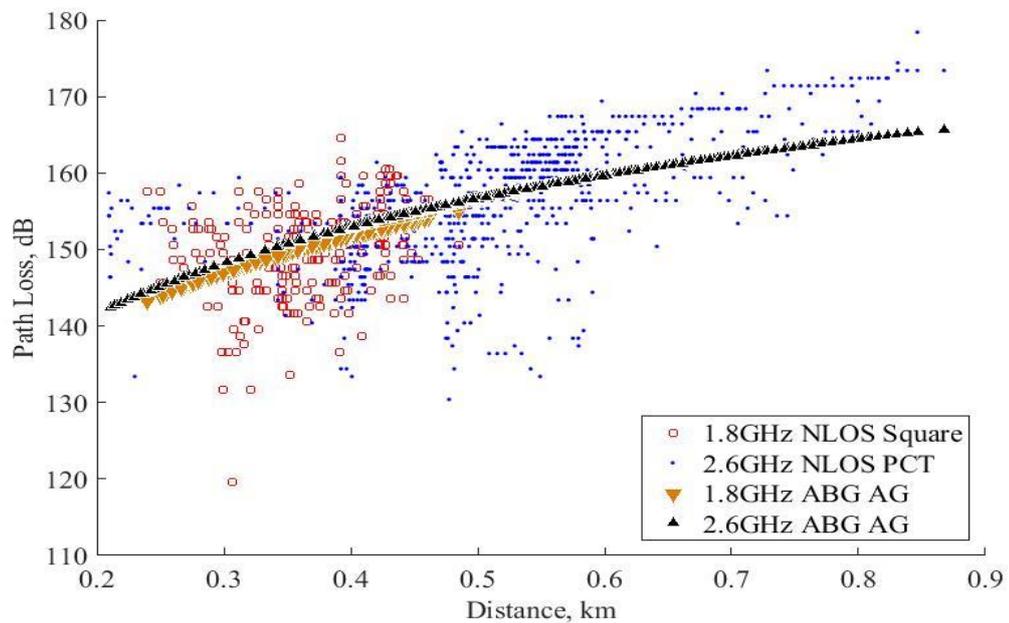
A Tabela 6 apresentam os resultados encontrados para o cenário investigado, mostrando o erro médio quadrático (EQM) e o desvio padrão.

Da Tabela 6 é possível observar que o modelo ABG otimizado certamente possui melhor concordância com os dados medidos quando comparado à sua versão original, para o caso monofrequência (2 GHz). Também é possível observar que, juntamente ao modelo ABG otimizado, os modelos CI ajustado e ECC33 foram os que alcançaram o melhor desempenho. Vale ressaltar que o ECC33 foi originalmente criado para atender frequências acima de 1 GHz, se ajustando bem ao cenário, ao contrário dos modelos ABG e CI, projetados para frequências acima de 2 GHz. Ao redor do mundo, no entanto, o LTE (Long Term Evolution) ainda costuma operar em frequências abaixo de 2.5 GHz.

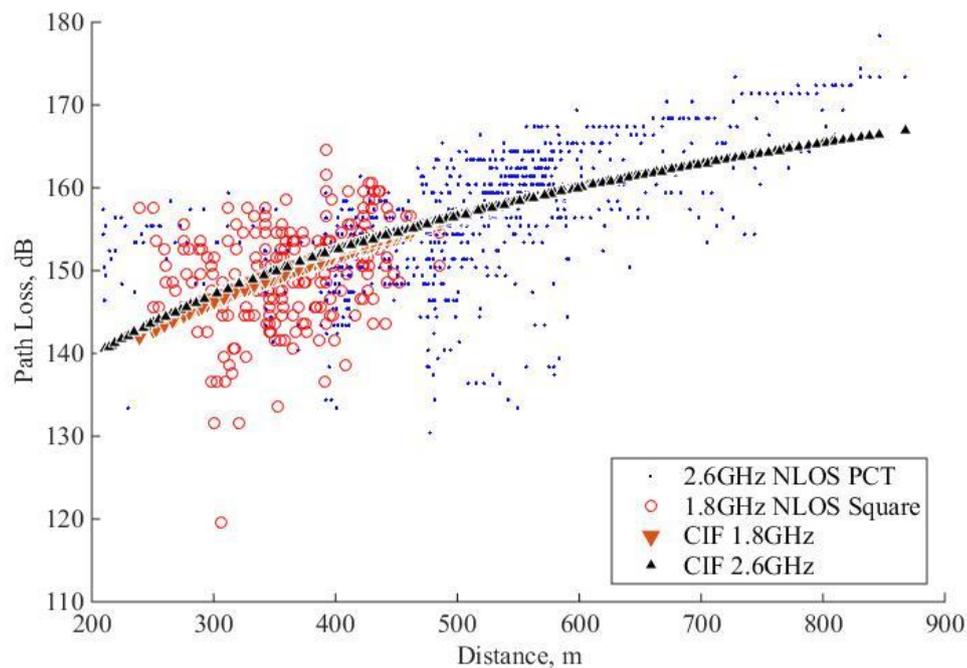
**Tabela 6. Modelos de propagação e o emq e desvio padrão. Fonte: o Autor.**

Modelo de Propagação	EMQ	Desvio Padrão
ABG otimizado	5.9165	8.0724
CI ajustado	5.9614	8.0635
ABG 2GHz	9.4000	30.3982
Cost231	13.244	16.3143
ECC-33	4.9289	6.1037
Walfisch	13.5464	12.3222
Ericsson 999	15.02367	50.5051
SUI	16.9034	22.4034

Para o cenário multifrequência com os dados da Praça e do PCT juntos, foram obtidos novos valores dos parâmetros. As Figuras 15 e 16 mostram o ótimo desempenho dos modelos ajustados com AG para as frequências de 1.8GHz e 2.6GHz.



**Figura 15. Modelo ABG otimizado com AG para multifrequencia. Fonte: o Autor.**



**Figura 16. Modelo CIF para multifrequencia. Fonte: o Autor**

Sendo proposta assim a adição dos parâmetros  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  para ambientes densamente arborizados presentes na Tabela 7 acrescentados à Tabela IV mostrada em [22].

**Tabela 7. Parâmetros do ABG, e CI para Uma Cenários sem visada direta para Monofrequência e ABG e CIF para multifrequência (f.) em relação à distância (d.). Fonte: o Autor.**

Scce.	F. Range (GHz)	Data Points	D.(km)	$A$	$\beta$	$\gamma$	$CI n$	CIF $n$
UMa	1.8	240	0.2-0.5	2,59	61	2	3.71	-
	1.8 – 2.6	940	0.2-0.9	3.79	51.2	0.67	-	4.31

A Tabela 8 nos apresenta os valores de EMQ e desvio padrão obtidos a partir do ajuste dos modelos multifrequência. A predição dos modelos multifrequencias apresentaram uma diferença pequena quando comparados os modelos originais as versões otimizadas.

**Tabela 8. Modelos de Propagação Multifrequência: EMQ e Desvio Padrão. Fonte: o Autor.**

Modelo de Propagação	EMQ	Desvio Padrão
ABG AG	5.8341	6.0724
ABG	5.8337	6.3783
‘CIF	5.8317	6.4576
CIF AG	5.8317	6.4576

## 5.5 IMPLANTAÇÃO DAS SMALLCELLS

A seguir os resultados da otimização do posicionando utilizando a técnica do Ótimo de Pareto, onde de 25 soluções possíveis foi retirada a melhor configuração para seis *smallcells* na área da praça, variando o algoritmo utilizado (PSO/FPA) e o modelo de propagação (ABG e CI) em diferentes faixas de frequência. As tabelas 9 e 10 nos apresentam todos os percentuais de cobertura alcançados nas diferentes faixas de frequência para os algoritmos PSO e FPA.

**Tabela 9. Percentual de cobertura obtido (FPA). Fonte: o Autor.**

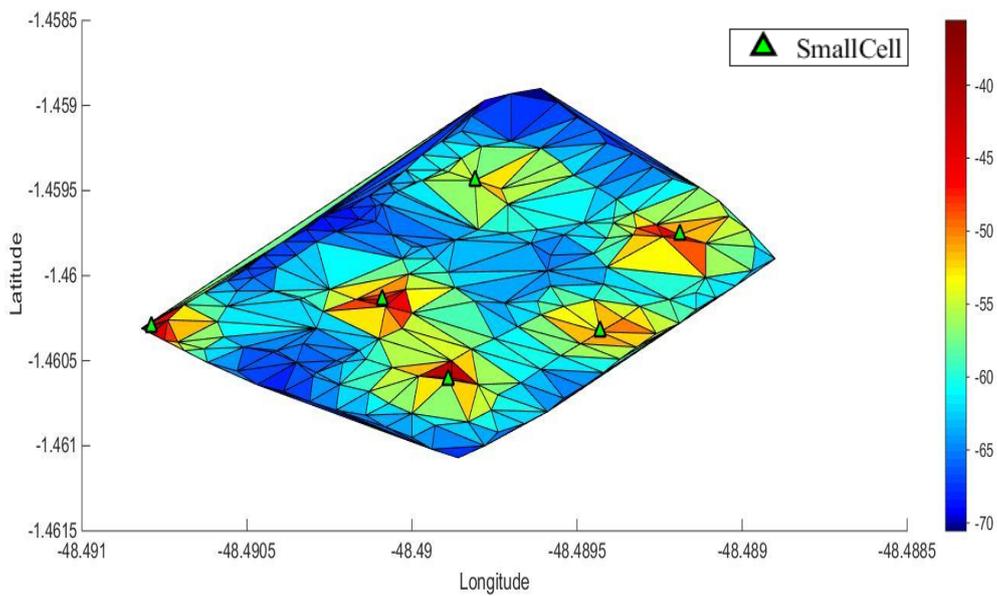
Frequências	Modelo ABG	Modelo CI
3.5GHz	97,7989%	100%
10 GHz	93,3245%	100%
24 GHz	65,9872%	67,7249%
28 GHz	55,2892%	57,1429%
60 GHz	20,3048%	19,5767%
73 GHz	15,3057%	17,9894%

**Tabela 10. Percentual de cobertura obtido (PSO). Fonte: o Autor**

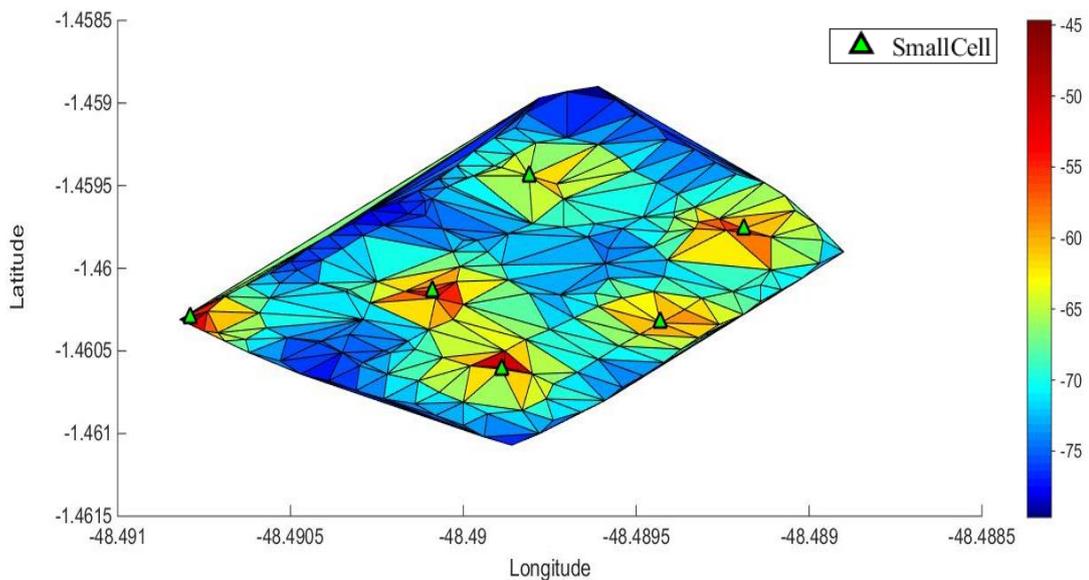
Frequências	Modelo ABG	Modelo CI
3.5GHz	93,8973%	100%
10 GHz	89,7842%	99,4709%
24 GHz	62,9573%	59,7884%
28 GHz	52,9291%	49,7354%
60 GHz	19,1238%	15,8731%
73 GHz	12,1924%	14,8148%

### 5.5.1 FREQUÊNCIA DE 3,5GHZ

A Figura 17 mostra o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI, enquanto a Figura 18 mostra o mapa de cobertura utilizando o PSO combinado ao modelo ABG. O PSO combinado com os dois modelos atingiu 100% de cobertura com o modelo CI e 93,8973% de cobertura com o modelo ABG para a frequência de 3.5GHz.

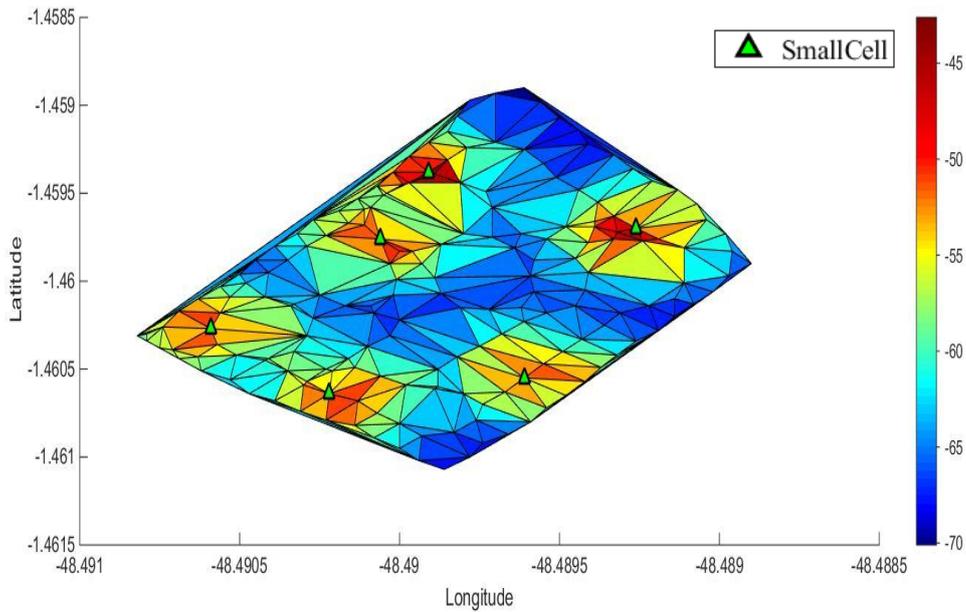


**Figura 17. Mapa de cobertura 3.5GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor**

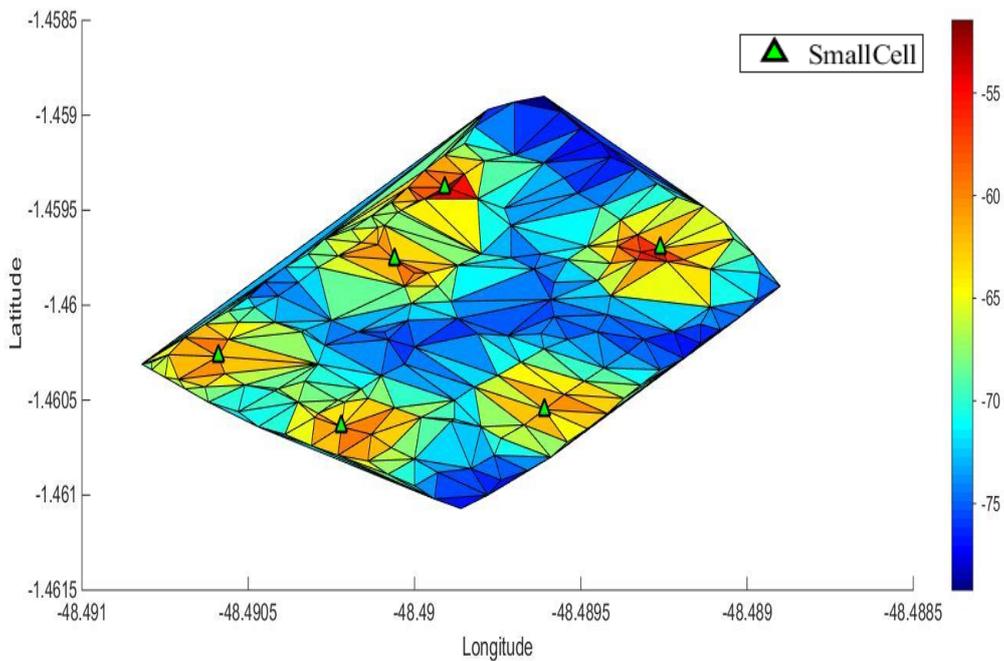


**Figura 18. Mapa de cobertura 3.5GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

O Algoritmo FPA encontrou outra configuração ótima para o posicionamento na solução Pareto 25 e a Figura 19 mostra o mapa de cobertura utilizando o FPA combinado com CI. A Figura 20 mostra o mapa de cobertura utilizando FPA combinado ao ABG. O FPA combinado com os dois modelos atingiu 100% de cobertura em ambos para a frequência de 3.5GHz.



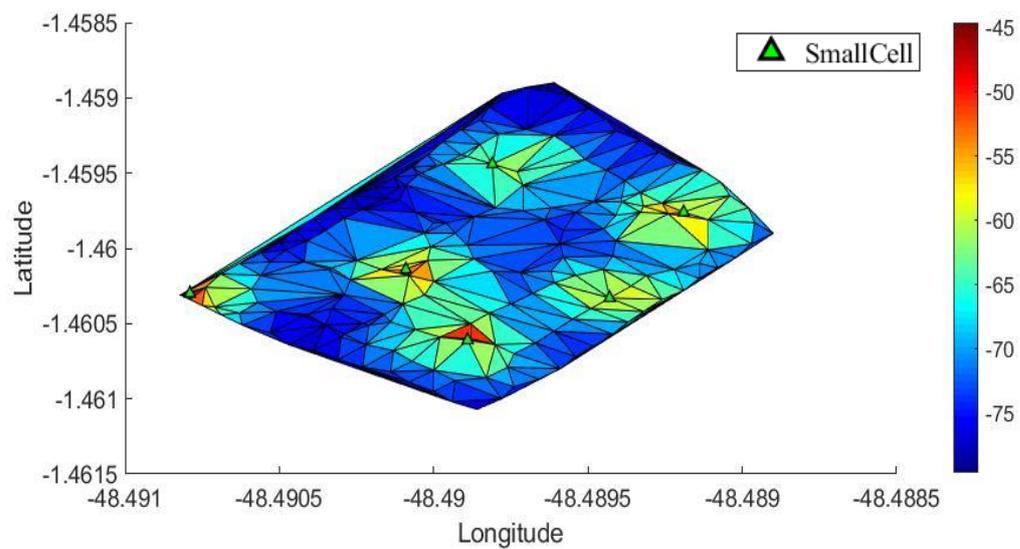
**Figura 19. Mapa de cobertura 3.5GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



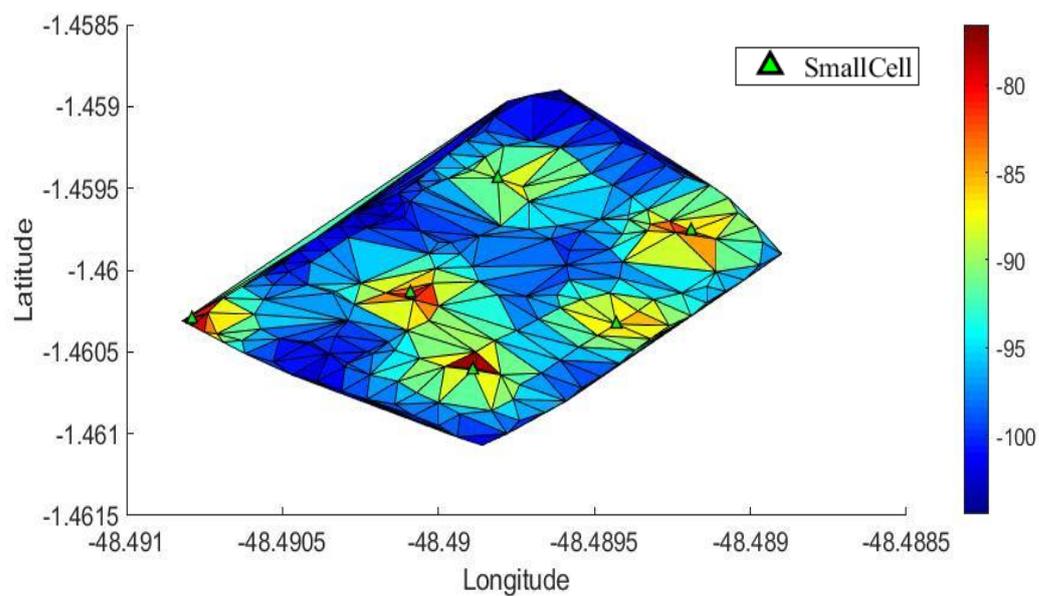
**Figura 20. Mapa de cobertura 3.5GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

## 5.5.2 FREQUÊNCIA DE 10GHZ

As Figura 21 e 22 mostram o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI e ao modelo de propagação ABG, respectivamente. O PSO atingiu 99,4709% de cobertura com o modelo CI e 89,7842% com o modelo ABG para a frequência de 10GHz

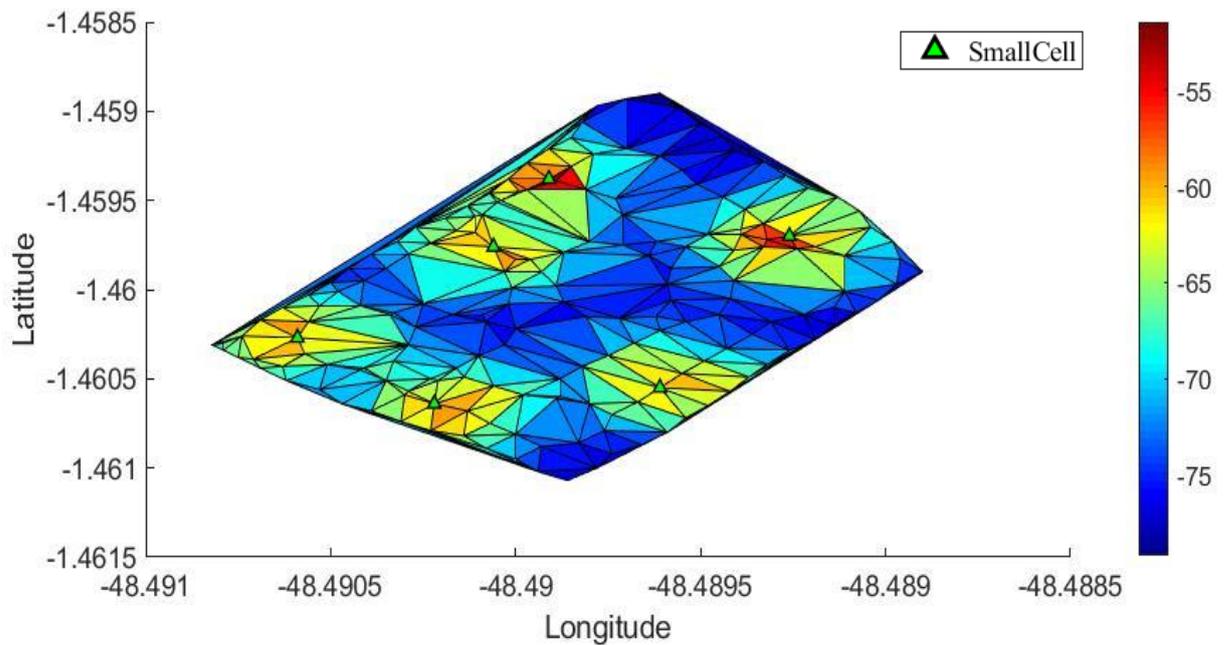


**Figura 21. Mapa de cobertura 10GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.**

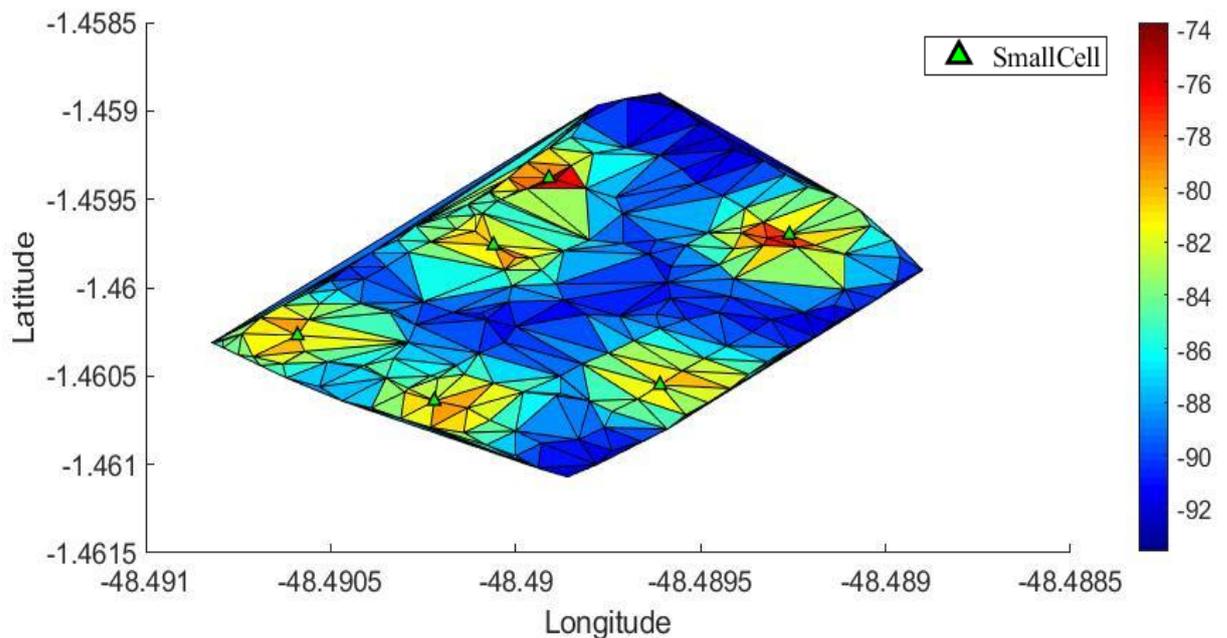


**Figura 22. Mapa de cobertura 10GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

As Figuras 23 e 24 apresentam o mapa de cobertura do Algoritmo FPA combinado com os modelos de propagação CI e ABG, respectivamente. O FPA conseguiu atingir um percentual de cobertura de 100% com o modelo CI e 93.3245% com o modelo ABG.



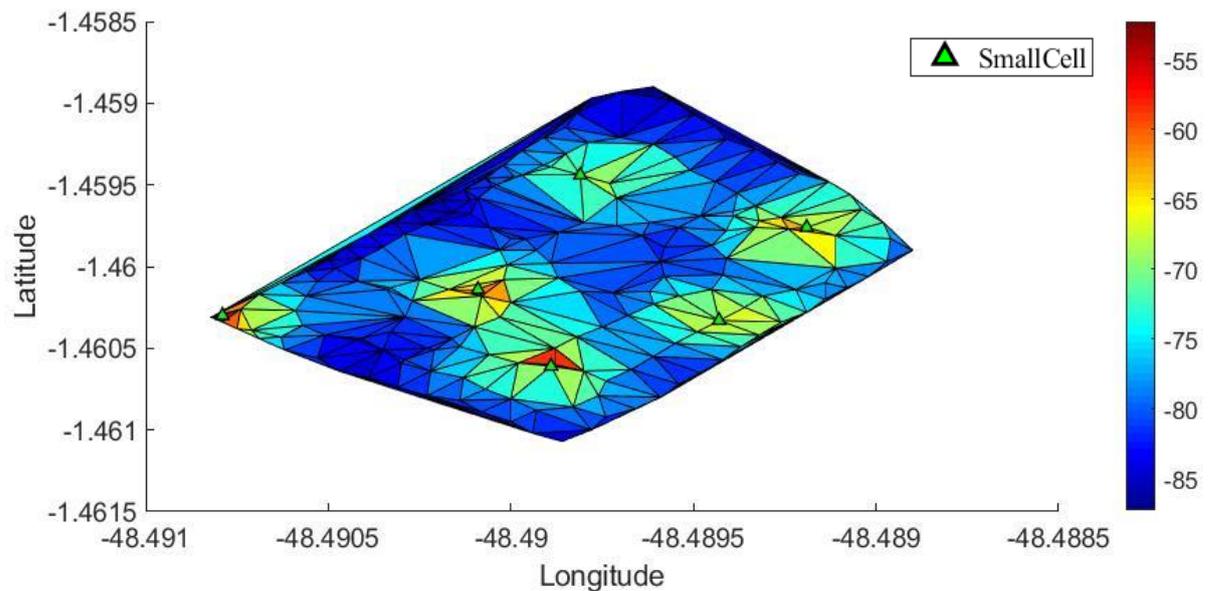
**Figura 23. Mapa de cobertura 10GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



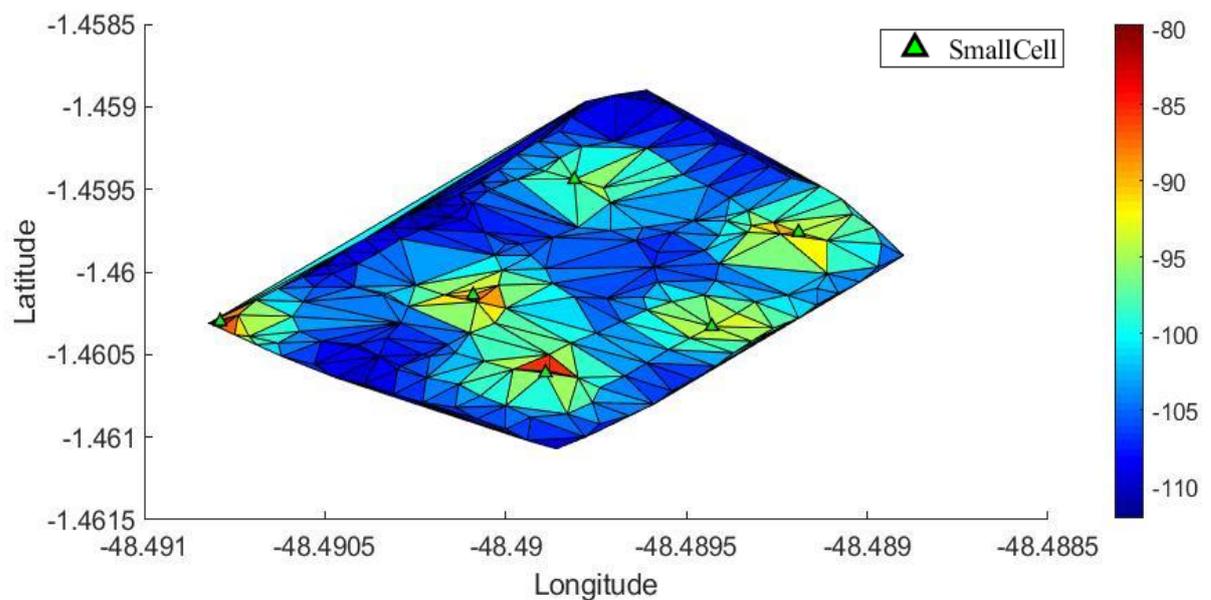
**Figura 24. Mapa de cobertura 10GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

### 5.5.3 FREQUÊNCIA DE 24GHZ

As Figura 25 e 26 mostram o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI e ao modelo de propagação ABG, respectivamente. O PSO atingiu um percentual de cobertura de 59,7884% com o modelo CI e 62,9573% com o modelo ABG.

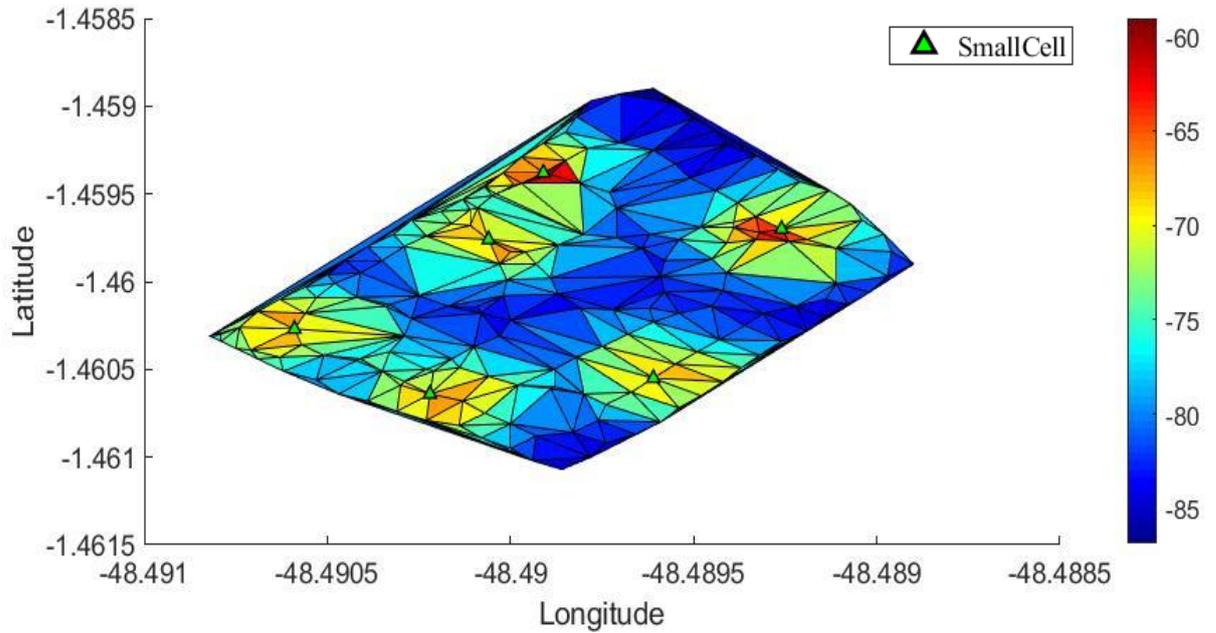


**Figura 25. Mapa de cobertura 24GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.**

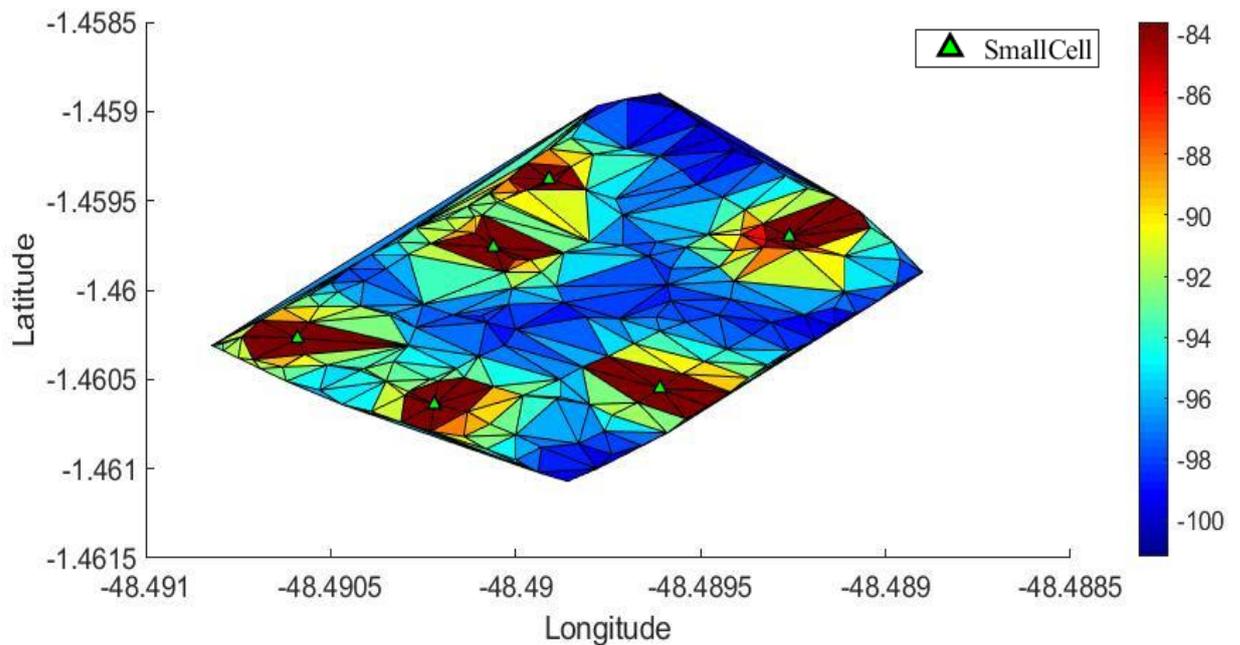


**Figura 26. Mapa de cobertura 24GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

As Figuras 27 e 28 mostram os mapas de cobertura do Algoritmo FPA combinado com os modelos de propagação CI e ABG. Que atingiram respectivamente 67,7249% e 65,9872% de percentual de cobertura.



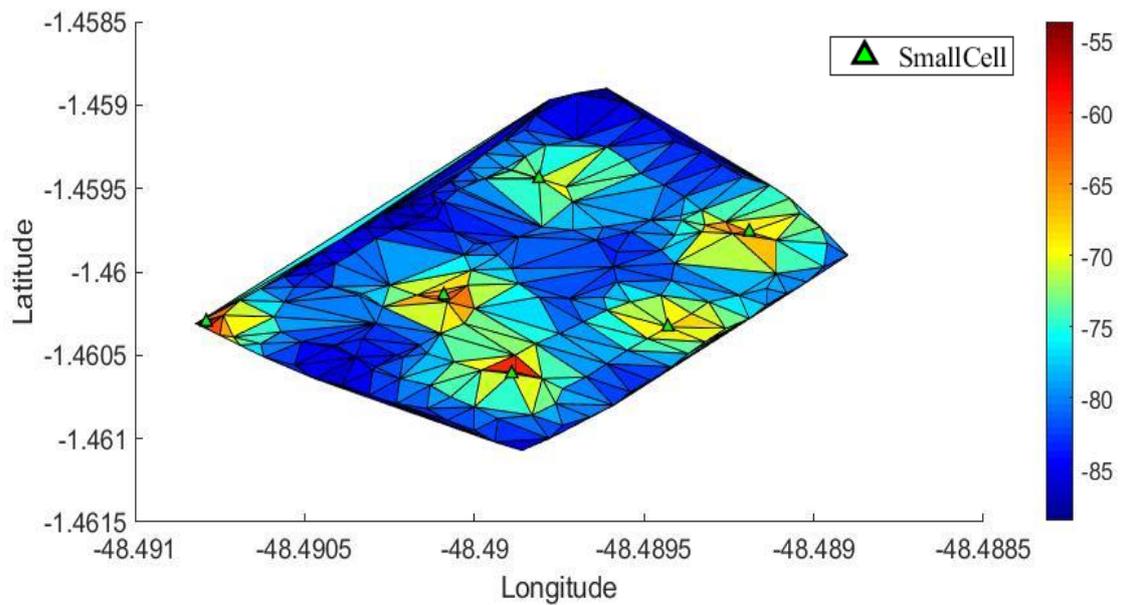
**Figura 27. Mapa de cobertura 24GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



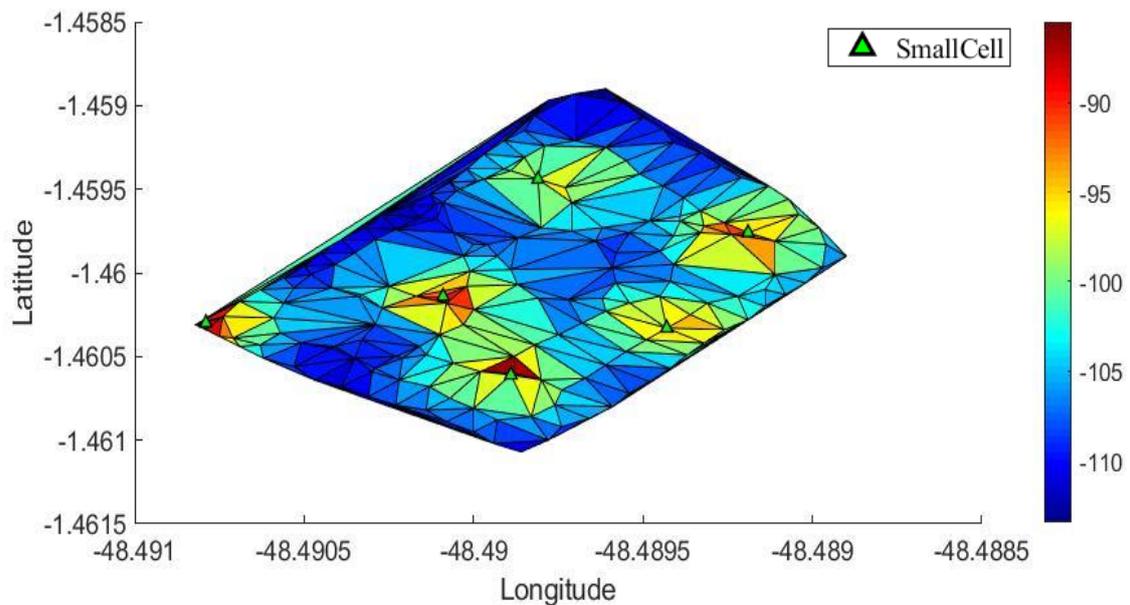
**Figura 28. Mapa de cobertura 24GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor**

#### 5.5.4 FREQUÊNCIA DE 28GHZ

As Figura 29 e 20 mostram o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI e ao modelo de propagação ABG, respectivamente. O PSO atingiu o percentual de cobertura de 49,7354% para o modelo CI e 52.9291% para o modelo ABG.

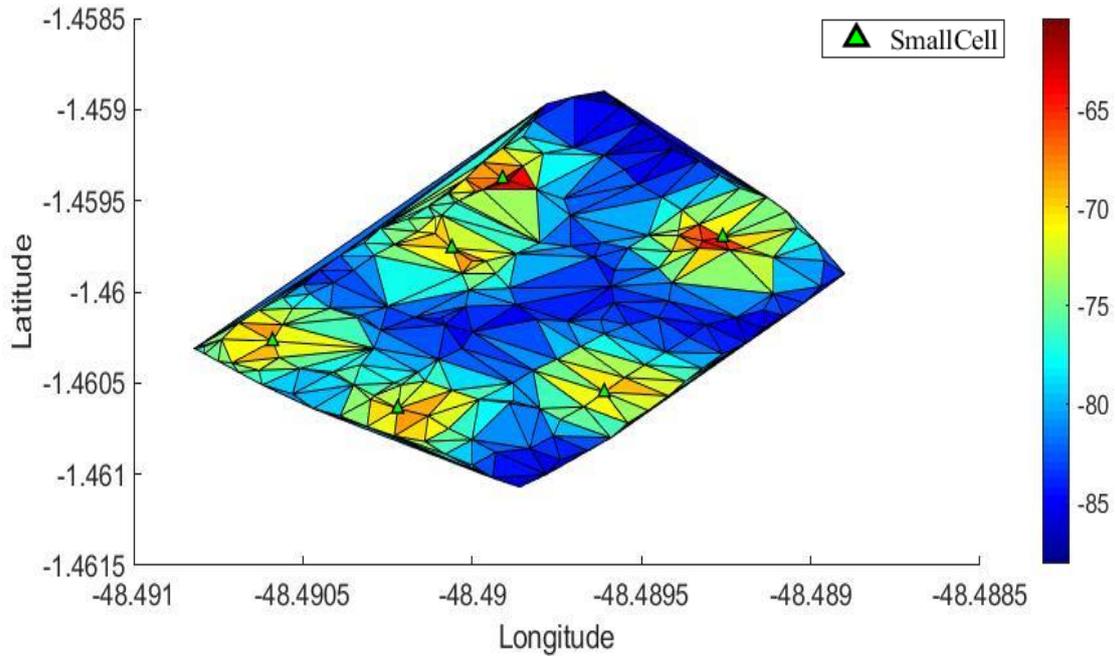


**Figura 29. Mapa de cobertura 28GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.**

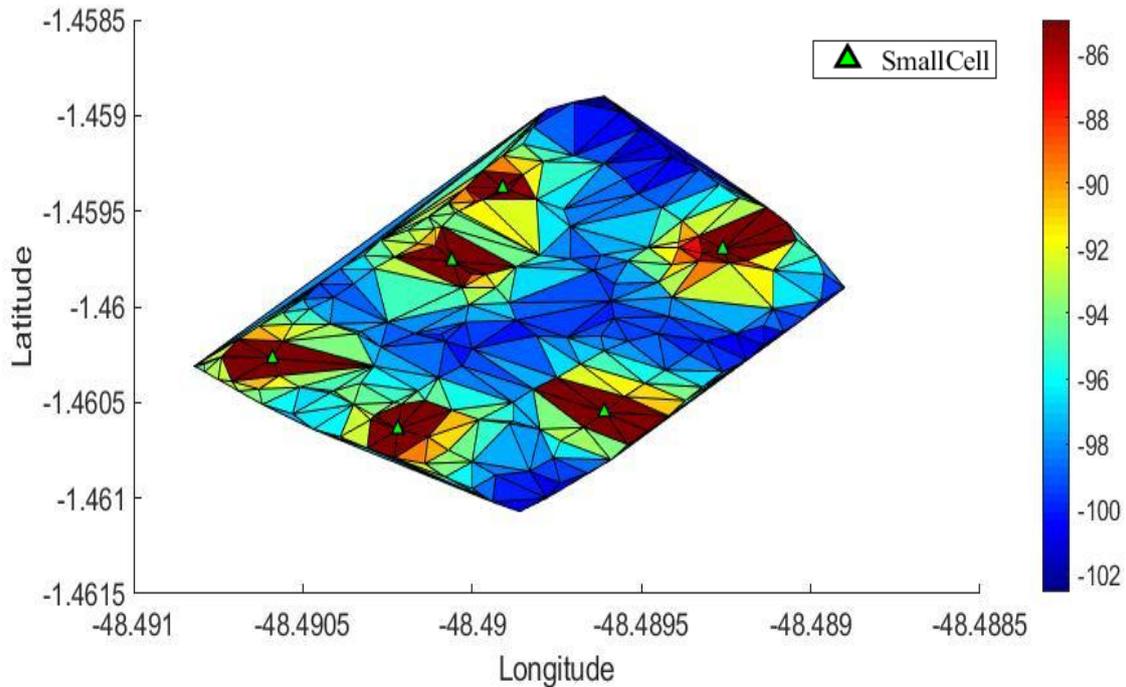


**Figura 30. Mapa de cobertura 28GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

As Figuras 31 e 32 apresentam o mapa de cobertura do Algoritmo FPA combinado com os modelos de propagação CI e ABG. Respectivamente atingiram o percentual de cobertura de 57,1429% e 55,2892%



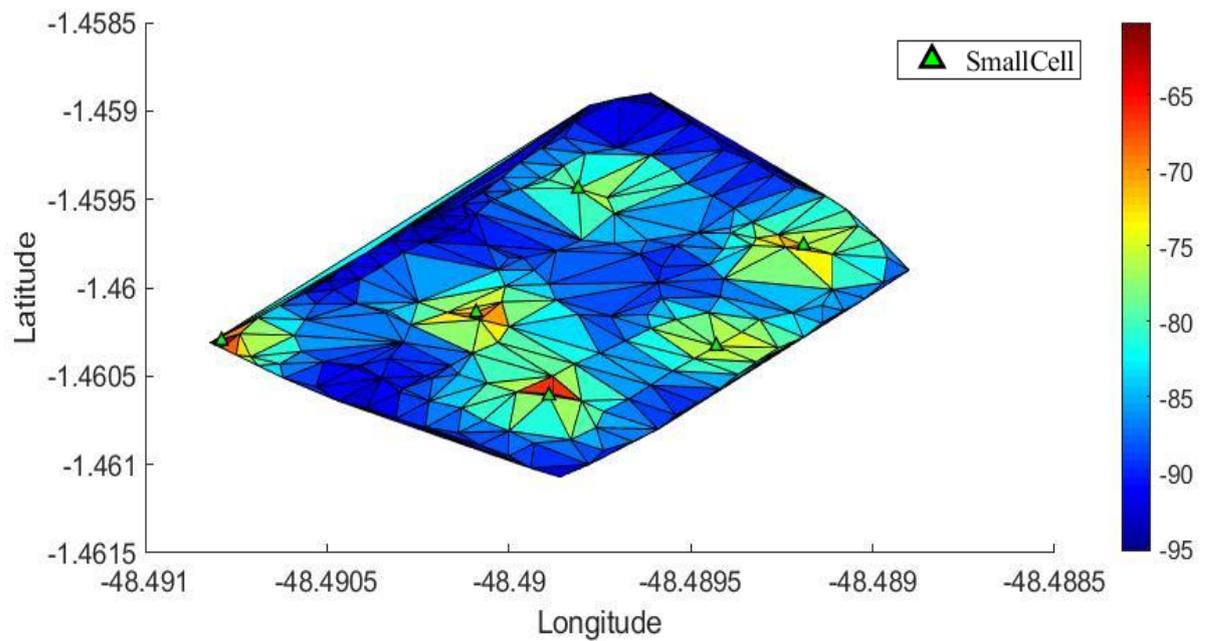
**Figura 31. Mapa de cobertura 28GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



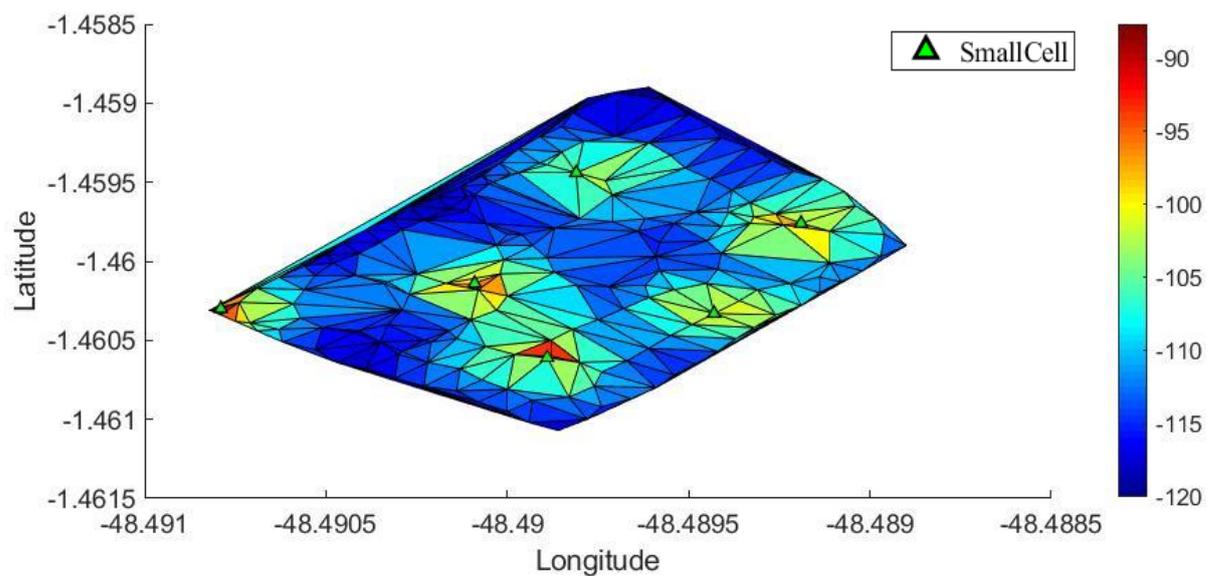
**Figura 32. Mapa de cobertura 28GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

### 5.5.5 FREQUÊNCIA DE 60GHZ

As Figura 34 e 33 mostram o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI e ao modelo de propagação ABG, respectivamente. O PSO atingiu o percentual de cobertura de 15,8731% para o modelo CI e 19,1238% para o modelo ABG.

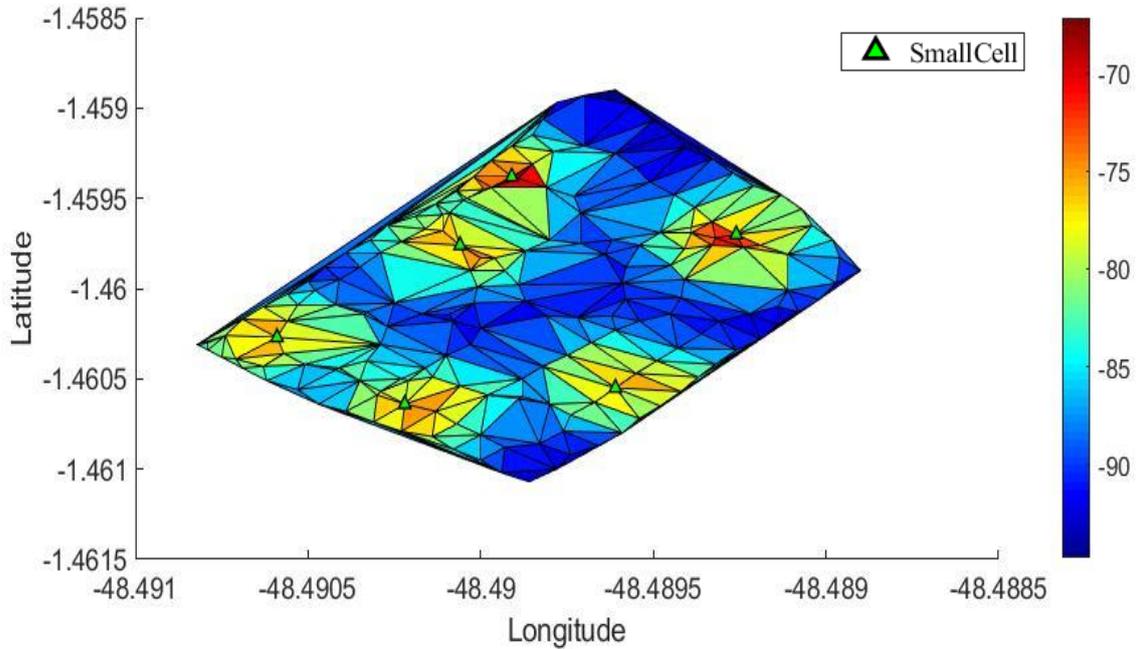


**Figura 33. Mapa de cobertura 60GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor**

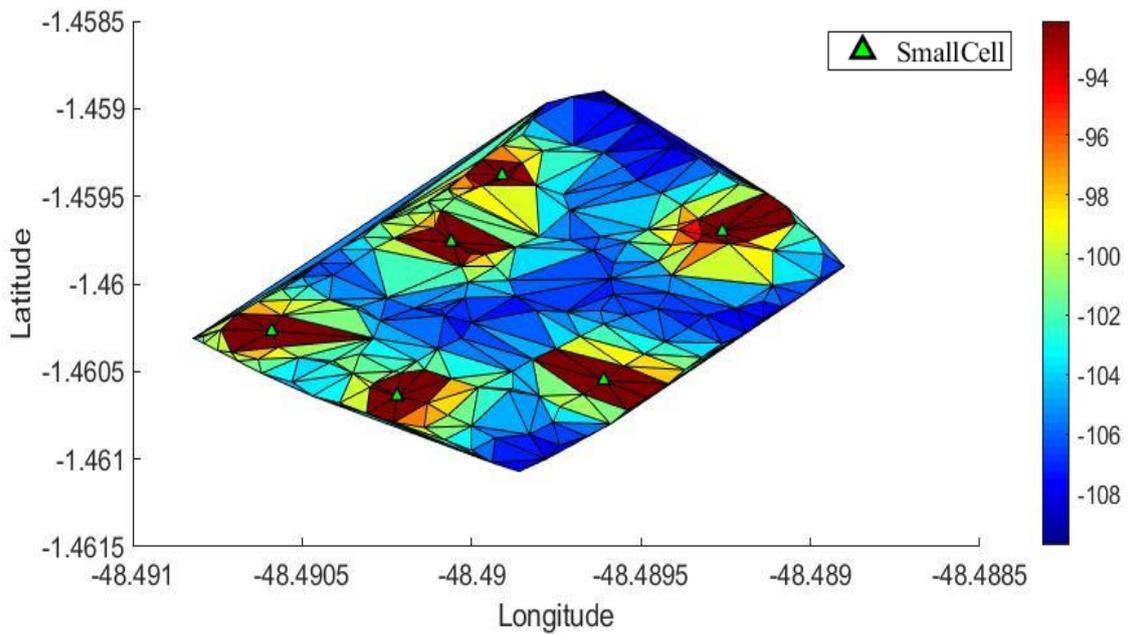


**Figura 34. Mapa de cobertura 60GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

As Figuras 35 e 36 o mapa de cobertura do Algoritmo FPA combinado com os modelos de propagação CI e ABG. Respectivamente atingiram o percentual de cobertura de 19,5767% e 20,3048%.



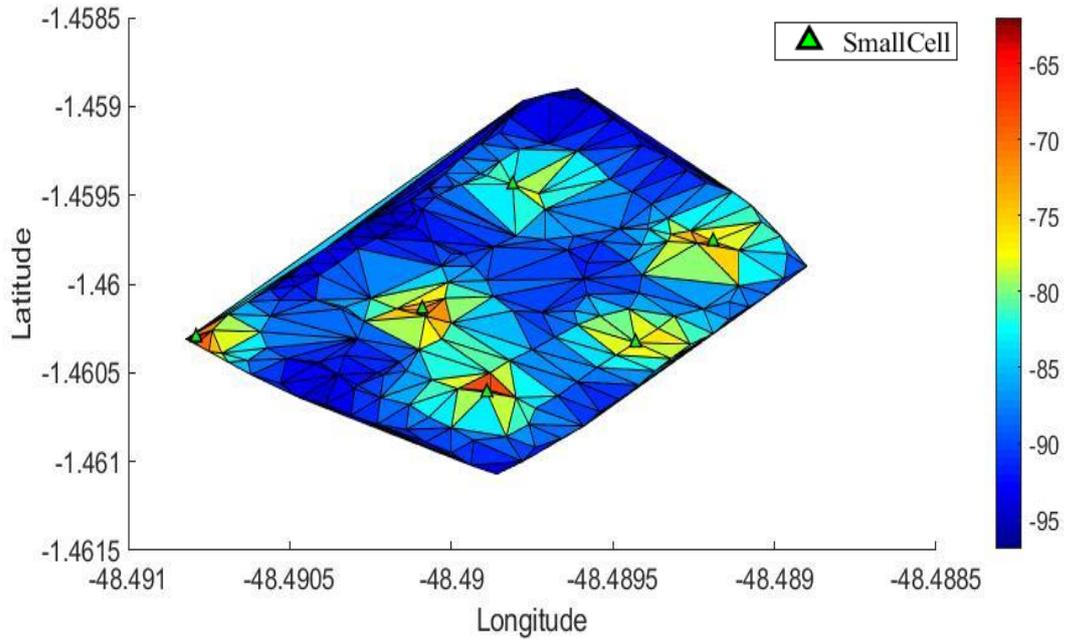
**Figura 35. Mapa de cobertura 60GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



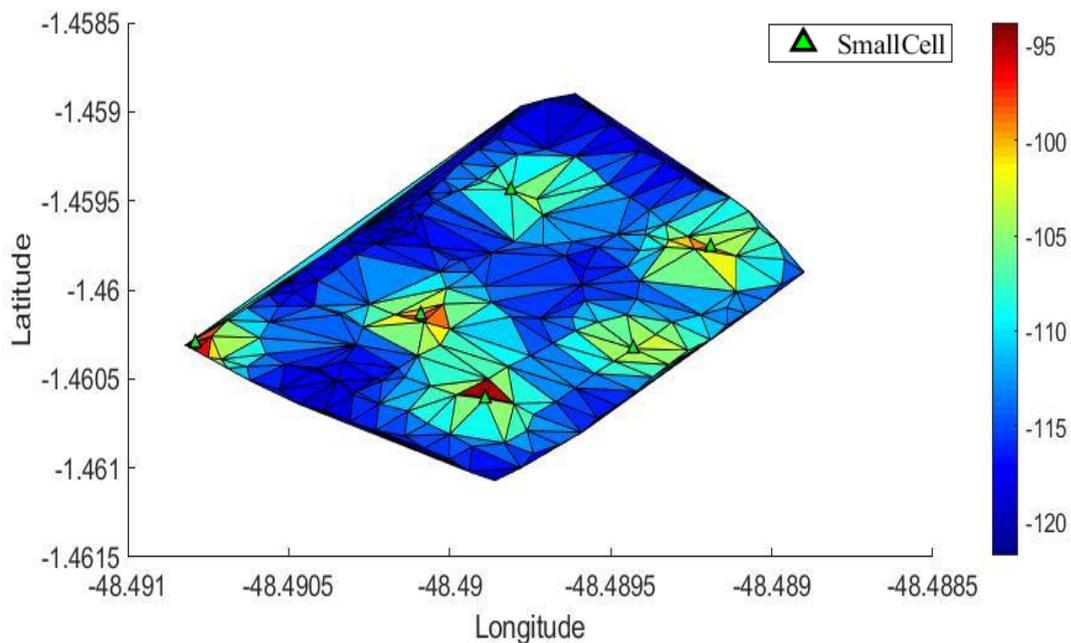
**Figura 36. Mapa de cobertura 60GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

### 5.5.6 FREQUÊNCIA 73GHZ

As Figura 37 e 38 mostram o posicionamento de 6 smallcells utilizando PSO combinado ao modelo de propagação CI e ao modelo de propagação ABG, respectivamente. O PSO atingiu um percentual de cobertura 14,8148% para o modelo CI e 12,1924% para o modelo ABG.

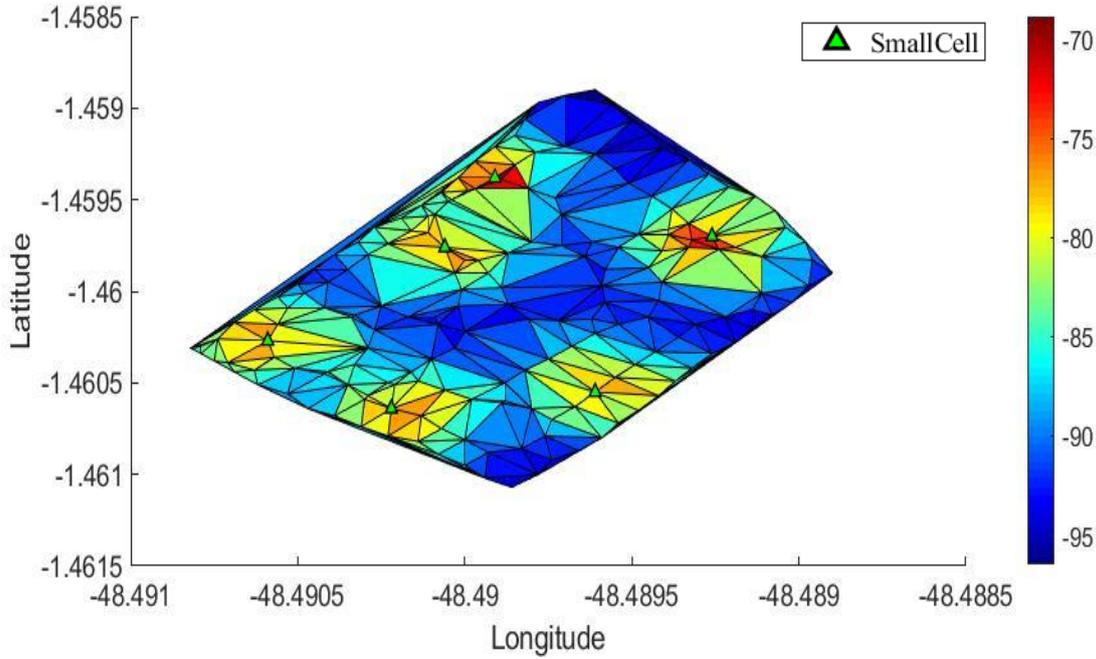


**Figura 37. Mapa de cobertura 73GHz - PSO com modelo CI. Fonte: o Autor.**

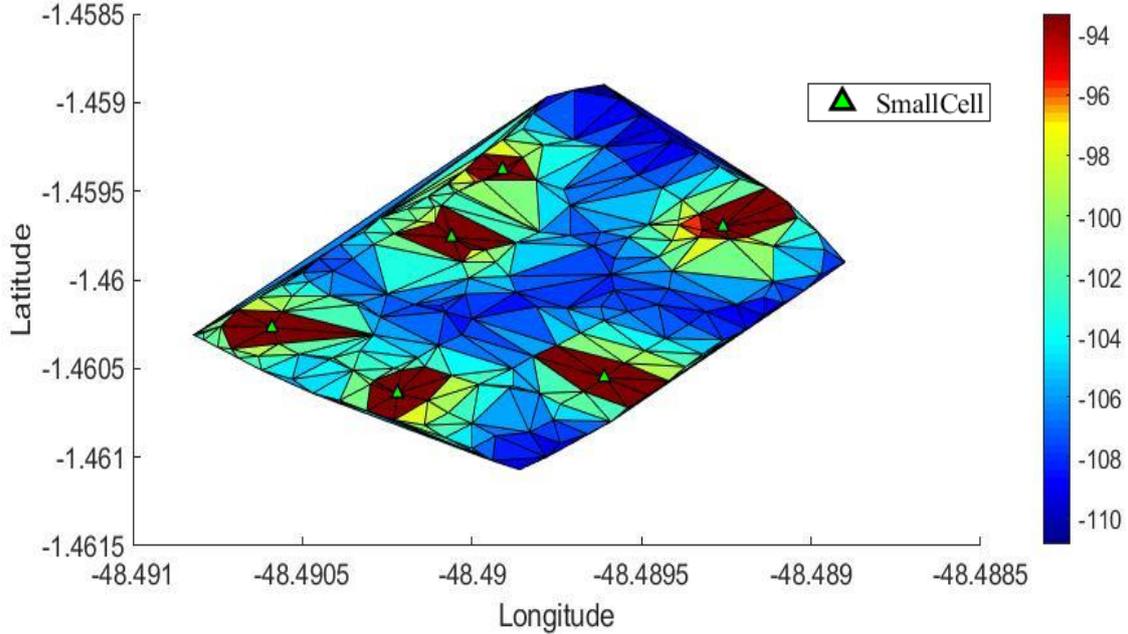


**Figura 38. Mapa de cobertura 73GHz - PSO com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

As Figuras 39 e 40 mostram o mapa de cobertura do Algoritmo FPA combinado com os modelos de propagação CI e ABG. Respectivamente foram atingidos os percentuais de cobertura de 17,9894% e 15,3857%



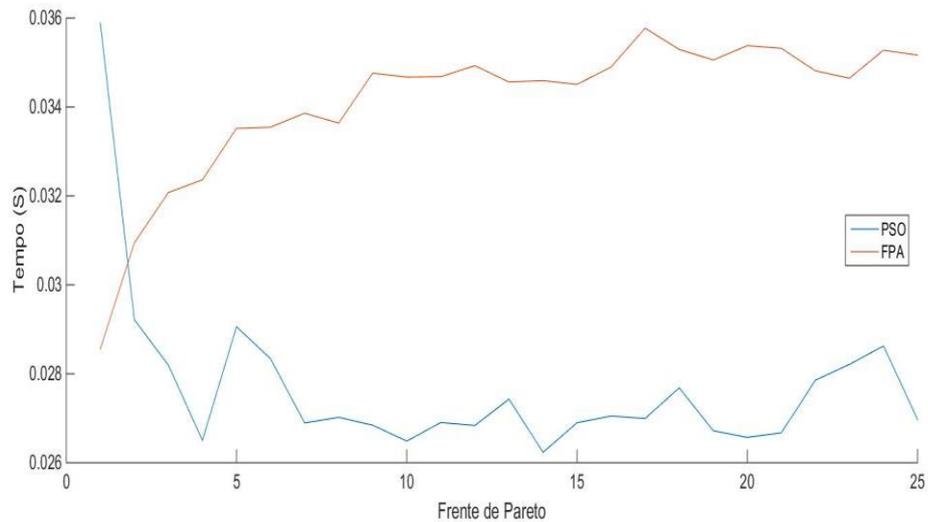
**Figura 39. Mapa de cobertura 73GHz - FPA com modelo CI. Fonte: o Autor.**



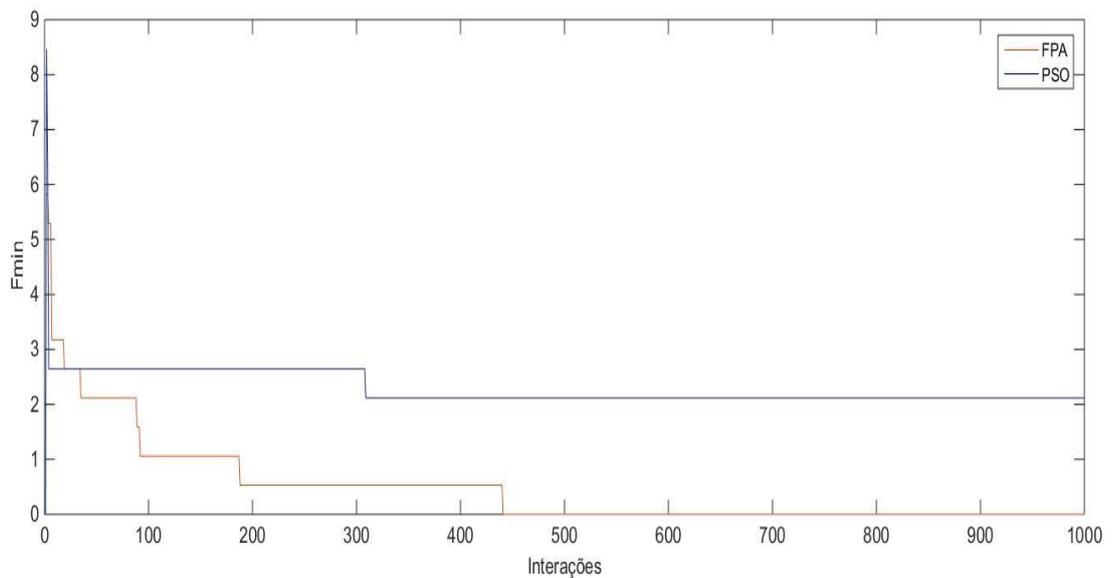
**Figura 40. Mapa de cobertura 73GHz - FPA com modelo ABG. Fonte: o Autor.**

## 5.6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Com o objetivo de avaliar o desempenho de ambos os algoritmos utilizados foram gerados dois gráficos: um referente ao tempo de simulação e outro referente à convergência dos algoritmos. A Figura 41 mostra o tempo de simulação do FPA e PSO, enquanto a Figura 42 mostra a convergência dos algoritmos para a melhor solução em 1000 iterações de uma das Frentes de Pareto em relação ao  $F_{min}$  que seria o custo para o valor *fitness* da função.



**Figura 41. Tempo de execução dos algoritmos para o cálculo de cada Frente de Pareto. Fonte: o Autor.**



**Figura 42. Convergência dos Algoritmos FPA e PSO. Fonte: o Autor.**

Das Figuras 41 e 42 é possível observar que o FPA tem um tempo de processamento elevado comparado ao PSO para o cálculo de cada Frente de Pareto, porém em menos iterações ele consegue convergir a uma solução ótima, enquanto que o PSO tem um tempo de execução menor e necessita de mais de mil iterações para convergir a um resultado ótimo.

## 5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se a partir dos resultados apresentados neste capítulo que ambos os modelos de propagação ajustados (ABG e CI) caracterizam de maneira próxima a perda de propagação no cenário investigado. Ao observamos a Figura 13 juntamente a Tabela 6 é possível perceber que o erro do modelo CI ajustado é menor quando comparado ao resultado obtido com o modelo ABG, o que gerou essa pequena diferença na predição do nível do sinal nas simulações do posicionamento. A diferença é consideravelmente mínima, tornando assim ambos os modelos utilizáveis para a predição da perda de propagação em ambientes densamente arborizados.

Em relação ao posicionamento otimizado, é perceptível a melhora da cobertura, quando comparamos os resultados da frequência 3.5GHz e 10GHz à figura 12 mostrada na metodologia representando a cobertura média atual da praça. Para as frequências 24GHz, 28GHz, 60GHz e 73GHz as seis *smallcells* não foram suficientes, sendo assim a implantação massiva de mais *smallcells* se vê necessária para melhorar a qualidade de canal da praça, visto que em frequências mais elevadas as ondas milimétricas se tornam mais suscetíveis a atenuação.

## 6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, uma metodologia flexível para implantação de *smallcells* em um cenário *outdoor* foi proposta. No estudo são utilizados dois modelos de propagação da próxima geração (5G) combinados com dois algoritmos Bioinspirados conhecidos da literatura: PSO e FPA. O sistema simula a implantação automática de *smallcells* baseada somente no nível do sinal, tentando atingir a máxima cobertura possível com um determinado número de *smallcells* tendo como objetivo deixar a cobertura em padrões aceitáveis para que os usuários experimentem uma boa qualidade de serviço.

Os resultados mostraram a eficiência teórica da metodologia aplicada, combinada aos modelos de propagação que melhor caracterizam a perda de propagação em região de densa arborização: CI e ABG.

Os algoritmos bioinspirados utilizados encontraram uma posição ótima para cada *smallcell* no cenário, ajudando a melhorar consideravelmente o nível de sinal na região investigada. O percentual de cobertura foi calculado para cada uma das configurações geradas nas diferentes faixas de frequências mostrando que para as frequências de 3.5GHz e 10GHz a configuração proposta se mostrou eficiente para melhorar a cobertura da praça. Para frequências mais elevadas uma densificação de *smallcells* se vê necessária para que a cobertura alcance níveis aceitáveis.

Em relação à avaliação de desempenho, os dois algoritmos se mostraram eficientes em seus resultados finais, porém a escolha de um deles é relativa ao tempo de execução, o FPA demora mais a execução quando comparado ao PSO, porém a convergência mais rápida do FPA o torna mais indicado para achar soluções rápidas visto que o número de iterações para o PSO convergir não foi verificado.

### 6.3 Contribuições da dissertação

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- A caracterização da perda de propagação para ambientes densamente arborizados.
- A comparação entre os modelos de propagação existentes na literatura com o objetivo de apontar os melhores a serem utilizados no ambiente em questão.

- Os valores ajustados para os modelos de propagação ABG e CI para regiões com densa arborização.
- Uma metodologia flexível para o planejamento de cobertura de *smallcells* em uma região outdoor.
- A utilização de algoritmos bioinspirados para resolver o problema de otimização do posicionamento das *smallcells*.

#### 6.4 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a quantidade de usuários no ambiente será levada em consideração nas simulações para a implantação das *smallcells* e outros algoritmos bioinspirados como o Symbiotic Organisms Search (SOS) e o Grey Wolf Optimizer (GWO) serão utilizados e comparados entre si.

Também é pensada na extrapolação dos modelos de propagação. Utilizar os encontrados na literatura e os otimizados para avaliar o impacto na taxa de dados. Simular e validar os resultados utilizando o NS3.

Por fim a utilização de modelos ótimos (convexos) como CPLEX e GUROBI para comparar o desempenho aos dos Algoritmos Bioinspirados para determinar os melhores a serem usados.

#### 6.5 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Para confecção deste trabalho algumas barreiras tiveram de ser transpassadas, entre elas destacam-se:

- As campanhas de medições. Exaustivas campanhas foram feitas com diferentes operadoras na região de estudo com o aplicativo G-NET Track Pro. Com o objetivo de validar os dados medidos.
- A obtenção dos dados das antenas que cercam a praça. Entrar em contato com a operadora escolhida e solicitar as informações demandou um grande tempo.

- A aplicação de um dos algoritmos bioinspirados para o posicionamento. O PSO é de simples implementação, porém o FPA demandou um maior tempo de estudo para ser aplicado.
- A geração do gráfico de cobertura através da triangulação dos pontos obtidos nas campanhas de medições.
- A falta de outros trabalhos acadêmicos que utilizem algoritmos bioinspirados para o posicionamento de antenas. Dentre as referências desta dissertação apenas uma tese de doutorado utiliza o PSO para um ambiente indoor.

## REFERÊNCIAS

[1] CISCO VNI FORECAST. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015?2020”, 2016.

[2] SERRANO, Filipe. Limitada; telefonia 4G chega ao Brasil. **Estadão**, [S.L], fev. 2013. Disponível em: <<http://link.estadao.com.br/noticias/geral,limitada-telefonia-4g-chega-ao-brasil,10000033773>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

[3] RAPPAPORT, THEODORE; ROH, WONIL; CHEUN, KYUNGWHOON. Mobile's millimeter-wave makeover. *IEEE Spectr.*, v. 51, n. 9, p. 34-58, 2014

[4]..LOEA CORPORATION. **Understanding millimeter wave wireless communication**. Disponível em: <[http://www.loeacom.com/pdf%20files/11104wp\\_understanding%20mmwcom.pdf](http://www.loeacom.com/pdf%20files/11104wp_understanding%20mmwcom.pdf)>. Acesso em: 28 dez. 2018.

[5] NGMN Alliance, “Small Cell Backhaul Requirements,” white paper, June 2012.

[6]..ELSAWY H, HOSSAIN E.” HetNets with Cognitive Small Cells: User Offloading and Distributed Channel Access Techniques”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, pp. 28-36, 2013

[7] OGDEN MURPHY WALLACE, 2016. Smallcells Technology [online], pp.1-26. Disponível em: <<https://wacities.org/docs/defaultsource/resources/broadbandinfrawebinarppt.pdf?sfvrsn=0>>. Acesso em: 20 dezembro. 2018.

- [8] LYRA, B.S. "Modelo de propagação para redes sem fio fixas na banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica".2009.21f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Pará. 2009
- [9] RAPPAPORT, THEODORE: "Wireless Communication, Principles and Practice", Prentice Hall PTR, 2000.
- [10] M. A. PEREIRA, Analise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800MHz. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Eng. Elétrica, 2007.
- [11] R. SILVA, "Características do Canal Radio em Banda Larga na faixa de 3.5 GHz em Ambiente Urbano" Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.
- [12] HAAS, E. DLR German Aerospace Center. Disponível em: <<http://www.kn-s.dlr.de>>. Acesso em: 15/10/2018
- [13] SILVA, JEAN CARNEIRO; SIQUEIRA, GLÁUCIO LIMA; CASTELLANOS, P. V. G. Propagation Model for Path Loss Through Vegetated Environments at 700–800 MHz Band. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 17, n. 1, p. 179-187, 2018.
- [14] ISKANDER, Magdy F.; YUN, Zhengqing. Propagation prediction models for wireless communication systems. **IEEE Transactions on microwave theory and techniques**, v. 50, n. 3, p. 662-673, 2002.
- [15] K. R SCHAUBACH, N. J DAVIS, TS RAPPAPORT, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments", IEEE 42 Vehicular Technology Conference" Vol 2, pp. 932-935, Maio 1992.

- [16] S. R SAUNDERS, "Antennas and propagation for wireless Communication Systems", New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [17] COTARES LTD., Cambridge Broadband Ltd. and Cambridge University, "A study on efficient dimensioning of broadband wireless access networks," tech. rep., Ofcom, UK, 2003. See Of com website.
- [18] ELECTRONIC COMMUNICATION COMMITTEE (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), "The analysis of the coexistence of FWA cells in the 3.4 - 3.8 GHz band," tech. rep., ECC Report 33, May 2003.
- [19] V. ERCEG ET AL., "*Channel Models for Fixed Wireless Applications*" IEEE802.16.3c-01/29r4, Broadband Wireless Working Group, IEEE P802.16, 2001
- [20] K. LOW, "Comparison of urban propagation models with CW-measurements," [1992 *Proceedings*] *Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference - Frontiers of Technology*, Denver, CO, 1992, pp. 936-942 vol.2
- [21] Cellular Expert Technical Reference, pp. 32-34
- [22] S. SUN ET AL., Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro- and Macro-Cellular Scenarios, 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC2016-Spring), Maio 2016.
- [23] M. MITCHELL, An Introduction to Genetic Algorithms, The MIT Press, 1999.

- [24] E. G. M. DE LACERDA, A. C. P. L. F. de Carvalho, “Introdução aos algoritmos genéticos,” *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*, v. 1, p. 99-148, 1999.
- [25] A. P. ENGELBRECHT, *Computational Intelligence: an introduction*, John Wiley & Sons, 2nd ed., 2007.
- [26] EBERHART, RUSSELL; KENNEDY, JAMES. A new optimizer using particle swarm theory. In: **Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on**. IEEE, 1995. p. 39-43.
- [27] CAVALCANTE, GUSTAVO ARAÚJO. **Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3, 5GHZ utilizando algoritmos genéticos**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [28] SILVA, LARYSSA DAYSE VILAR. Estudo de modelos de canal de comunicação sem fio na faixa de ondas milimétricas para tecnologias 5G. 2016.
- [29] TONINI, FEDERICO ET AL. Benefits of joint planning of small cells and fiber backhaul in 5G dense cellular networks. In: **Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on**. IEEE, 2017. p. 1-6.
- [30] MENG, Yu Song; LEE, Yee Hui; NG, Boon Chong. Study of propagation loss prediction in forest environment. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 17, p. 117-133, 2009
- [31] SILVA, JEAN CARNEIRO; SIQUEIRA, GLÁUCIO LIMA; CASTELLANOS, P. V. G. Propagation Model for Path Loss Through Vegetated Environments at 700–800 MHz Band. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 17, n. 1, p. 179-187, 2018.

- [32] CHEN, DAVID ET AL. 5G self-optimizing wireless mesh backhaul. In: **Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2015 IEEE Conference on**. IEEE, 2015. p. 23-24.
- [33] KELLY, MARVIN G. **The automatic placement of multiple indoor antennas using Particle Swarm Optimisation**. 2016. Tese de Doutorado. © Marvin G. Kelly.
- [34]..WANNSTRON, JEANETTE. LTE-Advanced (on-line). Disponível na Internet.<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lteadvanced>. 2016.
- [35] G. Solutions, Manual gnettrack, <http://www.gyokovsolutions.com/>
- [36]..SESHADRI. (2009, July 19). NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm.[Online].Disponível em:<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii--a-multiobjectiveoptimizationalgorithm?focused=5130592&tab>.