

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

TESE DE DOUTORADO

POSICIONAMENTO OTIMO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE DO SERVIÇO
MÓVEL CELULAR UTILIZANDO MODELO DE CONHECIMENTO DISCRETO
EM PROPAGAÇÃO OUTDOOR

IGOR RUIZ GOMES

TD-22/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018

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

IGOR RUIZ GOMES

POSICIONAMENTO OTIMO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE DO SERVIÇO
MÓVEL CELULAR UTILIZANDO MODELO DE CONHECIMENTO DISCRETO
EM PROPAGAÇÃO OUTDOOR

Tese submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Gervásio
Protásio dos Santos Cavalcante

TD-22/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018

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

POSICIONAMENTO OTIMO DE ESTAÇÕES RÁDIO BASE DO SERVIÇO
MÓVEL CELULAR UTILIZANDO MODELO DE CONHECIMENTO DISCRETO
EM PROPAGAÇÃO OUTDOOR

IGOR RUIZ GOMES

TESE SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA COMO
QUESITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

APROVADA EM 14/12/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
(ORIENTADOR – UFPA)

Prof.Dra. Jasmine Priscila Leite de Araújo
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dra. Fernanda Carla Lima Ferreira
(MEMBRO EXTERNO – UNIFESPA)

Prof. Dr. Adaildo Gomes d' Assunção
(MEMBRO EXTERNO – UFRN)

VISTO:

Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
(COORDENADOR DO PPGEE/CT/UFPA)
UFPA / ITEC / PPGEE

À minha amada família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Hermínio e Marta que sempre me ensinaram, me valorizaram e incentivaram. Estes que contribuíram grandemente com este trabalho, cada um à sua forma, meu pai com as incontáveis horas de estudo e programação e minha mãe com sua inabalável fé.

A minha querida esposa Lais, pelo constante incentivo e compreensão.

A minha irmã Cristiane, pelos seus “puxões de orelha”, constantes cobranças e incentivo. Sem você minha irmã este trabalho não seria possível, MUITO OBRIGADO!

Em especial ao Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela sua sábia orientação, compreensão e amizade ao longo dos anos, desde o meu mestrado.

Aos professores e colegas do LCT, que foram companheiros em árduas medições, que ajudaram na confecção das figuras, que ensinaram, leram e opinaram contribuindo com esta tese. Àqueles que simplesmente trouxeram alegria ao LCT.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de usufruir espaços, livros, equipamentos, em suma, por toda a estrutura a mim proporcionada.

À Universidade Federal do Pará, pelo suporte desde o meu mestrado.

RESUMO

Um bom projeto de redes sem fio depende de viabilidade técnica, financeira e quais critérios deseja-se atender. Com a aparição de novas tecnologias e serviços, como a transmissão em 5G e a reutilização de frequências, novos trabalhos estão sendo feitos para garantir o melhor projeto para uma determinada área. Este trabalho apresenta um modelo de rádio propagação discreto que utiliza o classificador K-vizinhos mais próximos. O modelo leva em consideração atributos diferentes de um ambiente, no caso desta tese, o estudo foi nas dependências da Universidade Federal do Pará, representando um ambiente tipicamente amazônico. Para a concepção do modelo campanhas de medição foram realizadas em tres diferentes frequências: 521MHz, 2100 MHz, e 2600 MHz. O estudo do desvanecimento nessas frequências foi realizado para fazer uma generalização de frequências para incluir no modelo. Com o modelo pronto foram feitos dois cenários para otimização do posicionamento das estações rádio base (ERBs) em estudo. O modelo proposto foi aplicado em alguns cenários, mostrando a potência recebida em cada ponto, além disso, testes para frequência de 700 MHz foram realizados para mostrar a adequação do polinômio obtido na generalização das frequências.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos de Rádio Propagação Empíricos; Modelos de Conhecimento Discreto; Classificador KNN, Otimização, Posicionamento de ERB.

ABSTRACT

A good wireless network design depends on technical, financial and what criteria you want to meet. New technologies and services, such as transmission in 5G, and the reuse of frequencies, several new studies are being done to ensure the best project for a given area. This work presents a discrete radio propagation model that uses the K-nearest neighbors classifier. The model takes into account different attributes of an environment, the studied environment was in the dependencies of the Federal University of Pará (Pará-Brazil), representing a typically Amazonian environment. For design the model, measurement campaigns were carried out in three different frequencies: 521MHz, 2100 MHz, and 2600 MHz. The study of the fading in these frequencies was made to make a generalization of frequencies to include in the model. Two scenarios to optimize the positioning of the base stations under study were carried out. The proposed model was applied in some scenarios, showing the power received at each point, in addition, tests for frequency of 700 MHz were performed to show how good the polynomial obtained was in the generalization of the frequencies.

KEYWORDS: Empirical Radio Propagation Models; Models of Discrete Knowledge; KNN Classifier, Optimization, RBS positioning.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	13
1. Introdução.....	14
1.1. Contextualização.....	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo Geral:	15
1.2.2. Objetivos Específicos:	15
1.3. Metodologia	15
1.4. Principais contribuições	16
1.5. Organização da Tese	16
2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Correlatos.	17
2.1. Modelos de propagação	17
2.1.1. Modelos determinísticos.....	18
2.1.2. Modelos Empíricos.....	19
2.2. Modelos de Propagação que envolvem vegetação.....	22
2.3. Planejamento de Redes sem fio	24
2.4. Considerações finais	24
3. Técnicas de otimização.....	25
3.1. Otimização clássica.....	25
3.1.1. Otimização linear.....	25
3.1.2. Otimização não-linear.....	26
3.2. Otimização Evolutiva.....	27
3.3. Método Nelder-Mead.....	28

3.4. Considerações finais	31
4. Aprendizado de Máquina.....	32
4.1. Tipos de Aprendizado.....	32
4.2. Agentes Baseados em Conhecimento (BC).....	33
4.3. Classificador K-Nearest Neighbors	34
4.4. Considerações finais	36
5. Metodologia de Aquisição e Tratamento dos dados.....	37
5.1. Seleções dos locais para medições em UHF.....	37
5.2. Equipamentos usados e medições na faixa UHF	40
5.3. Seleções dos locais para medições em 2100MHz e 2600MHz.....	41
5.4. Tratamento dos dados e estudo das frequências utilizadas	43
5.5. Considerações Finais	45
6. Modelo proposto.....	46
6.1. Discretização do Ambiente e Classificação das áreas	46
6.2. Contagem e Classificação.....	49
6.2. Breve Estudo comparativo.....	55
7. Cenário otimizado.....	57
7.1. Critérios de Otimização	57
7.2. Escolha dos locais candidatos.....	57
7.3 Mapas de potência recebidas	59
7.3.1 Mapas para 2100 Mhz	59
7.3.2 Mapas para 2600 MHz	62
7.3.3. Mapas para 700MHz	66
8. Conclusão	68
Referencias	70

LISTA DE FIGURAS

Fig.3.1. Simplex \times Karmarkar	26
Fig.3.2. Fluxograma das principais etapas dos AGs.....	28
Fig.3.3. Exemplo Tetraedro ou 3-simplex.....	29
Fig.3.4. (a) Reflexão; (b) Expansão; (c) Contração externa; (d) Contração interna; (e) Redução	30
Fig. 4.1. Modelo básico de um Agente baseado em Conhecimento.....	34
Fig. 4.2. (a) Conjunto de treinamento; (b) Elemento sendo classificado pelo KNN.....	35
Fig. 5.1. Disposição dos pontos medidos.	39
Fig. 5.2 Site Master S332E e Antena dipolo Anritsu MPP651A	40
Fig. 5.3 Realização das medições em UHF.	40
Fig. 5.5 Pontos medidos na UFPA, direção norte direta para esquerda	42
Fig. 5.6 Dados Medidos e curvas de tendencias.....	43
Fig. 5.7 Curvas de tendencia de propagação.	45
Fig. 6.1. Discretização do mapa da UFPA.	46
Fig. 6.2. Discretização para utilização do programa.	47
Fig. 6.3. Mapa de coloração conforme os atributos.....	48
Fig. 6.4. Mapa de coloração conforme os atributos.....	50
Fig. 6.5. Superfície de potência recebida EDGE	52
Fig. 6.6. Curvas de Nível EDGE	53
Fig. 6.7. Superfície LTE	54
Fig. 6.8. Curvas de Nível LTE.....	55
Fig.6.9. Comparação de modelos	56
Fig.7.1. Locais candidatos	58
Fig.7.2. Locais Candidatos para 700MHz	59
Fig. 7.3. Otimização EDGE duas Torres	60

Fig 7.4. Superfície EDGE duas torres.	61
Fig. 7.5. Otimização EDGE 3 torres.....	61
Fig. 7.6. Superfície EDGE três torres.....	62
Fig. 7.7. Otimização LTE duas torres.....	63
Fig. 7.8. Superfície LTE duas torres.....	64
Fig.7.9 Otimização LTE três torres.	65
Fig.7.10. Superfície LTE três torres	65
Fig. 7.11. Otimização 700MHz duas torres.....	66
Fig.7.12 Superfície 700MHz duas torres.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Parâmetros do Modelo SUI	21
Tabela 4.1. Algoritmos e tipos de aprendizado de máquina.....	33
Tabela 5.1. Informações das torres transmissoras UHF	37
Tabela 6.1. Soluções por mínimos quadrados.	51
Tabela 7.1 Solução de mínimos quadrados para 700MHz	66

LISTA DE ACRÔNIMOS

EDGE - Enhanced Data Rates for GSM Evolution

ERB – Estação Rádio Base

IEEE - The Institute of Electrical and Electronic Engineers

ITU-R- International Telecommunication Union-Radio communication Sector

KNN -K-Nearest Neighbors

LTE - Long Term Evolution

SUI - Stanford University Interim

1. Introdução

1.1. Contextualização

Os modelos de perda de propagação são importantes na predição da área de cobertura, análise de interferência, alocação de frequências e parâmetros de célula, sendo esses os componentes básicos do planejamento de uma rede de comunicações móveis. Utilizar um modelo de propagação adequado é um dos fatores essenciais para trazer economia de tempo e recurso (NKORDEH et al., 2014).

O planejamento das redes sem fio é umas das maiores preocupações da atualidade. Projetos antigos visavam introduzir o sistema e garantir o funcionamento mínimo, mas com as melhorias das redes, aumento no número de usuários, novos serviços, tecnologias e estudo sobre o efeito da grande exposição eletromagnética, faz-se necessário planejamento bem feito.

Há mais de 40 anos são apresentados, discutidos e revisados diversos modelos de perda de propagação para várias faixas de frequências, tipos de trajetos, correções para perfis do terreno, alturas das antenas transmissora e receptora entre outros.

Os novos planejamentos levam em consideração muitos aspectos, podendo-se destacar: médio/baixa potência irradiada; posicionamento ótimo de novas antenas transmissoras; modelos adequados à predição de intensidade de sinal. Para atender esses quesitos as novas antenas têm uma potência menor, mas isso acarreta em uma menor área de cobertura levando assim a novos estudos em propagação do sinal (MUÑOZ et al 2018)

Grandes centros urbanos estão fazendo as trocas de grandes células para células pequenas (NI et al 2015), então a maior parte dos estudos de propagação é baseados em cidade com muitas edificações como Tóquio, Nova York, Barcelona ou São Paulo. Esses modelos não são apropriados para predição de sinal em cidades com ambientes misto de edificações e arborização. Logo um estudo para esse tipo de ambiente se faz necessário para atender não somente a realidade de cidades amazônicas, como é o principal objeto de estudo deste trabalho, mas também para atender outras cidades com florestas tropicais ou mesmo cidades bem arborizadas.

Nesse contexto um estudo sobre planejamento de redes sem fio é importante. Esta tese contribui para esse planejamento com duas etapas: Um modelo de predição de sinal recebido em qualquer área de um mapa e o melhor posicionamento das ERB para maximizar a potência do sinal recebido

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral:

Propor um modelo empírico de rádio propagação *outdoor* e o posicionamento ótimo de ERBs em um cenário amazônico.

1.2.2. Objetivos Específicos:

Desenvolver um modelo empírico de rádio propagação *outdoor* que apresente melhor desempenho em ambientes amazônicos, considerando a sua heterogeneidade;

Estudar algumas frequências para obter uma generalização e assim tornar o programa desenvolvido mais flexível a diferentes projetos;

Utilizar Modelos de Conhecimento (Inteligência Artificial) para embasamento teórico e computacional do modelo proposto;

Otimizar posicionamento multi-fonte de novas ERBs nos cenários estudados.

1.3. Metodologia

A elaboração do modelo proposto exigiu estudos e pesquisas em diferentes âmbitos. Primeiramente foi feita uma pesquisa bibliográfica para alicerçar o referencial teórico utilizado, abrangendo o estudo de modelos de propagação, matemática aplicada e técnicas de inteligência computacionais. Em seguida, foram realizadas campanhas de medição para aquisição de dados em diferentes frequências.

A metodologia aplicada nesta tese inclui técnicas de aprendizado de máquina como embasamento computacional do modelo proposto, programação inteira devido a forma do modelo proposto, e a aplicação de uma técnica de otimização para o posicionamento das estações rádio bases.

Todos os programas referentes ao modelo de conhecimento discreto foram feitos no software Matlab® devido a sua grande variedade de funções internas e tratamento

matricial facilitado, enquanto que a parte de otimização foi desenvolvida em Java® para garantir um resultado mais rápido, uma vez que o Matlab® é mais lento computacionalmente.

1.4. Principais contribuições

Como principal contribuição destaca-se um modelo de propagação empírico que pode ser aplicado não somente à morfologia estudada nessa tese, mas a qualquer outra desde que se tenha um conjunto de treinamento mínimo.

O polinômio obtido para a generalização das frequências, foi obtido através da coleta de 3 frequências distintas, tornando o modelo mais flexível.

Uma otimização do posicionamento das estações rádio bases para um planejamento de área de cobertura foi realizada, facilitando os projetos para essas redes.

1.5. Organização da Tese

A tese está dividida em oito capítulos.

O capítulo 2 apresenta alguns trabalhos sobre modelos de propagação clássicos, modelos de propagação para ambientes arborizados, planejamento de novas redes celulares.

O capítulo 3 apresenta um estudo sobre técnicas de otimização, abordando com mais profundidade o método escolhido para este trabalho.

O capítulo 4 discute elementos de aprendizado de máquina e agentes baseados em conhecimento, destacando o algoritmo usado pelo modelo proposto.

O capítulo 5 apresenta a metodologia de aquisição de dados, descrevendo a localização e disposição dos pontos, também o *setup* de medições e caracterização dos terrenos.

O capítulo 6 descreve o modelo proposto assim como aspectos teóricos e considerações feitas na elaboração deste.

O capítulo 7 mostra os resultados obtidos nas otimizações para diferentes cenários e frequências.

Por fim, o capítulo 8 apresenta a conclusão e trabalhos futuros desta tese.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Correlatos.

O planejamento para uma rede sem fio é de suma importância para que se possa garantir a melhor cobertura para seus usuários. Modelos de propagação são utilizados para fazer tal planejamento, contudo diferentes ambientes, climas, frequências e distâncias influenciam na escolha dos modelos, e muitas vezes um modelo é apropriado a uma localidade não é para outra.

Neste capítulo são abordados alguns modelos de propagação clássicos da literatura bem como alguns modelos que levam em consideração diferentes perdas como, vegetação edificação entre outras.

2.1. Modelos de rádio propagação

No estudo da rádio propagação, encontra-se uma grande variedade de modelos de predição de atenuação, sendo a maior parte obtida empiricamente. Em contraste com os modelos empíricos, existem os modelos determinísticos (teóricos) e modelos mistos, conhecidos por semi-determinísticos (RAPPAPORT, 2002).

Os modelos empíricos são obtidos a partir de campanhas de medições em uma ou mais regiões, modelamento dos resultados obtidos e apresentação do resultado final (modelo) através de ábacos (como o modelo de Okumura, por exemplo) ou expressões que mostram o valor médio da atenuação. Modelos dessa categoria, principalmente os modelos dados por uma expressão, apresentam a vantagem de serem, em geral, de fácil aplicação e baixo tempo de execução.

Modelos empíricos tendem a não fornecer resultados muito confiáveis quando aplicados a regiões que difiram significativamente da região onde as campanhas de medições ocorreram. Mesmo que alguns modelos apresentem adaptações para a predição em áreas de características globais distintas do original (como, por exemplo, o modelo de Okumura-Hata), os modelos empíricos são melhores adaptados a regiões de mesmas características da região onde foram realizadas as medições.

Modelos determinísticos levam em consideração os fenômenos físicos associados à propagação de uma onda eletromagnética como reflexão, difração, refração entre outros (SAUNDERS, 1999). Devido à grande quantidade de cálculos envolvidos

nesse tipo de abordagens, suas principais aplicações são em ambientes *indoor* devido ao tamanho e a variabilidade do ambiente ser menor que o *outdoor* para minimizar, o já alto, custo computacional.

2.1.1. Modelos determinísticos

Pode-se destacar como principais modelos o modelo de traçado de raios, modelos que usam o método das diferenças finitas no domínio do tempo e modelos de equações diferenciais parabólicas.

2.1.1.1. Modelo de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

No modelo FDTD as equações de Maxwell são aproximadas através de um conjunto de equações de diferenças finitas. Primeiramente para a realização dos cálculos é necessário definir um *grid* específico sobre a área de interesse (NESKOVIC et al., 2000). Uma vez definidas as condições iniciais, o algoritmo FDTD utiliza diferenças centrais para aproximar ambas as derivadas temporal e espacial. Nos nós do *grid*, as soluções são determinadas iterativamente.

2.1.1.2 Modelo de Traçados de Raios

O modelo de traçado de raios (ray tracing) foi desenvolvido inicialmente com uso da computação gráfica para gerar cenas com iluminação e sombra realistas. Como essa técnica utilizava a física da luz para as simulações passou a usar para descrever propagação de ondas eletromagnéticas sendo aplicado em propagação.

Os raios diretos são considerados ao longo do percurso de propagação do transmissor ao receptor calculando todos os possíveis percursos do sinal do transmissor até o receptor. Este modelo é comumente usado em ambientes *indoor*, sendo que alguns algoritmos mais complexos incluem o mecanismo de difração, espalhamento em parede difusa e transmissão através de vários materiais.

Considerado o modelo de predição de intensidade de campo mais confiável da atualidade, o traçado de raios requer um *layout* detalhado da área de estudo. A precisão do modelo depende da precisão e da complexidade do banco de dados do *layout* da área (Yun,Z. Iskander, M. F, 2015).

A principal desvantagem do uso deste modelo é a grande carga computacional para simular uma enorme quantidade de raios. O tempo computacional depende exponencialmente dos detalhes incluídos no *layout* da área. Em alguns poucos casos

podem ser utilizados em ambientes *outdoor*, mas com uma área pequena.

2.1.1.3. Modelos que utilizam equações parabólicas

Esses modelos consistem na aplicação de equações diferenciais parciais parabólicas para estimar a potência recebida em um ambiente. Esse método exige um tempo computacional bem mais reduzido que os anteriores e por isso tem ganhado destaque nos últimos anos. O trabalho de (OLIVEIRA et al., 2013) mostra um exemplo de aplicação das equações parabólicas em ambientes *outdoor*.

2.1.2. Modelos Empíricos

Os modelos empíricos clássicos para ambientes *outdoor* são: o modelo de Okumura et al, de Hata et al, COST 231, e o *Dual-Slope*. Uma grande variedade de modelos foi baseada ou são modificações desses modelos clássicos.

2.1.2.1. Modelo de Okumura

O modelo de Okumura (1968) aplica-se a frequências de 150 MHz a 1920 MHz, distâncias de 1 km a 100 km e alturas de antena transmissora variando de 30 m a 1000 m. O modelo foi desenvolvido através de um grande número de medições realizadas no Japão com antenas verticais omnidirecionais para transmissora e receptora.

O modelo de Okumura é adequado à cidades grandes com muitas edificações, já que a maior parte de suas campanhas de medições foram feitas em Tóquio, mas não se adequa bem a ambientes rurais. Este modelo consiste num conjunto de curvas de atenuação média para espaço livre (A_{mu}) em área urbana e pode ser expresso por:

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (2.1)$$

Sendo:

$L_{50}(dB)$: valor médio da perda de propagação;

L_F : perda de propagação no espaço livre;

A_{mu} : atenuação média relativa ao espaço livre na frequência f ;

$G(h_{te})$: fator de ganho da antena transmissora;

$G(h_{re})$: fator de ganho da antena receptora;

G_{AREA} : ganho gerado pelo ambiente.

2.1.2.2. Modelo de Hata

O modelo de Hata(1980) é uma formulação empírica das curvas descritas por Okumura. Este modelo é valido para frequências entre 150MHz e 1500MHz, antenas transmissoras em altura entre 30m e 200m e receptores com alturas entre 1m e 10m. A formulação para perda de propagação para ambientes urbanos é dada por:

$$L_{50}(urbano)(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d \quad (2.2)$$

Sendo:

f_c : frequência em MHz;

h_{te} : altura efetiva da antena transmissora;

h_{re} : altura efetiva da antena receptora;

d : distância em quilômetros entre antenas transmissora e receptora;

$a(h_{re})$: fator de correção para altura efetiva da antena receptora a qual é função do tamanho da área coberta.

2.1.2.3. Modelo SUI (Stanford University Interim)

O grupo de trabalho 802.16 do IEEE desenvolveu padrões para sistemas em banda larga. Trabalhando em conjunto com a Universidade de Stanford desenvolveram um modelo de propagação para ambientes suburbanos operando em frequências abaixo de 11 GHz . As perdas de propagação são calculadas por:

$$L_{sui} = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + S, d > d_0 \quad (2.3)$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2.4)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.5)$$

Onde:

d: distância em metros;

d_0 : distância inicial (100m);

λ : comprimento de onda em metros;

γ : expoente de perdas;

h_b : altura do transmissor (10 m a 80 m)

Os parâmetros a, b e c variam de acordo com o tipo de terreno mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Parâmetros do Modelo SUI

Parâmetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,5	20

2.1.2.4. Modelo COST231-Hata

A Cooperativa Europeia para Pesquisa Científica e Técnica (EURO-COST) apresentou uma extensão do modelo de Hata para frequências até 2 GHz (COST-231 1991).

$$L_{50}(\text{urbano})(dB) = 46,3 + 33,9 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d + C_M \quad (2.6)$$

Sendo as mesmas variáveis anteriormente definidas no modelo de Hata e C_M dado por:

0 dB para cidades de médio porte e áreas suburbanas;

3 dB para grandes cidades.

2.1.2.5. Dual-Slope

Este é comumente usado quando a antena transmissora se encontra além de vários comprimentos de onda do plano terra horizontal. A perda de propagação $L(d)$ é dada por:

$$L(d) = L_b + \begin{cases} 10 n_1 \log d + P_1, & 1 < d < d_{brk} \\ 10(n_1 - n_2) \log d_{brk} + 10n_2 \log d + P_1, & d \geq d_{brk} \end{cases} \quad (3.4)$$

Sendo:

P_1 perda de propagação em dB no ponto localizado a uma distância de referência d_0 ;

d_{brk} distância ao breakpoint ou ponto de Fresnel ou de descontinuidade;

L_b parâmetro básico de perda o qual depende da frequência, das alturas das antenas e de n_1, n_2 ;

n_1, n_2 declives das linhas de ajustes antes e depois do ponto de descontinuidade.

2.2. Modelos de Propagação que envolve vegetação

Na literatura existem modelos analíticos que tentam modelar árvores ou florestas desde a década de 60 (TAMIR,1967). Trabalhos posteriores já mostravam um cenário misto tipo da região amazônica, onde existem edificações e arborização densa (CAVALCANTE 1982).

No trabalho de Meng et al (2009) é apresentado um estudo de um modelo de 4 camadas para transmissor e receptor dentro da floresta, neste, os autores fazem uma comparação com modelos tradicionais, evidenciando que modelos como COST231 e ITU-R não apresentam bons resultados para regiões de floresta.

É importante salientar que apesar dos autores fazerem uma abordagem para florestas tropicais, o cenário escolhido para medições é bem específico e não condiz com florestas naturais equatoriais e que, assim como no caso das florestas na Alemanha, não correspondem ao tipo de vegetação encontrado na floresta amazônica.

Castro (2010) descreve um modelo de propagação empírico na faixa de 5,8 GHz para ambientes tipos da Amazônia. O autor fez uma extensa campanha de medições em 12 cidades amazônicas com um total de 335 clientes. O modelo obteve um erro RMS de 3,8 dB enquanto que os modelos comparados, SUI e COST231-Hata, obtiveram um erro RMS superior a 10 dB, reforçando a necessidade de um estudo e planejamento para garantir um bom funcionamento da rede para diferentes cenários, uma vez que os modelos clássicos não se comportam bem para ambientes diferentes dos quais foram inicialmente estudados..

Chee et al (2011) modelaram a atenuação devido a folhagem em áreas rurais da Alemanha na frequência de 3,5 GHz. Neste trabalho são apresentados vários modelos que se aproximam da geometria das árvores dentre esses um que admite cilindros para troncos e galhos, e discos para folhas. Dados de medições em três estações do ano são comparados aos resultados das simulações. Os autores encontram diferenças de 0,2 dB/m no coeficiente efetivo de folhagem entre dados da primavera e do verão. Além disso, a atenuação na primavera é cerca de 3,15 dB enquanto que no verão é de 4,68 dB.

Gomes et al (2012) desenvolveu um modelo de conhecimento aplicado a ambientes indoor. Este modelo usa fatos e regras para associar novos elementos a elementos pré-existentes. Foram realizadas campanhas de medições em um espaço de 230 m² em radiais.

Gomes (2015) desenvolveu um modelo de propagação para a faixa de TV digital, onde são considerados trajetos mistos do tipo terra-água doce-terra em diferentes estações do ano, no caso verão e inverno amazônicos. A autora utiliza um modelo de conhecimento contínuo para a caracterização das perdas. O modelo proposto é um algoritmo híbrido de KNN e agentes baseados em conhecimento, onde inicialmente cada ponto do cenário recebe uma classificação de seus atributos, e em seguida, baseado nessas informações, é calculado um valor de potência recebida.

O trabalho propõe um algoritmo, não possuindo formulação matemática. O programa utiliza os seguintes dados de entrada: Dados da emissora; Potência recebida em cada ponto; Localização geográfica dos pontos; Notas referentes aos critérios morfológicos; Notas referentes à estação do ano; Vetor de pesos que define a intensidade de cada regra. Suas saídas são: Localização dos pontos em coordenadas polares; superfície de potências; gráficos por radiais; gráficos por morfologia.

Valente et al (2016) propõe uma otimização dos modelos de SUI e COST 231 para adaptar-se bem a frequência de 1800 MHz usada para LTE. Duas rotas foram feitas para as campanhas de medições. Os modelos sem otimização chegam a ter um erro médio de 8,24 dB, já com a otimização realizada o erro médio ficou em 3,56 dB, mostrando que os modelos clássicos não podem ser usados diretamente para o planejamento da rede sem sofrerem algumas adaptações.

2.3.Planejamento de Redes sem fio

Taufique et al (2017) descrevem os principais tópicos para o planejamento das novas tecnologias celulares a serem implantadas, em especial o 5G. Os autores destacam no planejamento a importância da troca de grandes ERB para o formato *small cell*. Destacam ainda a otimização do posicionamento de novas ERBs para a melhor cobertura e modelos de propagação voltados para os mapas das cidades, reutilização de frequências (*refarming*) entre outros aspectos.

Muñoz et al (2018) explora o tema de otimização de planejamento automático de redes sem fio e apresenta um *framework* para planejamento de *small cells* para 5G. Os autores mostram um melhoramento no tráfego dos dados quando as células (torres) são reorganizadas para melhorar a qualidade do sinal.

2.4.Considerações finais

Neste capítulo foram mostrados alguns modelos de propagação clássicos e alguns que se aproximam do teor deste trabalho. Muitos trabalhos mostram a importância de um bom planejamento garantir uma melhor cobertura da rede, o que fortalece a importância do trabalho aqui proposto uma vez que o posicionamento ótimo para o cenário em estudo é mostrado.

3. Técnicas de otimização

Diversos problemas exigem a melhor solução, e para atingir tal objetivo utilizam-se técnicas de otimização. As diferentes técnicas contemplam diferentes tipos de problemas. Pode-se dividir essas técnicas em duas grandes áreas: Otimização clássica e otimização evolutiva (meta-heurísticas ou semi-heurísticas).

3.1. Otimização clássica

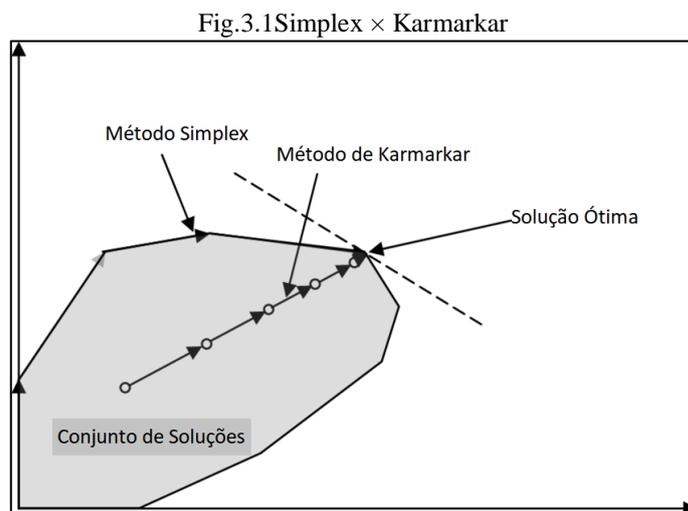
As técnicas de otimização clássicas são baseadas em conceitos e rotinas matemáticas bem definidas. Resolvendo uma gama muito grande de problemas de otimização como a linear, não-linear e inteira.

3.1.1. Otimização linear

Quando a função objetivo for linear juntamente com todas as restrições do problema, se caracteriza um problema de programação linear o qual possui algoritmos próprios para sua resolução destacando-se dois que são os mais conhecidos e também os mais aplicados, O método Simplex, desenvolvido por George Dantzig (DANTZIG, 1963) e o método de Karmarkar (KARMARKAR, 1984).

O método Simplex encontra sucessivamente soluções básicas que são vértices do convexo formado pelas restrições lineares até atingir o vértice ótimo. Sabe-se que em um problema de programação linear, se ele tem solução, necessariamente ele apresenta uma solução que é um vértice. Esta conclusão faz com as soluções ótimas de problemas lineares sejam obtidas com poucas iterações, tornado o método mais utilizado e eficiente para essa categoria de problemas.

O método de Karmarkar utiliza projeções ortogonais cujas matrizes de projeção são calculadas a cada iteração produzindo pontos interiores ao convexo cada vez mais próximos da solução. A Fig. 3.1 mostra a principal diferença das buscas do simplex e do método de Karmarkar.



3.1.2. Otimização não-linear

Problemas não-lineares possuem restrições ou/e a função objetivo não-lineares. Existem algumas técnicas que são mais usadas como os métodos do gradiente, método de Newton, método de gradientes conjugados e método de Nelder-Mead.

O método do gradiente busca fundamentalmente a direção de máxima descida (no caso de minimização). Para achar o mínimo na direção de máxima descida (menos gradiente) é utilizada uma busca unidimensional, a cada iteração. A busca unidimensional consiste em procurar, de modo organizado, o ponto de mínimo de uma função sobre uma reta. Normalmente a reta está mergulhada num espaço de dimensão n , sendo n o número de variáveis do problema.

O método de Newton recebeu este nome por ser baseado nas conclusões de Newton para resolver equações transcendentais. Essas equações normalmente envolvem funções transcendentais do tipo exponencial, seno, cosseno etc. As equações transcendentais não possuem soluções algébricas em geral. Newton desenvolveu um procedimento para obter soluções numéricas para as equações citadas.

O método Gradientes Conjugados foi desenvolvido originalmente para minimização de uma função quadrática, mas a sua generalização para funções não-quadráticas foi óbvia. Este é um método de direções conjugadas que são obtidas pela seleção sucessiva de direções como vetores conjugados a partir de sucessivos gradientes. As direções não são especificadas a priori, mas são determinadas a cada iteração do método. Esse método apresenta algumas vantagens como o fato de obter-se gradientes não-nulos e linearmente independentes com relação a todas as direções previamente calculadas. A determinação das direções é algo bastante simples o que faz

deste método apenas um pouco mais complexo do que o método do Gradiente.

O Nelder-Mead diferente dos outros métodos citados, ele não possui teorema de convergência e não faz uso de derivadas, esse método utiliza estratégias de buscas diretas. Esse método possui diversas variações e é o mais utilizado no mundo.

3.2.Otimização Evolutiva

A computação evolucionária usa modelos computacionais dos processos naturais de evolução como ferramenta para resolver problemas diversos. Apesar de haver muitas variedades desses modelos computacionais, todos eles têm conceitos em comum, tais como a simulação da evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução, onde esses processos dependem da adequação do indivíduo dentro do ambiente em que ele se encontra.

Existem diversos algoritmos como os Algoritmos Genéticos (AG), Colônia de Formigas (CF), *Particle Swarms* (PSO), Busca Tabu (BT), *Simulating Annealing* (SA) entre muitos outros algoritmos que são bio-inspirados.

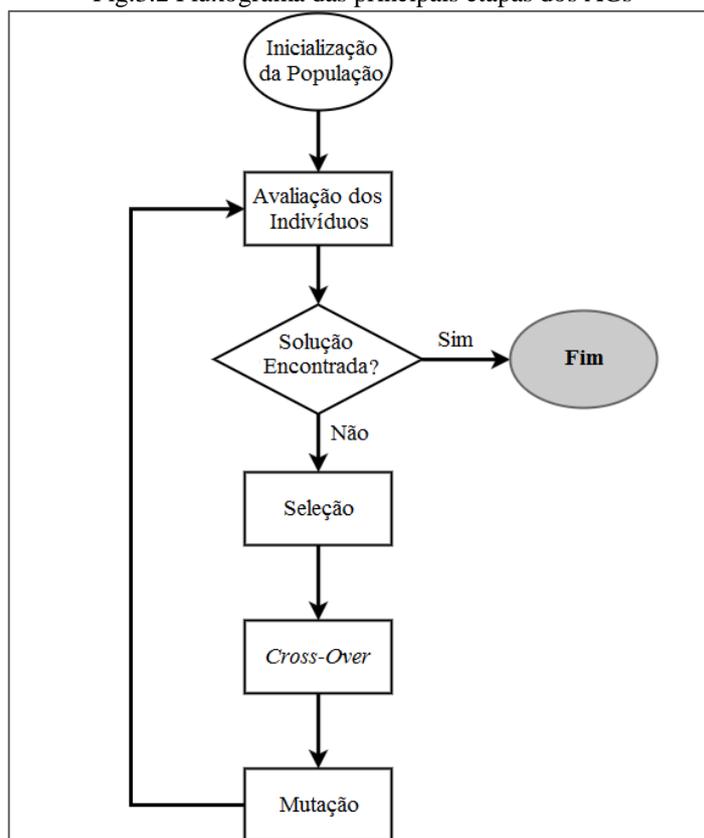
Os estudos em computação evolutiva começaram ainda na década de 30, mas foi com o trabalho de Holland (1975), propondo os AG, que essa área recebeu destaque. Seu uso foi proposto inicialmente para a inteligência artificial, mas com o caráter de melhoramento das soluções logo se tornou o maior representante desses algoritmos para a otimização. O fluxograma 3.2 mostra as etapas básicas de um AG.

As principais vantagens são: fácil codificação; vários tipos de problemas podem ser resolvidos com pequenas alterações; conseguem soluções para problemas do tipo Não-Polinomial Difícil (NP-hard).

Como desvantagens pode-se destacar que o processo de melhoramento das soluções depende de uma variável aleatória, logo existem casos em que o algoritmo não consegue convergir ficando preso em ótimos locais.

O processo de evolução é mais complexo de executar do que os cálculos dos modelos matemáticos, então naturalmente os algoritmos bio-inspirados obtêm os resultados com muito mais iterações que os métodos clássicos, sendo menos eficientes para problemas “bem definidos”.

Fig.3.2 Fluxograma das principais etapas dos AGs



3.3.Método Nelder-Mead

Nesta seção é explicado com mais detalhes o métodos Nelder-Mead. Dentre as técnicas citadas o Nelder-Mead foi escolhido para fazer o posicionamento do ótimo das ERB. Esse método foi escolhido devido o problema possuir características favoráveis para melhor desempenho desse método, vale ressaltar que os outros métodos possivelmente obteriam o posicionamento ótimo também.

O Nelder-Mead foi iniciado por John Nelder após assistir uma palestra sobre o método simplex, que se adaptava a superfícies, proposto por Spendley, Hext e Himsworth (1962). Apesar do termo simplex não fazer referência ao algoritmo utilizado para problemas lineares, proposto por Dantzig, é apropriado, pois a abordagem utiliza $N + 1$ vértices num espaço n -dimensional a fim de explorar a superfície da função objetivo (WRIGHT, 2012). Dois métodos foram simplex foram inicialmente propostos.

O primeiro método simplex inicia com $N+1$ vértices em R^n , onde a cada iteração de busca e exclui o vértice de maior valor (pior vértice), refletindo-o isometricamente este vértice em relação ao centroide dos n melhores vértices, gerando assim um novo

vértice com um valor da função menor que o vértice excluído. Neste método o conjunto de ângulos internos do simplex permanece constante. A Fig. 3.3 mostra um exemplo visual de um simplex.

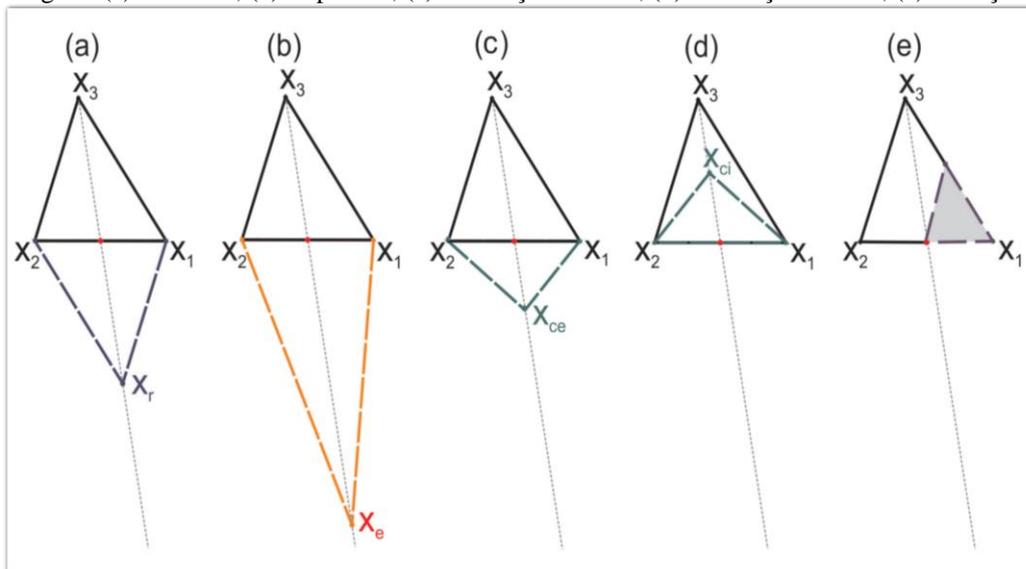
Fig.3.3 Exemplo Tetraedro ou 3-simplex



O segundo método simplex foi publicado por John Nelder e Roger Mead, onde os ângulos internos podem se tornar arbitrariamente pequenos. Este método se inicia com um conjunto de soluções candidatas, isto é, aproximações do valor máximo da função. Esses pontos definem os vértices do simplex no qual o esforço de busca é focado.

Uma iteração do algoritmo tem como objetivo mudar a forma e o tamanho do simplex através da identificação de um candidato para substituir o pior ponto do conjunto. As principais mudanças de forma são: Reflexão; Expansão; Contração Interna; Contração Externa; Redução. A Fig 3.4 mostra exemplos das principais mudanças de forma no Nelder-Mead.

Fig.3.4 (a) Reflexão; (b) Expansão; (c) Contração externa; (d) Contração interna; (e) Redução



As principais vantagens da utilização Nelder-Mead são:

- Para fazer a otimização não é necessário derivadas;
- Método é eficiente para um número de dimensões baixo/moderado;
- É aplicável em funções descontínuas;
- Mesmo na presença de ruído aleatório tem robustez para convergir;
- Acentuado decréscimo da função em suas primeiras iterações;
- Poucas avaliações por iteração;
- Simplicidade de implementação computacional;

Destacam-se algumas desvantagens da utilização deste método:

- Problema da alta dimensionalidade, devido à natureza de alguns problemas a eficiência pode variar;
- Em alguns casos o método pode chegar apenas em um ótimo local;
- Escolha de bons critérios de parada;

Neste trabalho, foi utilizada uma variação do Nelder-Mead para variáveis binárias. Essa escolha deve-se ao problema em questão, uma vez que os locais candidatos para o posicionamento das ERB podem ser atribuídos como Há-Torre e Não-Há-Torre, sendo assim um problema de combinação binária (otimização combinatória).

A discretização do problema aqui proposto possui 652 quadrados para avaliação, mesmo se todos os quadrados do mapa fossem locais candidatos para a otimização existiriam C_{652}^2 possibilidades totalizando 212.226 combinações, como a menor palavra dos computadores é $2^{32}-1 = 4.294.967.295$, para fazer a otimização não se usaria nem uma palavra completa de alocação, fazendo com que a dimensão, nos padrões para o Nelder-Mead, seja pequena, reforçando ainda mais a escolha desse método.

3.4. Considerações finais

Métodos otimizadores são necessários para garantir a melhor solução. Existem diversos métodos para diferentes tipos de problemas. Não é possível afirmar que um otimizador seja melhor que outro, e sim técnicas de otimização mais adequadas a um problema específico. Neste trabalho optou-se pelo Nelder-Mead pela sua proximidade com o problema a ser otimizado, isso não significa que os outros métodos de otimização não conseguiriam chegar no resultado ótimo.

4. Aprendizado de Máquina

O Aprendizado de Máquina (AM) é uma das ramificações da Inteligência Artificial (IA), onde foca-se em fazer o computador reconhecer padrões em bases de dados, devido à grande quantidade de informações e variações, neste trabalho, são apenas explanadas informações e técnicas que influenciaram no desenvolvimento. O aprendizado classifica-se em três categorias: Supervisionado; Não supervisionado; Reforço. (Kirk 2014)

4.1. Tipos de Aprendizado

O aprendizado supervisionado depende das entradas e saídas de dados, isto é, não é necessário um conhecimento prévio e algumas possíveis soluções para um determinado problema. Um mapeamento entre as entradas x e saídas y geram um conjunto de dados $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ conhecido como conjunto de treinamento, onde N é o número de elementos desse conjunto. Se o conjunto das saídas for composto por números reais tem-se uma regressão, mas se for um conjunto qualitativo tem-se um classificador (Russel 2011).

O aprendizado não supervisionado é utilizado quando não se possui as saídas do problema, logo a sua dependência é somente do conjunto de entrada $D = \{x_i\}_{i=1}^N$. Como para esse tipo de aprendizado não existe uma métrica direta para o cálculo de erro os problemas são menos bem-definidos (Murphy 2012).

Aprendizado por reforço é um ramo estudado em estatística, psicologia, neurociência e ciência da computação. A aprendizagem de máquina é um método de programação de agentes através do oferecimento de recompensas e punições, sem a necessidade de especificar como uma tarefa deve ser realizada. O formato de “tentativa e erro” é o explorado por agentes inteligentes uma vez que os ambientes, para esses casos, são dinâmicos (Sutton et al. 1998).

A Tabela 4.1 mostra as características de alguns algoritmos de aprendizado de máquina, vale lembrar que existem diversos outros além de variações dos aqui citados.

Tabela 4.1. Algoritmos e tipos de aprendizado de máquina

ALGORITMO	TIPO DE APRENDIZADO	CLASSE	APLICAÇÕES
K-Nearest Neighbor	Supervisionado	Baseado em exemplos	Problemas de distância
Naive Bayesian	Supervisionado	Probabilístico	Probabilidade é maior que zero para cada classe
Neural Networks	Supervisionado	Aproximação funcional não linear	Entradas binárias
(Kernel) Ridge Regression	Supervisionado	Regressão	Variáveis contínuas
Hidden Markov Models	Supervisionado ou não supervisionado	Markoviano	Séries temporais e dados sem memória
Clustering	Não supervisionado	Clustering	Agrupamento de informações
Filtragem	Não supervisionado	Feature transformation	Dados com muitas variáveis
Q-learning	Reforço	Atualização por experiência	Ambientes dinâmicos

Fonte: (KIRK, 2014)

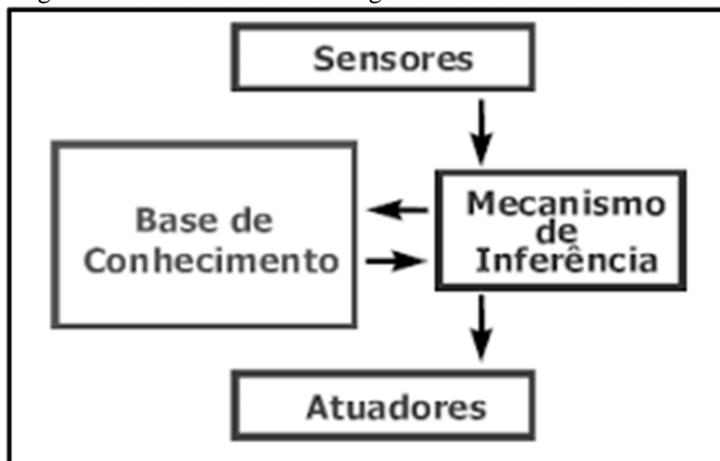
4.2. Agentes Baseados em Conhecimento (BC)

Agentes baseados em conhecimento funcionam utilizando modelos matemáticos baseados em Fatos e Regras ou mesmo utilizando o método dedutivo da lógica computacional.

Fatos são todos os conhecimentos inseridos no programa inicialmente, podem ser tanto quantitativo (equipamentos de monitoramento) quanto qualitativo (empírico). Todo o conhecimento reunido no programa é denominado Base de Dados.

Regras são encadeamentos lógicos dos fatos podendo gerar uma ação ou um novo fato dependendo do contexto. Computacionalmente as regras são da forma do SE-ENTÃO e podem ser compostas de múltiplos antecedentes por conjunções ou disjunções (NEGNEVITSKY, 2005). A Fig. 4.1 mostra um esquema básico de um Agente BC.

Fig. 4.1. Modelo básico de um Agente baseado em Conhecimento



As regras podem ser classificadas com fracas ou fortes. Regras ditas fracas normalmente envolvem uma grande incerteza dos fatos, caso contrário são ditas fortes. Para diferenciar as regras existe um peso associado a elas que está no intervalo de [0 1], um sendo o mais próximo da certeza dos fatos. Regras novas podem ser criadas a partir de um conjunto de regras antigas, esse processo é conhecido como inferência, normalmente usada para adaptação de ambientes.

4.3. Classificador K-Nearest Neighbors

O K-Nearest Neighbors (KNN) (K-vizinhos mais próximos) é um classificador onde o aprendizado é baseado em proximidades. O conjunto de treinamento é formado por vetores n-dimensionais e cada elemento deste conjunto representa um ponto no espaço n-dimensional (BISHOP, 2006).

A classe de um novo elemento que não pertence ao conjunto de treinamento é determinada pelos K elementos do conjunto de treinamento que estejam mais próximos do elemento desconhecido, ou seja, as menores distâncias. A classe atribuída ao novo elemento é a mesma dos K elementos mais frequentes.

As métricas mais comuns para determinação da distância entre dois pontos $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ e $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ do \mathbb{R}^n são:

Distância Euclidiana:

$$d(X, Y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (5.1)$$

Distância Manhattan:

$$d(X, Y) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + \dots + |x_n - y_n| \quad (5.2)$$

Distância Minkowski:

$$d(X, Y) = (|x_1 - y_1|^p + |x_2 - y_2|^p + \dots + |x_n - y_n|^p)^{1/p}, p \in \mathbb{N} \quad (5.3)$$

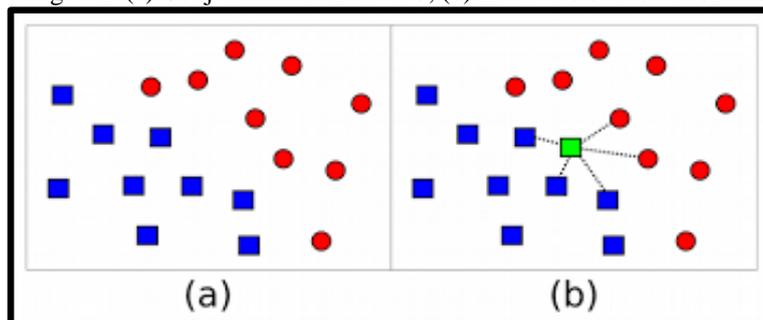
Esta distância é a generalização das duas anteriores sendo a distância M para $q = 1$, a E para $q = 2$ e quando $q = \infty$ a distância máxima dos módulos.

No caso de informações mais relevantes que outras é possível inserir ponderação, que é uma variação da distância Euclidiana:

$$d(X, Y) = \sqrt{\omega_1(x_1 - y_1)^2 + \omega_2(x_2 - y_2)^2 + \dots + \omega_n(x_n - y_n)^2} \quad (5.4)$$

A Fig. 4.2 ilustra o funcionamento da classificação de um novo elemento usando um conjunto de treinamento com dois atributos usando um KNN, o lado (b) mostra a associação do da quantidade de vizinhos para determinar a qual classe o novo elemento pertencerá.

Fig. 4.2. (a) Conjunto de treinamento; (b) Elemento sendo classificado pelo KNN



As principais vantagens do KNN são:

- Rápido treinamento;
- Capaz de aprender funções complexas;
- Informações do conjunto de treinamento nunca são perdidas.

O KNN possui algumas desvantagens tais como:

- Pode ser enganado por atributos irrelevantes;
- Às vezes não tem uma determinação robusta de métricas;

- Lento em realização de consultas.
- Maldição da Dimensionalidade, onde o KNN não consegue classificar um novo elemento devido a número muito grande de dimensões (tipos de atributos) de um conjunto de treinamento.

O tipo e a classificação dos atributos deste trabalho precisam ser feitos por um especialista do conhecimento caracterizando um aprendizado supervisionado. Neste trabalho foi utilizado uma variação do KNN para casos discretos, uma vez que todo o cenário foi discretizado e as medidas coletadas formam um conjunto de treinamento sendo possível caracterizar as diferentes perdas em cada vizinho novo do ambiente.

As métricas deste trabalho são bem definidas, já que se está trabalhando com potência recebida, e o número de atributos do conjunto de treinamento baixo (4 atributos), o programa desenvolvido não tem dois dos maiores possíveis problemas da utilização dos KNN.

4.4. Considerações finais

Neste capítulo foram abordados aspectos de aprendizado de máquina, dando ênfase em agentes baseados em conhecimento e no classificador KNN, pois os dois fazem parte do modelo proposto neste trabalho.

5. Metodologia de Aquisição e Tratamento dos dados

Este capítulo descreve uma campanha de medição da região metropolitana de Belém e outra dentro da Universidade Federal do Pará (UFPA) e a metodologia empregada na aquisição e tratamento dos dados.

A campanha na região metropolitana de Belém foi feita pra a faixa de UHF (Ultra High Frequency), e a campanha dentro da UFPA, nas frequências de 2100 MHz e 2600 MHz.

5.1. Seleções dos locais para medições em UHF

Os locais selecionados para as medições na região metropolitana de Belém foram distribuídos em radiais onde tinham trechos urbanos, suburbanos, vegetação e trechos sobre água doce (estes últimos não foram utilizados na versão final deste trabalho).

As medições foram feitas para duas emissoras de TV digital que possuem frequências de operação adjacentes e localizações próximas. A TX1 é a transmissora 1 (frequência central 521,14 MHz) e a TX2 é a transmissora 2 (frequência central 515,14 MHz) ambas com largura de banda de 6 MHz. Outras informações sobre as antenas transmissoras podem ser vistas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Informações das torres transmissoras UHF

Transmissora	Localização	Altura (m)	Faixa (MHz)	Potência de Operação (kW)	Potência Efetivamente Radiada (ERP) (kW)
TX1	01°27'43"S/ 48°29'28"O	114,58	518-524	6,00	52,15
TX2	01°27'12"S/ 48°29'22"O	125,30	512-518	10,00	61,79

Foram traçadas 14 radiais e distribuídos 84 pontos de medição entre elas, a origem das radiais se encontra no TX1 e como a transmissora não se encontra no centro geográfico de Belém cada radial ficou com uma quantidade de pontos distinta.

A Fig. 5.1 mostra uma imagem de satélite com os pontos distribuídos nas

radiais. Os pontos de medição estão representados pelos triângulos amarelos e o TX1 está representado pelo círculo vermelho.

Fig. 5.1. Disposição dos pontos medidos.



5.2. Equipamentos usados e medições na faixa UHF

Para a realização das medições foi utilizado uma antena dipolo da Anritsu MPP651A que capta as frequências entre 470 MHz e 1700 MHz, um analisador de espectro portátil *Site Master S332E* da Anritsu e um cabo coaxial RGC 213 com impedância característica de 50 Ohms e 3m de comprimento para conectar o analisador a antena. Foram utilizados também um laptop e flash *drives* para armazenamento dos dados coletados.

A Fig. 5.2 mostra os equipamentos usados, do lado direito o analisador e do lado esquerdo a antena dipolo.

Fig. 5.2 Site Master S332E e Antena dipolo Anritsu MPP651A



Durante as medições a antena foi colocada em um tripé de alumínio instalado no teto de um veículo de passeio para a realização das medidas. Durante a coleta de dados esperava-se o sinal estabilizar para poder diminuir o número de dados *outliers*. A Fig. 5.3 mostra os equipamentos instalados no carro para as medidas.

Fig. 5.3 Realização das medições em UHF.



5.3. Seleções dos locais para medições em 2100 MHz e 2600 MHz

As medições em 2100 MHz e 2600 MHz ocorreram nas dependências da Universidade Federal do Pará por dois motivos: 1) as antenas transmissoras dos sistemas móveis celulares irradiam com potências muito menores que as torres de TV digital; 2) Os locais escolhidos para a instalação de novas torre ser dentro da UFPA. A Tabela 5.2 mostra as principais características da antena TX1.

Tabela 5.2. Informações das antenas transmissoras celular

Transmissora	Localização	Altura (m)	Faixa (MHz)	Potência de Operação (w)	Ganho (Db)
TX1	01°27'51,3"S/ 48°26'56.6"O	40	2100 e 2600	40	15.4

Foram medidos 24 pontos a 1m e 2m de altura, da mesma forma que as medidas em UHF. Esperava-se a estabilização do sinal para início da coleta. Em cada ponto permanecia-se medindo por 2 minutos para cada uma das frequências, dando um total de 60 amostras por ponto. Depois de feito as medições em cada ponto, foi considerada a média das coletas para a potência recebida nesse ponto.

As medições foram feitas utilizando o programa *Cell Signal Monitor*®, que captura a potência recebida em intervalos de tempo configuráveis, este programa também identifica a rede que está conectada, monitora a velocidade de *Upload* e *Download*.

Os pontos de medições não foram distribuídos em radiais, uma vez que a área da UFPA é côncava e teriam pontos fora de suas dependências. Para captar o sinal celular foram utilizados 2 aparelhos celulares, modelo LG K10 conectados em redes diferentes (*Long Term Evolution-LTE e Enhanced Data Rates For GSM Evolution - EDGE*).

A Fig 5.5 mostra um mapa da UFPA, onde os marcadores em amarelo são os pontos medidos, e o ponto vermelho representa a torre celular, todas as informações referentes a torre estão disponíveis em (www.anatel.gov.br)

Fig. 5.5 Pontos medidos na UFPA, direção norte direta para esquerda



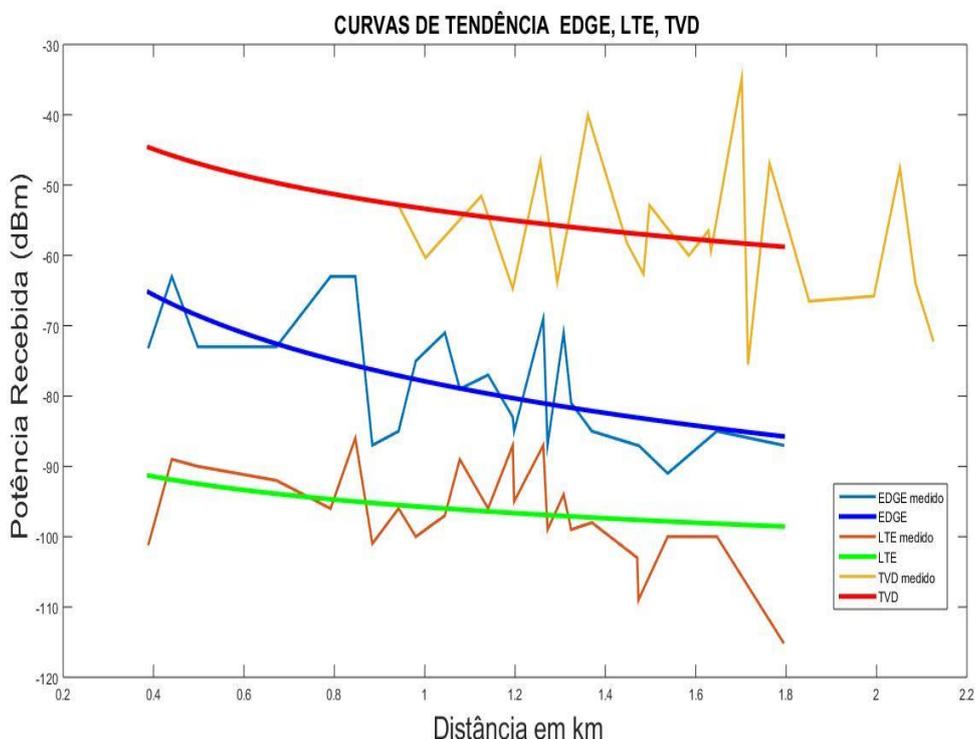
5.4. Tratamento dos dados e estudo das frequências utilizadas

O modelo proposto leva em consideração a frequência de transmissão. Um estudo do comportamento das frequências foi necessário a fim de se determinar um polinômio característico, para que o modelo pudesse atender frequências que não foram medidas.

Durante as medições algumas amostras se afastavam muito do desvio padrão, sendo considerados dados espúrios, logo esses dados foram removidos para que somente os dados representativos fossem utilizados.

Curvas de tendência de propagação para as 3 frequências medidas foram traçadas. O gráfico da Fig. 5.6 mostra as 3 curvas onde percebe-se uma degradação maior do sinal em frequências mais altas.

Fig. 5.6 Dados Medidos e curvas de tendencias.



Os dados medidos em UHF não contemplam distâncias menores que 900 m. Logo para essas distâncias tem-se apenas a tendência dos dados, e como a primeira campanha de medições foi para uma área muito maior que a segunda, os dados são mostrados além do limite das outras duas frequências.

A obtenção das curvas de tendência foi dada pela equação (4.1):

$$y = a + b \ln(x) \quad (4.1)$$

Onde:

y é a frequência;

x é a distância a um ponto de referência;

a e b são parâmetros a serem determinados. Estes parâmetros foram determinados pelo método dos mínimos quadrados lineares;

As mudanças de tecnologia dos últimos anos desencadearam um processo de reutilização de frequências que começou a ocorrer em todo o mundo uma vez que alguns serviços começaram a ser desativados. Esse processo é conhecido de *refarming*, e no Brasil esse processo ocorre devido a uma parte da população possuir celulares de fabricação mais antiga que operam em frequências distintas.

O processo de *refarming* no Brasil está sendo realizado nas frequências de 700 MHz e 1800 MHz, e para que a parcela da população que tem celulares antigos, tenha acesso aos serviços 4G, o *refarming* está sendo feito para a frequências de 700 MHz.

As possíveis frequências de *refarming* no Brasil foram simuladas a partir do polinômio gerado anteriormente. A obtenção das curvas de tendência em diferentes frequências foi utilizada a mesma lógica da equação (4.1). Com as 3 curvas anteriores pode-se fazer o seguinte sistema:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 + b_1 \ln(x) \\ y_2 = a_2 + b_2 \ln(x) \\ y_3 = a_3 + b_3 \ln(x) \end{cases} \quad (4.2)$$

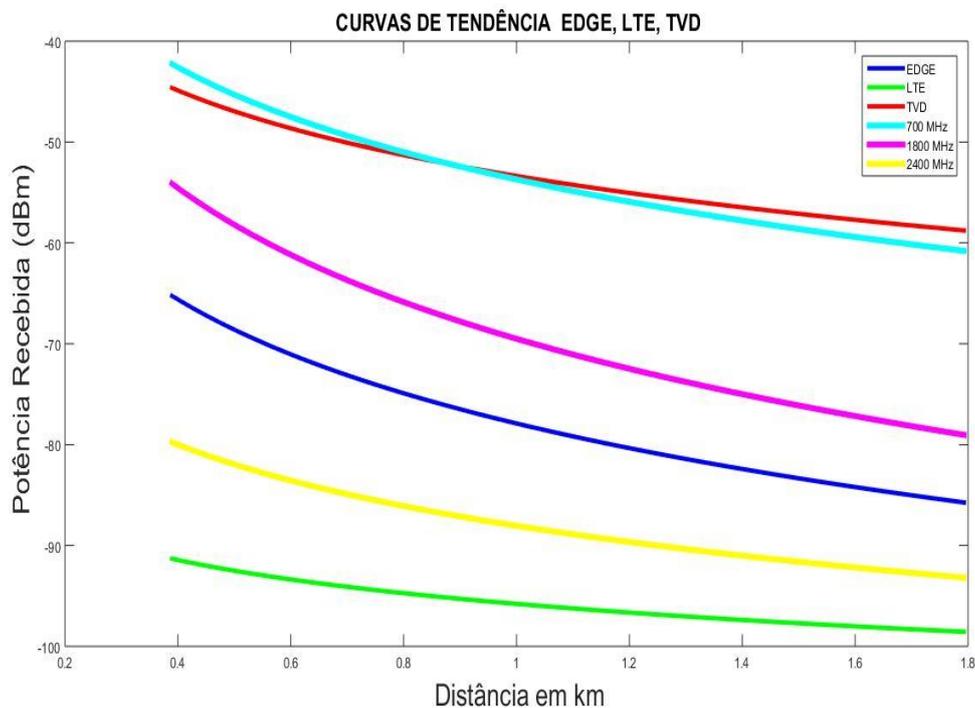
Os parâmetros a_1, a_2 e a_3 determinam uma parábola, bem como os parâmetros b_1, b_2 e b_3 . Assim dada uma frequência pode-se obter a sua curva de tendência calculando-se novo parâmetro a e novo parâmetro b , identificando-se assim a sua curva.

A Fig. 5.7 mostra as curvas para as frequências de 700 MHz, 1800 MHz e 2400 MHz junto com as curvas dos dados medidos para que se pudesse fazer uma avaliação do polinômio obtido.

O comportamento obtido para as três frequências está dentro do esperado. Na curva de 700 MHz é possível ver um desvanecimento próximo a de 521 MHz, mas o sinal degrada mais rapidamente. A degradação do sinal na frequência de 1800 Mhz também se comporta de maneira prevista uma vez que a curva está entre as curvas de

2100 MHz e 521 MHz. O teste de 2400 MHz foi feito para saber se a curva seria adaptada entre as curvas de 2100 MHz e 2600 MHz.

Fig. 5.7 Curvas de tendência de propagação.



5.5.Considerações Finais

Este capítulo descreve as duas campanhas de medições realizadas. Diferentes frequências foram analisadas para se fazer uma generalização do cálculo de frequências arbitrárias. Esse estudo permite que o modelo proposto se adeque a frequências diferentes das coletas nas campanhas de medições.

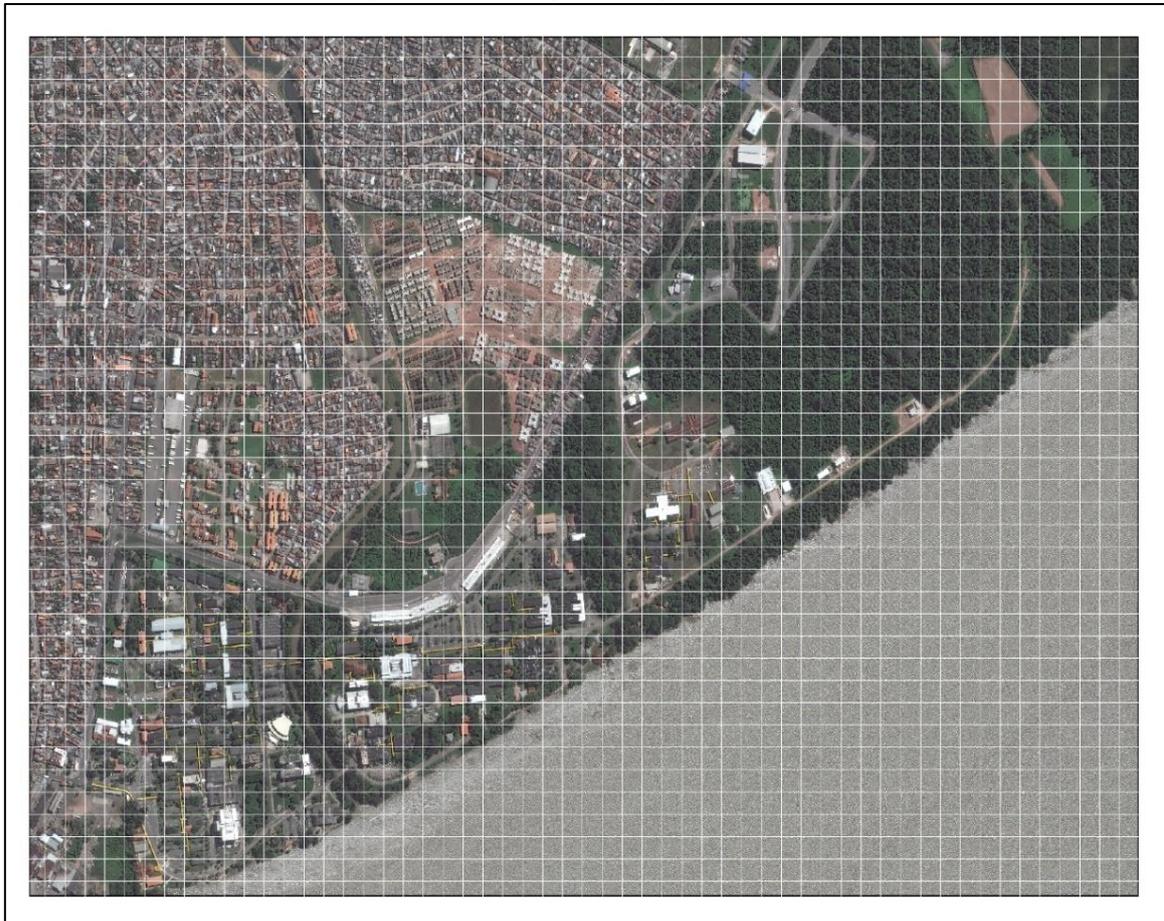
6. Modelo proposto

Neste capítulo é descrito em detalhes como foi desenvolvido o modelo de conhecimento proposto e um breve estudo comparativo. Este capítulo se divide em três partes, duas sobre o modelo e uma sobre o estudo comparativo.

6.1. Discretização do Ambiente e Classificação das áreas

As medições principais deste trabalho ocorreram na UFPA, seu ambiente mostra bem a realidade das cidades amazônicas, e neste trabalho dividiu-se o mapa da UFPA em quadrados de 50 m. A Fig. 6.1 mostra uma imagem aérea com as divisões feitas.

Fig. 6.1. Discretização do mapa da UFPA.

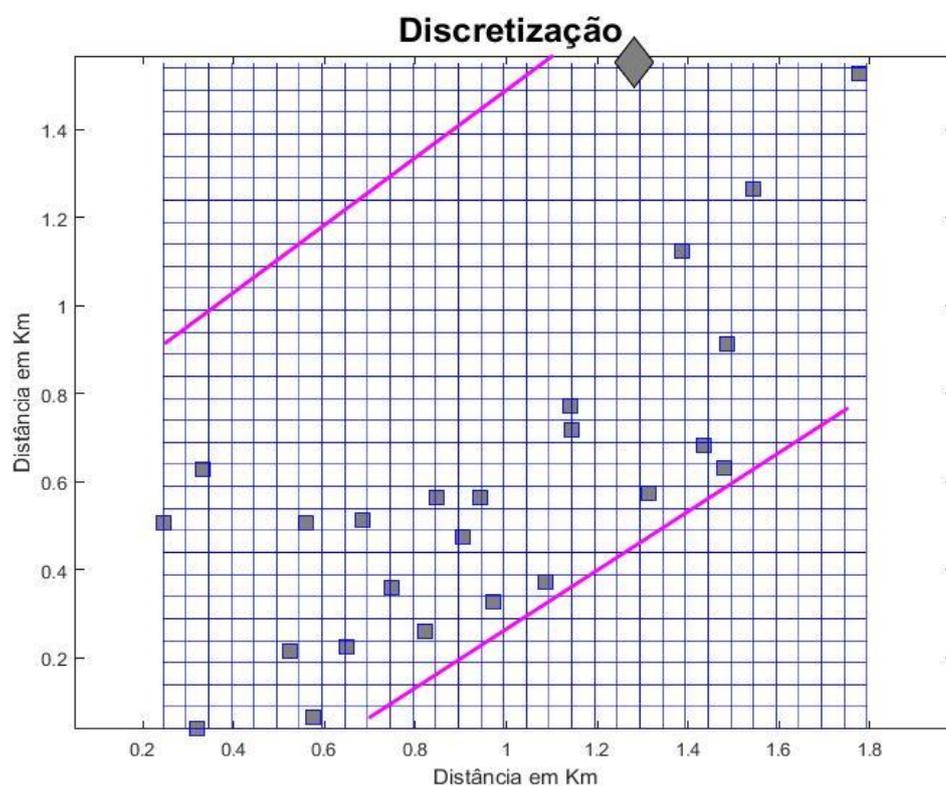


O tamanho do quadrado pode ser alterado, contudo se for grande a precisão pode piorar, mas se for pequeno pode acarretar um uma inviabilidade de classificar uma imensa quantidade de quadrados.

A imagem da Fig. 6.1 compreende bem mais que a UFPA, existem quadriculados que não são de interesse deste estudo, como por exemplo, a grande área da diagonal inferior direita que mostra o rio Guamá. Para reduzir o número de quadrados analisados desnecessariamente foram passadas duas diagonais de corte para que o esforço computacional fosse reduzido.

A Fig 6.2 mostra a informação lida pelo programa já com as diagonais de corte, a ERB a qual as medidas foram coletadas e também os pontos medidos, a partir dessa discretização o programa pode trabalhar de maneira matricial a posição dos pontos de medição e a ERB.

Fig. 6.2. Discretização para utilização do programa.



A área entre as diagonais possui um total de 652 quadrados, cada um dos quadrados recebe um atributo valorado de 1 a 4 dependendo do seu tipo. Os valores representam a seguinte informação:

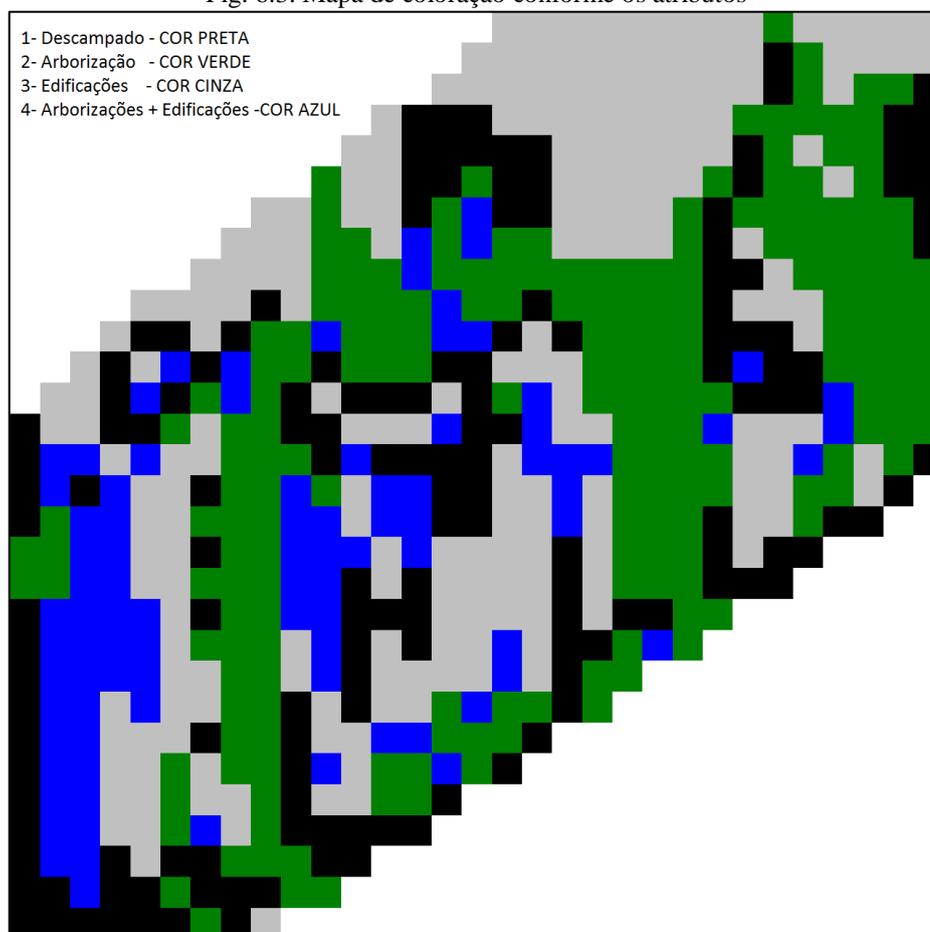
- 1- Descampado, geralmente ruas ou áreas de vegetação rasteira;
- 2- Arborização, caracterizado por áreas verdes;

- 3- Edificação, caracterizado pelos prédios e estruturas de alvenaria;
- 4- Arborização + Edificação, como o quadrado possui 50m de lado, existem quadrados que tem em principio mais de um atributo.

Os atributos listados podem ser alterados, o modelo de conhecimento permite a inserção de outras classificações. Colocar um grande número de atributos aumenta a incerteza dos calculado.

A Fig. 6.3 mostra mapa discretizado com uma cor para cada atributo: preto para descampado; verde para arborização; cinza para edificação; azul para arborização + edificação. Este mapa foi criado para ser feita uma comparação visual com o mapa original.

Fig. 6.3. Mapa de coloração conforme os atributos



A inserção dos valores dos atributos foi feita de maneira manual, isto é, na matriz de posição foram inseridos, nos 652 quadrados, um a um. A escolha dos atributos foi feita de maneira visual, logo é possível que diferentes pessoas analisem um quadrado de diferentes formas, contudo não deve variar muito do resultado aqui

mostrado.

6.2. Contagem e Classificação

O cálculo da potência recebida em cada ponto depende do somatório das perdas em cada quadrado. Cada ponto de medida está a diferentes distâncias da ERB, logo é preciso identificar quantos e quais tipos de quadrados foram atravessados.

A função de perda ou potência recebida depende dos pontos atravessados e conseqüentemente da distância de forma implícita. Assim a função pode ser dada pela fórmula:

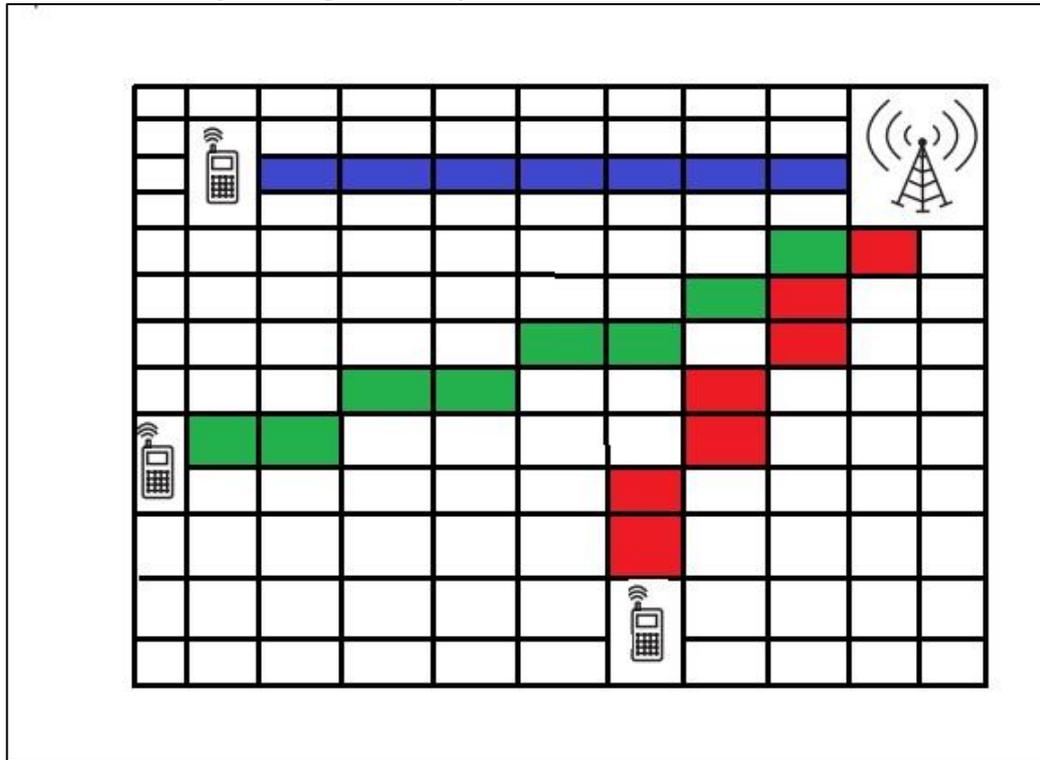
$$Perdas_{pontoP} = F\left(\sum PerdaPontosAtravessados\ até\ P\right) \quad (6.1)$$

Neste trabalho a função utilizada foi a função identidade. O modelo pode ser aprimorado utilizando uma outra função que pode depender do ambiente, ou ainda da distância.

A distância euclidiana foi usada para saber a distância da ERB aos pontos, contudo o cenário é discreto, logo os quadrados atravessados pela reta traçada são os considerados para o cálculo da perda. A reta formada pelos quadrados selecionados pode ficar com um serrilhado (*Aliasing*), um problema comum na Computação Gráfica, mas o presente trabalho não tem intenção de resolver esse problema, e sim contar quantos e quais tipos de quadrados o sinal atravessou.

Na Fig. 6.4 uma ERB foi posicionada e 3 receptores foram colocados em pontos que possam ilustrar a contagem dos quadrados além de mostrar como a “reta” composta por quadrados ficaria. Cada cor indica o sinal para diferentes receptores e não o tipo de quadrado atravessado.

Fig. 6.4. Mapa de coloração conforme os atributos



Um sistema foi gerado usando os dados das medidas e a quantidade de cada quadrado utilizado, como são 24 pontos medidos tem-se 24 equações. A equação do sistema é mostrada em (6.1):

$$q_{i,1}\alpha_1 + q_{i,2}\alpha_2 + q_{i,3}\alpha_3 + q_{i,4}\alpha_4 = b_i, \quad i = 1..24 \quad (6.1)$$

Onde:

α_j : perdas em cada tipo de quadrado a serem calculadas;

$q_{i,j}$: quantidade de cada tipo j de quadrado atravessado na equação i ;

b_i : potência recebida no ponto i .

As perdas são calculadas a partir da potência de referência próximas a ERB.

O sistema apresentado é incompatível e de posto completo, e uma solução de mínimos quadrados lineares pode ser encontrada numericamente. A solução formal é dada por:

$$\begin{aligned}
 A^t \times (A\alpha &= b) \\
 A^t A\alpha &= A^t b \\
 \alpha &= (A^t A)^{-1} \times A^t b
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Os cálculos matriciais são computacionalmente muito custosos, o Matlab® faz o cálculo de maneira eficiente usando rotações de Givens-Householder. A Tabela 6.1 mostra os resultados calculados para cada α :

Tabela 6.1. Soluções por mínimos quadrados.

Tipo de quadrado	Perda intrínseca EDGE (dB)	Perda intrínseca LTE (dB)
α_1: Descampado	-0,49	-0.80
α_2: Arborização	-0,71	-1.31
α_3: Edificação	-0,61	-1.25
α_4: Arborização + Edificação	-0,17	-0.26

Os resultados mostram a realidade de um ambiente com arborização densa. A perda em arborização foi a mais alta como esperado, seguido de edificação e descampado.

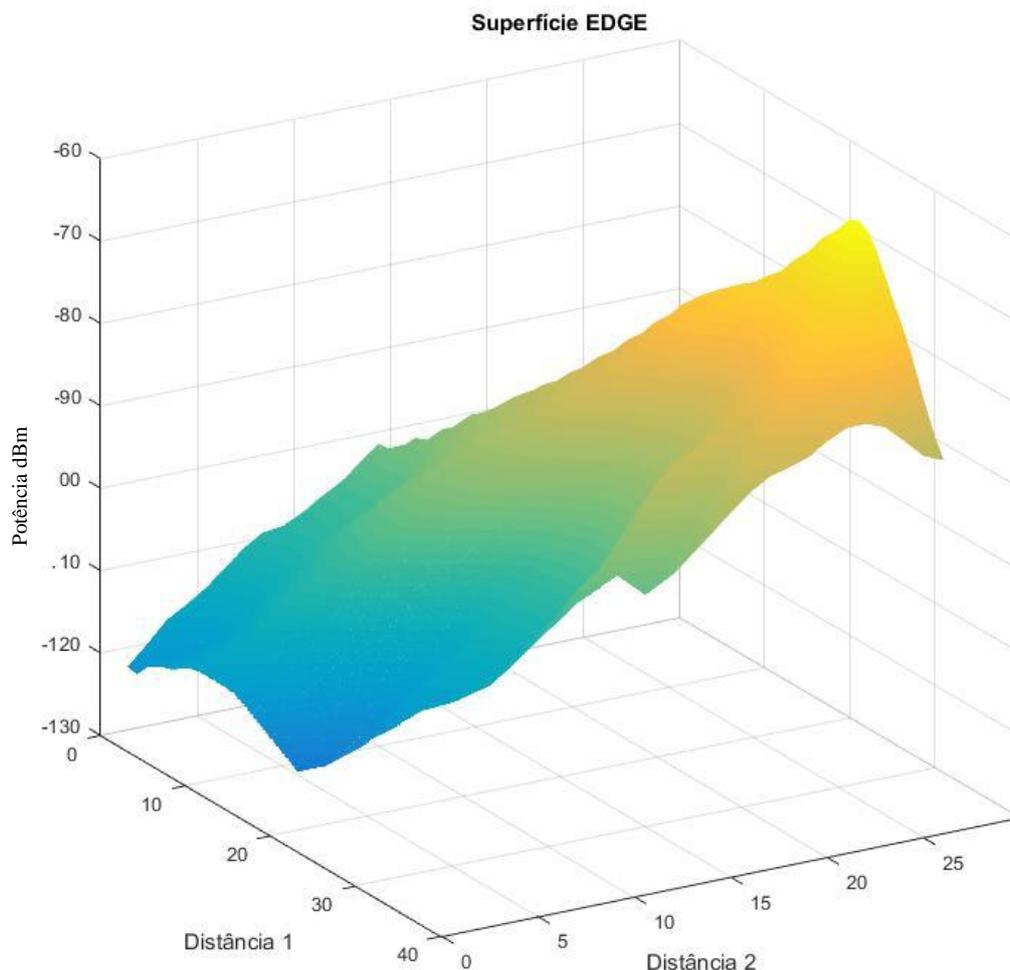
O valor encontrado para edificação + arborização foi o menor de todos, isso pode ocorrer por diversos motivos como: a quantidade de quadrados classificados não ser o suficiente; quantidade de medidas nas proximidades desses quadrados serem insuficientes; o sinal passar entre a edificação e a arborização sem atravessar esses obstáculos.

O código foi feito para permitir uma flexibilidade para atender diferentes cenários para o planejamento de uma rede, sendo possível *setar* os seguintes atributos: altura de transmissão, altura de recepção, frequência de operação, potência inicial, quantidade de locais candidatos e localização dos mesmos (otimização).

Todas as soluções encontradas estão de acordo com as medidas coletadas, e a Fig. 6.5 mostra a superfície do sinal propagado no mapa de estudo para a frequência de

2100 MHz.

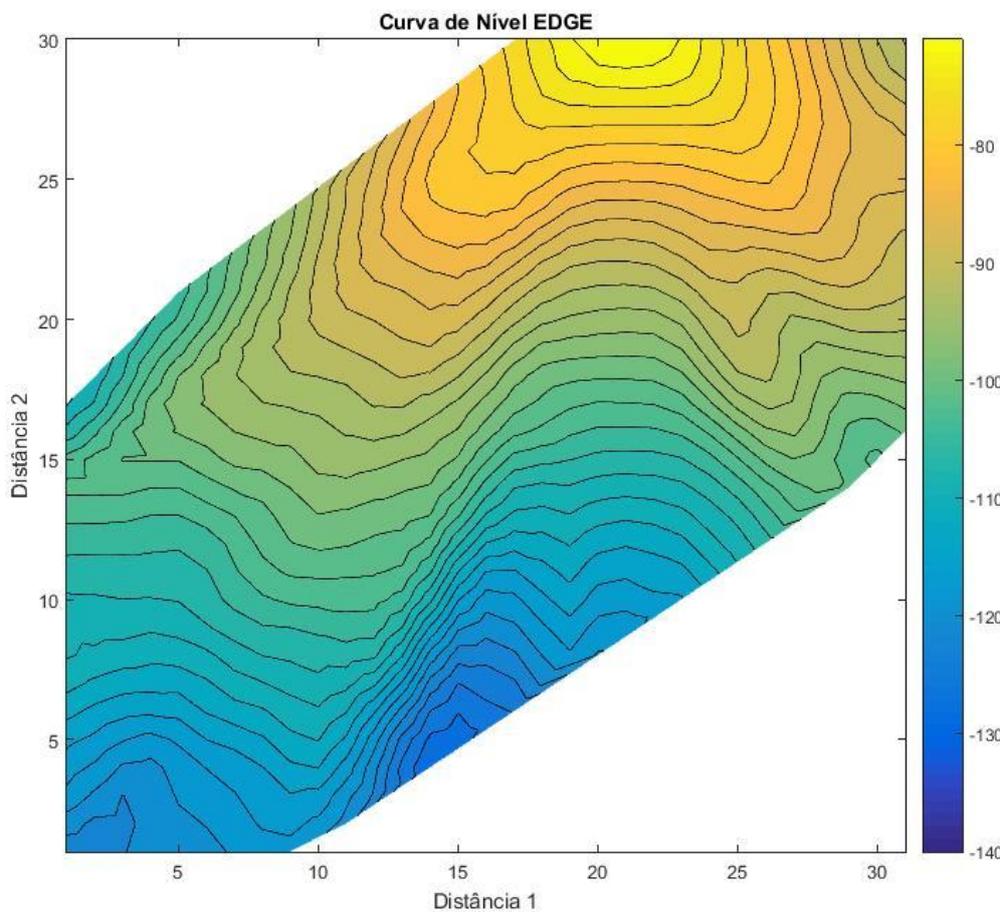
Fig. 6.5. Superfície de potência recebida EDGE



O enfraquecimento do sinal recebido é evidente com o afastamento da ERB. Pontos próximos a ERB estão representados em amarelo. As distancias no gráfico se referem à quantidade de quadrados de lado 50m contidos no mapa da UFPA.

A Fig.6.6 mostra as curvas de nível com a mesma visibilidade dos mapas anteriores. Nas proximidades do ponto (20,20) existe uma grande área arborizada dentro da UFPA, o que evidencia a perda maior que nessa região. Logo existem regiões mais afastadas com uma potência recebida maior do que as áreas da coluna do ponto (20,20).

Fig. 6.6. Curvas de Nível EDGE



A superfície e as curvas de nível também foram geradas para o caso da frequência de 2600 MHz. A Fig. 6.7 e 6.8 mostram esses gráficos respectivamente.

Como o modelo faz uma predição do sinal em cada ponto, não se leva em consideração as sensibilidades das antenas de diferentes aparelhos, então existem pontos na Fig. 6.7 afastados que a recepção do sinal chegou a -145 dBm, que na prática a maioria dos celulares já não possuem conectividade nesse nível de potência

Fig. 6.7. Superfície LTE

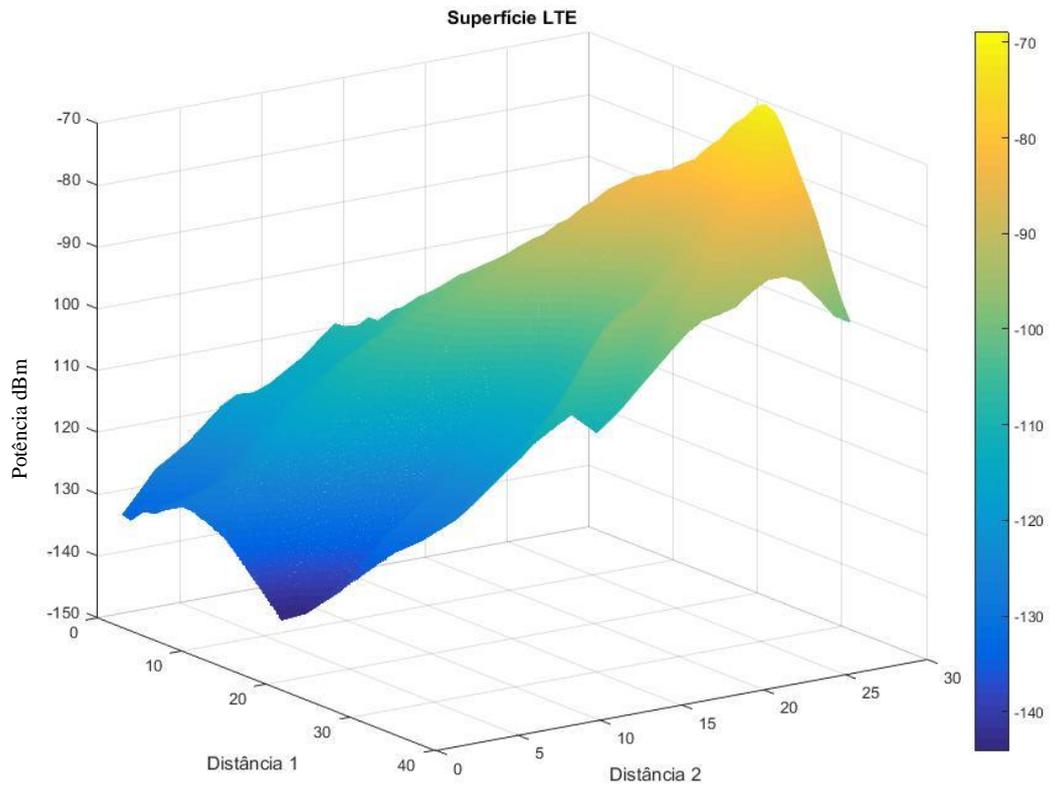
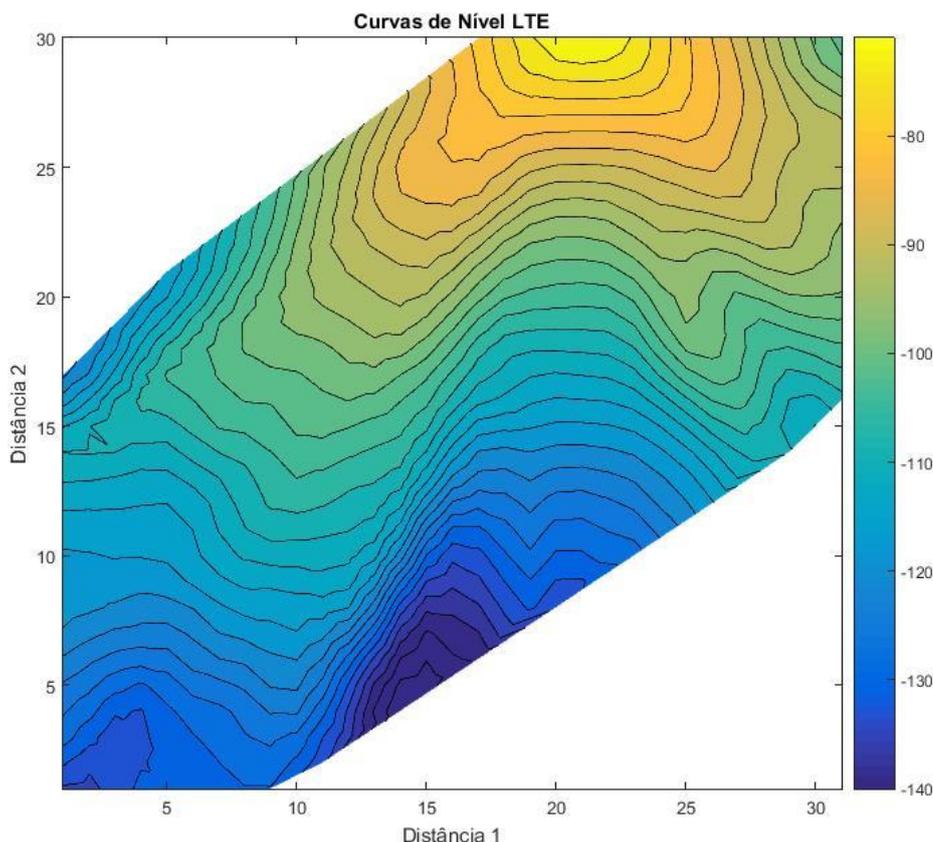


Fig. 6.8. Curvas de Nível LTE



Percebe-se um comportamento parecido com a frequência de 2100 MHz, contudo as frequências mais altas sofrem um desvanecimento mais rápido, esse fenômeno é percebido nas tonalidades dos gráficos são mais escuras que os anteriores.

6.2. Breve Estudo comparativo

Nesta seção é mostrado os resultados comparados com o modelo da literatura, uma variação do modelo de Okumura, destacando o erro médio e o erro médio quadrático. O erro RMS não pode ser calculado já que suas comparações precisam ser necessariamente vetoriais.

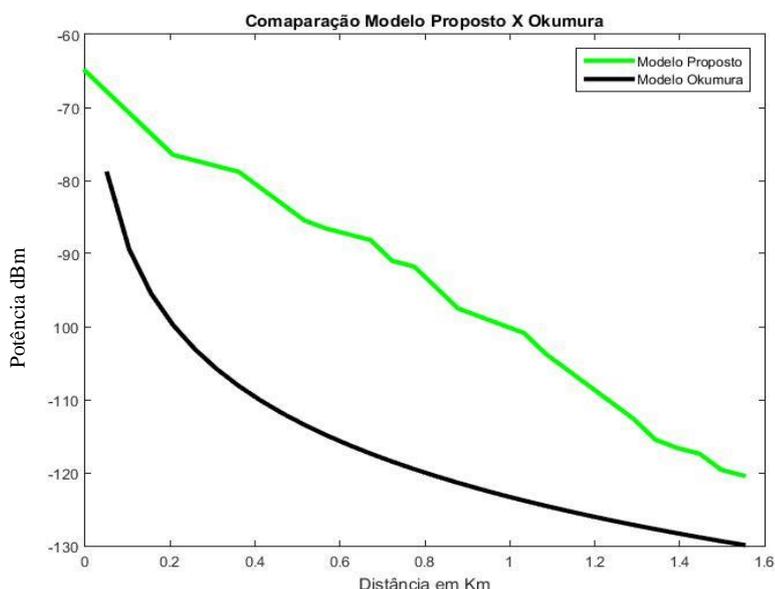
A comparação do modelo proposto não pode ser direta pois o modelo é em área diferente dos modelos clássicos de perda que levam basicamente em consideração a distância.

Os erros médios para 2100 MHz e 2600 MHz foram 3,54 e 4,40 respectivamente. O erro para o modelo de Okumura foi de 20,89. O erro para o modelo

proposto foi menor, como esperado, uma vez que o modelo de Okumura foi feito para um ambiente muito diferente dos ambientes amazônicos.

As curvas de perda de propagação para comparação dos modelos são mostrada na Fig. 6.9. Para gerar essas curvas foi selecionado um ponto específico no mapa para que o modelo proposto pudesse ser visto de maneira aproximada ao modelo Okumura

Fig.6.9. Comparação de modelos



O modelo proposto possui um decaimento, mas não em formato de curva já que as perdas são calculadas quadrado a quadrado, dando um aspecto de dentilhado.

Soluções por mínimos quadrados lineares geram resíduos, se os resíduos forem muito grandes a representatividade dos pesos calculados é comprometida. Os erros médios nos resíduos para 2100 MHz e 2600 MHz foi 4,18 e 5,66 respectivamente. Estes resultados são excelentes, pois garantem que os pesos calculados são coerentes.

7. Cenário otimizado

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos da otimização da posição das ERB para maximizar a potência recebida em todos os pontos do mapa. Foram feitos para as frequências da segunda campanha de medições, 2100 MHz e 2600MHz, além da frequências de *refarming* de 700 MHz .

Todas as frequências utilizadas foram aplicadas em dois cenários: o primeiro contendo duas ERB dentro da UFPA; o segundo contendo 3 ERB, sendo duas dentro da UFPA e a última sendo a mesma ERB da segunda campanha realizada.

Os cenários foram escolhidos para mostrar que a otimização pode ser feita pra um projeto cuja cobertura no local ainda não exista, e outro que pode considerar torres pré-existentes e assim espalhar mais a cobertura.

7.1. Critérios de Otimização

Os critérios de otimização para cada cenário escolhido são diferentes. A escolha do posicionamento ótimo depende diretamente dos locais candidatos, e tipos de quadrados atravessados.

O cenário de duas torres pode ser interpretado como um projeto novo de cobertura. O critério para a otimização foi a potência media recebida em todos os pontos serem a maior possível. Esse critério posiciona e maximiza a área de cobertura uma vez que não existem outros sinais.

O mesmo critério foi aplicado para três torres, contudo o cenário otimiza o posicionamento, mas não necessariamente garante a máxima cobertura, isso se deve a torre fixa e, para que a máxima área de cobertura seja necessariamente encontrada, o problema passaria a ser otimização multiobjectivo, que foge ao escopo dessa tese.

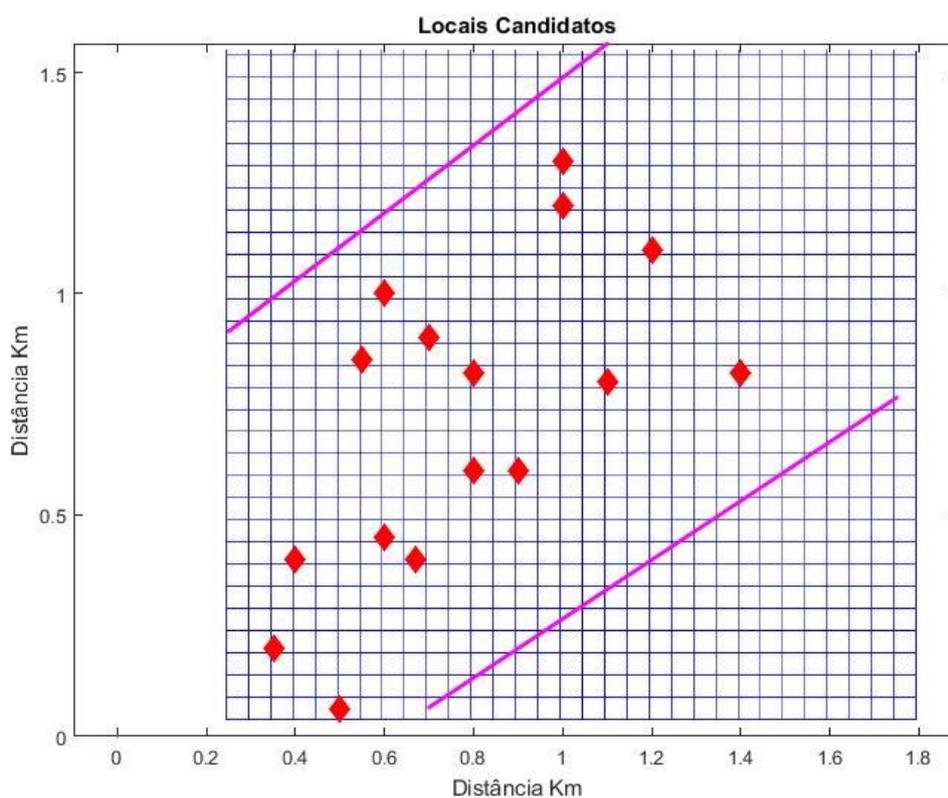
7.2. Escolha dos locais candidatos.

Para ambos os cenários forma escolhidos 15 locais candidatos para receber as torres. No programa desenvolvido pode-se colocar quantos e em quaisquer lugares o projetista da rede quiser. Afim de se aproximar de um projeto real, optou-se por limitar

o numero de locais candidatos, uma vez que um projeto de uma torre depende de diversos fatores como: espaço físico para colocar as torres, pontos de energia e internet, limitando assim o número de locais possíveis para a instalação das mesmas.

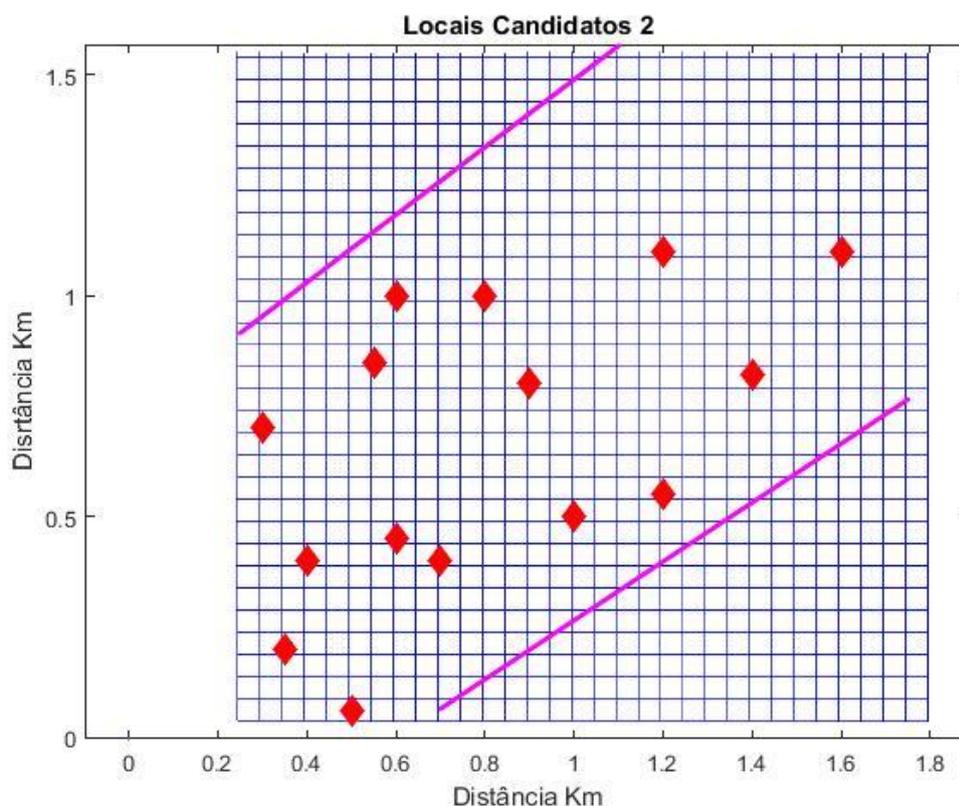
A Fig 7.1 mostra os locais candidatos para 2100 MHz e 2600MHz, destacados em vermelho, no mapa lógico de quadrados. Diferentes locais candidatos foram selecionados para o caso de 700 MHz pois foi feito uma aproximação do sistema implantado para *small cell*, a Fig 7.2 mostra os locais candidatos para 700 MHz.

Fig.7.1 Locais candidatos



Não houve preocupação com o posicionamento no mapa real devido as ERBs podem ser de alturas diferentes, no caso para *small cells* as antenas podem ser colocadas em cima de prédios ou em formato de postes nas ruas, tornando possíveis suas instalações nesses lugares.

Fig.7.2. Locais Candidatos para 700MHz



Os locais para 700 MHz foram mudados para testar o programa otimizador e garantir a melhor escolha mesmo com candidatos diferentes.

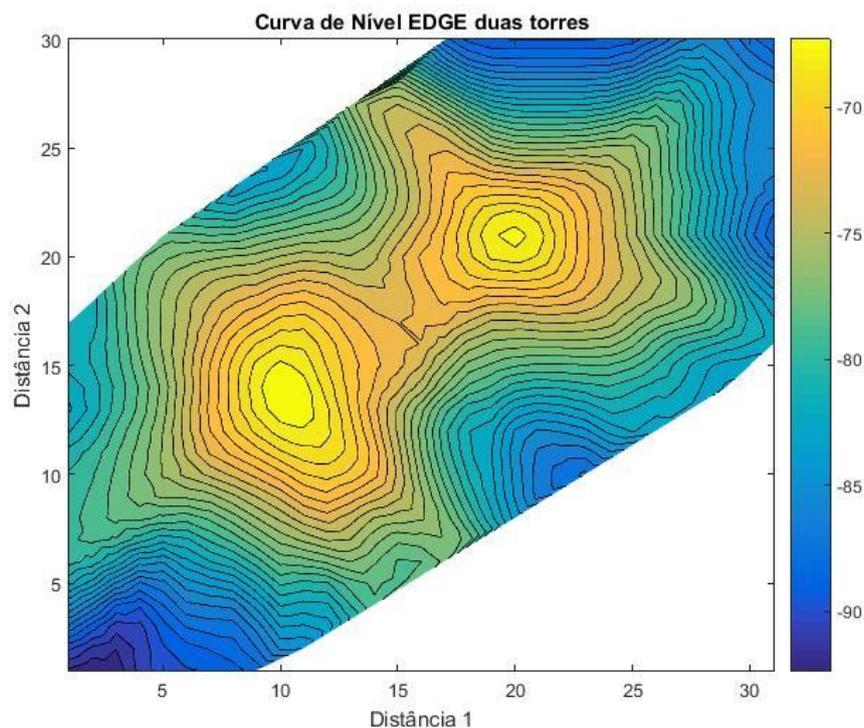
7.3 Mapas de potência recebidas

Foram gerados os mapas de potência recebida para 4 frequências, 2100 MHz, 2600 MHz, que foram frequências coletadas nas campanhas de medições, e 700 MHz e para representar as frequências de *refarming*.

7.3.1 Mapas para 2100 MHz

Os mapas obtidos são para os dois cenários. A otimização é mais facilmente obtida nos casos de 2100 MHz e 2600 MHz devido serem as frequências das campanhas de medições. A Fig. 7.3 mostra o resultado da otimização para o caso de duas torres.

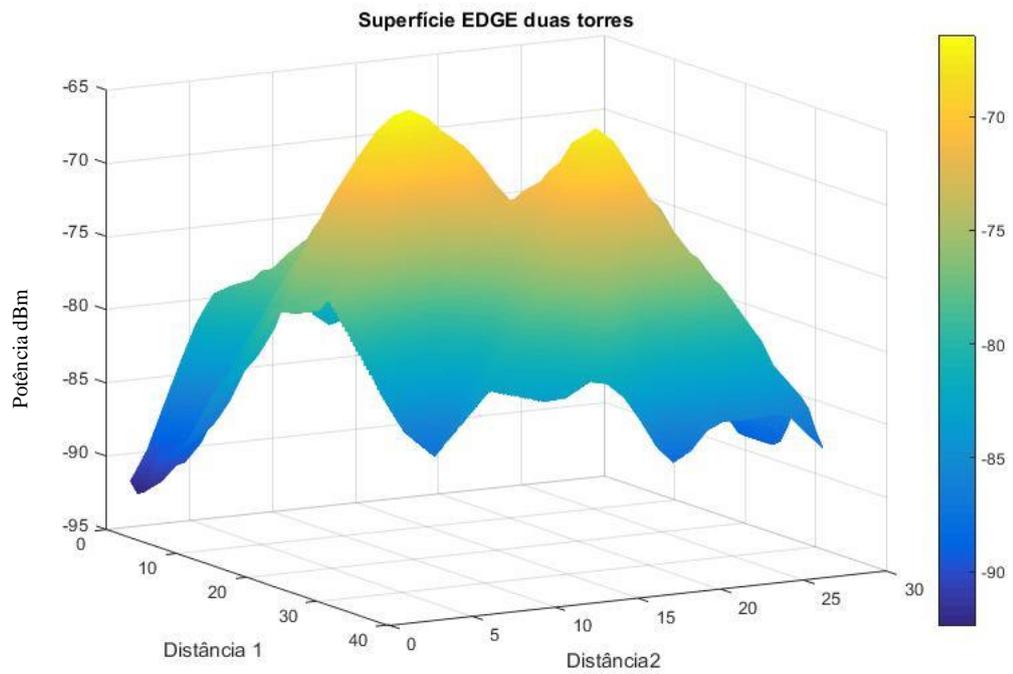
Fig. 7.3 Otimização EDGE duas Torres



A Centralização das torres era prevista, mas não necessariamente seriam os melhores locais, pois o modelo leva em consideração as perdas em por diferentes atributos. A proximidade de um conjunto de quadrados com as maiores perdas é natural, pois se o posicionamento for longe desse conjunto, o sinal atravessará eles como conjunto aumentado a perda.

A Fig. 7.4 mostra a superfície gerada pelas duas torres.

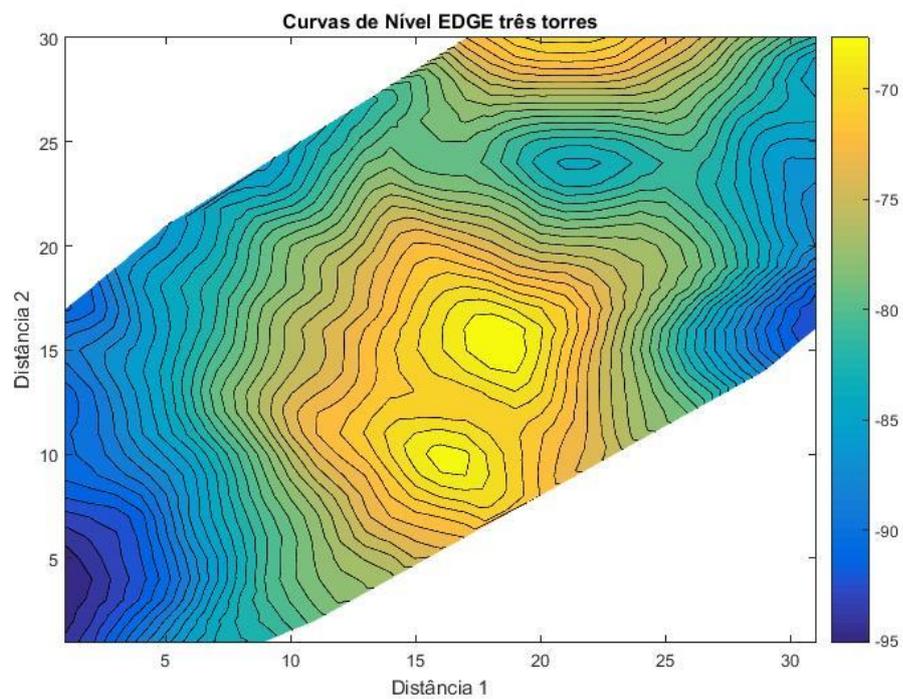
A Fig 7.4 Superfície EDGE duas torres.



Os picos em amarelo representam as localizações ótimas das torres. Os posicionamentos obtidos mostram que é possível ter uma potência recebida maior que -95 dB para a maioria dos pontos

A Fig. 7.5 mostra o posicionamento para o caso de três torres.

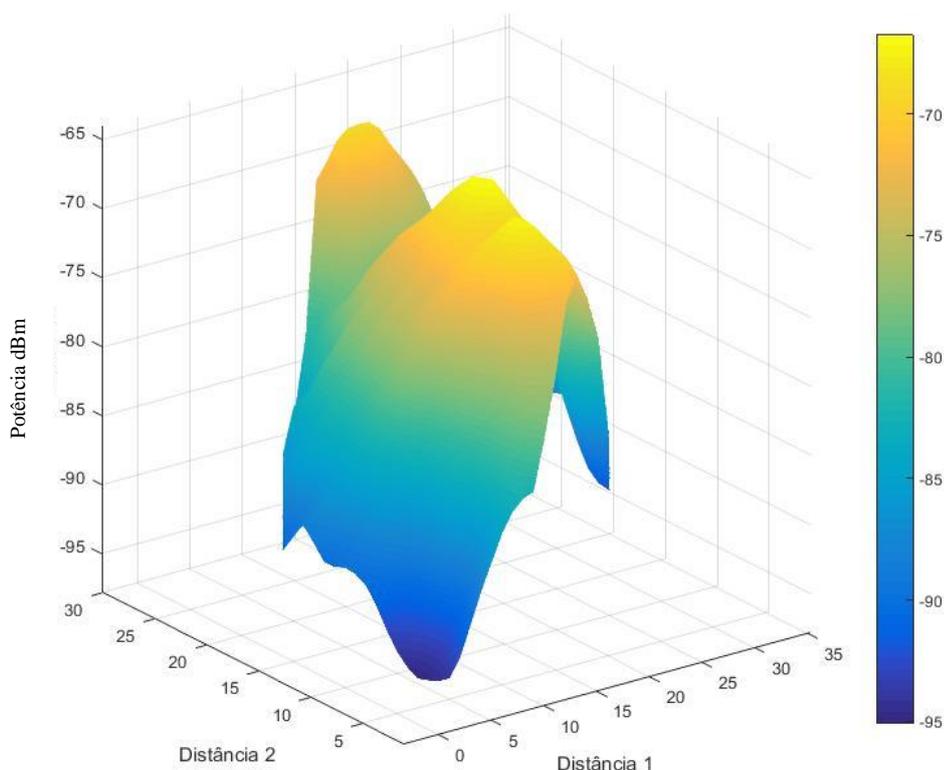
Fig. 7.5 Otimização EDGE 3 torres



Neste caso as torres não ficaram centralizadas, isso se deve a presença da terceira torre deslocando as outras duas. Como não existe um caráter de prioridade de atendimento a otimização não posicionou a parte nas áreas superiores, o que atenderia também um público fora da UFPA.

A superfície da otimização com as três torres para 2100 MHz é mostrada na Fig.7.6

Fig. 7.6 Superfície EDGE três torres

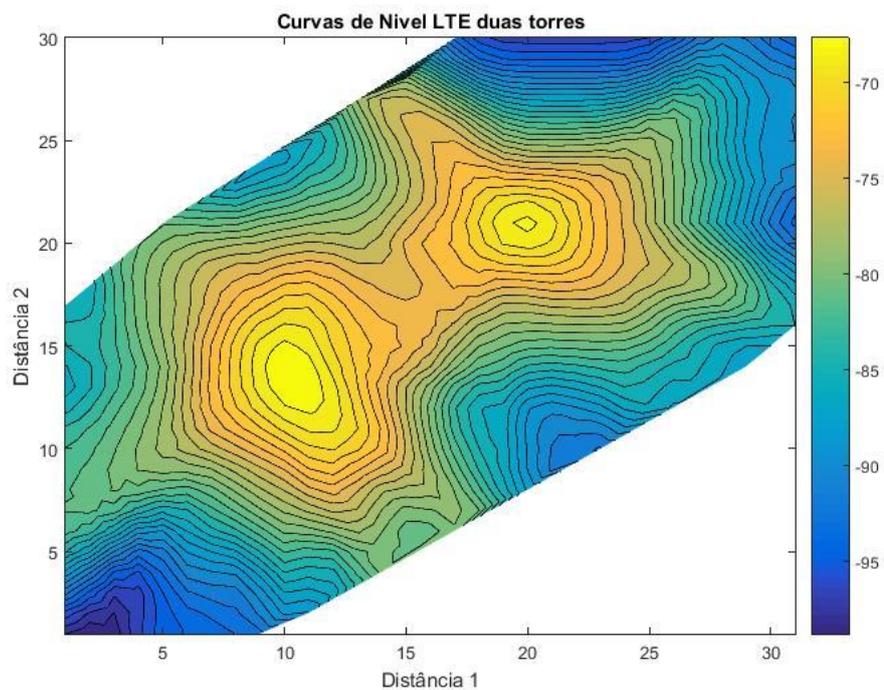


A superfície mostra para garantir que a maioria dos pontos receba uma potência adequada, alguns poucos na ponta acabam ficando com valores de potencia mais baixo.

7.3.2 Mapas para 2600 MHz

Os mesmos mapas gerados na seção anterior foram gerados agora para a frequência de 2600 MHz. A Fig.7.7 mostra as curvas de nível para o caso de duas torres.

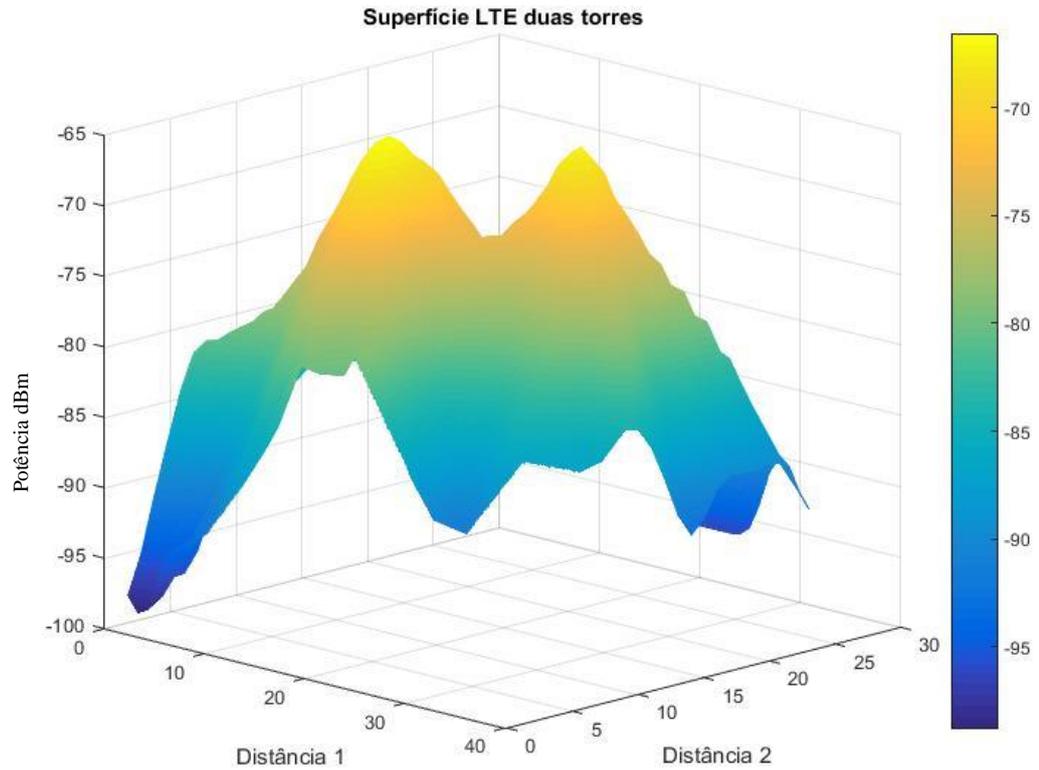
Fig. 7.7. Otimização LTE duas torres.



O mapa obtido tem o mesmo posicionamento das torres que o caso anterior, mas com o desvanecimento do sinal é maior pra frequências mais altas a potência recebida acaba sendo menor que o caso de 2100.

A Fig. 7.8 mostra a superfície gerada para o caso de duas torres.

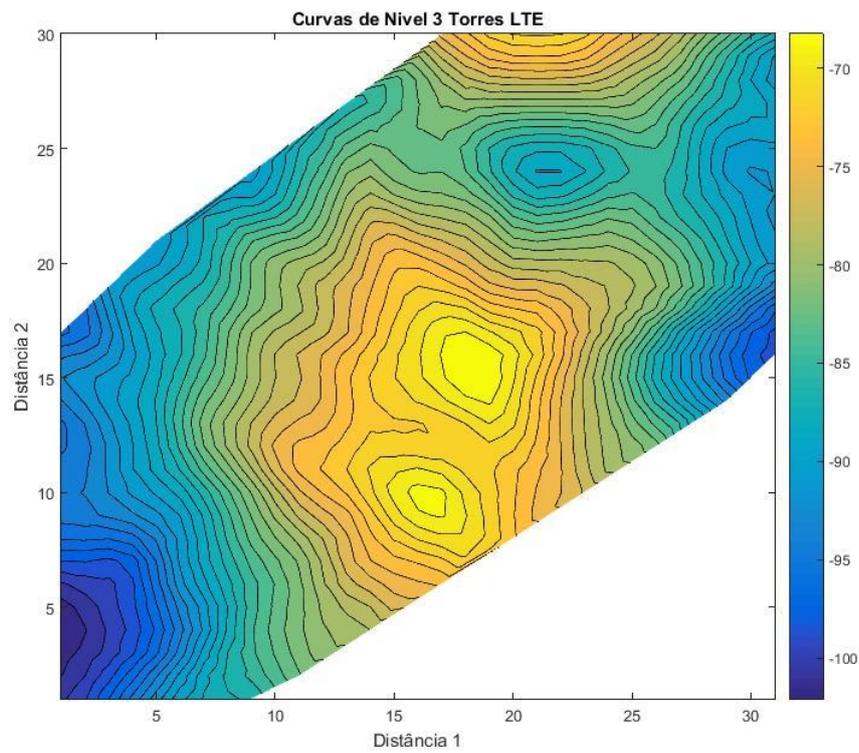
Fig. 7.8 Superfície LTE duas torres



Na superfície identifica-se que a maior parte dos pontos está com uma potência recebida entre -80 e -95 dB, e alguns poucos pontos abaixo de -100dB

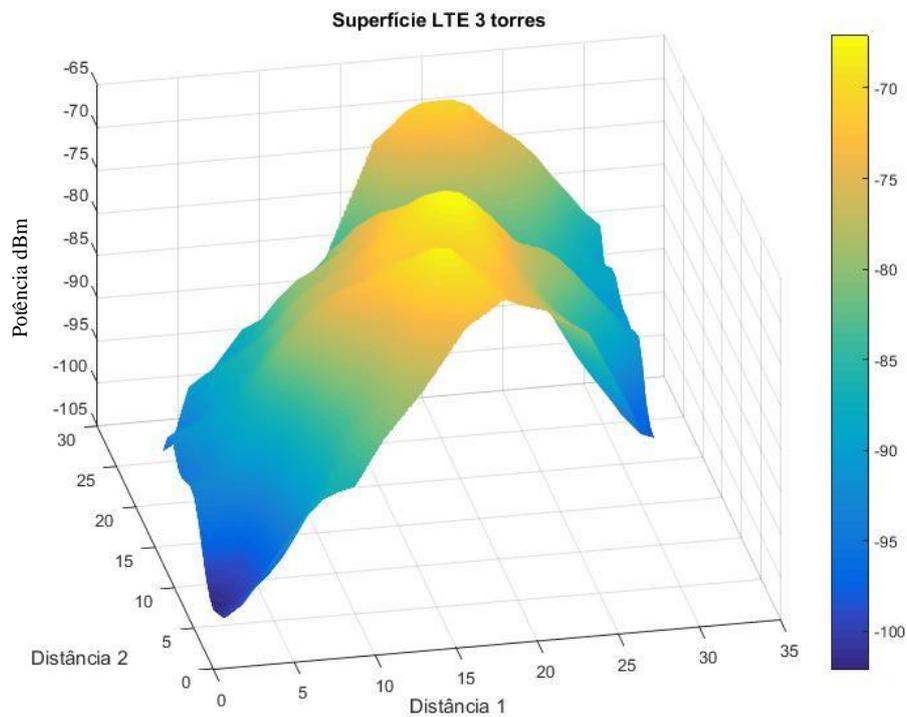
A Fig. 7.9 mostra o resultado do posicionamento para o caso de três torres.

Fig.7.9 Otimização LTE três torres.



A pequena ilha de pior recepção entre a torre de fora da UPFA e as outras duas é a região que há um bosque denso. A Fig 7.10 mostra a superfície para o caso de 3 torres.

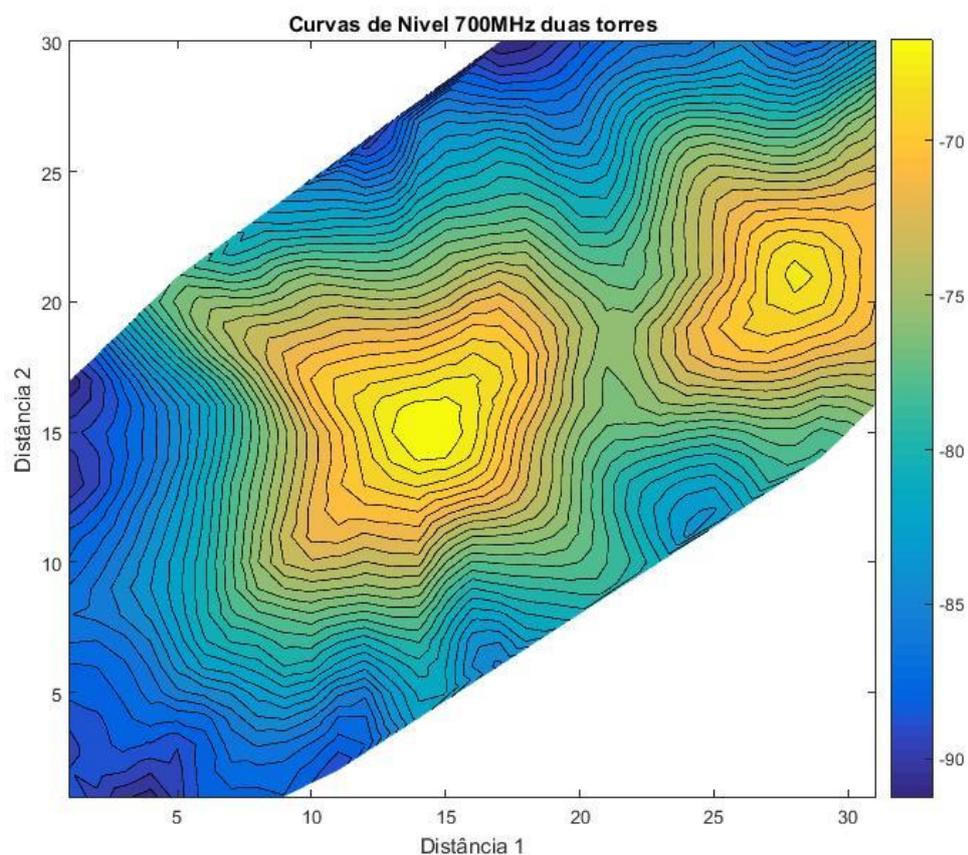
Fig.7.10. Superfície LTE três torres



7.3.3. Mapas para 700 MHz

No caso de 700 MHz somente a configuração com duas torres foi feita uma vez a torre fora da UFPA não utiliza essa frequência logo não poderia ser utilizado na prática. A Fig.7.11 mostra as curvas de nível.

Fig. 7.11. Otimização 700 MHz duas torres



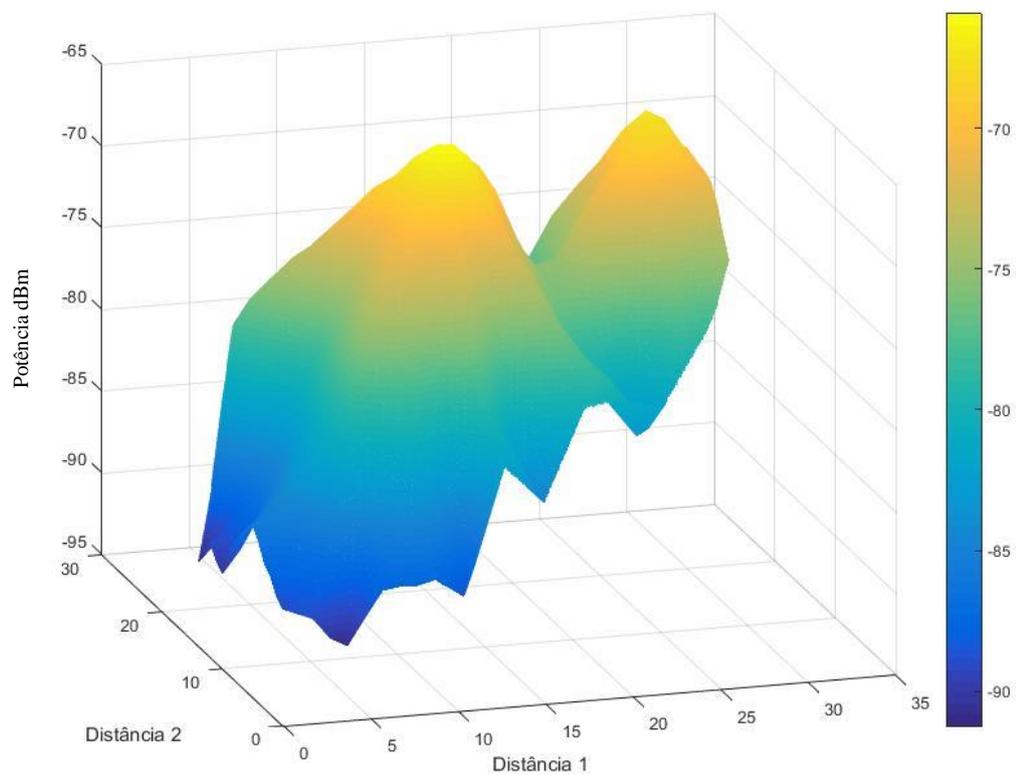
O posicionamento das torres focou diferente dos demais casos porque os locais candidatos foram mudados, mas percebe-se que mesmo com posições diferentes, frequências distintas, e neste caso, que se aproximou de um *small cell*, uma potência irradiada menos que as demais. Os valores para as perdas em cada tipo de quadrado foram calculados para o caso de 700 MHz e são mostrados na Tabela 7.1

7.1 Solução de mínimos quadrados para 700MHz

Tipo de quadrado	Perda intrínseca 700 MHz(dB)
α_1 : Descampado	-0,68
α_2 : Arborização	-1.10
α_3 : Edificação	-1.05
α_4 : Arborização + Edificação	-0,28

A Fig 7.12 mostra a superfície para 700MHz

Fig.7.12 Superfície 700MHz duas torres



A superfície mostra que a maioria dos pontos está com uma potência recebida mais que -85 dB. Para melhorar a confiabilidade dos resultados obtidos para 700 MHz o ideal eram ter mediadas reais para se usar como conjunto de treinamento.

8. Conclusão

O presente trabalho apresentou um modelo de rádio propagação que faz uso do classificador KNN de forma discretizada. Campanhas de medições foram realizadas em frequências distintas para que o modelo pudesse ser mais flexibilizado no uso das frequências. Além disso foi feita uma otimização para diferentes cenários utilizando o modelo proposto.

O modelo proposto apresenta vários aspectos inovadores. O primeiro é o caráter híbrido do modelo, utilizando aprendizado supervisionado de máquina na abordagem teórica/computacional, possibilitando tratar diferentes atributos de um ambiente.

Outro aspecto inovador é a inclusão de uma generalização do uso das frequências a partir de um polinômio gerado por uma parábola, e apesar do modelo proposto não possuir uma formulação matemática definida, o algoritmo desenvolvido faz uso de muitas formulações em seu desenvolvimento.

Os resultados do modelo proposto mostram-se adequado a predição da potência recebida em cada ponto do cenário, diferenciando-se da maioria dos modelos de propagação que tem uma característica ponto a ponto.

Aspectos do ambiente foram inseridos no modelo pelo classificador KNN, onde os atributos escolhidos representam um de uma típica cidade amazônica. Como a inserção de atributos depende de um especialista do conhecimento (aprendizado supervisionado), o modelo pode ser adaptado a outros tipos de ambientes, desde que se possa construir um conjunto de treinamento mínimo.

A otimização do posicionamento das torres mostrou que o modelo pode ser utilizado em planejamentos de áreas e cobertura, uma vez que foi possível prever, em área, a potência recebida. Os locais candidatos podem ter uma maior flexibilidade se forem consideradas modelos de *small cell*, que tem formato de um poste e altura de 15m, que baixaria o custo, conseqüentemente, o número de locais candidatos aumentaria.

Em trabalhos futuros pretende-se inserir no modelo atributos qualitativos de relevância de cobertura, onde os quadrados teriam um sistema de prioridade de atendimento.

Pode-se como trabalho futuro usar otimização multiobjetivo, para garantir a maior potência mínima, podendo-se levar em consideração não só a média geral, mas também a relevância dos quadrados de terreno em questão.

Campanhas de medições em diferentes frequências, em especial as possíveis frequências em 5G, pode ser pensado para melhorar o polinômio desenvolvido para o cálculo das frequências.

[Por fim pode-se associar a vazão de dados à potencia nos mapas de cobertura.

Referencias

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, Anatel, www.anatel.gov.br, último acesso em :01/12/2018

Bishop, C. M. and I. T. Nabney. **Pattern Recognition and Machine Learning: A Matlab Companion**. Springer. (2008)

CASTRO, B.S.L “Modelo de propagação para redes sem fio fixas na Banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região Amazônica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2010

CAVALCANTE, G.P.S.” **Propagação de ondas eletromagnéticas em meios com camadas múltiplas usando funções de Green Diádicas e sua aplicação no modelamento de florestas**”. 1982. 89 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

DANTZIG, G. B., “**Linear Programming and Extensions**”, Princeton University Press, 1963

CHEE, K.L.; TORRICO, S.A.; KUNER, T. “**Foliage Attenuation Over Mixed Terrains in Rural Areas for Broadband Access at 3.5 GHz**”. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, v. 59, nº 7, jul. 2011

EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH EURO-COST231, **Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800MHz Bands**. Revision 2, The Hague, set. 1991

GOMES, C. R.; LEITE, J. B. N.; NASCIMENTO, R. A.; GOMES, I. R.; GOMES, H. S.; FRAIHA, S. G. C.; CAVALCANTE, G. P. S. “**Knowledge-Based Indoor Propagation Model**”. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION-EUCAP, **Anais...**, Praga, 2012

GOMES, C. R. “**MODELO DE RÁDIO PROPAGAÇÃO NA FAIXA DE UHF PARA TRAJETOS NÃO HOMOGÊNEOS E CLIMAS DISTINTOS UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 2015

HATA, M. “**Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service**”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT- 29, 3, p.317-325, 1980

HOLLAND, J. H. “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, MIT Press, p. 11-147, 1975.

KARMAKAR, N., A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming, Combinatorics 4, 1984, pp. 373 – 395

KIRK, M. **Thoughtful machine learning**: a test-drive approach. Sebastopol: O’Reilly, 2014.

NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, G.; “**Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment**”. IEEE Communications Surveys, p. 9-11, 2000

NEGNEVITSKY, M. “**Artificial intelligence: a guide to intelligent systems**”. Harlow:Addison-Wesley, 2a edição, 2005, p.26.

Ni. W, et al "**Graph theory and its applications to future network planning: software-defined online small cell management,**" in *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 52-60, February 2015.

NKORDEH, N.S et al. “**LTE Network Planning using the Hata-Okumura and the COST-231 Hata Pathloss Models**” World Congress on Engineering, London, 2014

MENG, Y.S.; LEE, Y.H.; NG, B.C “**Further study of rainfall effect on VHF forested radio-wave propagation with four layered model**”. Progress in electromagnetics research-PIER99, pp.149-161, 2009.

MURPHY, K.P. “**Machine learning**”: A probabilistic perspective. Massachusetts: MIT, 2012

Muñoz,P; Sallent, O; Pérez-Romero,J, "**Self-Dimensioning and Planning of Small Cell Capacity in Multitenant 5G Networks,**" in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 4552-4564, May 2018

OKUMURA, T.; OHMORI, E.; FUKUDA, K. “**Field strength and its variability in VHF and UHF Land-Mobile radio service**”. Review of the Electrical

Communication Laboratory, v. 16, 9-10, p.825-873, 1968

OLIVEIRA, R. A. N.; SOUZA, J. F.; MAGNO, F. N. B.; COZZOLINO, K.; CAVALCANTE, G. P. S. “**Propagation Path Loss Prediction Using Parabolic Equations for Narrow and Wide Angles**”, In: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION-EUCAP, 7, Anais..., Gothenburg, Sweden, 2013

RAPPAPORT, T. S. “**Wireless Communications: Principles and Practice**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

SAUNDERS, S. R. “**Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems**”. Baffins Lane: John Wiley and Sons, 1999

SPENDLEY, W.; HEXT, G. R.; HIMSWORTH, F. R.” **Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation**”. *Technometrics*, v. 1962, p. 441–461, 1962.

SUTTUN, R. S.” **Special issue of Machine Learning on reinforcement learning, 8. Also published as Reinforcement Learning**”. Kluwer Academic, Boston, 1992.

TAUFIQUE, A; Jaber,B; Imran, A; Dawy,Z; Yacoub,E, "**Planning Wireless Cellular Networks of Future: Outlook, Challenges and Opportunities**," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4821-4845, 2017.

TAMIR, T. “**Radiowave propagation in forest environments**”. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, v.15, n°6, 1967

VALENTE, A. M. C., RODRIGUES, J. C.; PINHEIRO, M. R. “**Otimização de modelos de perda de propagação da rede LTE 1800 MHz utilizando algoritmo genético**” XXXIV Simposio Brasileiro de Telecomunicações, SBrT 2016.

WRIGHT, M. H. “**Nelder, Mead, and the other simplex method**”. *Documenta Mathematica*, v. 2012, p. 271–276, 2012.

Yun,Z. and Iskander, M. F. "**Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications**," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089-1100, 2015.