



Universidade Federal do Tocantins
Campus Universitário Palmas
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional de Sistemas

Vinícius Oliveira Costa

Alocação de Antenas para Rede Celular de 4G utilizando Algoritmos Meméticos

Brasil

Agosto/2016

Vinícius Oliveira Costa

Alocação de Antenas para Rede Celular de 4G utilizando Algoritmos Meméticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Sistemas da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. George Lauro Ribeiro de Brito

Universidade Federal do Tocantins - UFT
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Sistemas

Brasil
Agosto/2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

C837a Costa, Vinícius Oliveira.

Alocação de antenas para rede celular 4G utilizando algoritmos meméticos. / Vinícius Oliveira Costa. – Palmas, TO, 2016.

82 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Modelagem Computacional de Sistemas, 2016.

Orientador: Dr. George Lauro Ribeiro de Brito

1. Tecnologia da informação. 2. Alocação de Antenas. 3. Modelagem Computacional. 4. Algoritmos Meméticos. I. Título

CDD 4

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

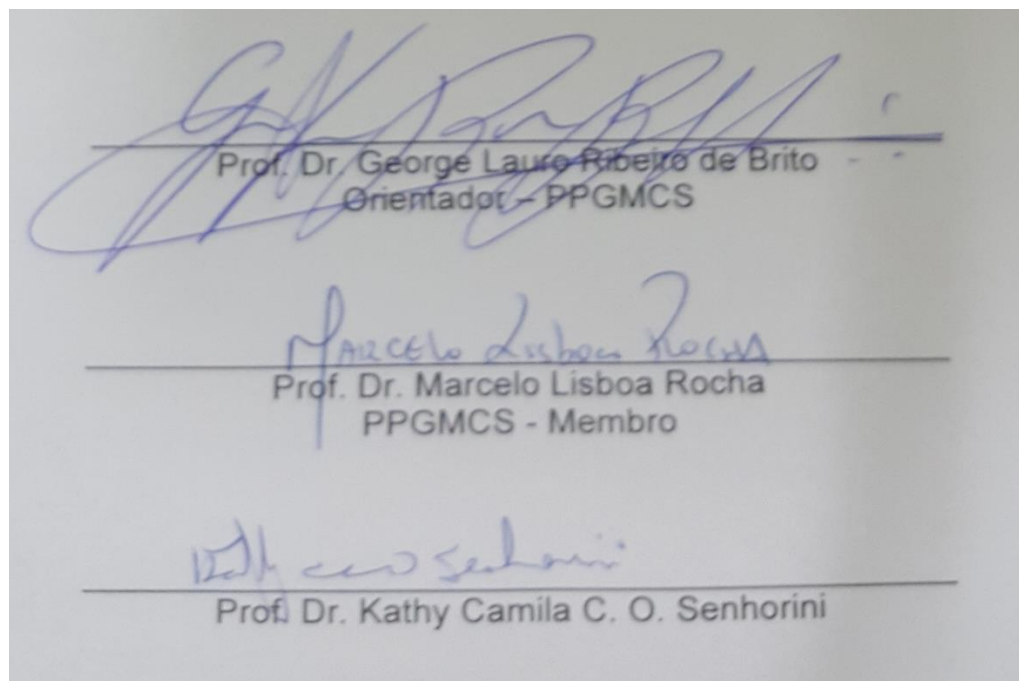
Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Vinícius Oliveira Costa

**Alocação de Antenas para Rede Celular de 4G
utilizando Algoritmos
Meméticos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Modelagem Computacional de Sistemas da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional de Sistemas.

Trabalho aprovado. Brasil, 31 de agosto de 2016:



Brasil
Agosto/2016

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, saúde, amigos e oportunidades. Agradeço aos professores pelo conhecimento compartilhado e paciência na tarefa de transmitir o conhecimento e orientar. Agradeço aos familiares, amigos e esposa pela presença em minha vida.

Tornar o simples complicado é fácil, tornar o complicado simples isto é criatividade.

Charles Mingus

Resumo

Este trabalho trata do problema de alocação de estações rádio base (ERBs) para o sistema de telefonia celular de 4G, que no Brasil utiliza o protocolo LTE (*Long Term Evolution*). Tal problema consiste em dada uma determinada região geográfica, onde se encontram os possíveis clientes, dispor antenas de modo a cobrir a maior área possível da região em estudo, levando em consideração a capacidade de cada antena em atender os clientes com qualidade de serviço. O algoritmo apresentado calcula o raio de alcance da ERB, a quantidade mínima de ERBs necessárias para cobrir a região em estudo e a localização de cada ERB. Para que o algoritmo pudesse ser desenvolvido foi investigado o sistema de comunicação LTE, modelos de propagação de sinal além do algoritmo memético, visto que a alocação de ERBs é um problema NP-difícil. Para o raio de ação da célula foi considerado, além do modelo de propagação, o cálculo de *link budget*, *throughput* e relação sinal ruído. Por fim, uma comparação entre o LTE operando nas faixas de frequências de 700 MHz e 2,5 GHz foi realizado. O algoritmo de alocação de ERBs se mostrou eficiente cobrindo mais de 80% da área de estudo em 29 dos 30 casos analisados. Com relação a frequência, o LTE se mostrou mais adequado operando em 700 MHz pois a quantidade de ERBs para cobertura da área de estudo é menor se comparado a frequências de 2,5 GHz.

Palavras-chave: Propagação de sinal, Alocação de ERBs, Algoritmo Memético.

Abstract

This work deals with the issue of radio base stations (RBSs) allocation for the 4G cell phone system, which in Brazil uses the LTE (Long Term Evolution) protocol. Such problem consists in a certain geographical region, where potential customers might be found, having antennas to cover the largest possible area of the region under study, taking into account the capacity of each antenna to serve customers with quality of service. The presented algorithm calculates the range of the RBS station, the minimum amount of necessary RBS to cover the area under study and the location of each RBS. In order to the algorithm to be developed the LTE communication system was investigated, signal propagation models beyond memetic algorithm, since the RBS allocation is a NP-hard problem. For the cell's range of action it was considered, besides the model of propagation, the link budget calculation, throughput and noise signal relation. Therefore, a comparison between LTE operating on 700 MHz and 2,5 GHz frequencies was made. The RBS allocation algorithm was efficient covering more than 80% of the study area in 29 from the 30 analyzed cases. In relation to the frequency, LTE was considered more adequate operating on 700 MHz, for the quantity of RBS to cover the study area is smaller, if compared to 2,5 GHz frequencies.

Keywords: Signal propagation, RBS allocation, Memetic algorithm.

Lista de figuras

Figura 1 – Modelo de Acesso ao Canal de Rádio (TECHNOLOGIES, 2009).	24
Figura 2 – Interface X2 e S1 (NOHRBORG, 2016).	25
Figura 3 – Modulação OFDM. Adaptado de (SVERZUT, 2008).	26
Figura 4 – Técnica de acesso múltiplo OFDMA. Adaptado de (SVERZUT, 2008).	26
Figura 5 – Comparação ente OFDMA e SC-FDMA (TECHNOLOGIES, 2009).	27
Figura 6 – Constelações das Modulações BPSK (a) e QPSK (b).	28
Figura 7 – Constelações das Modulações 16QAM (a) e 64QAM (b).	29
Figura 8 – Cruzamento de um ponto.	43
Figura 9 – Cruzamento com n pontos.	43
Figura 10 – Cruzamento uniforme.	44
Figura 11 – Mutação.	45
Figura 12 – Refinamento feito pelo algoritmo memético. Adaptado de (RADCLIFFE; SURRY, 1994).	46
Figura 13 – Exemplo de pontos de demanda e cobertura da antena.	54
Figura 14 – Representação do indivíduo do AM.	55
Figura 15 – Exemplo de indivíduo (Pai) com função objetivo = 54,49409%.	56
Figura 16 – Exemplo de indivíduo (Mãe) com função objetivo = 68,66975%.	56
Figura 17 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Pai", apresentado na Figura 15.	56
Figura 18 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Mãe", apresentado na Figura 16.	57
Figura 19 – Exemplo de indivíduo "Filho 1" com função objetivo = 44,17052%.	58
Figura 20 – Exemplo de indivíduo "Filho 2" com função objetivo = 75,91166%.	58
Figura 21 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Filho 1", apresen- tado na Figura 19.	58
Figura 22 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Filho 2", apresen- tado na Figura 20.	59
Figura 23 – Exemplo do reposicionamento de ERBs feito pela busca tabu.	60
Figura 24 – Exemplo de indivíduo "Filho 2" após a busca tabu.	60
Figura 25 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Filho 2" após a busca tabu, apresentado na Figura 24.	61
Figura 26 – Representação do Plano Diretor de Palmas-TO.	63
Figura 27 – Representação do Plano Diretor de Palmas-TO com os pontos de demanda.	64
Figura 28 – Gráfico do tempo de processamento por quantidade de ERBs a serem alocadas.	71

Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxa de Código de Modulação. Adaptada de (3GPP, 2009).	30
Tabela 2 – valores dos parâmetros para encontrar o fator de perda do caminho em função da altura da antena de transmissão do modelo SUI. Fonte (ERCEG et al., 1999).	36
Tabela 3 – Comparação entre a codificação binária e Gray.	40
Tabela 4 – Largura de banda e subportadoras LTE. Baseado em (ERCEG et al., 1999).	50
Tabela 5 – Frequência, modulação, e taxa de códigos empregados nos testes. . . .	63
Tabela 6 – Resultados dos pré-testes utilizando AG: Raio, quantidade de ERBs, erro da média dos pontos atendidos e média de pontos atendidos. . . .	65
Tabela 7 – Possibilidades de combinações de frequência, modulação e taxa de códigos para calculo do raio das ERBs.	66
Tabela 8 – Resultados do AM: Raio, quantidade de ERBs, erro da média dos pontos atendidos e média de pontos atendidos.	67

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Algoritmo Genético Clássico. Adaptado de Paiva, 2016.	39
Algoritmo 2 – Algoritmo Memético.	47
Algoritmo 3 – Busca Tabu.	47
Algoritmo 4 – Algoritmo para calculo do raio de atuação da ERB.	52

Lista de abreviaturas e siglas

16QAM	<i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i> (16 modulação de amplitude em quadratura)
2G	Sistema de telefonia celular de segunda geração
3G	Sistema de telefonia celular de terceira geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> (Terceira geração de projetos em parceria)
4G	Sistema de telefonia celular de quarta geração
64QAM	<i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i> (64 modulação de amplitude em quadratura)
AE	Algoritmos evolucionários
AG	Algoritmo Genético
AM	Algoritmo Memético
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> (Modulação por deslocamento de fase binária)
BT	Busca Tabu
eNB	NóB evoluído
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> (Núcleo do pacote evoluído)
EPS	<i>Evolved Packet System</i> (Sistema do pacote evoluído)
ERB	Estação Rádio Base
EuroCOST	<i>European Co-operative for Scientific and Technical Research</i> (Cooperativa Europeia para a Investigação Científica e Técnica)
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> (Rede de acesso a rádio terrestre universal evoluída)
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i> (Divisão de frequência por duplexação)
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i> (Divisão de frequência por multiplexação)

IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Evolução a longo prazo)
MME	<i>Mobility Management Entity</i> (Entidade de gerenciamento móvel)
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i> (Algoritmo Genético classificador não dominante)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal)
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> (Divisão de Frequência ortogonal de acesso múltiplo)
PAR	<i>Peak to Average Ratio</i> (Taxa média de pico)
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulação de amplitude em quadratura)
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (Modulação por deslocamento de fase em quadratura)
SA	<i>Simulated annealing</i> (Recozimento simulado)
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> (Acesso múltiplo por divisão de frequência de portadora única)
S-GW	<i>Serving GateWay</i> (direcionamento de serviços)
SIR	<i>Signal-to-Interference Ratio</i> (Taxa de interferência de sinal)
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> (Taxa de ruído de sinal)
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> (Duplexação por divisão do tempo)
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> (Sistema Universal de telecomunicação móvel)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivos Específicos	17
1.2	Revisao da Literatura	17
1.3	Estrutura do Trabalho	22
2	PADRÃO DE COMUNICAÇÃO LTE	23
2.1	Arquitetura do LTE	24
2.2	Multiplexação	25
2.2.1	OFDM e OFDMA	25
2.2.2	SC-FDMA	27
2.3	Modulação	27
2.3.1	QPSK	28
2.3.2	QAM	29
2.4	Taxa de Código	30
3	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	31
3.1	Propagação em Espaço Livre	31
3.2	Modelo de Okumura	32
3.3	Modelo de Hata-Okumura	33
3.4	Modelo COST-231 Hata	34
3.5	Modelo SUI	34
3.6	Modelo COST-231 Hata Modificado	36
4	ALGORITMOS GENÉTICOS E MEMÉTICOS	38
4.1	Algoritmos Genéticos	38
4.1.1	Codificação das Variáveis	39
4.1.2	Inicialização da População	40
4.1.3	Função Objetivo	40
4.1.4	Seleção	41
4.1.4.1	Roleta	41
4.1.4.2	Classificação	41
4.1.4.3	Torneio	42
4.1.5	Cruzamento	42
4.1.6	Mutação	44
4.1.7	Critérios de Convergência	44

4.2 – Algoritmo Memético	45
4.2.1 – Busca Tabu	46
5 O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ERBS	49
5.1 – Formulação da Quantidade de ERBs necessárias	49
5.1.1 – Máxima Taxa de Transferência	49
5.1.2 – Relação Sinal Ruído	50
5.1.3 – Máxima Perda de Propagação Permitida	51
5.1.4 – Raio da ERB	52
5.1.5 – Quantidade de ERBs	53
5.2 – Posicionamento Ideal das ERBS	53
6 TESTES E RESULTADOS	62
7 CONCLUSÕES	73
7.1 – Contribuições e Trabalhos Futuros	74
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICES	80
APÊNDICE A – TRABALHO APRESENTADO NA SEÇÃO DE POSTERS COM PUBLICAÇÃO NOS ANAIS DO XLVIII SBPO 2016	81

1 Introdução

A comunicação é à base das relações humanas, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade. Então, com a necessidade de comunicação constante surge o sistema de comunicação móvel celular que teve sua primeira geração na década de 80 do século passado. Os primeiros sistemas de comunicação celular permitiam apenas o tráfego de voz de forma analógica. Na segunda geração (2G) das comunicações móveis acontece a transição dos sistemas analógicos para os digitais, o que permitiu a transmissão de voz e dados. A terceira geração surge como um melhoramento da 2G com maior velocidade de comunicação. Atualmente a comunicação móvel se encontra na sua quarta geração (4G) o que permite maiores velocidades, menor latência e melhor utilização do espectro e com isso melhores serviços para os usuários (SÁ, 2010).

As constantes melhorias das tecnologias de comunicações móveis se devem ao fato de o número de usuários serem crescentes em todo o mundo. Sendo assim as novas tecnologias devem garantir maior velocidade de acesso, redução no tempo para conexão e redução nos custos da rede.

Neste cenário, a tecnologia escolhida no Brasil para sistemas de comunicação 4G foi o LTE (Long Term Evolution) que teve a faixa de frequência de 2,5 GHz licitada em 2012 (ANATEL, 2012). Posteriormente, em 2014, a ANATEL licitou a faixa de frequência de 700 MHz para ser utilizado pela telefonia 4G, entretanto isso só poderá ocorrer com o fim da transmissão do sinal de TV analógico que está previsto para começar ainda em 2016.

O processo de implantação de uma nova tecnologia ou mesmo a alteração da faixa de frequência envolve grandes investimentos, principalmente por parte dos fabricantes e operadoras. Sendo assim, é necessário antes da implantação que se faça um planejamento o mais preciso possível, para que desta forma, os acertos se maximizem reduzindo custos e aumentando a satisfação do usuário. É importante destacar que um planejamento ineficiente pode acarretar graves consequências para a imagem do produto e consequentemente perdas financeiras para os investidores (ZANETTI, 2012).

Com o intuito de auxiliar no planejamento de uma rede celular de 4G o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de calcular o raio de cada ERB (Estação Rádio Base), definir a quantidade de ERBs necessárias e alocar as ERBs na área em estudo levando em consideração a propagação do sinal e a capacidade de atendimento.

Por se tratar de um problema NP – Difícil, isto é, um problema que não se pode resolver deterministicamente em tempo polinomial, então uma metaheurística será utilizada

a fim de se obter um bom resultado porém sem garantia de ser o melhor. A metaheurística escolhida foi o Algoritmo Memético (AM), que de uma forma simples pode ser explicado como sendo o Algoritmo Genético (AG) com o acréscimo de busca local, tal algoritmo foi escolhido pela sua capacidade de sair de ótimos locais e apresentar bom desempenho.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta capaz de alocar estações rádio base (ERBs) para sistemas celulares de 4G utilizando o protocolo LTE. Além disso foi feita uma comparação da alocação de ERBs utilizando frequências de 700 MHz e 2,5 GHz.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Calcular o raio de cada ERB de acordo com um modelo de propagação adequado, que será definido no capítulo 3;
- minimizar a quantidade de ERBs necessárias;
- maximizar a quantidade de usuários atendidos;
- respeitar a capacidade de cada ERB em atender com qualidade de serviço;
- realizar um estudo de caso na cidade de Palmas-TO com frequências de 700 MHz e 2,5 GHz.

1.2 Revisão da Literatura

O problema de alocação das Estações Rádio Base (ERBs) é de fundamental importância no planejamento de sistemas celulares. Por isso se faz necessário ter métodos eficientes de alocação de ERBs. Na literatura encontram-se duas principais metodologias para o problema de alocação de ERBs, a primeira consiste em uma estratégia de otimização contínua e a segunda em modelos matemáticos discretos (AMALDI et al., 2006). O presente trabalho tem como foco a primeira metodologia devido a experiência do autor no assunto.

Nos modelos que utilizam estratégias de otimização contínua um número k de ERBs devem ser alocadas no espaço de busca de forma a maximizar a cobertura; entretanto, pode haver áreas proibidas, onde não se deve instala-las (SCHMIDT-DUMONT; VUUREN, 2015). O objetivo deste tipo de metodologia é determinar a localização de cada ERB, sendo possível também que haja outros fatores a serem analisados: potência de transmissão e orientação das antenas. O elemento mais importante neste tipo de modelo de otimização é o modelo de propagação de sinal que informa a intensidade do sinal que é recebida em

cada ponto do espaço de busca (AMALDI et al., 2006). Geralmente a função objetivo é alguma medida referente à qualidade de serviço recebido em cada ponto de demanda do espaço de busca.

O conceito de pontos de demanda (*demand node*) foi originalmente apresentado por Tutschku (TUTSCHKU; GERLICH; TRAN-GIA, 1996), e é utilizado para modelar o tráfego de dados nos sistemas celulares. Uma região densamente povoada necessita de um grande número de pontos de demanda, já uma região rural apresenta poucos pontos de demanda.

No trabalho de Schmidt-Dumont (SCHMIDT-DUMONT; VUUREN, 2015) o problema de alocação de ERBs é formulado levando em consideração a linha de visibilidade¹ e a zona de Fresnel² entre o móvel e a ERB. Zona de Fresnel, de modo simplificado, é uma elipse formada entre o transmissor e o receptor de uma onda de rádio. Deste modo, se a linha de visada ou a zona de Fresnel é bloqueada então não existe comunicação entre o transmissor e o receptor, por exemplo, se existir um morro entre a ERB e o móvel. Entretanto não é levado em consideração nenhum modelo de propagação o que faz com que o sinal não tenha desvanecimento. Além disso nenhuma heurística foi aplicada o que possibilita realizar testes apenas em pequenas áreas e com poucas antenas devido ao tempo necessário de computação. O que torna tal trabalho interessante é a metodologia aplicada que mescla conceitos de computação gráfica para saber se o móvel conseguirá ser atendido pela ERB e a modelagem bi-objetiva que maximiza os pontos de demanda cobertos ao mesmo tempo em que maximiza a dupla cobertura de cada ponto de demanda.

Mathar (MATHAR; NIESSEN, 2000) em seu trabalho propõe formulações para a alocação de ERBs, tratando os problemas de otimização analíticos como programas lineares inteiros que na maioria das vezes obtém soluções ótimas mas que em casos complexos se faz necessário a utilização da heurística *simulated annealing*. Mathar define três tópicos principais para a resolução do problema: primeiramente um modelo preciso de propagação de ondas de rádio; o segundo tópico é ter uma descrição analítica da demanda do tráfego; e por fim a localização e configuração das ERBs de modo que a maior parte do tráfego deve ser servido e ao mesmo tempo minimiza a interferência e multi cobertura. Entretanto Mathar trata apenas do terceiro aspecto do problema. Mathar ainda apresenta como resultado os pontos de demanda atendidos, pontos de demanda com múltipla cobertura, número de interferência entre pares de ERBs, quantidade de canal e conexões de *downlink* bloqueadas e pontos de demandas servidos unicamente.

Já no trabalho realizado por Kalvenes (KALVENES; KENNINGTON; OLINICK, 2006) é desenvolvido um novo modelo de localização de ERBs e atribuição de serviços onde o modelo considera a receita gerada e o custo de instalação de cada ERB em redes

¹ Linha imaginária entre o transmissor e o receptor sem obstrução.

² Elipse imaginária formada entre o transmissor e o receptor.

W-CDMA de terceira geração. Para a execução dos testes um software foi desenvolvido utilizando a heurística *branch and bound* e o modelo de propagação de sinal de Hata. Além disso outros testes foram realizados adaptando o modelo para uma infraestrutura já existente de segunda geração e depois para a expansão da mesma infraestrutura.

Segundo Amaldi (AMALDI; CAPONE; MALUCELLI, 2008), o planejamento de sistemas de telefonia de terceira geração (3G) não pode ser baseado apenas em problema de cobertura e alocação de frequência como acontecia com sistemas de segunda geração (2G). Outro ponto a ser destacado é que em trabalhos anteriores do autor (AMALDI; CAPONE; MALUCELLI, 2003), com tecnologia 2G, apenas a qualidade do sinal na direção de *uplink* (do móvel para a ERB) era considerado pois o *uplink* é mais crítico que o *downlink* (da ERB para o móvel) quando se trata de tráfego simétrico como em chamadas de voz.

Porem sistemas 3G são especialmente projetados para trabalhar com serviços de dados o que causa um impacto na direção de *downlink* e produz tráfego assimétrico. Sendo assim em sistemas 3G além do *uplink* deve ser levado em conta também o *downlink*. Outros pontos considerados por (AMALDI; CAPONE; MALUCELLI, 2008) é que além da localização das ERBs é preciso levar em consideração a configuração das ERBs e orientação dos setores para que assim se obtenha qualidade nas conexões e cobertura dos pontos de demanda. Então o autor propõe um modelo de programação matemática para planejamento de redes 3G que utiliza o modelo de propagação Hata e leva em consideração *uplink*, *downlink*, sinal piloto, *Signal-to-Interference Ratio* (SIR) e também altura, inclinação e orientação dos setores das ERBs. Como se trata de um problema NP-difícil, um algoritmo de Busca Tabu foi desenvolvido. Para a realização dos testes um ambiente foi simulado, neste ambiente foram criadas áreas de alta, média e baixa quantidade de tráfego de dados. Além disso o autor realiza testes com um modelo simplificado que não leva em consideração o *downlink* e conclui que os resultados são semelhantes além do que, neste caso, o tempo de computação é reduzido cinquenta vezes. Por fim, o autor coloca que a introdução do sinal piloto piora a qualidade das soluções porem apresenta resultados mais próximos da realidade.

Bechelane (BECHELANE, 2008), demonstra um modelo matemático para alocação de ERBs em sistemas 3G levando em consideração diferentes tipos de serviço e controle de potência no *downlink* e *uplink*. O autor afirma que em sistemas 3G a capacidade da célula é determinada pela distribuição do tráfego, sendo assim, o recurso alocado para cada canal é a energia. É necessário minimizar a potência de transmissão para assim diminuir o ruído na célula. Com isso o problema de alocação de ERBs deve considerar não somente o alcance do sinal, mas também a distribuição do tráfego, controle de potência e a qualidade em um ambiente com múltiplos serviços. Como parte do modelo o autor apresenta as formulações matemáticas e o algoritmo genético com duas abordagens, mono-objetivo e multi-objetivo. Com o resultado gerado pelo AG são feitas simulações variando a demanda

para verificar a qualidade da solução. O diferencial deste trabalho se deve ao controle de potência que produz resultados mais próximos da realidade.

No trabalho de Munyaneza (MUNYANEZA; KURIEN; WYK, 2008) um algoritmo genético multi objetivo é desenvolvido para alocação de ERBs com tecnologia 3G (UMTS - Universal Mobile Telecommunication System). A principal atribuição do algoritmo é alocar ERBs maximizando a cobertura e qualidade de serviço com base na relação sinal ruído, bem como minimizar o custo utilizando a menor quantidade possível de ERBs. O cálculo de Link budget foi realizado utilizando o modelo de Okumura-Hata para perda de propagação do sinal e com isso calculado o raio e área das ERBs. Foi calculada também a capacidade das células considerando interferência de outras células, taxa de bit de erro, quantidade de usuários por célula. Com isso a área da célula pode ser recalculada. Para a realização dos testes foi utilizado 60 possíveis pontos de localização das ERBs, 128 pontos de demanda distribuídos em uma área de 20 Km². Os testes são inicializados com ERBs omnidirecionais que são posteriormente atualizadas para antenas setorizadas com 3 seções e na sequência com 6 seções, este processo é importante pois com o aumento no número de seções a cobertura é melhorada através do ganho da antena. Antes dos testes efetivos uma série de testes foram feitas para se obter os melhores valores de probabilidade de inicialização, probabilidade de cruzamentos e probabilidade de mutações, após encontrar estes valores o algoritmo genético foi ajustado para a realização dos testes finais que conseguiu uma cobertura de 98% em 31 minutos.

Lakshminarasimman (LAKSHMINARASIMMAN et al., 2011) expõe uma modificação no algoritmo NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) para alocação de ERBs, considerando a localização, potência de transmissão, altura, ângulo de inclinação e perda de sinal. O algoritmo desenvolvido é uma variação multi objetivo do algoritmo genético que tem o intuito de maximizar a cobertura e minimizar os custos satisfazendo a demanda de tráfego, o handover (quando o móvel se movimenta de uma ERB para outra) e a sobreposição de células. A modificação feita no NSGA-II foi o acréscimo do controle de elitismo e do operador dinâmico de distância da aglomeração, que remove indivíduos não dominantes. As antenas consideradas são do tipo omnidirecional e direcional. O modelo de propagação de sinal utilizado foi o Okumura-Hata. Os testes foram simulados em uma área de 15 Km² discretizada em hexágonos de 300 m com 2822 pontos de demanda. O autor conclui que o algoritmo proposto é adequado para alocar ERBs no mundo real e que poderia ser aplicado em tecnologia GSM considerando as características ambientais.

Athanasiadou (ATHANASIADOU; ZARBOUTI; TSOULOS, 2014), inicia o seu trabalho expondo a característica do LTE em poder utilizar ERBs com potências variadas, sendo macro células, com ERBs de alta potência e micro ou femto células com ERBs de baixa potência. Então ele desenvolve um modelo para alocar macro e micro ERBs e também nós de retransmissão, sendo que as macro ERBs tem três setores e as micro ERBs,

os nós de retransmissão e a antena dos usuários são do tipo omnidirecional. O modelo é desenvolvido levando em consideração a cobertura, capacidade e custo. Para calcular a quantidade de ERBs necessárias para cobrir os pontos de demanda ele utiliza uma equação que depende da relação sinal ruído, taxa de código, número de elementos de recursos, verificação de redundância do LTE e tempo de duração do símbolo LTE. O algoritmo de otimização para alocação das ERBs divide o número total de possibilidades em pequenos grupos onde ocorrem exaustivas buscas por soluções. Como resposta o algoritmo entrega a largura de banda de acordo com a relação sinal-ruído, a taxa de dados requisitada e garante a cobertura de todos os pontos de demanda com a quantidade mínima de ERBs e suas localizações. Os testes foram realizados em uma área quadrada de 3 Km de lado, utilizando frequência de 2,12 GHz.

No trabalho apresentado por Valavanis et al. (VALAVANIS et al., 2014) é proposto um algoritmo para alocar ERBs minimizando o custo, cobrindo toda a área de demanda e levando em consideração a capacidade de atendimento. O modelo permite a utilização de macro, micro e femto células. As equações e parâmetros de testes utilizados são os mesmos apresentados anteriormente no trabalho de (ATHANASIADOU; ZARBOUTI; TSOULOS, 2014). A principal diferença foi o algoritmo de otimização empregado, sendo escolhido o AG responsável por escolher o subconjunto de ERBs candidatas e nós de retransmissão com custo mínimo, atendendo toda a área de demanda e respeitando a capacidade de atendimento das ERBs. Dois estudos de casos foram realizados em áreas quadradas de 3 Km e 8 Km de lado com frequência de 2,12 GHz.

Lee et al. apresentam um algoritmo para alocação de ERBs para sistemas de quarta geração (4G) que utilizam tecnologia LTE. A principal contribuição do seu trabalho é um algoritmo evolutivo que introduz o paradigma co-evolução cooperativa, que é um método de agrupamento para dividir as soluções candidatas em grupos, seu objetivo é resolver problemas cada vez maiores e mais complexos dentro de um tempo menor. O algoritmo leva em consideração a satisfação do usuário em termos de transferência de dados considerando a interferência que o sinal sofre. Entretanto nenhum modelo de propagação de sinal é incluído no algoritmo (LEE et al., 2015).

É importante notar que problemas de alocação de ERBs são NP-difícil, sendo assim faz-se necessário a utilização de algum método de otimização ou o espaço de busca deve ser pequeno, a fim de que se possa obter os resultados em tempo aceitável. Skakov e Malysh (SKAKOV; MALYSH, 2016) fazem uma comparação entre duas técnicas de otimização, *simulated annealing* (SA) e algoritmos evolucionários (AE) com o intuito de verificar qual delas apresenta melhores resultados para o problema de alocação de ERBs. Os algoritmos buscam através da função objetivo minimizar o custo (quantidade de ERBs instaladas) e o nível de SIR de cada usuário. Então (SKAKOV; MALYSH, 2016) concluem que ambas as metodologias encontram soluções em tempo aceitável sendo que SA se sai melhor que AE.

Izario (IZARIO, 2015) em seu trabalho faz uma comparação entre o LTE operando em 700 MHz e 2,5 GHz. Neste trabalho é projetado uma rede LTE funcionando em ambas as frequências levando em consideração os cálculos de *Link Budget*, propagação do sinal, *throughput máximo*, modulação, taxa de código e relação sinal ruído. Este trabalho é importante pois mostra como calcular o tamanho máximo de uma célula e com isso especificar a quantidade mínima necessária de ERBs para cobrir uma determinada área de estudo. Entretanto Izario não faz nenhuma formulação a respeito da alocação das ERBs, os testes são realizados em uma área pequena onde é possível alocar as antenas manualmente.

1.3 Estrutura do Trabalho

No segundo capítulo são apresentadas as principais características do LTE; no terceiro capítulo os principais modelos de propagação são apresentados; no quarto capítulo é feita uma explanação dos algoritmos genético e memético; no quinto capítulo o problema de alocação de antenas é descrito; no sexto capítulo são mostrados os testes realizados e os respectivos resultados e por fim; no sétimo capítulo as conclusões são feitas e as indicações de trabalhos futuros são colocadas.

2 Padrão de Comunicação LTE

O LTE (*Long Term Evolution*) é regido pelas normas estabelecidas na organização 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), sua primeira versão ficou pronta em dezembro de 2008, sendo conhecida como *Release 8*, posteriormente outras especificações foram lançadas agregando melhorias. As motivações para o desenvolvimento do LTE foram (NOHRBORG, 2016):

- Necessidade de garantir competitividade para os sistemas 3G no futuro;
- Demanda dos usuários por altas taxas de dados e qualidade de serviços;
- Sistema otimizado para comutação de pacotes;
- Redução de custos;
- Baixa complexidade.

Os principais requisitos para o LTE são, alta eficiência espectral, altas taxas de pico de dados, baixo tempo de *round trip*, flexibilidade na frequência e na largura de banda. Para que isso aconteça, no acesso utiliza-se OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) que combinado com modulações de alta ordem (chegando a 64QAM), altas larguras de banda (até 20 MHz) e multiplexação espacial no *downlink* podem fornecer taxas de pico de até 75 Mbps no *uplink* e 300 Mbps no *downlink* (NOHRBORG, 2016).

Entretanto estas taxas de dados dificilmente são conseguidas na prática devido a uma série de fatores como quantidade de antenas simultâneas (MIMO), largura de banda do canal, frequência de operação, modulação e técnicas de correção de erros (YIN; CAVALLARO, 2012).

Com relação a largura de banda o LTE possui uma grande flexibilidade podendo operar em: 1,25; 2,5; 5; 10; 15 e 20 MHz. A alocação do espectro pode ocorrer tanto utilizando FDD (*Frequency Division Duplexing*) quanto TDD (*Time Division Duplexing*) o que garante ao LTE uma melhor gestão do espectro (SÁ, 2010) .

FDD é eficiente caso o tráfego de dados seja simétrico, como ocorre em serviços de voz. Neste modo duas faixas de frequência são utilizadas uma para o receptor e outra para o transmissor. No modo TDD apenas uma faixa de frequência é utilizada e a transmissão e recepção ocorre com uma divisão do tempo. Neste caso a transmissão de dados assimétricos se torna mais eficiente.

Outro fator importante no LTE, que melhora tanto a cobertura quanto a capacidade do sistema, é a possibilidade de se trabalhar simultaneamente com mais de uma antena. A

Figura 1 ilustra as diferentes possibilidades. Cabe destacar que o esquema SISO é o modo padrão de transmissão nos sistemas de comunicações móveis. O MISO é uma evolução do SISO e apresenta mais de uma antena no transmissor. O esquema SIMO permite diversidade no lado do receptor. E o esquema MIMO apresenta mais de uma antena tanto no receptor quanto no transmissor e consegue taxas de transferência de dados maiores se comparada aos outros esquemas de antenas.

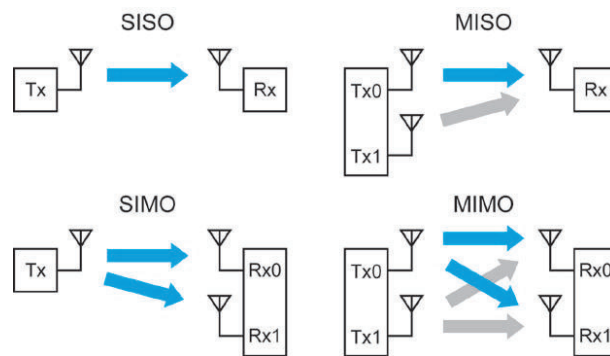


Figura 1 – Modelo de Acesso ao Canal de Rádio (TECHNOLOGIES, 2009).

2.1 Arquitetura do LTE

A arquitetura do LTE é conhecida como EPS (*Evolved Packet System*) e está dividida em duas partes, a rede de acesso sem fio E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) e núcleo da rede EPC (*Evolved Packet Core*). Sendo o EPC totalmente baseado em IP (*Internet Protocol*) (SVERZUT, 2008).

A rede de acesso LTE é simplesmente uma rede de estações rádio base, chamadas de Nób evolúido (eNB) onde não existe um controlador inteligente centralizado. Os eNB são interligados entre si por interfaces X2 e a ligação ao núcleo da rede acontece pela interface S1 como pode ser visto na Figura 2. A distribuição da inteligência entre as ERBs se faz necessária para aumentar a velocidade ao se estabelecer uma ligação e reduzir o tempo de *handover* (mudança do móvel de uma ERB para outra) (NOHRBORG, 2016).

A interface S1 interliga os elementos de rede eNBs às entidades MME (*Mobility Management Entity*) e ao *gateway* S-GW (*Serving GateWay*) que estão presentes no núcleo da rede EPC. É o MME que fica responsável por controlar os eNB, além disso, dentre as suas principais atribuições se destacam: sinalizações, segurança, *handover* e seleção do *gateway* S-GW (SVERZUT, 2008).

Questões de mobilidade entre redes 3GPP e procedimentos relacionados a tarifação são executados pelo S-GW, sendo suas principais funções: *handover* entre eNB, interceptação de chamadas autorizadas pela justiça, roteamento, marcação de pacotes no nível de transporte e tarifação de voz e dados (SVERZUT, 2008).

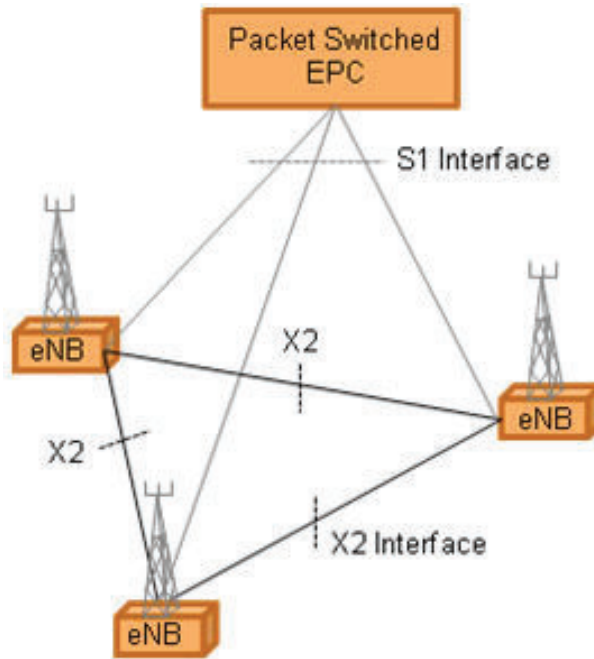


Figura 2 – Interface X2 e S1 (NOHRBORG, 2016).

2.2 Multiplexação

A multiplexação no LTE ocorre de formas diferentes no *downlink* e no *uplink*, sendo utilizado multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM) e acesso múltiplo por divisão de frequência de uma única portadora (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access* - SC-FDMA) respectivamente.

2.2.1 OFDM e OFDMA

Na OFDM a banda do sinal é dividida em faixas de frequências espaçadas igualmente uma da outra, onde cada divisão representa uma subportadora que transporta parte dos dados do usuário, conforme Figura 3. Subportadora é uma pequena divisão da portadora, que por sua vez representa um fluxo de pacotes IP com uma qualidade de serviço definida entre o *gateway* e o usuário (CUETO, 2013). No LTE as subportadoras são espaçadas umas das outras por 15 KHz e uma faixa é formada por 12 subportadoras que formam um bloco de recursos (*resource block*) (SVERZUT, 2008). Cada subportadora é modulada com um esquema de modulação convencional (QPSK, 16QAM ou 64QAM) com uma baixa taxa de símbolos (TECHNOLOGIES, 2009).

A OFDM é uma forma melhorada da multiplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM). A FDM permite que múltiplos sinais sejam transmitidos, cada um utilizando uma portadora em uma faixa de frequência diferente (WEINSTEIN, 2009). O que diferencia a FDM da OFDM é a ortogonalidade entre as

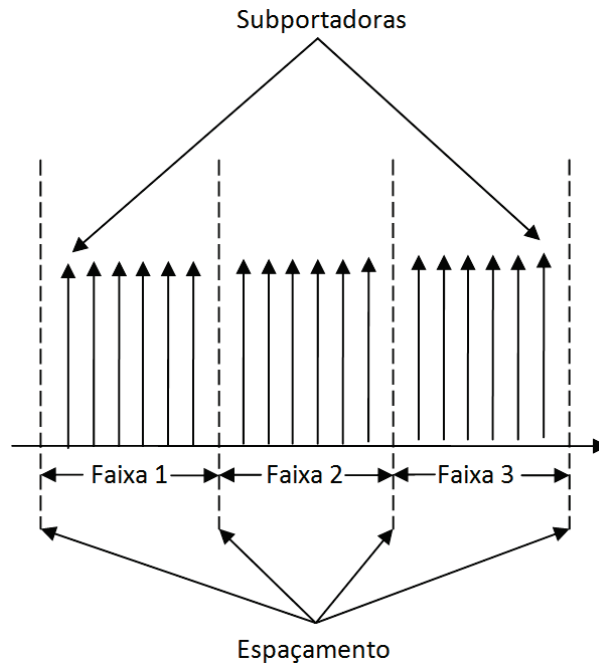


Figura 3 – Modulação OFDM. Adaptado de (SVERZUT, 2008).

subportadoras ou frequências que a OFDM utiliza para que uma subportadora não cause interferência nas outras. Para que a ortogonalidade seja eficiente as subportadoras precisam estar sincronizadas (SVERZUT, 2008).

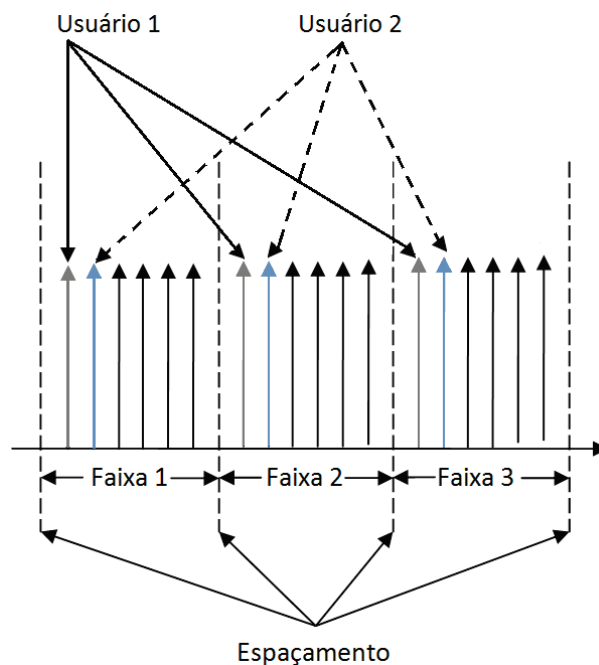


Figura 4 – Técnica de acesso múltiplo OFDMA. Adaptado de (SVERZUT, 2008).

A multiplexação de acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA*) é a versão multiusuário da OFDM. A OFDMA aloca as subportadoras presentes na OFDM para os usuários conforme mostrado

na Figura 4. As subportadoras são alocadas aos diversos usuários simultaneamente em um determinado intervalo de tempo (SVERZUT, 2008).

Em se tratando de sistemas moveis de banda larga a OFDMA é uma das melhores técnicas pois fornece escalabilidade, otimiza a técnica de varias antenas MIMO e permite a seletividade no canal de radio frequência (SVERZUT, 2008).

2.2.2 SC-FDMA

A escolha da SC-FDMA para o *uplink* se deve ao fato de o OFDM apresentar flutuações de potência, ocasionando uma elevada taxa média de pico¹ (*Peak to Average Ratio* - PAR) o que pode trazer problemas de destruição da ortogonalidade entre as subportadoras causando assim uma ineficiente utilização de potência (SÁ, 2010). A SC-FDMA tras a vantagem de poder combinar as técnicas de baixo PAR de sistemas de transmissão de portadora única e manter a resistência a multi caminhos e flexibilidade na alocação de frequências como a OFDMA (TECHNOLOGIES, 2009).

A Figura 5 mostra uma comparação entre OFDMA e SC-FDMA, onde é possível entender as diferenças entre estas duas técnicas de multiplexação.

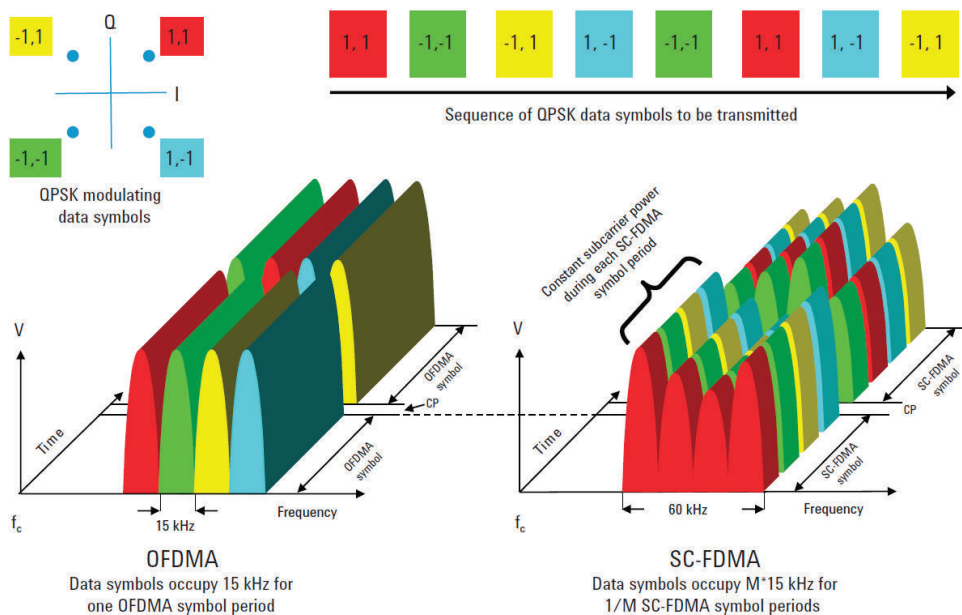


Figura 5 – Comparação ente OFDMA e SC-FDMA (TECHNOLOGIES, 2009).

2.3 Modulação

A Modulação é o processo de codificar informação de uma fonte de mensagem em uma forma adequada para transmissão (RAPPAPORT, 2009). As principais formas de

¹ Indica a relação entre o maior valor e a média de um conjunto de dados. É utilizado para indicar a variabilidade dos dados.

modulação utilizadas no LTE são QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) e 64QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*). Elas representam uma sequência temporal de símbolos onde cada uma tem m estados finitos. Para encontrar quantos bits diferentes cada símbolo pode representar utiliza-se a equação 2.1 (RAPPAPORT, 2009).

$$n = \log_2 m \quad (2.1)$$

Onde:

- m é o número de estados;
- n é o número de bits por símbolo.

2.3.1 QPSK

O QPSK é uma técnica de modulação baseada no BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) onde a informação (0 ou 1) depende da fase da portadora, sempre que há uma mudança no bit de 0 para 1 ou vice versa a portadora altera a fase da onda em 180° mantendo a amplitude sempre constante. Esta técnica de modulação permite 1 bit por símbolo.

O QPSK tem o dobro de eficiência se comparado com o BPSK, pois diferentemente do BPSK onde a fase da portadora varia em 180° no QPSK esta variação é de 90° o que permite quatro símbolos diferentes ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$). Aplicado a equação 2.1 observa-se a existência de dois bits por símbolo (RAPPAPORT, 2009).

As modulações BPSK e QPSK são ilustradas com a utilização de diagramas de constelação bidimensional com dois e quatro pontos respectivamente. A Figura 6(a) representa a modulação BPSK e a Figura 6(b) a modulação QPSK.

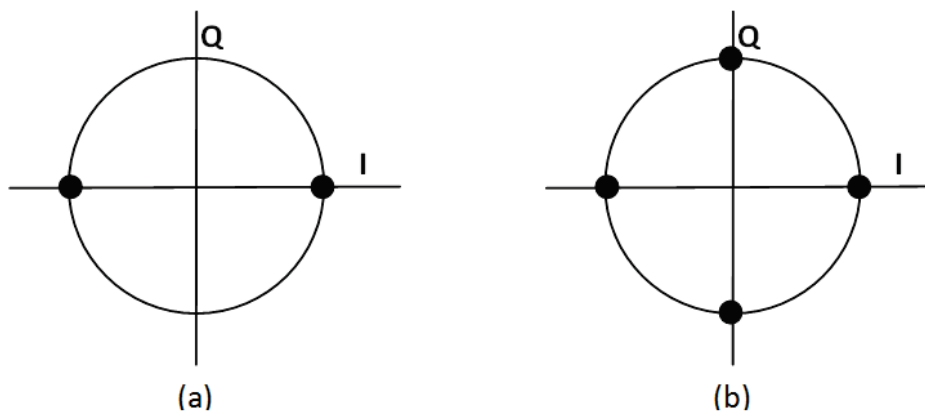


Figura 6 – Constelações das Modulações BPSK (a) e QPSK (b).

Um fato interessante sobre as modulações BPSK e QPSK é que a probabilidade de erro de bit de ambas são iguais entretanto QPSK entrega o dobro de dados que BPSK utilizando a mesma largura de banda (RAPPAPORT, 2009).

2.3.2 QAM

Na modulação do tipo PSK a amplitude da onda é constante variando apenas a fase da onda. Quando se acrescenta a variação da amplitude juntamente com a variação da fase se obtém a modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) que apresenta superioridade em relação a PSK em termos de eficiência de potência (RAPPAPORT, 2009).

No LTE as formas de QAM utilizadas são 16QAM e 64QAM que representam 16 e 64 símbolos respectivamente. Utilizando a equação 2.1 encontra-se 4 bits por símbolo para 16QAM e 6 bits por símbolo para 64QAM, como pode ser observado nas constelações da Figura 7.

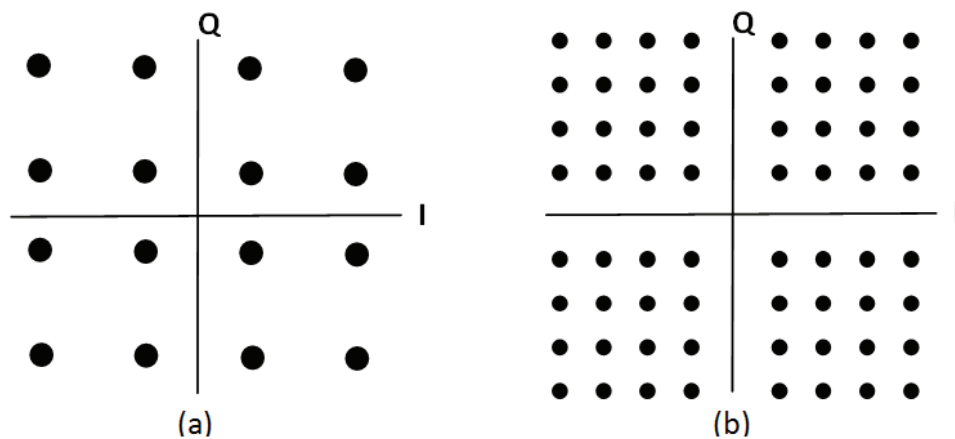


Figura 7 – Constelações das Modulações 16QAM (a) e 64QAM (b).

O fato de a modulação 16QAM ter menos bits por símbolo que a 64QAM, faz com que ela tenha uma taxa de transmissão também menor. Entretanto a distância euclidiana² entre os símbolos na 16QAM é maior que na 64QAM. Com isso a qualidade de serviço na 16QAM é melhor pois uma distância maior entre os símbolos apresenta menos erros de interpretação no receptor (HAYKIN, 2001).

² A distância euclidiana é definida utilizando-se o Teorema de Pitágoras, onde para um triângulo retângulo, o quadrado da distância entre dois pontos é igual a soma dos quadrados das medidas dos outros dois lados. A distância pode ser generalizada para qualquer número de dimensões (PORTANOVA, 2005).

2.4 Taxa de Código

A taxa de código informa a proporção de bits por símbolo que é efetivamente transmitida em cada tipo de modulação (SANTOS, 2010). Por exemplo, se a taxa de código for de 0,762 e a modulação utilizada for QPSK (que transmite 2 bits por símbolo) então a transmissão efetiva por símbolo será $2 \times 0,762 = 0,1523$ bits de informação por símbolo. A Tabela 1 mostra as modulações e suas respectivas taxas de códigos utilizadas no LTE.

Tabela 1 – Taxa de Código de Modulação. Adaptada de (3GPP, 2009).

Modulação	Taxa de Códigos	Eficiência
QPSK	0,0762	0,1523
QPSK	0,1172	0,2344
QPSK	0,1885	0,3770
QPSK	0,3008	0,6016
QPSK	0,4385	0,8770
QPSK	0,5879	1,1758
16QAM	0,3691	1,4766
16QAM	0,4785	1,9141
16QAM	0,6016	2,4063
64QAM	0,4551	2,7305
64QAM	0,5537	3,3223
64QAM	0,6504	3,9023
64QAM	0,7539	4,5234
64QAM	0,8525	5,1152
64QAM	0,9258	5,5547

A taxa de códigos é importante no LTE pois permite a correção de erros. Quanto maior for a taxa de códigos maior será a taxa de transmissão efetiva, entretanto menor será a capacidade corretora do código (SÁ, 2010).

3 Modelos de Propagação

Os modelos de propagação se destinam a calcular o raio teórico de alcance de uma célula da rede de telefonia celular, em outras palavras, tais modelos se destinam a dar uma estimativa das perdas de propagação do sinal levando em consideração fatores como distância entre o transmissor e o receptor, tipo de terreno, altura das antenas de recepção e transmissão, frequências dentre outros fatores. Pode se dizer ainda que um modelo de propagação é um conjunto de expressões matemáticas, algoritmos e diagramas que representam as características de um enlace de rádio (BARRETO, 2013).

Na literatura encontram-se diversos modelos de propagação que dependendo do ambiente podem ser *indoor* (ambiente interno) ou *outdoor* (ambiente externo), neste trabalho considerar-se-á apenas os modelos outdoor que podem ser divididos em três categorias, empíricos que são baseados na relação entre a atenuação e a distância; teóricos que necessitam de bases de dados topográficos e utilizam os métodos das ligações fixas e; modelos híbridos que contemplam ambas as perspectivas empíricas e teóricas (SÁ, 2010).

3.1 Propagação em Espaço Livre

O modelo de propagação em espaço livre é um modelo simples que leva em consideração apenas a frequência utilizada na operação e a distância entre as antenas do receptor e do transmissor. Neste modelo não são considerados os obstáculos entre transmissor e receptor. A equação da atenuação da propagação é dada por (RAPPAPORT, 2002):

$$A_{prop} (dB) = 10 \times \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \times \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \right] \quad (3.1)$$

Onde:

- A_{prop} é a atenuação da propagação;
- P_t é a potência de transmissão;
- P_r é a potência de recepção;
- G_t é o ganho da antena de transmissão;
- G_r é o ganho da antena de recepção;
- λ é o comprimento da onda;

- d é a distância entre a antena do transmissor e a do receptor.

Se as antenas forem isotrópicas, isto é, $G_t=G_r=1$, então a atenuação da propagação no espaço livre será:

$$A_0 = 32,4 + 20\log(d)_{[km]} + 20\log(f)_{[MHZ]} \quad (3.2)$$

Onde:

- A_0 é atenuação no espaço livre
- f é a frequência da portadora
- d é a distância entre a antena transmissora e a receptora.

A desvantagem do modelo de propagação em espaço livre é que este modelo não leva em consideração obstáculos entre o transmissor e o receptor, entretanto em cenários reais dificilmente tem-se ambientes desta forma.

3.2 Modelo de Okumura

O modelo de Okumura é um método de predição de sinal empírico, baseado em uma serie de medições feitas na cidade de Tóquio nos anos 60, abrange uma faixa de frequência que vai de 200 MHz a 1920 MHz, distâncias de 1 km a 100 km e a altura das antenas transmissoras pode variar de 30 m a 1000 m (RAPPAPORT, 2002).

É um dos modelos mais utilizados para predição de sinal em áreas urbanas se baseando em gráficos e diferentes fatores de correção para alguns parâmetros (ZANETTI, 2012). Sua formula básica é dada pela equação 3.3.

$$L_{50} (dB) = L_F + A_{mu} - H_{tu} - H_{ru} + G_{\acute{a}rea} \quad (3.3)$$

Onde:

- L_{50} perda média no caminho de propagação;
- L_F é a perda no espaço livre;
- A_{mu} é a atenuação mediana em relação ao espaço livre em área urbana;
- H_{tu} é o fator de ganho em altura da antena transmissora;
- H_{ru} é o fator de ganho em altura da antena do móvel;

- $G_{\text{área}}$ é o fator de correção em função da frequência para áreas suburbanas, quase aberta e aberta.

Os gráficos com os valores para os parâmetros A_{mu} , H_{tu} , H_{ru} e $G_{\text{área}}$ podem ser encontrados em (ZANETTI, 2012).

O modelo de Okumura tem a vantagem de ser um dos modelos mais simples e com melhor precisão na predição de perdas de propagação em ambientes desordenados. Como desvantagem tem se a lenta resposta em mudanças bruscas de terreno e não sendo tão bom em áreas rurais.

3.3 Modelo de Hata-Okumura

O modelo de Hata-Okumura é uma formula de perda de propagação empírica baseada no modelo de Okumura e que tem como intuito, facilitar a codificação em computador. Tal modelo funciona com pequenas taxas de erro se utilizado na faixa de frequência de 100 a 1500 MHz, distância de 1 a 20 km, altura da antena transmissora de 20 a 200 m e altura da antena móvel de 1 a 10 m (HATA, 1980). Sua formulação é dada por:

Para áreas urbanas:

$$A_{prop}(dB) = 69,55 + 26,16 \times \log(f) - 13,82 \times \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \times \log(h_{te})) \times \log(d) \quad (3.4)$$

Fator de correção para altura efetiva da antena em cidades pequenas e médias:

$$a(h_{re}) = (1,1 \times \log(f) - 0,7) h_{re} - (1,56 \times \log(f) - 0,8) \quad (3.5)$$

Fator de correção para altura efetiva da antena em cidades grandes

$$a(h_{re}) = 8,29 \times (\log(1,54 \times h_{re}))^2 - 1,1 \quad \text{onde } f \leq 300MHz \quad (3.6)$$

$$a(h_{re}) = 3,2 \times (\log(11,75 \times h_{re}))^2 - 4,97 \quad \text{onde } f > 300MHz \quad (3.7)$$

Para áreas suburbanas:

$$A_{prop}(dB) = A_{prop}(urbana) - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5,4 \quad (3.8)$$

Para áreas rurais:

$$A_{prop}(dB) = A_{prop}(urbana) - 4,78(\log(f))^2 + 18,3 \log(f) - 40,9 \quad (3.9)$$

Onde:

- $a(h_{re})$ é o fator de correção dependente do meio ambiente;
- f é a frequência em MHz;
- d é a distância em Km;
- h_{te} é a altura da antena transmissora em metros;
- h_{re} é a altura da antena receptora em metros.

A formulação feita por Hata torna o modelo de Okumura mais fácil de utilizar e implementar em computador e é a forma como geralmente é aplicado o modelo de Okumura (ZANETTI, 2012).

3.4 Modelo COST-231 Hata

O modelo Hata atende a frequências inferiores a 1500 MHz e com intuito de expandir este modelo para frequências de até 2000 MHz a EuroCOST (*European Co-operative for Scientific and Technical Research*) desenvolveu o modelo COST 231-HATA. Sua formulação é mostrada a seguir:

$$A_{prop}(dB) = 46,3 + 33,9 \times \log(f) - 13,82 \times \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \times \log(h_{te})) \times \log(d) + C_M \quad (3.10)$$

Onde:

- C_M é igual a 3dB para centros metropolitanos e igual a 0 para cidades médias e áreas suburbanas.

Os demais parâmetros são os mesmos do modelo Hata-Okumura.

Os modelos de Hata e COST-231 Hata são utilizados na maioria das ferramentas comerciais de planejamento de telefonia móvel (SEYBOLD, 2005).

3.5 Modelo SUI

O modelo SUI foi desenvolvido por Erceg et al. (ERCEG et al., 1999) e posteriormente, com modificações, foi recomendado como cálculo da perda de percurso do padrão IEEE 802.16 (BARRETO, 2013). Este modelo é também recomendado pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) (IZARIO, 2015).

O modelo SUI trabalha com três tipos de terrenos diferentes e os categoriza como (IZARIO, 2015):

- Tipo A: Terreno montanhoso com alta densidade de obstáculos;
- Tipo B: Terreno montanhoso com baixa densidade de obstáculos ou planície com alta densidade de obstáculos;
- Tipo C: Planície de baixa densidade de obstáculos.

A fórmula da perda de propagação é a seguinte:

$$L = A + 10 \alpha \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \quad (3.11)$$

Onde:

- L é a máxima perda de propagação;
- A é a perda no espaço livre levando em consideração a distância
- α é o fator de perda do caminho em função da altura da antena de transmissão;
- d é a distância máxima de atuação da célula;
- d_0 é a distância de referência;
- X_f é a correção da frequência;
- X_h é a correção da altura da antena receptora;
- S é Desvanecimento de acordo com o tipo do terreno e está entre 8,2 e 10,6 dB.

Obs.: o valor de d deve ser sempre maior que d_0 .

A equação da perda no espaço livre levando em consideração a distância d_0 é:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.12)$$

Onde: λ é o comprimento de onda.

A equação da correção da frequência é:

$$X_f = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right), \text{ a frequência } f \text{ é dada em MHz.} \quad (3.13)$$

A equação da correção da altura será:

$$X_h = -10,8 \log \left(\frac{h}{2} \right), \text{ para terrenos do tipo A e B;} \quad (3.14)$$

$$X_h = -20 \log \left(\frac{h}{2} \right), \text{ para terrenos do tipo C.} \quad (3.15)$$

Onde: h é a altura da antena receptora.

A equação do fator de perda do caminho em função da altura da antena de transmissão é:

$$\alpha = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (3.16)$$

Onde: h_b é a altura da antena de transmissão e os valores de a, b e c podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – valores dos parâmetros para encontrar o fator de perda do caminho em função da altura da antena de transmissão do modelo SUI. Fonte (ERCEG et al., 1999).

Parâmetro	Tipo A	Tipo B	Tipo C
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	12,6	17,1	20,0

O modelo SUI é válido para antenas de recepção com altura entre 2 a 10 m e antenas de transmissão variando de 10 a 80 m, com relação à frequência de operação, esta deve estar entre 1,9 GHz e 3,5 GHz (CAVALCANTE, 2010).

3.6 Modelo COST-231 Hata Modificado

A Alcatel-Lucent propôs um modelo de propagação para contornar a limitação do modelo COST-231 Hata, que atendem frequências entre 1.5 e 2 GHz. Seu modelo de propagação é descrito a seguir, onde K_1 e K_2 caracterizam o modelo de propagação e R [km] é a distância entre a antena transmissora e a receptora em km (ALCATEL-LUCENT, 2011):

$$Perda_{Propagação}(R_{Km}) = K_1 + K_2 \times \log_{10}(R_{km}) \quad (3.17)$$

Onde K_1 é calculado de acordo com a frequência:

- Para frequências de 700, 850 ou 900 MHz, o modelo de Hata-Okumura é usado:

$$K_1 = 69,55 + 26,16 \times \log_{10}(F_{Mhz}) - 13,82 \times \log_{10}(H_b) - a(H_m) + K_c \quad (3.18)$$

- Para frequências 1,9 GHz ou 2,1 GHz, o modelo COST-231 Hata é usado:

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \times \log_{10}(F_{Mhz}) - 13,82 \times \log_{10}(H_b) - a(H_m) + K_c \quad (3.19)$$

- Para frequência de 2,6 GHz o modelo modificado pela Alcatel-Lucent a partir do modelo COST-231 Hata é utilizado:

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \times \log_{10}(2000) + 20 \times \text{Log}_{10}\left(\frac{F_{MHz}}{2000}\right) - 13,82 \times \log_{10}(H_b) - a(H_m) + K_c \quad (3.20)$$

E os outros fatores são:

$$K_2 = 44,9 - 6,55 \times \text{Log}_{10}(H_b) \quad (3.21)$$

$$a(H_m) = 3,2 \times [\text{Log}_{10}(11,75 \times H_m)]^2 - 4,97 \quad \text{para } K_c > -5 \quad (3.22)$$

$$a(H_m) = [1,1 \times \text{Log}_{10}(F_{MHz}) - 0,7] \times H_m - [1,56 \times \text{Log}_{10}(F_{MHz}) - 0,8] \quad \text{para } K_c < -5 \quad (3.23)$$

Onde:

- F_{MHz} é a frequência;
- H_b é a altura da antena de transmissão em metros;
- H_m é a altura da antena de recepção em metros (normalmente 1,5m).
- K_c é o fator de correção morfológico e depende do ambiente, sua equação é:

$$K_c = 0 \quad \text{para ambiente urbano} \quad (3.24)$$

$$K_c = -2 \left[\log_{10}\left(\frac{F_{MHz}}{28}\right) \right]^2 \quad \text{para ambiente suburbano} \quad (3.25)$$

$$K_c = -4,78[\log_{10}(F_{MHz})]^2 + 18,33 \times \log_{10}(F_{MHz}) \quad \text{para ambiente rural} \quad (3.26)$$

Este modelo se mostra o mais adequado para se trabalhar com o LTE, pois atende as faixas de frequência 2,5 GHz, já disponíveis no Brasil, e também 700 MHz que será disponibilizado para telefonia celular com o fim da TV analógica.

4 Algoritmos Genéticos e Meméticos

Os métodos de otimização são úteis para encontrar soluções para problemas onde não há linearidade, o espaço de busca é descontínuo, quando apresenta ruído ou quando o espaço de busca se mostra muito grande. Para resolver tais tipos de problemas os métodos estocásticos se mostram interessantes e dentre eles os algoritmos genéticos (AGs) se destacam, pois são baseados em um conjunto de indivíduos, chamados de população, o que permite fugir dos ótimos locais em busca do ótimo global e também são capazes de encontrar vários ótimos em uma única execução (GRUBISIC, 2012).

Entretanto, em algumas situações, somente o AG pode falhar não oferecendo resultados satisfatórios, neste contexto, vários métodos de hibridização têm sido propostos (BONFIM; YAMAKAMI, 2006). Dentre os métodos de hibridização, se evidencia o algoritmo memético (AM) (MOSCATO; NORMAN, 1992) que tem como objetivo aumentar a performance do AG utilizando busca local.

4.1 Algoritmos Genéticos

Os AGs são um tipo de algoritmo evolutivo que se baseia na evolução natural das espécies proposto por Charles Darwin, onde os indivíduos com melhores aptidões sobrevivem, cruzam e geram descendentes. Os AGs foram originalmente propostos por John H. Holland (HOLLAND, 1975) e posteriormente por seu aluno David E. Goldberg (GOLDBERG, 1989). Após a publicação dos trabalhos de Holland e Goldberg vários outros trabalhos foram publicados aplicando o AG nas mais diversas áreas e tornando o método mais eficiente.

Os AGs trabalham de forma aleatória orientada e se direcionam através da função objetivo. Inicialmente uma população de indivíduos é criada, onde cada indivíduo é uma solução candidata para a resolução do problema proposto. Em seguida os indivíduos cruzam entre si e geram novos indivíduos sendo possível também que ocorra mutação, porém com uma probabilidade muito pequena se comparada com a probabilidade de cruzamentos. Observa-se que os indivíduos mais aptos têm uma maior probabilidade de cruzar e conseqüentemente transmitir seu material genético para as novas gerações, isto significa que a cada nova geração tem-se indivíduos melhores. A aptidão de um indivíduo é dada pela função objetivo que dependendo do problema pode ser uma função de maximização ou minimização (ÁVILA, 2002).

No algoritmo genético clássico cada indivíduo é implementado como uma string binária (0, 1), sendo a população inicial gerada aleatoriamente. Então ocorrem os cruza-

mentos e mutações, os novos indivíduos são inseridos na população e os indivíduos antigos são eliminados. O AG clássico pode ser visto no Algoritmo 1 (PAIVA, 2016).

Algoritmo 1: Algoritmo Genético Clássico. Adaptado de Paiva, 2016.

```
ger=0;
Gera população inicial aleatoriamente;
Calcular o fitness dos indivíduos da população;
enquanto ger < maxGer faça
{
    Selecionar os pais para reprodução;
    Realizar crossover com os pais selecionados;
    Aplicar mutação sobre os filhos gerados na operação anterior;
    Calcular o fitness dos filhos;
    Substituir todos os indivíduos da população atual pelos
filhos;
    ger=ger+1;
}
```

4.1.1 Codificação das Variáveis

O primeiro passo na construção do AG é a escolha do tipo de codificação que deve ser realizado adequadamente sob pena de o AG não convergir. Os principais tipos de codificação das variáveis são Binária, Gray ou Real.

A codificação Binária é a mais simples e foi utilizada no AG clássico devido a sua analogia direta com a genética natural, seus indivíduos utilizam apenas os dígitos 0 e 1. Está codificação é comumente adotada em problemas discretos (CAVALCANTE, 2010). Um exemplo desta codificação pode ser visto a seguir:

$$X = [01011 \ 10101 \ \dots \ X_n]$$

Onde X_n representa um gene do individuo ou um gene do cromossomo.

Um problema que esta codificação apresenta é a ocorrência de *Hamming cliffs*, que são diferenças grandes nas cadeias de bits que codificam dois números inteiros que estão próximos. Por exemplo, quando se tem uma cadeia de valores binários e um dos bits mais significativos é alterado, isto causa uma grande variação na variável com relação ao universo de busca e isto pode ser prejudicial (ÁVILA, 2002).

A codificação Gray resolve o problema de *Hamming cliffs*, pois sua representação é baseada nos números inteiros adjacentes, sendo assim, uma pequena variação ajuda na convergência dos AGs, enquanto que na codificação binária uma pequena variação poderia levar a uma outra região no espaço de busca (ÁVILA, 2002). Uma comparação entre a codificação Binária e a Gray pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre a codificação binária e Gray.

Decimal	0	1	2	3	4	5	6	7
Binário	0	1	10	11	100	101	110	111
Gray	0	1	11	10	110	111	101	100

Outra possível codificação é a Real que se faz interessante quando as variáveis do problema tratado são de natureza real. Tem a vantagem de minimizar *Hamming cliffs* e se mostra mais rápida e eficaz. Como desvantagem, a codificação Real torna o processo de troca de informação genética mais complexo (CAVALCANTE, 2010). Um exemplo de codificação real é mostrado a seguir.

$$R = [2, 342 \ 8, 978 \ 6, 272 \ \dots \ R_n]$$

Onde, R_n representa um gene.

4.1.2 Inicialização da População

A geração da população inicial é um passo simples, podendo ser realizada de forma aleatória ou fazendo uso de alguma heurística, esta por sua vez, depende do problema a ser tratado. Geralmente as populações tem tamanho fixo que devem ser o maior possível respeitando as limitações de recurso computacional e tempo. A diversidade genética é uma característica que possibilita uma exploração paralela mais ampla do espaço de busca e garante a vantagem do AG sobre os métodos de otimização convencionais (CAVALCANTE, 2010).

4.1.3 Função Objetivo

A função objetivo é a forma como os AGs verificam a aptidão, também chamada de *fitness*, de um indivíduo como solução do problema. A função objetivo funciona como uma nota dada a cada indivíduo, quanto melhor for o indivíduo maior é a sua nota. É através desta nota que serão selecionados os indivíduos que irão cruzar e gerar novos descendentes, quanto melhor a função objetivo de um individuo maior será a probabilidade de ele gerar descendentes (LINDEN, 2008).

A função objetivo é, em muitos casos, a única ligação do problema real com o AG, sendo assim, ela deve ser modelada cuidadosamente para refletir bem o problema. Todo o conhecimento que se tem sobre o problema deve estar representado na função objetivo para torna-la mais precisa e assim conseguir distinguir dentre duas soluções próximas qual é a melhor (LINDEN, 2008).

Por natureza os AGs são técnicas de maximização então se o problema a ser tratado é um problema de maximização a função objetivo pode ser aplicada de forma

direta, entretanto se o problema for de minimização a função objetivo deve ser ajustada adequadamente (ÁVILA, 2002).

4.1.4 Seleção

A seleção consiste em escolher, com base na função objetivo, quais os indivíduos da geração atual irão cruzar para gerar os indivíduos da próxima geração. Isto acontece seguindo os conceitos da evolução natural das espécies onde os indivíduos mais aptos, com maior *fitness*, tendem a viver mais, cruzar mais e assim deixar mais descendentes que os indivíduos menos aptos (SIVANANDAM; DEEPA, 2007).

Entretanto, os AGs não devem escolher apenas os melhores indivíduos para gerar as próximas gerações, pois pode acontecer de eles não estarem próximos ao ótimo global e assim correr o risco de o AG levar para soluções que são ótimos locais. Para contornar este problema deve se manter uma probabilidade de selecionar também indivíduos com *fitness* baixos e desta forma explorar melhor o espaço de busca (CAVALCANTE, 2010).

Existem vários métodos de seleção e dentre eles os mais utilizados são o método da roleta, torneio e *rank*, estes métodos serão descritos a seguir.

4.1.4.1 Roleta

No método de seleção da roleta é criada uma roleta e cada indivíduo recebe uma fatia da roleta proporcional à sua função objetivo, sendo assim os melhores indivíduos recebem uma fatia maior da roleta e os piores indivíduos recebem uma fatia menor da mesma. Então gira-se a roleta quantas vezes forem necessárias para que se obtenha o número de pares que irão cruzar e gerar os novos indivíduos (ÁVILA, 2002).

Por se tratar de um método probabilístico, mesmo os indivíduos com menores *fitness* podem ser escolhidos, entretanto os indivíduos com melhores *fitness* terão maiores chances de serem selecionados. Isto pode fazer com que o AG convirja prematuramente, pois os indivíduos com o *fitness* muito acima da média podem dominar o processo de seleção o que pode fazer com que a diversidade genética diminua a cada nova geração (CAVALCANTE, 2010).

4.1.4.2 Classificação

O método de classificação, mais conhecido como *Rank*, evita uma convergência prematura, pois não permite a dominância de um indivíduo com um *fitness* muito alto com relação aos outros indivíduos. Neste método os indivíduos são ordenados de acordo com seu *fitness* e colocados em uma lista, *rank*, então a seleção acontece através da colocação de cada indivíduo dentro desta lista ao contrário da roleta que se dá com base no *fitness*. A vantagem deste método é que se evita a convergência prematura, pois a pressão seletiva

no início do processo é reduzida. Outra vantagem é o aumento da pressão seletiva no final do processo o que eleva a velocidade de convergência (CAVALCANTE, 2010).

4.1.4.3 Torneio

No método de seleção por torneio são escolhidos aleatoriamente K indivíduos da população que deverão competir entre si, aquele que tiver o maior *fitness* é escolhido, isto é feito N vezes representando a quantidade de indivíduos que deverão cruzar para gerar os novos descendentes. Se o valor de K for alto a pressão de seleção também aumenta, isto é, indivíduos com o *fitness* acima da média terão maior probabilidade de serem escolhidos. O valor comumente utilizado para K é 2 (CAVALCANTE, 2010).

4.1.5 Cruzamento

Cruzamento, também conhecido como *crossover*, é o processo pelo qual dois indivíduos trocam material genético gerando dois novos descendentes. Isto ocorre após o processo de seleção que escolhe os pares de indivíduos que irão cruzar. Pode ocorrer ou não entre os pares selecionados na etapa anterior e isso depende da probabilidade de cruzamento que geralmente está entre 70% e 100%, conforme ocorre na natureza a maioria dos casais geram descendentes (ÁVILA, 2002).

O processo de cruzamento pode ocorrer de diversas maneiras: cruzamento de um ponto, cruzamento de n pontos e cruzamento uniforme (PAIVA, 2016).

No cruzamento de um ponto é escolhido de forma aleatória um ponto de corte. Então cada indivíduo (pai) do par selecionado para o cruzamento é separado no ponto de corte gerando a metade direita e esquerda dos indivíduos (pais). Os novos indivíduos, filhos, serão gerados através da união dos materiais genéticos separados dos pais de forma que o primeiro filho será a metade direita do primeiro pai com a metade esquerda do segundo pai e o segundo filho será a metade esquerda do primeiro pai com a metade direita do segundo pai, conforme mostra a figura 8.

O cruzamento de n pontos é semelhante ao cruzamento de um ponto porém vários pontos de corte são selecionados dividindo os pais em vários pedaços que serão colocados de forma alternada para gerar os indivíduos filhos conforme mostrado na figura 9.

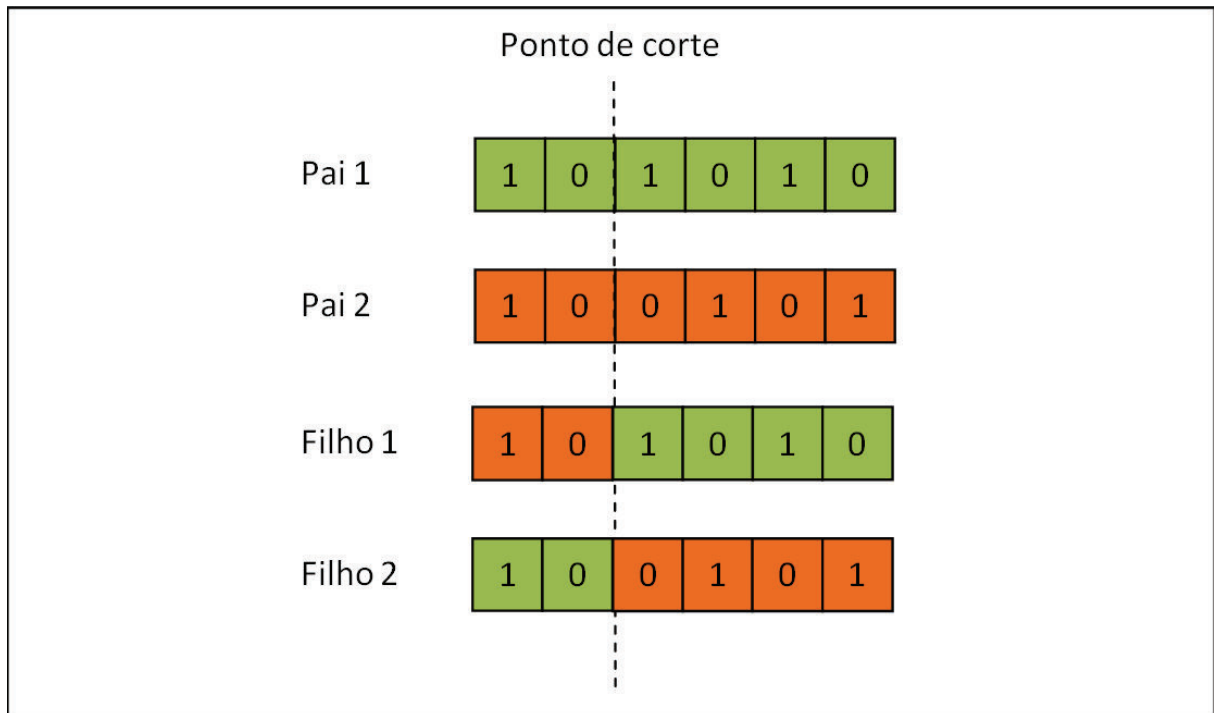


Figura 8 – Cruzamento de um ponto.

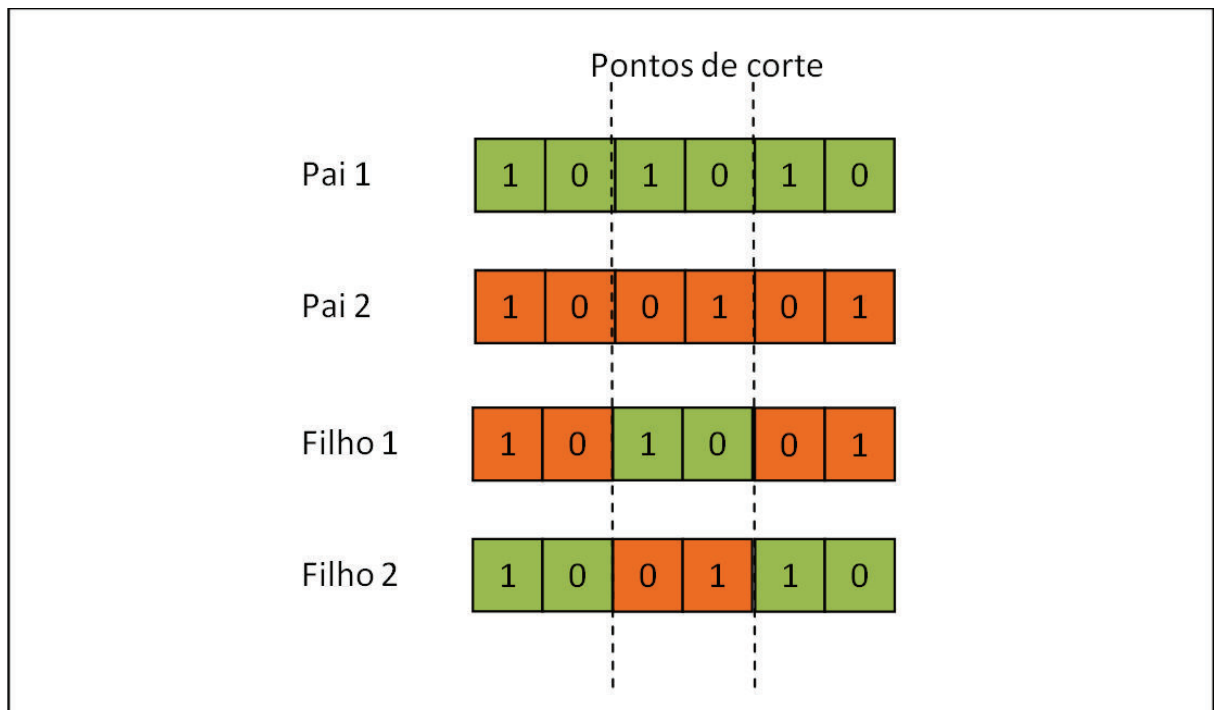


Figura 9 – Cruzamento com n pontos.

O cruzamento uniforme se baseia em um vetor binário gerado aleatoriamente isto faz com que cada elemento filho tenha 50% do material genético de cada um dos pais. Depois que o vetor binário é gerado o cruzamento acontece da seguinte forma, se o valor do vetor gerado for 1 então o filho 1 recebe o material genético do pai 1 e o filho 2 recebe

material genético do pai 2, se o valor for 0 o filho 1 recebe material genético do pai 2 e o filho 2 recebe material genético do pai 1, conforme mostrado na figura 10.

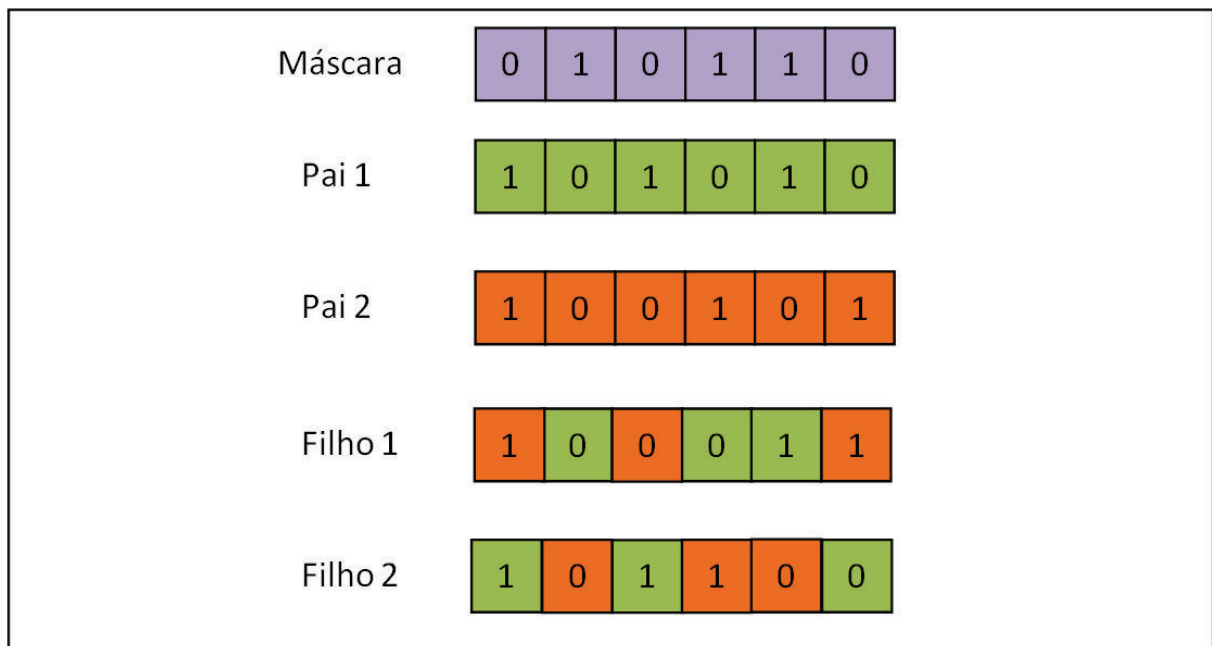


Figura 10 – Cruzamento uniforme.

4.1.6 Mutação

Assim como na natureza a mutação nos AGs tem uma probabilidade muito pequena de acontecer se comparado a probabilidade de cruzamentos. Esta probabilidade gira em torno de 0% a 5% para que a busca não seja um processo puramente aleatório (ÁVILA, 2002).

A mutação altera o cromossomo de um indivíduo de forma aleatória, isto é importante para manter a diversidade da população e assim fugir de ótimos locais. Ela pode ocorrer de várias formas sendo as mais simples inverter o nível lógico de um gene (bit) ou trocar dois genes de lugar (PAIVA, 2016). A figura 11 exemplifica estes dois processos.

4.1.7 Critérios de Convergência

O critério de convergência mais simples é determinar uma quantidade máxima de gerações porém, se a quantidade de iterações for pequena, o AG pode falhar por não fazer uma busca completa no espaço de busca. Outro critério de convergência é verificar a diversidade genética da população e se os indivíduos estiverem muito parecidos significa que estão na mesma região e o AG pode ser finalizado. O problema que surge aqui é a possibilidade de se estar em um ótimo local. Pode se também trabalhar com um erro máximo então quando um indivíduo tiver um erro menor que o estipulado o AG finaliza,

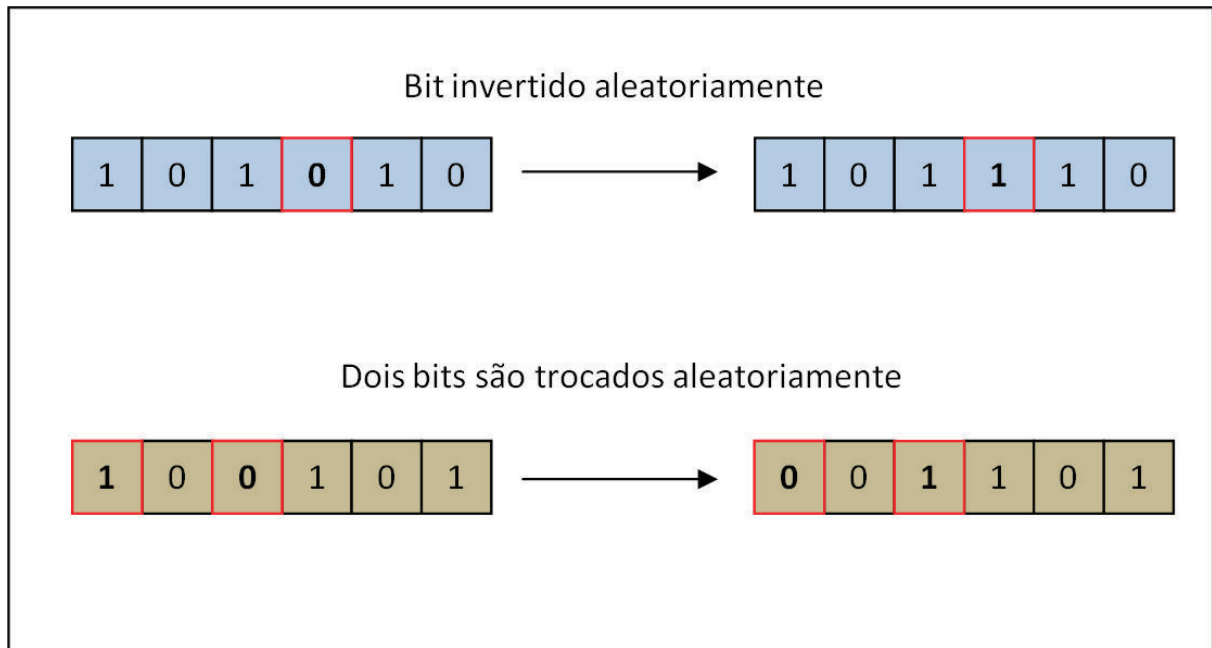


Figura 11 – Mutação.

entretanto isso só é possível se o problema for bem conhecido e um erro máximo já tiver sido estipulado (ÁVILA, 2002).

4.2 Algoritmo Memético

O AM é um algoritmo evolutivo onde a busca local se faz presente proporcionando melhorias significativas, tal algoritmo foi originalmente proposto por Moscato e Norman (MOSCATO; NORMAN, 1992). O termo memético vem da noção de meme que representa uma informação de troca de ideia entre as pessoas. O meme está para o AM assim como o gene está para o AG.

Antes de um meme ser transmitido para a próxima pessoa ele é adaptado de acordo com o que a pessoa pensa, entende e processa o meme, ao contrario do AG onde os genes são transmitidos sem alterações. O pensamento é análogo ao refinamento feito por uma busca local sendo assim o termo "algoritmo memético" descreve o AG com busca local (RADCLIFFE; SURRY, 1994).

O AM pode ser entendido como um tipo de AG especial onde o espaço de busca engloba apenas os ótimos locais. Isso se deve ao fato de que todos os indivíduos da população, inclusive a população inicial, serem refinados através da busca local. Quando ocorre um cruzamento ou uma mutação a solução pode não estar em um ótimo local, entretanto, isso é corrigido com uma nova busca local (RADCLIFFE; SURRY, 1994). A Figura 12 ilustra o refinamento feito pelo AM, onde X e Y representam os pais que após o cruzamento geram o filho Z' que é refinado pela busca local e se torna o ótimo local Z .

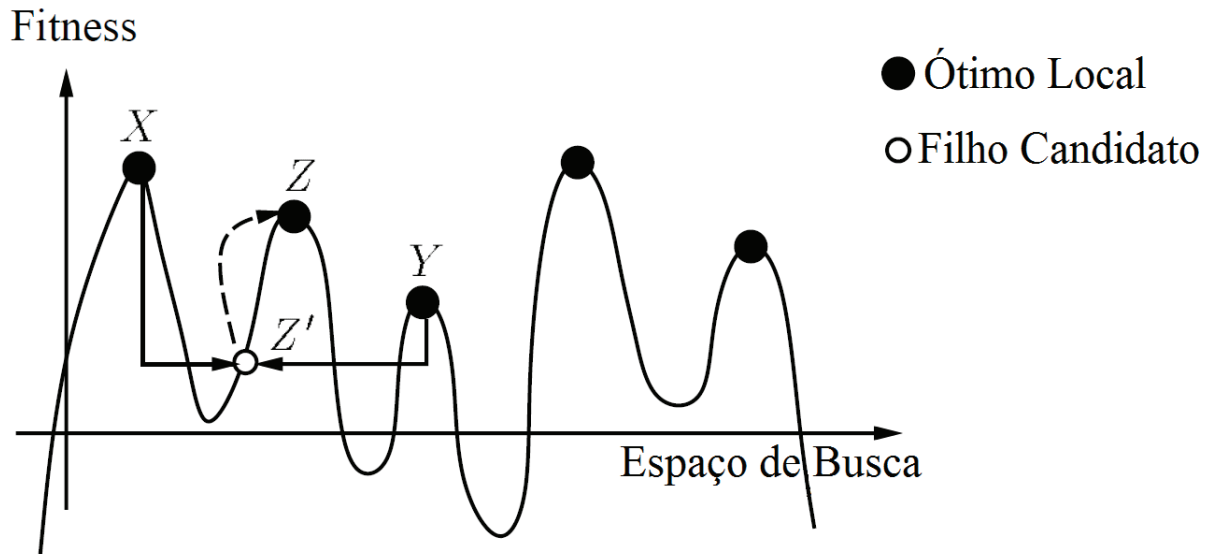


Figura 12 – Refinamento feito pelo algoritmo memético. Adaptado de (RADCLIFFE; SURRY, 1994).

As principais vantagens do AM são: diversificação e intensificação. A diversificação se deve às características presentes no AG como população, cruzamento e mutação. Já a intensificação se deve a busca local. Com isso, no geral, os AMs apresentam performance melhor do que os AGs tradicionais (TAUMATURGO, 2013).

Entretanto, o desenvolvimento de um AM eficaz é uma tarefa complexa pois necessita de uma abordagem híbrida envolvendo AG com busca local o que exige do desenvolvedor conhecimento de diferentes áreas da otimização. Outro fator é que AM pode funcionar bem para determinado tipo de problema e falhar em outros (SILVA, 2012). Sendo assim, o desenvolvedor deve ter experiência suficiente para modelar o problema e codificá-lo adequadamente a fim de que se possa obter bons resultados com o AM.

O Algoritmo 2 apresenta as alterações feitas no AG clássico apresentado no Algoritmo 1 com o intuito de transformá-lo em AM, onde pode ser observado que a busca local é aplicada na população inicial e depois de cruzamentos e mutações.

4.2.1 Busca Tabu

O método de busca local utilizado neste trabalho é a busca tabu (BT), também conhecida como *tabu search*. A sua principal vantagem consiste em uma memória que guarda os locais já visitados e não permite que a busca volte naqueles pontos, com isso a BT é forçada a explorar novas regiões do espaço de busca (PHAM; KARABOGA, 2012).

O algoritmo de busca tabu se diferencia dos algoritmos de busca local tradicionais em alguns fatores principais, o primeiro é a possibilidade de buscar na vizinhança uma nova melhor solução mesmo que isso signifique procurar em indivíduos de menor qualidade o que permite que o algoritmo escape de ótimos locais. O segundo fator é a possibilidade de gerar

Algoritmo 2: Algoritmo Memético.

```
ger=0;
Gera população inicial aleatoriamente;
Busca local;
Calcula o fitness dos indivíduos da população;
enquanto ger < maxGer faça
{
    Selecionar os pais para reprodução;
    Realizar crossover com os pais selecionados;
    Busca local;
    Aplicar mutação sobre os filhos gerados na operação anterior;
    Busca local;
    Calcular o fitness dos filhos;
    Substituir todos os indivíduos da população atual pelos filhos;
    ger=ger+1;
}
```

vizinhanças dinâmicas que podem crescer, com isso se na busca em uma vizinhança não for encontrada uma solução melhor então a vizinhança pode ser expandida para aumentar a probabilidade de se encontrar uma solução melhor (SOUSA, 2015).

Outro fator é uma lista com as soluções já visitadas. Esta lista é chamada de lista tabu, pois o algoritmo fica proibido de visitar estas soluções para impedir que se entre em um processo de ciclagem, isto é, para que não fique procurando soluções repetidas em locais já visitados. As soluções que estão na lista tabu podem sair dela depois de um determinado tempo ou número de iterações (ARENALES et al., 2015).

Algoritmo 3: Busca Tabu.

```
Inicialize a solução atual
Faça
{
    Crie uma lista de vizinhos candidatos
    Escolha o melhor vizinho candidato admissível
    Se critério de parada não for satisfeito
        Atualize a lista tabu
} enquanto critério de parada não for satisfeito
```

O algoritmo de busca tabu funciona da seguinte forma, inicialmente cria uma solução que será a solução atual, depois uma lista de vizinhos da solução atual é criada, então a lista de vizinhos é avaliada e o melhor é escolhido, este melhor vizinho passará a ser a

nova solução atual se não fizer parte da lista tabu e for melhor que a solução atual, na sequencia é verificada se o critério de parada não é atendido e se for verdade a lista tabu é atualizada então o algoritmo fica em laço enquanto a condição de saída não é satisfeita (GLOVER, 1990). O Algoritmo 3 mostra a busca tabu.

5 O problema de Alocação de ERBs

O problema de alocação de ERBs consiste em dada uma determinada região geográfica, onde se encontram os possíveis usuários, dispor ERBs, quantas forem necessárias, de modo a cobrir toda área com qualidade de serviço (QoS). Isso deve ser feito alocando a menor quantidade possível de ERBs com a máxima cobertura.

O problema é então dividido em duas partes distintas, na primeira deve-se encontrar quantas ERBs serão necessárias para cobrir toda a região em estudo e a segunda parte consiste em informar o posicionamento ideal destas ERBs.

5.1 Formulação da Quantidade de ERBs necessárias

Para obter a quantidade de ERBs necessárias para cobrir uma região é preciso inicialmente calcular alguns parâmetros, são eles: *throughput* máximo, relação sinal ruído (SNR), *LINK BUDGET*, raio da ERB e área da ERB. Então sabendo a área da ERB é possível determinar quantas ERBs serão necessárias.

5.1.1 Máxima Taxa de Transferência

O *throughput* máximo é a taxa máxima de dados transmitidos, sua equação é dada por:

$$Throughput = \frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \quad (5.1)$$

Onde:

- T_s é o tempo de símbolo;
- N_b é o número de bits;
- S_p é o número de subportadoras.

O tempo para transmissão de um símbolo OFDM é de $71,367 \mu s^1$. O número de bits depende da modulação e pode ser 2, 4 ou 6 para as modulações QPSK, 16QAM e 64QAM respectivamente. O número de subportadoras depende da largura de banda que é apresentado na tabela 4.

¹ O tempo total de um símbolo OFDM é dado pela duração do símbolo que é aproximadamente $66,7 \mu s$ mais a duração do prefixo cíclico que na forma normal é aproximadamente $4,7 \mu s$ (BURBANK et al., 2013)

Tabela 4 – Largura de banda e subportadoras LTE. Baseado em (ERCEG et al., 1999).

Largura de Banda MHz	Número de Subportadoras
5	300
10	600
15	900
20	1200

Por exemplo, suponha que se deseja encontrar o *throughput* máximo para uma largura de banda de 10 MHz e modulação 16QAM, então aplicando a equação 5.1 tem-se:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{71,367 \times 10^{-6}} \times 4 \times 600 = 33,63 \text{Mbps} \quad (5.2)$$

A equação 5.1 pode ser expandida se as taxas de códigos forem consideradas. Para isto é necessário a utilização dos valores apresentados na Tabela 1. A nova equação do *throughput* será:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \times R_c \quad (5.3)$$

Onde: R_c é a taxa de codificação de modulação; os outro parâmetros são os mesmos da equação 5.1.

5.1.2 Relação Sinal Ruído

A taxa de dados máxima também conhecida como capacidade do canal é dependente de outros dois fatores, a largura de banda e a relação sinal ruído. Sua formulação é (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2013):

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (5.4)$$

Onde:

- C é a capacidade do canal em bps;
- B é a largura de banda do canal em Hz;
- SNR é a relação sinal ruído.

Na seção 5.1.1 foram apresentadas as equações para a taxa de dados. Unindo as equações 5.3 e 5.4 e deixando a SNR em evidência tem-se:

$$\frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \times R_c = B \times \log_2(1 + SNR)$$

$$SNR = 2^{\frac{\frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \times R_c}{B}} - 1 \quad (5.5)$$

A equação para se obter o valor de SNR em decibel é:

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR \quad (5.6)$$

5.1.3 Máxima Perda de Propagação Permitida

O *LINK BUDGET* é utilizado para se calcular a máxima perda de propagação permitida a fim de que os usuários que se encontrem nas bordas da célula consigam utilizar o sistema. A equação de *LINK BUDGET* para propagação no espaço livre é:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (5.7)$$

Onde:

- L é a perda máxima no espaço livre;
- P_{tx} é a potência de transmissão em dBm;
- G_{tx} é o ganho da antena de transmissão em dBi;
- L_{tx} é a perda na transmissão;
- SNR_{Req} é a relação sinal ruído requerida em dB;
- S_{rx} é a sensibilidade na recepção em dB;
- G_{rt} é o ganho da antena de recepção em dBi;
- L_{rt} são as perdas na recepção em dB;
- G_{dv} é o ganho de diversidade em dBi;
- M é a margem de desvanecimento em dB.

A máxima perda deve ser calculada para o *downlink* e *uplink* e será adotado o menor valor encontrado (pior caso).

Segundo Izario (IZARIO, 2015) o valor adotado para M está entre 4 dB e 6 dB para áreas urbanas. A sensibilidade requerida na recepção para o cálculo de *link budget* de *downlink* é de -92 dBm que é a maior sensibilidade requerida especificada pela 3GPP. Já para o cálculo de *link budget* de *uplink* a sensibilidade requerida será de -101,5 dBm. A máxima potência de transmissão permitida do móvel seguindo o padrão 3GPP é de 23 dBm.

5.1.4 Raio da ERB

O raio da ERB é encontrado utilizando um modelo de propagação de sinal. Este modelo deve ser escolhido adequadamente e depende da frequência do sistema, tipo de terreno, distância entre receptor e transmissor, etc². Conforme exposto no capítulo 3 o modelo de propagação mais adequado para o LTE é o modelo COST-231 Hata Modificado apresentado na seção 3.6 pois este modelo atende as frequências de operação de 2,5 GHz utilizadas no Brasil e também as frequências de 700 MHz que serão utilizadas no Brasil após o desligamento do sinal da TV analógica.

Então, igualando as equações 3.17 e 5.7 onde a $Perda_{Propagação}$ será o menor valor encontrado entre *link budget* do *downlink* e *link budget* do *uplink* tem se:

$$\min(L_{uplink}, L_{downlink}) = K_1 + K_2 \times \text{Log}_{10}(R_{km}) \quad (5.8)$$

Como se deseja encontrar o raio da célula a variável R_{km} deve ser isolada:

$$R = 10^{\frac{\min(L_{uplink}, L_{downlink}) - K_1}{K_2}} \quad (5.9)$$

Como o valor de K_1 depende da frequência a equação 3.18 será utilizada se a frequência for 700 MHz e a equação 3.20 será utilizada para frequência de 2,5 GHz. O calculo do raio da ERB é exibido no Algoritmo 4.

Algoritmo 4: Algoritmo para calculo do raio de atuação da ERB.

```

Calcule SNRdB
Calcule Link Budget downlink
Calcule Link Budget uplink
se ( Link Budget downlink < Link Budget uplink)
{
    L= Link Budget downlink
}
senão
{
    L= Link Budget uplink
}
se (Frequência=700 MHz)
{
    Calcule K1 utilizando a equação Hata-Okumura do modelo COST-231
    Hata Modificado
}
senão se(Frequência=2,5 GHz)
{
    Calcule K1 utilizando a equação modificada pela Alcatel -Lucent
    do modelo COST-231 Hata Modificado
}
Calcule o raio utilizando a equação R=10[(L-k1)/K2]
```

² Dependendo do modelo parâmetros como, paredes, altura de prédios e larguras de ruas podem ser considerados.

5.1.5 Quantidade de ERBs

Antes de calcular a quantidade de ERBs é preciso calcular a área de cada ERB. Utilizando a equação 5.10 para encontrar a área da circunferência tem-se a área máxima da ERB para atender usuários com qualidade de serviço:

$$A = \pi \times R^2 \quad (5.10)$$

Onde:

- R é o raio de alcance da ERB;
- A é a área de cobertura da ERB.

Para se calcular a quantidade de ERBs necessárias é preciso saber qual a área a ser coberta, então divide-se a área a ser coberta pela área da ERB e o resultado se for fração deve ser arredondado para cima.

$$Quantidade = arredonda_para_cima\left(\frac{A_{total}}{A_{ERB}}\right) \quad (5.11)$$

5.2 Posicionamento Ideal das ERBs

O problema de posicionamento das ERBs consiste em dada uma determinada região geográfica, determinar onde as ERBs devem ser posicionadas. Com as equações apresentadas na seção 5.1 é possível definir a quantidade de ERBs necessárias e o raio de cada uma, deve-se então determinar onde as ERBs serão alocadas.

Toda a região geográfica deve ser coberta pelas ERBs, pois pode haver um cliente em qualquer ponto da região utilizando um dispositivo móvel. Entretanto, para facilitar a modelagem do problema, o espaço deve ser discretizado colocando-se nele pontos de demanda, onde cada ponto estará a uma distância " $dist$ " um do outro. Quanto menor for o valor de " $dist$ " mais preciso será o modelo e maior será o custo computacional. Na Figura 13, cada triângulo representa um ponto de demanda e o círculo vermelho representa a área de atuação da ERB (célula), os pontos sob o círculo são pontos atendidos e os pontos fora do círculo são pontos não atendidos pela ERB.

O algoritmo deve então posicionar o conjunto N de ERBs de forma a atender todo um conjunto M de pontos de demanda. Por se tratar de um algoritmo NP-difícil o algoritmo memético foi utilizado. A formulação matemática para este problema é dada pela equação 5.12 que é também a representação da função objetivo.

$$Maximizar f = \sum_{i=1}^m (M_i) \times \frac{100}{m} \quad (5.12)$$

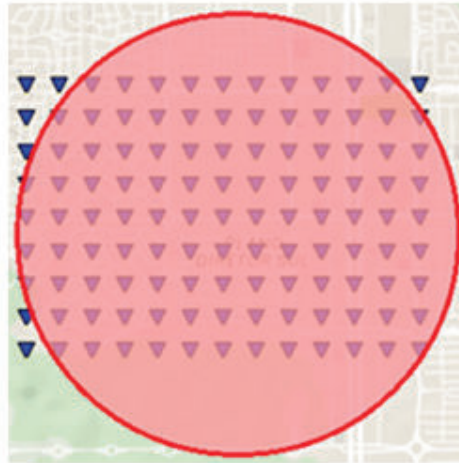


Figura 13 – Exemplo de pontos de demanda e cobertura da antena.

Sujeito a:

$$m > n \quad (5.13)$$

$$M_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m \quad (5.14)$$

$$d_{ij} = \text{distância}(M_i, N_j), \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n \quad (5.15)$$

$$M_i = \{1 \Leftrightarrow d_{ij} \leq R\} \vee \{0 \Leftrightarrow d_{ij} > R\} \quad (5.16)$$

Onde:

- M conjunto dos pontos de demanda, valerá 1 se o ponto i for atendido por pelo menos uma ERB ou 0 caso não seja atendido por nenhuma ERB;
- m representa a quantidade de pontos de demanda;
- N conjunto das ERBs a serem instaladas;
- n representa a quantidade de ERBs a serem instaladas;
- d_{ij} representa a distância entre o ponto de demanda M_i e a ERB N_j ;
- R representa o raio de ação das ERBs (raio das células).

A função objetivo f é implementada como sendo o percentual de pontos de demanda atendidos por no mínimo uma ERB. Com isso, quanto maior for a quantidade de pontos de demanda atendidos melhor será a solução. A solução ótima é aquela que atende 100% dos pontos de demanda.

A restrição definida na equação 5.13 informa que a quantidade de pontos de demanda deve ser maior que a quantidade de ERBs a serem instaladas. Essa restrição falha se a variável "*dist*" for grande, o que ocasiona um pequeno número de pontos de demanda. Os valores aceitos para M_i são 0 ou 1 conforme apresentado na restrição 5.14. Para que um ponto de demanda seja considerado atendido a distância entre o ponto de demanda e uma ERB deve ser menor do que o raio de alcance da ERB, então se o ponto de demanda M_i é atendido por pelo menos uma ERB ele será 1 se não for atendido por nenhuma ERB então seu valor será 0 como indicado pelas restrições 5.15 e 5.16.

Com a função objetivo já modelada, deve-se elaborar a representação dos indivíduos do AM. Isso é feito utilizando um vetor de tamanho n (calculado com a equação 5.11) onde cada posição do vetor representa uma ERB com sua latitude e longitude conforme mostra o exemplo da Figura 14 para $n = 6$. A latitude e longitude da ERB irá coincidir com algum ponto de demanda, isto é, a ERB será posicionada sobre algum ponto de demanda. Como a ERB tem um raio de ação (calculado com a equação 5.9) ela formará uma célula capaz de cobrir os pontos de demanda que estiverem a uma distância menor que o raio da ERB.

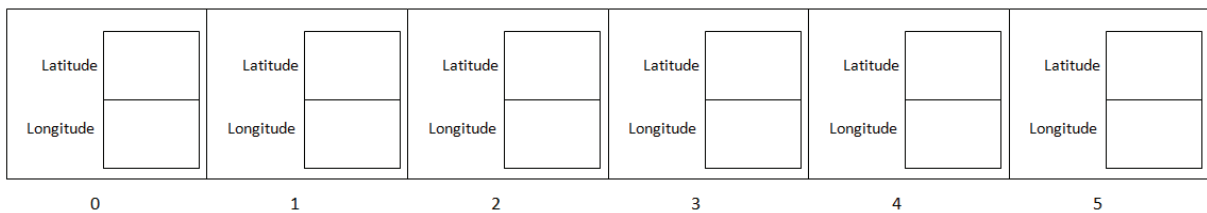


Figura 14 – Representação do indivíduo do AM.

Para um melhor entendimento é apresentado um exemplo, onde se deseja alocar antenas de modo a cobrir uma área de 116 Km^2 , com $dist = 250m$ e conseqüentemente 1947 pontos de demanda, utilizando frequência de 700 MHz, modulação QPKS e taxa de código de 0,5879. Aplicando as equações da seção 5.1 encontra-se um raio de 2674,7 metros e a necessidade de se instalar 6 ERBs. Com isso, inicia-se o AM e gera-se a população inicial, dois possíveis indivíduos (gerados de forma aleatória) dessa população com seus respectivos valores de função objetivo são mostrados nas Figuras 15 e 16. Estes indivíduos foram chamados de "Pai" e "Mãe", representando indivíduos que foram selecionados para cruzamento e conseqüentemente gerar descendentes para a nova geração. As Figuras 17 e 18 mostram a representação gráfica dos indivíduos "Pai" e "Mãe", sendo possível observar os pontos de demanda e área de cobertura das ERBs.

Pai
Função objetivo = 54,49409%

Latitude	-10,2336	Latitude	-10,2291	Latitude	-10,2358	Latitude	-10,2246	Latitude	-10,2763	Latitude	-10,2741
Longitude	-48,3598	Longitude	-48,2968	Longitude	-48,3148	Longitude	-48,3148	Longitude	-48,3036	Longitude	-48,3441
	0		1		2		3		4		5

Figura 15 – Exemplo de individuo (Pai) com função objetivo = 54,49409%.

Mãe
Função objetivo = 68,66975%

Latitude	-10,1548	Latitude	-10,1728	Latitude	-10,2043	Latitude	-10,2763	Latitude	-10,2336	Latitude	-10,2403
Longitude	-48,3598	Longitude	-48,3058	Longitude	-48,3441	Longitude	-48,3036	Longitude	-48,3418	Longitude	-48,3306
	0		1		2		3		4		5

Figura 16 – Exemplo de individuo (Mãe) com função objetivo = 68,66975%.

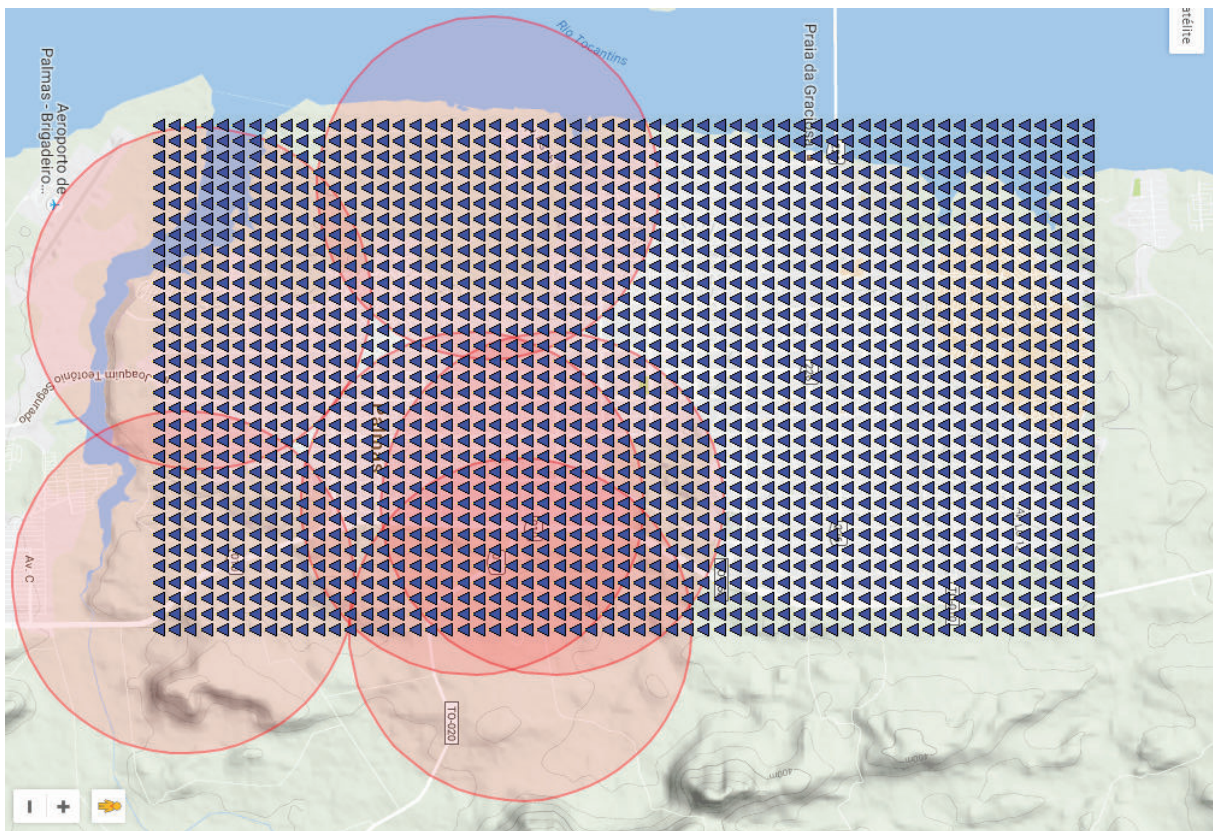


Figura 17 – Exemplo da representação da cobertura do individuo "Pai", apresentado na Figura 15.

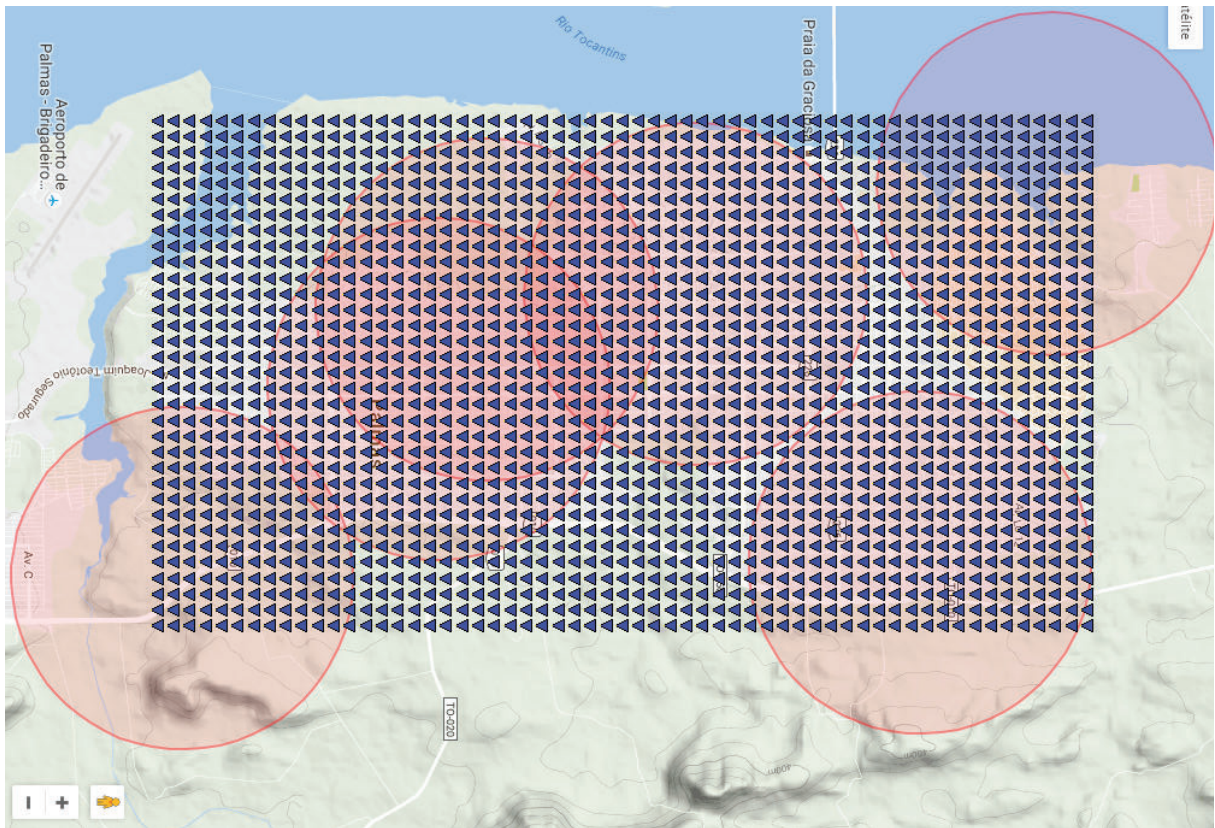


Figura 18 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Mãe", apresentado na Figura 16.

O cruzamento de indivíduos foi realizado através de trocas de ERBs entre eles, semelhante ao que acontece na figura 8, com a diferença que na imagem existem valores binários para os genes e no caso do AM, aqui proposto, cada gene é uma ERB constituída de latitude e longitude. As Figuras 19 e 20 mostram os filhos (Filho 1 e Filho 2) gerados após o cruzamento dos indivíduos "Pai" e "Mãe". A linha vertical tracejada nas Figuras 15 e 16 representam os pontos de corte para o cruzamento. Nos indivíduos "Filho 1" e "Filho 2" a linha vertical tracejada indica o ponto de corte onde de um lado estão os genes herdados do "Pai" e do outro lado os genes herdados da "Mãe". A função objetivo do "Filho 2" é 75,91166, superior à dos indivíduos "pais", entretanto, nem sempre o cruzamento gera bons filhos, como pode ser observado na figura 19 que tem a função objetivo igual a 44,17052, inferior a de ambos os "pais". As Figuras 21 e 22 mostram graficamente os "Filhos" 1 e 2. Se a população fosse constituída de apenas dois elementos e se não houvesse mais interações (gerações) o indivíduo "Filho 2" seria a incumbente (o melhor indivíduo), pois apresentou a melhor função objetivo.

Filho 1
Função objetivo = 44,17052 %

Latitude	-10,2336	-10,2291	-10,2358	-10,2763	-10,2336	-10,2403
Longitude	-48,3598	-48,2968	-48,3148	-48,3036	-48,3418	-48,3306
	0	1	2	3	4	5

Figura 19 – Exemplo de indivíduo "Filho 1" com função objetivo = 44,17052%.

Filho 2
Função objetivo = 75,91166%

Latitude	-10,1548	-10,1728	-10,2043	-10,2246	-10,2763	-10,2741
Longitude	-48,3598	-48,3058	-48,3441	-48,3148	-48,3036	-48,3441
	0	1	2	3	4	5

Figura 20 – Exemplo de indivíduo "Filho 2" com função objetivo = 75,91166%.

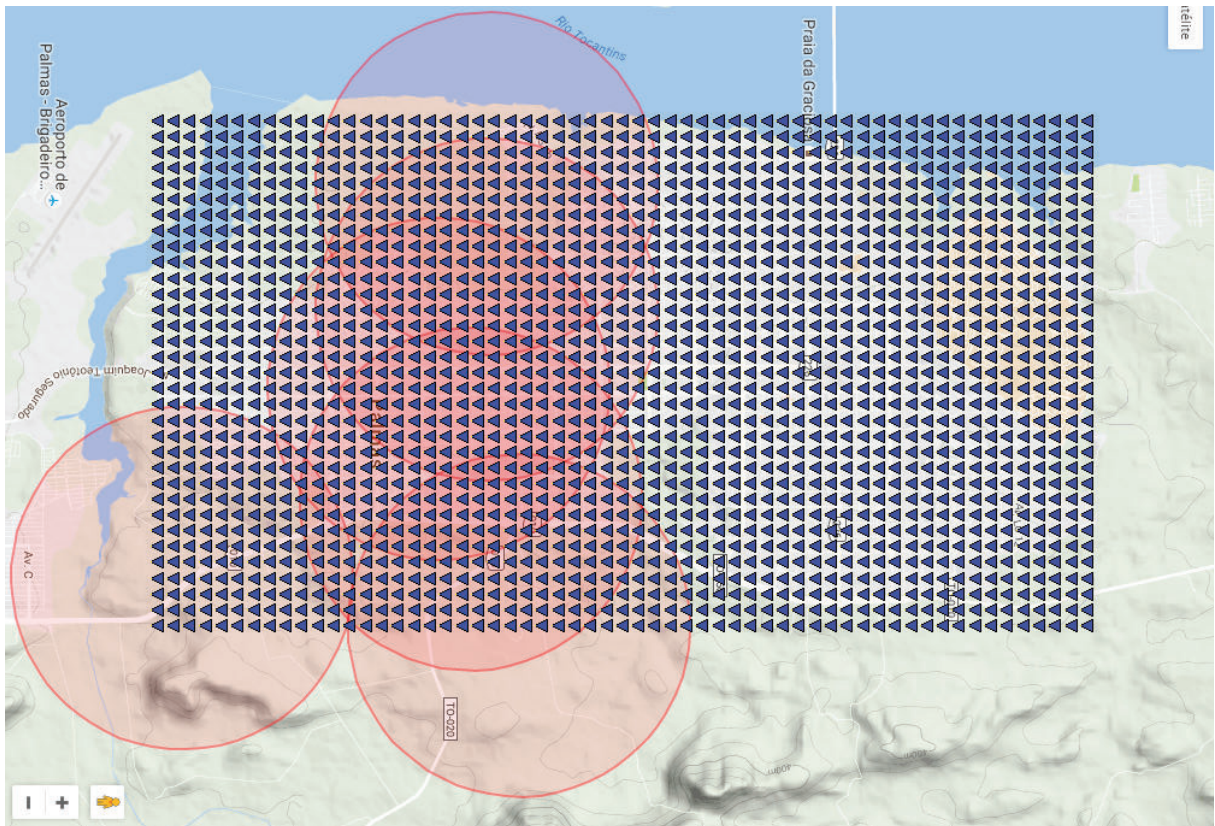


Figura 21 – Exemplo da representação da cobertura do indivíduo "Filho 1", apresentado na Figura 19.

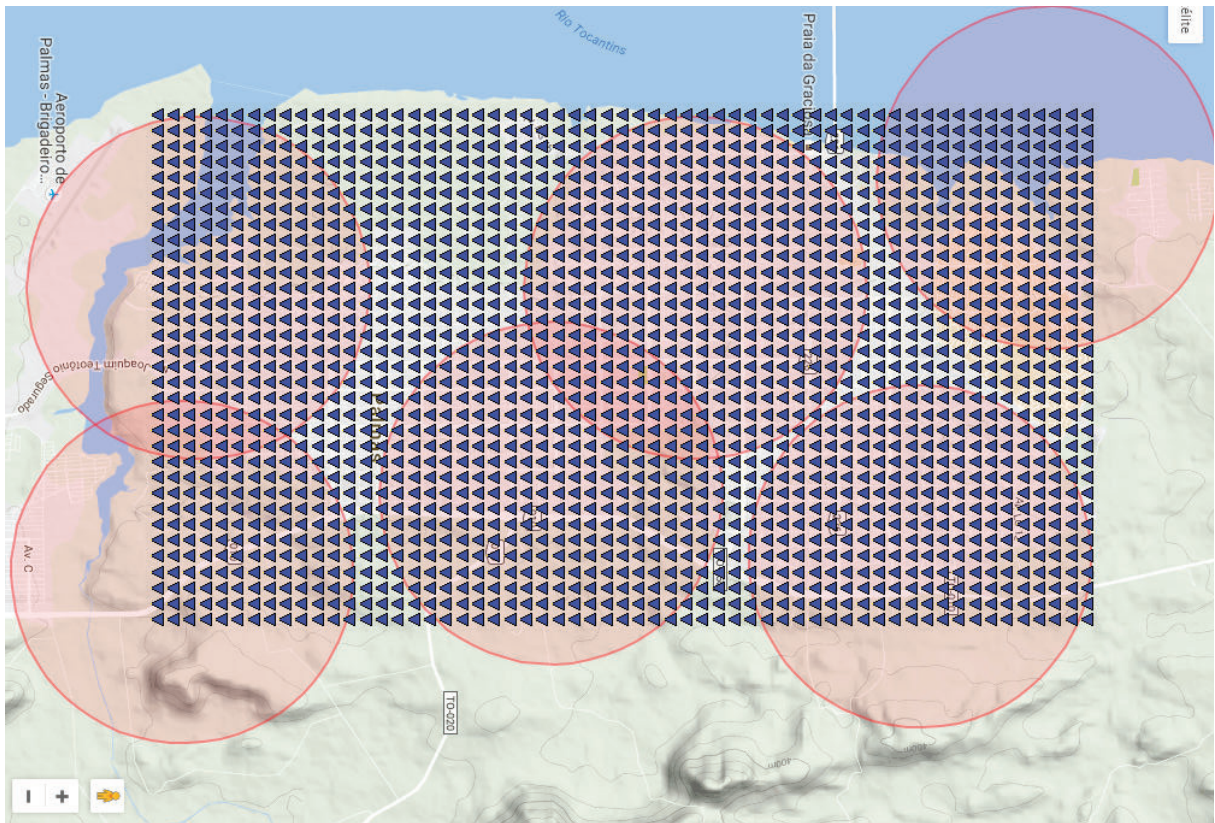


Figura 22 – Exemplo da representação da cobertura do individuo "Filho 2", apresentado na Figura 20.

Por fim, foi definida a busca local do AM que é a busca tabu. A busca tabu foi escolhida para ser o algoritmo de busca local pois a função objetivo do presente trabalho é custosa, depende da quantidade de pontos de demanda e de ERBs. Sendo assim, cada vez que a função objetivo é avaliada há um consumo de recursos computacionais e de tempo. A busca tabu cria uma lista tabu onde as soluções já avaliados e que não são melhores que a solução atual são inseridas e não voltam a ser avaliadas melhorando assim o desempenho do algoritmo, com isso, uma vez que a solução seja inserida na lista tabu, elas não sairão da lista ate o fim da busca local. Com relação a quantidade de iterações o algoritmo ficara buscando novos vizinhos enquanto existirem vizinhos melhores que a solução atual.

O funcionamento da busca tabu pode ser resumido da seguinte forma, cada ERB atende a um determinado grupo de pontos de demanda, a busca tabu reposiciona as ERBs de forma que pontos de demanda não atendidos possam ser atendidos, então cada ERB de um individuo faz uma busca em sua vizinhança e se a quantidade de pontos de demanda não atendidos diminuir, a ERB assume esta nova posição. Como se trata de uma busca tabu os pontos proibidos serão os pontos já visitados para que desta forma o algoritmo explore novas regiões e obtenha um melhor desempenho.

A Figura 23 representa um exemplo de como o reposicionamento de ERBs é feito pela busca tabu, a Figura 23(a) representa uma ERB que foi posicionada através do

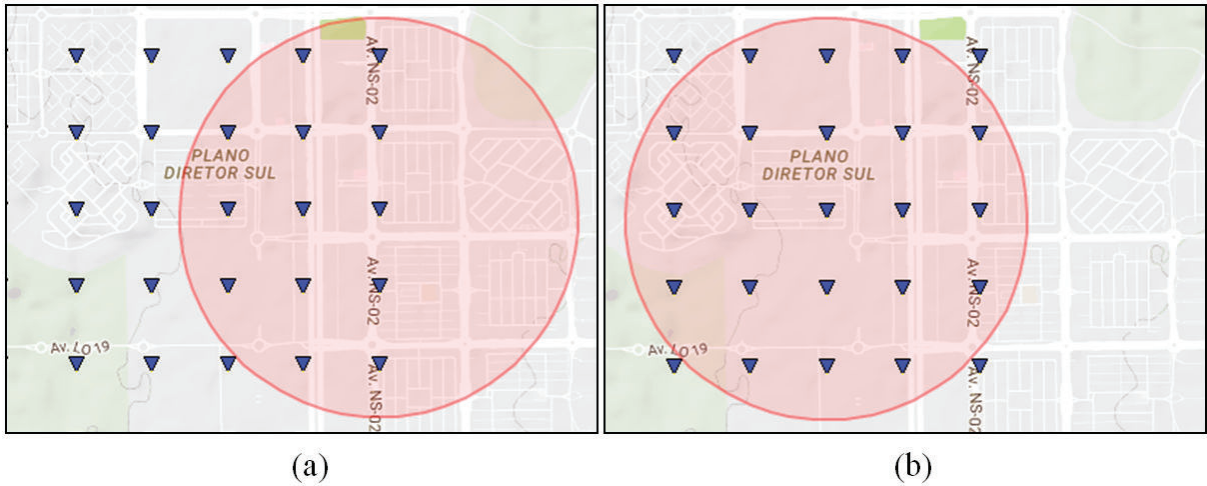


Figura 23 – Exemplo do reposicionamento de ERBs feito pela busca tabu.

cruzamento e/ou mutação. Entretanto, vários pontos de demanda não foram atendidos. Então, utilizando a busca tabu, a ERB é reposicionada fazendo uma busca pela vizinhança, de modo a maximizar o atendimento dos pontos de demanda. Isto faz com que a ERB seja reposicionada para a direita deixando de atender menos pontos de demanda conforme apresentado na Figura 23(b). Os pontos de demanda são armazenados em uma matriz e a busca tabu permite que cada ERB visite pontos à direita, esquerda, acima ou abaixo do posicionamento inicial sendo estes movimentos repetidos enquanto houver melhoria na função objetivo. Este processo se repete para todas as ERBs do indivíduo. Se a busca tabu for aplicada ao indivíduo "Filho 2" apresentado nas Figuras 20 e 22 o novo valor da função objetivo será 89,77914%, uma melhora de 13,86748%. A Figura 24 mostra o indivíduo "Filho 2" após a realização da busca tabu, sendo sua representação gráfica apresentada na Figura 25.

Filho 2 após a busca tabu
 Função objetivo = 89,77914%

Latitude	-10,1683	Latitude	-10,1728	Latitude	-10,2156	Latitude	-10,2313	Latitude	-10,2606	Latitude	-10,2606
Longitude	-48,3486	Longitude	-48,3103	Longitude	-48,3508	Longitude	-48,3148	Longitude	-48,3081	Longitude	-48,3508
	0		1		2		3		4		5

Figura 24 – Exemplo de indivíduo "Filho 2" após a busca tabu.

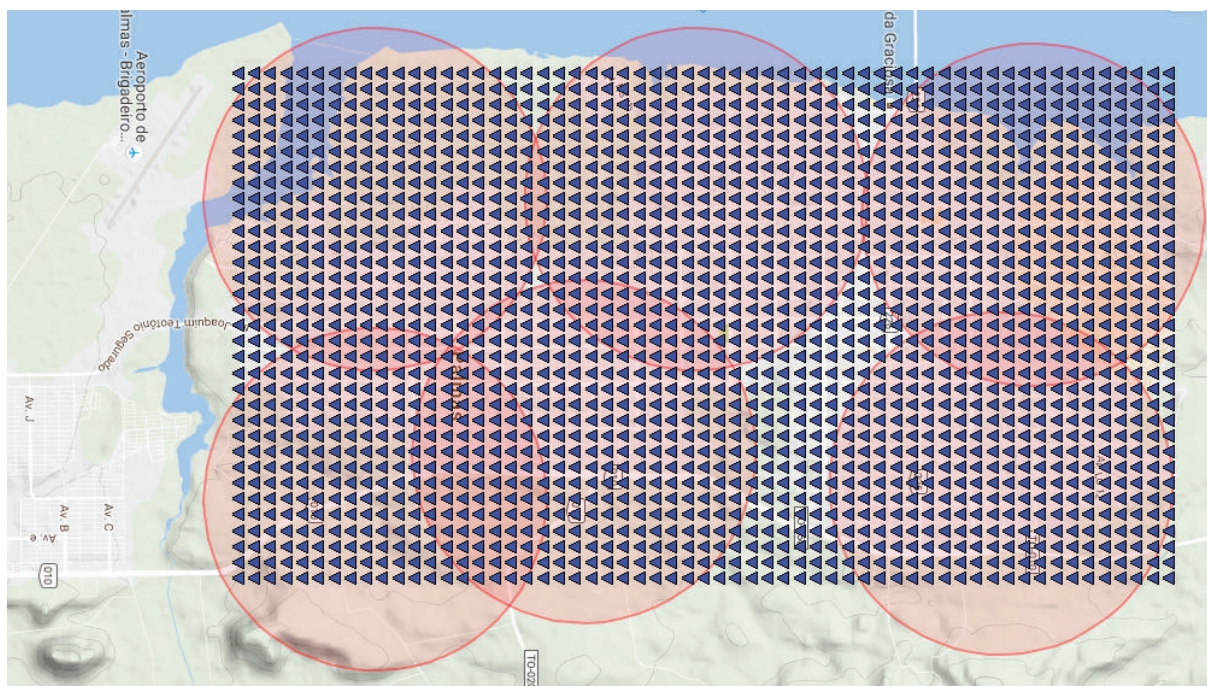


Figura 25 – Exemplo da representação da cobertura do individuo "Filho 2" após a busca tabu, apresentado na Figura 24.

6 Testes e Resultados

Diversos testes computacionais foram realizados para verificar a eficiência do algoritmo empregado e comparar as frequências de 2,5 GHz e 700 MHz. Foram utilizados computadores com processador AMD Phenom (tm) II X2 550 Processor de 3.10 GHz, 4 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 8 de 64 bits. O software utilizado foi escrito em C# utilizando o Microsoft Visual Studio Ultimate 2012.

Inicialmente um pré-teste foi realizado utilizando o AG para verificar se tal algoritmo poderia gerar bons resultados sem mescla-lo com a busca local. Para calcular o raio de atuação e a quantidade de ERBs as equações apresentadas na seção 5.1 foram utilizadas. Os parâmetros e valores adotados estão de acordo com a literatura e são apresentados nas listas seguintes (IZARIO, 2015) (SANTOS, 2010) e na Tabela 5:

Para o calculo de *Link Budget* de ***DOWNLINK***

- Potência de transmissão: 48 dBm;
- ganho da antena de transmissão: 18 dBi;
- perdas na transmissão: 3 dB;
- sensibilidade requerida na recepção: -92 dBm;
- ganho da antena receptora: 0 dBi;
- perdas na recepção: 0 dB;
- Ganho de diversidade: 0 dB;
- margem de desvanecimento: 5 dB.
- SNR: Tabela 5

Para o calculo de *Link Budget* de ***UPLINK***

- Potência de transmissão: 23 dBm;
- ganho da antena de transmissão: 0 dBi;
- perdas na transmissão: 0 dB;
- sensibilidade requerida na recepção: -101,5 dBm;
- ganho da antena receptora: 18 dBi;

- perdas na recepção: 3 dB;
- Ganho de diversidade: 3 dB;
- margem de desvanecimento: 5 dB.
- SNR: Tabela 5

Tabela 5 – Frequência, modulação, e taxa de códigos empregados nos testes.

Frequência MHz	Modulação	Taxa de Códigos
700	QPSK	0,5879
700	16QAM	0,4785
700	64QAM	0,4551
2500	QPSK	0,5879
2500	16QAM	0,4785
2500	64QAM	0,4551

Os parâmetros empregados no AG são os seguintes:

- Número de gerações (iterações do AG) igual a 100;
- Tamanho da população 50 indivíduos;
- Porcentagem de mutação 5%;
- Porcentagem de cruzamentos 100%;
- Quantidade de pontos de demanda = 480, sendo a distância entre um e outro de 500 m, e abrangendo uma área de 108 Km².

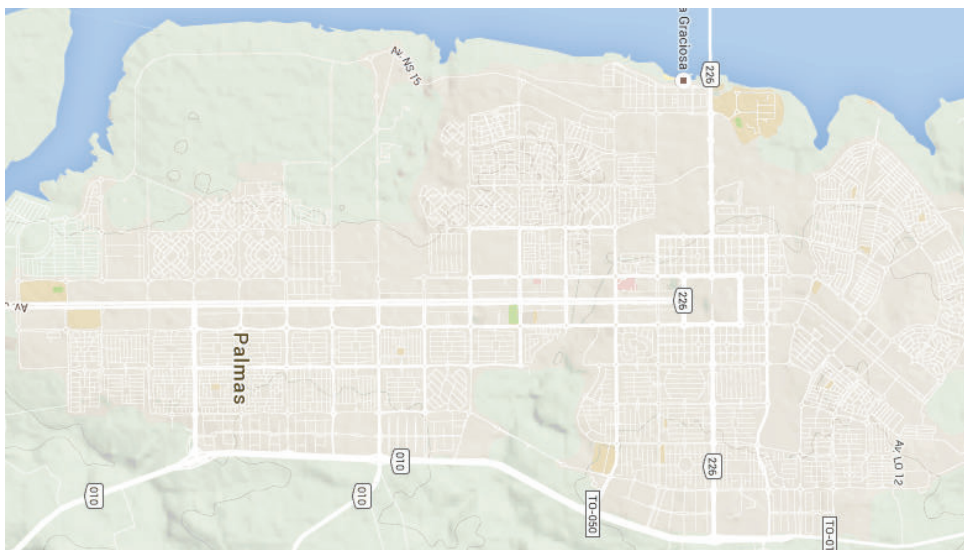


Figura 26 – Representação do Plano Diretor de Palmas-TO.

Os pré-testes foram realizados na Região Central do Plano Diretor de Palmas (PALMAS, 2007). Para colher os dados uma aplicação *Web* foi desenvolvida utilizando a *API* do *Google Maps*. A figura 26 mostra a Região Central do Plano Diretor de Palmas.

Conforme apresentado no Capítulo 5 o espaço de busca deve ser discretizado, isso significa que ao longo do espaço de busca vários pontos de demanda serão inseridos. Para os pré-testes o parâmetro "*dist*" equivale 500 m. O espaço de busca com seus respectivos pontos de demanda estão representados na Figura 27.

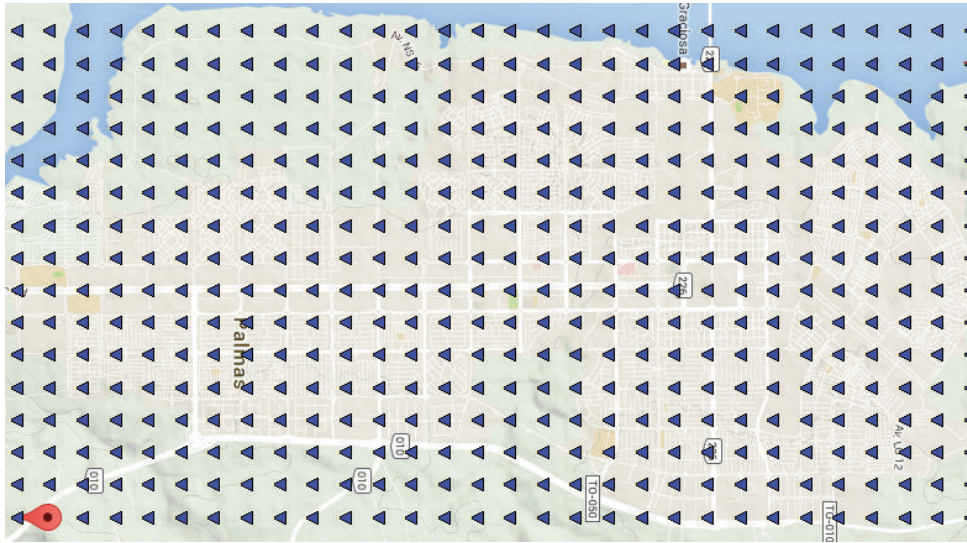


Figura 27 – Representação do Plano Diretor de Palmas-TO com os pontos de demanda.

O cálculo da quantidade de ERBs e raio das células é feito apenas uma vez para cada linha da Tabela 5 pois se trata de cálculos determinísticos. Entretanto a porcentagem de pontos de demanda atendidos é calculada pelo AG que é responsável por fazer a alocação das antenas. Como o AG é um algoritmo estocástico, foram realizados 100 testes para cada uma das linhas de parâmetros da Tabela 5. Após a realização dos 100 testes para cada linha a média e o erro são calculados. Para encontrar o erro utiliza-se a seguinte equação $erro = t_{\alpha/2} \times S/\sqrt{n}$, onde $t_{\alpha/2}$ é o t de student com probabilidade de 0,05 e grau de liberdade de 99, S é o desvio padrão e n o tamanho da amostra. As médias foram calculadas com 95% de confiança. Os resultados dos pré-testes podem ser vistos na Tabela 6.

Com relação ao posicionamento das ERBs e conseqüentemente a porcentagem de pontos atendidos pelas mesmas tem-se uma média de atendimento baixa, sendo a menor média da porcentagem de pontos de demanda atendidos de 58,28% e a maior média de 73,59%. Conclui-se com isso que o AG tradicional é ineficiente na alocação de ERBs. Então, melhorias foram aplicadas no AG para se obter uma maior taxa de atendimento de pontos de demanda, tal melhoria consiste na inclusão da busca tabu o que transforma o AG em AM.

Tabela 6 – Resultados dos pré-testes utilizando AG: Raio, quantidade de ERBs, erro da média dos pontos atendidos e média de pontos atendidos.

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos	Raio (m)	Quantidade de ERBs	Erro (%)	Porcentagem Média de Pontos Atendidos (%)
700	QPSK	0,5879	2674,7	5	1,19	60,71 (59,52 a 61,9)
700	16QAM	0,4785	2171,5	8	1,02	64,7 (63,69 a 65,72)
700	64QAM	0,4551	1808	11	0,9	66,66 (65,76 a 67,56)
2500	QPSK	0,5879	929,7	41	0,34	58,62 (58,28 a 58,96)
2500	16QAM	0,4785	754,8	61	0,47	73,12 (72,66 a 73,59)
2500	64QAM	0,4551	628,5	88	0,3	64,5 (64,19 a 64,8)

Os pontos de demanda e os parâmetros empregados no AM para cálculo do *Link Budget* de *downlink* e *uplink* são os mesmos apresentados para o AG. Para a frequência, modulação e taxa de código foram utilizados 2,5 GHz e 700 MHz e as combinações apresentadas na Tabela 1, o que gerou todas as possíveis combinações para o LTE que pode ser visto na Tabela 7 .

Para o AM os parâmetros são os seguintes:

- Número de gerações (iterações do AM) igual a 100;
- Tamanho da população 50 indivíduos;
- Porcentagem de mutação 5%;
- Porcentagem de cruzamentos 100%;
- Quantidade de pontos de demanda = 1947, sendo a distância entre um e outro de 250 m, e abrangendo uma área de 116 Km².

Houve a necessidade de mudar o parâmetro *dist* de 500 m (que foi aplicado nos pré-testes) para 250 m pois alguns dos parâmetros da Tabela 7 aplicados nas equações

Tabela 7 – Possibilidades de combinações de frequência, modulação e taxa de códigos para cálculo do raio das ERBs.

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos
700	QPSK	0,0762
700	QPSK	0,1172
700	QPSK	0,1885
700	QPSK	0,3008
700	QPSK	0,4385
700	QPSK	0,5879
700	16QAM	0,3691
700	16QAM	0,4785
700	16QAM	0,6016
700	64QAM	0,4551
700	64QAM	0,5537
700	64QAM	0,6504
700	64QAM	0,7539
700	64QAM	0,8525
700	64QAM	0,9258
2500	QPSK	0,0762
2500	QPSK	0,1172
2500	QPSK	0,1885
2500	QPSK	0,3008
2500	QPSK	0,4385
2500	QPSK	0,5879
2500	16QAM	0,3691
2500	16QAM	0,4785
2500	16QAM	0,6016
2500	64QAM	0,4551
2500	64QAM	0,5537
2500	64QAM	0,6504
2500	64QAM	0,7539
2500	64QAM	0,8525
2500	64QAM	0,9258

para calcular o raio das ERBs geram valores menores que 500 m o que acarretaria em ERBs que cobririam apenas um ponto de demanda e com isso aumentaria a quantidade de pontos de demanda não atendidos. Na Tabela 6 todos os raios são maiores que 500 m, já na Tabela 8 para frequência de 2,5 GHz, modulação 64QAM e taxas de códigos iguais a 0,7539; 0,8525 e 0,9258 os raios são menores que 500 m. É importante notar que essa diminuição do parâmetro *dist* faz com que se necessite de mais pontos de demanda para cobrir a mesma área ocasionando um maior consumo de tempo e recursos computacionais mas com a vantagem de tornar o modelo mais próximo da realidade.

Para cada linha da Tabela 7 foram realizados 100 testes, então a média e o erro da porcentagem dos pontos de demanda atendidos foram calculadas. Para encontrar o erro a formula $erro = t_{\alpha/2} \times S/\sqrt{n}$ foi utilizada, ficando a média real variando de *media - erro*

a *media + erro* com 95% de confiança conforme apresentado anteriormente nos pré-testes. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do AM: Raio, quantidade de ERBs, erro da média dos pontos atendidos e média de pontos atendidos.

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos	Raio (m)	Quantidade de ERBs	Erro (%)	Porcentagem Média de Pontos Atendidos (%)
700	QPSK	0,0762	5227,7	2	8,59E-15	99,3836 (99,3836 a 99,3836)
700	QPSK	0,1172	4594,4	2	2,00E-14	93,2203 (93,2203 a 93,2203)
700	QPSK	0,1885	3966,1	3	0,0020	90,4458 (90,4437 a 90,4478)
700	QPSK	0,3008	3406,4	4	0,0184	89,3914 (89,3730 a 89,4098)
700	QPSK	0,4385	2986,9	5	0,0137	90,1099 (90,0962 a 90,1236)
700	QPSK	0,5879	2674,7	6	0,0068	93,9222 (93,9154 a 93,9291)
700	16QAM	0,3691	2438,0	7	0,0105	91,9962 (91,9856 a 92,0067)
700	16QAM	0,4785	2171,5	8	0,0120	90,8285 (90,8164 a 90,8406)
700	16QAM	0,6016	1937,4	10	0,0621	85,7337 (85,6715 a 85,7958)

Continuação da Tabela 8

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos	Raio (m)	Quantidade de ERBs	Erro (%)	Porcentagem Média de Pontos Atendidos (%)
700	64QAM	0,4551	1808	12	0,0594	91,0037 (90,9443 a 91,0631)
700	64QAM	0,5537	1606,3	15	0,1169	93,8658 (93,7489 a 93,9827)
700	64QAM	0,6504	1439,8	18	0,1046	87,3118 (87,2071 a 87,4164)
700	64QAM	0,7539	1286,7	23	0,1206	91,9836 (91,8630 a 92,1042)
700	64QAM	0,8525	1159,3	28	0,1142	90,7585 (90,6442 a 90,8728)
700	64QAM	0,9258	1074,3	32	0,1036	89,8667 (89,7630 a 89,9704)
2500	QPSK	0,0762	1817,1	12	0,0722	90,8818 (90,8096 a 90,9541)
2500	QPSK	0,1172	1597	15	0,1306	89,7101 (89,5795 a 89,8407)
2500	QPSK	0,1885	1378,6	20	0,0995	89,3748 (89,2752 a 89,4743)
2500	QPSK	0,3008	1184	27	0,1423	89,1613 (89,0189 a 89,3036)

Continuação da Tabela 8

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos	Raio (m)	Quantidade de ERBs	Erro (%)	Porcentagem Média de Pontos Atendidos (%)
2500	QPSK	0,4385	1038,2	35	0,1516	90,5702 (90,4185 a 90,7218)
2500	QPSK	0,5879	929,7	43	0,1662	91,7928 (91,6265 a 91,9590)
2500	16QAM	0,3691	847,4	52	0,1353	89,1265 (88,9911 a 89,2619)
2500	16QAM	0,4785	754,8	65	0,1497	87,4165 (87,2667 a 87,5663)
2500	16QAM	0,6016	673,4	82	0,1300	83,3836 (83,2536 a 83,5137)
2500	64QAM	0,4551	628,4	94	0,1308	90,6119 (90,4811 a 90,7428)
2500	64QAM	0,5537	558,3	119	0,1283	74,6638 (74,5355 a 74,7922)
2500	64QAM	0,6504	500,4	148	0,1491	86,5348 (86,3856 a 86,6840)
2500	64QAM	0,7539	447,2	185	0,1416	81,9506 (81,8089 a 82,0922)
2500	64QAM	0,8525	403	228	0,1722	92,9232 (92,7510 a 93,0954)

Continuação da Tabela 8

Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Códigos	Raio (m)	Quantidade de ERBs	Erro (%)	Porcentagem Média de Pontos Atendidos (%)
2500	64QAM	0,9258	373,4	265	0,1265	97,2557 (97,1291 a 97,3822)

Observando as Tabelas 6 e 8 pode-se verificar a melhoria do AM em comparação ao AG, as linhas com fundo cinza da Tabela 8 apresentam os mesmos parâmetros da Tabela 6. Esta melhora se deve ao fato de a população do AM sempre estar em um ótimo local então em cada cruzamento é trocado material genético entre dois indivíduos que são ótimos locais e as mutações também acontecem com os ótimos locais. Outro ponto a ser observado é que o AM apresenta resultados mais homogêneos que o AG devido ao desvio padrão dos testes feitos no AM serem menores do que no AG, isso pode ser observado pelo erro, onde no AM o maior erro é de 0,1722 e no AG o menor é de 0,3.

A eficiência do AM pode ser observada na coluna referente a porcentagem média de pontos atendidos da Tabela 8, onde das 30 configurações possíveis 17 atenderam 90% ou mais dos pontos de demanda, se for analisado a quantidade de configurações que atende a 89% ou mais este número sobe para 23. Com tais números apresentados pode se concluir que o algoritmo desenvolvido neste trabalho aloca ERBs satisfatoriamente pois a exigência da ANATEL é que o município tenha no mínimo 80% de sua área coberta pela operadora de telefonia celular (ANATEL, 2016) (ANATEL, 2012).

Apenas em 1 caso a porcentagem de pontos atendidos foi menor que 80%. Este caso em específico apresentou resultados insatisfatórios pois as bordas das ERBs se sobrepõem, fazendo com que diversos pontos de demanda tenham mais de uma ERB os cobrindo enquanto outros pontos de demanda ficam sem nenhuma cobertura.

Com relação as frequências de operação do LTE a frequência de 700 MHz é a melhor para se utilizar devido ao comportamento físico de operação dos meios eletromagnéticos (IZARIO, 2015). Isso pode ser observado pelos resultados apresentados onde o raio das células para frequências de 2,5 GHz são menores que os raios das células de 700 MHz com a mesma modulação e taxa de códigos e conseqüentemente a quantidade de ERBs necessárias se torna maior para frequências de operação de 2,5 GHz fazendo os custos das operadoras subirem. Outro fator a se destacar é que a frequência de 700 MHz permite um maior tráfego de dados (CUETO, 2013).

Se for comparado o numero de ERBs com a frequência é possível verificar que para frequências de 2,5 GHz é preciso no mínimo 6 vezes mais ERBs do que para frequências de 700 MHz com a mesma modulação e taxa de código, por exemplo, para modulação QPKS e taxa de código de 0,4385 com frequência de 700 MHz são necessárias 5 ERBs para cobrir a área em estudo, já para frequência de 2,5 GHz são necessárias 35 ERBs para cobrir a mesma área, ou seja 7 vezes mais.

Observando as modulações e taxas de códigos conclui se que quanto maior for a entrega de bits por simbolo menor é o raio das antenas tanto para frequências de 700 MHz quanto para 2,5 GHz. As modulações QPSK, 16QAM e 64QAM entregam 2, 4 e 6 bits por simbolo respectivamente e este valor é multiplicado pela taxa de código para se obter a quantidade de bits por simbolo que é efetivamente transmitida. Com isso tem se que altas taxas de bits por símbolos necessitam de ERBs com raios menores e em maior número para cobrir uma determinada área, por outro lado, baixas taxas de bits por simbolo necessitam de um número menor de ERBs com raios maiores. Em resumo, velocidades de transmissão altas necessitam de muitas ERBs com raios pequenos e velocidades de transmissão baixas necessitam de poucas ERBs com raios grandes.

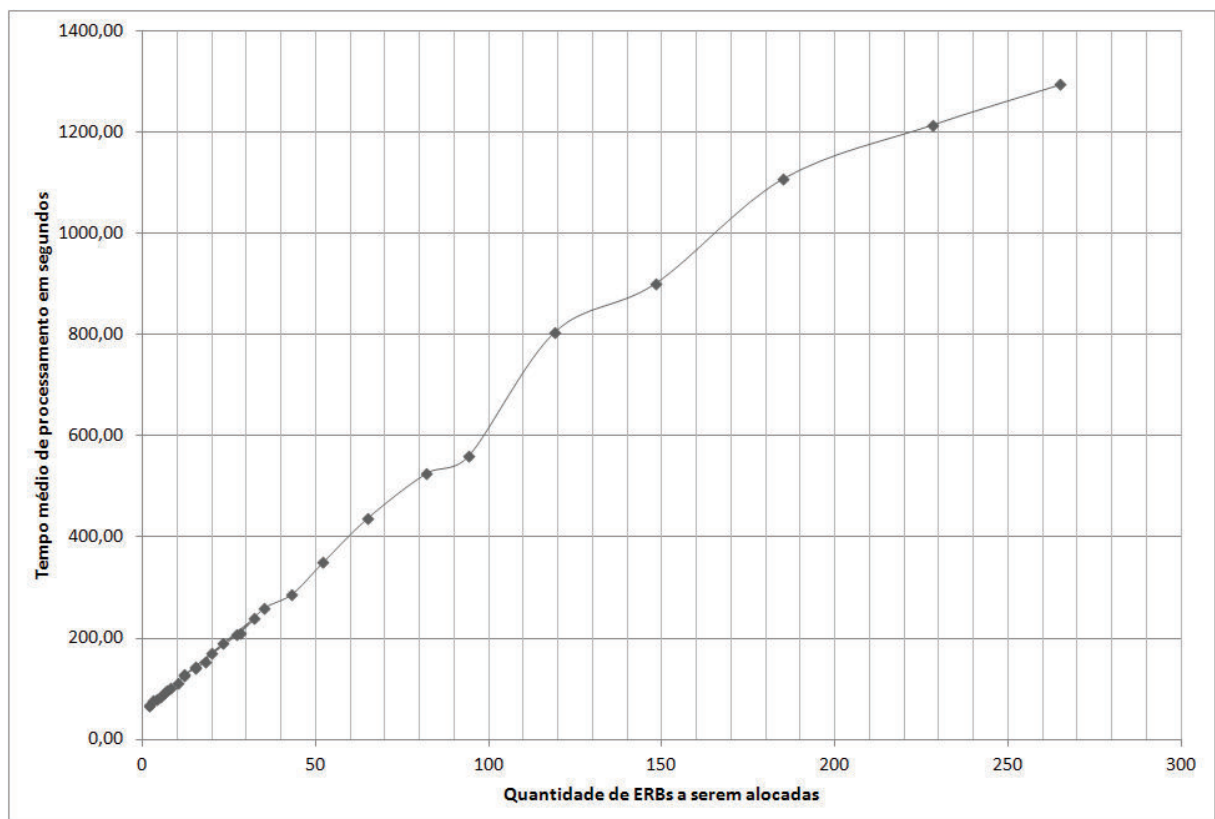


Figura 28 – Gráfico do tempo de processamento por quantidade de ERBs a serem alocadas.

Outro fator a ser considerado é o tempo de processamento do AM que depende diretamente do número de ERBs que devem ser alocadas, fazendo com que o tempo de processamento aumente nos testes que necessitam de mais ERBs. Por exemplo, o

tempo médio para se alocar duas antenas, quando se utiliza frequência de 700 MHz, modulação QPKS e taxa de código de 0,0762 foi de 68 segundos, já para alocar 265 ERBs, quando se utiliza frequências de 2,5 GHz, modulação 64QAM e taxa de código de 0,9258 o tempo foi de 21 minutos e 30 segundos. A figura 28 mostra o gráfico do tempo médio de processamento por quantidade de ERBs a serem alocadas.

Devido ao fato de se realizar ao todo 3000 experimentos para os testes um laboratório de informática com 30 computadores foi utilizado. Cada computador realizava um conjunto de 30 experimentos, isto é, calculava cada uma das linhas da tabela 7 e isso foi replicado para que se conseguisse as 100 repetições para o cálculo das médias (os pré-testes foram feitos de maneira análoga).

7 Conclusões

Este trabalho gerou um software para auxiliar no planejamento de sistemas de telefonia celular de 4G utilizando o protocolo LTE. Inicialmente foi realizado um estudo sobre o LTE, que é o protocolo de sistemas de 4G adotado no Brasil, em seguida os principais modelos de propagação foram exibidos e o modelo COST-231 Hata Modificado foi escolhido por ser o mais adequado para se trabalhar com o LTE em razão da ampla faixa de frequências que ele pode trabalhar. Posteriormente foi apresentado o algoritmo genético e uma de suas variações, o algoritmo memético, este por sua vez foi utilizado para encontrar o posicionamento ótimo das ERBs.

Na sequência foram apresentadas as formulações necessárias para o dimensionamento das células de forma que mesmo os usuários que se encontram nas bordas das células sejam atendidos com qualidade. Com isso, um algoritmo memético foi desenvolvido com a finalidade de posicionar as ERBs na região de estudo maximizando a quantidade de usuários atendidos. Após o desenvolvimento do software um estudo de caso foi realizado tendo como área de demanda a cidade de Palmas-TO, este estudo foi executado com as frequências de 700 MHz e 2,5 GHz e um comparativo entre estas frequências de operação foi efetuado. Além da frequência foram analisadas também as diversas modulações e taxas de códigos disponíveis no LTE.

Após os testes verificou-se que as equações apresentadas neste trabalho são eficientes no cálculo do raio da célula e quantidade de ERBs necessárias para cobrir a área de estudo. Tais cálculos atendem aos usuários que estão mais distantes das ERBs, isto é, nas bordas das células, garantindo a entrega dos dados com qualidade de serviço a todos os usuários que estão dentro do raio de alcance das ERBs.

O algoritmo memético apresentou bons resultados no que diz respeito a alocação de ERBs no município de Palmas-TO, pois das 30 possíveis combinações de frequência de operação e parâmetros relacionados ao cálculo do *throughput* em 29 delas a cobertura da área de estudo foi de mais de 80% dos pontos de demanda, estando, portanto, dentro do exigido pela ANATEL para áreas urbanas.

Com relação à frequência de operação do LTE foi possível observar as vantagens do planejamento feito com frequências de 700 MHz se comparado a frequências de 2,5 GHz. Os testes apresentaram que a quantidade de ERBs necessárias para frequências de 700 MHz é cerca de 6 a 8 vezes menor que para a frequência de 2,5 GHz, o que trará economia para as operadoras quando a frequência de 700 MHz estiver disponível para o uso no Brasil.

O inconveniente deste algoritmo é o tempo elevado de processamento que piora

com o aumento da quantidade de pontos de demanda e ERBs. Nos testes realizados, para o pior caso, quando se tem modulação 64QAM, taxa de código de 0,9258 e frequência de 2,5 GHz o tempo de processamento levou em média 21 minutos e 30 segundos. Outra limitação é que nos testes realizados neste trabalho apenas um tipo de ERB era considerado por vez, entretanto no mundo real as operadoras utilizam diversos tipos de ERBs para realizar a cobertura de uma cidade

7.1 Contribuições e Trabalhos Futuros

Este trabalho gerou um poster com resultados preliminares aos apresentados aqui. Que consistia em alocar antenas levando em consideração o raio e os pontos de demanda não atendidos. O trabalho foi apresentado e publicado nos anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO 2016 na seção de posters.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se o desenvolvimento de um algoritmo mais rápido; adaptações no presente algoritmo para que ele permita executar o planejamento considerando ERBs de tipos diferentes ao mesmo tempo; e a geração da população inicial por meio de heurísticas construtivas.

Referências

- 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 8.8.0 Release 8)*. [S.l.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 30.
- ALCATEL-LUCENT. *Lte dimensioning guidelines – outdoor link budget –fdd*. fevereiro 2011. Citado na página 36.
- AMALDI, E.; CAPONE, A.; MALUCELLI, F. Planning umts base station location: Optimization models with power control and algorithms. *IEEE Transactions on wireless Communications*, IEEE, v. 2, n. 5, p. 939–952, 2003. Citado na página 19.
- AMALDI, E.; CAPONE, A.; MALUCELLI, F. Radio planning and coverage optimization of 3g cellular networks. *Wireless Networks*, Springer-Verlag New York, Inc., v. 14, n. 4, p. 435–447, 2008. Citado na página 19.
- AMALDI, E.; CAPONE, A.; MALUCELLI, F.; MANNINO, C. Optimization problems and models for planning cellular networks. In: *Handbook of optimization in telecommunications*. [S.l.]: Springer, 2006. p. 917–939. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- ANATEL. *Edital da Licitação Nº 004/2012/PVCP/SPV - ANATEL*. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 70.
- ANATEL. *Cobertura e Zona de Sombra - Portal do Consumidor - Agência Nacional de Telecomunicações*. 2016. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/consumidor/index.php/telefonia-celular/direitos/cobertura-e-zona-de-sombra>>. Citado na página 70.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. *Pesquisa Operacional, 2ª Edição: Para Cursos de Engenharia*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2015. Citado na página 47.
- ATHANASIADOU, G.; ZARBOUTI, D.; TSOULOS, G. Automatic location of base-stations for optimum coverage and capacity planning of lte systems. In: IEEE. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. [S.l.], 2014. p. 2077–2081. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- ÁVILA, S. L. *Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas refletoras*. Dissertação (Mestrado) — Florianópolis, SC, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 38, 39, 41, 42, 44 e 45.
- BARRETO, E. P. *Caracterização da Perda de Propagação em Região Urbana nas faixas de 2, 5 GHz e 3, 5 GHz*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- BECHELANE, C. O. *Planejamento e simulação de redes celulares de terceira geração com controle de potência e múltiplos serviços*. XL SBPO, João Pessoa, PB, 2008. Citado na página 19.

- BONFIM, T. R.; YAMAKAMI, A. Aplicação do algoritmo memético no escalonamento job shop com parâmetros fuzzy. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2006. Citado na página 38.
- BURBANK, J. L.; ANDRUSENKO, J.; EVERETT, J. S.; KASCH, W. T. *Wireless Networking: Understanding Internetworking Challenges*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado na página 49.
- CAVALCANTE, G. A. *Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3, 5GHZ utilizando algoritmos genéticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 36, 39, 40, 41 e 42.
- CUETO, D. Y. M. *Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes LTE-Advanced*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 70.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. [S.l.]: Academic press, 2013. Citado na página 50.
- ERCEG, V.; GREENSTEIN, L. J.; TJANDRA, S. Y.; PARKOFF, S. R.; GUPTA, A.; KULIC, B.; JULIUS, A. A.; BIANCHI, R. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal on selected areas in communications*, IEEE, v. 17, n. 7, p. 1205–1211, 1999. Citado 4 vezes nas páginas 10, 34, 36 e 50.
- GLOVER, F. Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, INFORMS, v. 20, n. 4, p. 74–94, 1990. Citado na página 48.
- GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, v. 1989, p. 102, 1989. Citado na página 38.
- GRUBISIC, S. *Técnica de traçado de raios associada a metaheurísticas para otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores*. Tese (Doutorado) — Florianópolis, 2012. Citado na página 38.
- HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 29, n. 3, p. 317–325, 1980. Citado na página 33.
- HAYKIN, S. *Communication systems (4th Edition)*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. Citado na página 29.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. [S.l.]: U Michigan Press, 1975. Citado na página 38.
- IZARIO, B. R. F. *Comparação do sistema LTE operando na faixa de 2, 5 GHZ e 700 MHZ*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 22, 34, 51, 62 e 70.
- KALVENES, J.; KENNINGTON, J.; OLINICK, E. Base station location and service assignments in w-cdma networks. *INFORMS Journal on Computing*, INFORMS, v. 18, n. 3, p. 366–376, 2006. Citado na página 18.

- LAKSHMINARASIMMAN, N.; BASKAR, S.; ALPHONES, A.; IRUTHAYARAJAN, M. W. Evolutionary multiobjective optimization of cellular base station locations using modified nsga-ii. *Wireless Networks*, Springer, v. 17, n. 3, p. 597–609, 2011. Citado na página 20.
- LEE, S.; LEE, S.; KIM, K.; KIM, Y. H. Base station placement algorithm for large-scale lte heterogeneous networks. *PloS one*, Public Library of Science, v. 10, n. 10, p. e0139190, 2015. Citado na página 21.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2008. Citado na página 40.
- MATHAR, R.; NIESSEN, T. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks. *Wireless Networks*, Springer-Verlag New York, Inc., v. 6, n. 6, p. 421–428, 2000. Citado na página 18.
- MOSCATO, P.; NORMAN, M. G. A memetic approach for the traveling salesman problem implementation of a computational ecology for combinatorial optimization on message-passing systems. *Parallel computing and transputer applications*, Amsterdam: IOS Press, v. 1, p. 177–186, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 45.
- MUNYANEZA, J.; KURIEN, A.; WYK, B. V. Optimization of antenna placement in 3g networks using genetic algorithms. In: IEEE. *Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, 2008 Third International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 30–37. Citado na página 20.
- NOHRBORG, M. *LTE*. 2016. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 23, 24 e 25.
- PAIVA, J. L. d. *Um algoritmo genético híbrido para supressão de ruídos em imagens*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 39, 42 e 44.
- PALMAS. Lei municipal complementar nº 155. Palmas, TO, 28 de dezembro de 2007. Citado na página 64.
- PHAM, D.; KARABOGA, D. *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 46.
- PORTANOVA, R. *Um currículo de matemática em movimento*. [S.l.]: EDIPUCRS, 2005. Citado na página 29.
- RADCLIFFE, N. J.; SURRY, P. D. Formal memetic algorithms. In: SPRINGER. *AISB Workshop on Evolutionary Computing*. [S.l.], 1994. p. 1–16. Citado 3 vezes nas páginas 9, 45 e 46.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications: Principles and practice*, prentice-hall inc. *NJ, USA*, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.

- SÁ, S. M. R. de. *ALGORTIMO PARA DESENVOLVER UMA FERRAMENTA DE PLANEAMENTO PARA O SISTEMA DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS LTE*. Tese (Doutorado) — ISCTE-IUL, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 16, 23, 27, 30 e 31.
- SANTOS, D. dos. *Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 62.
- SCHMIDT-DUMONT, T.; VUUREN, J. van. Radio transmission tower placement in cellular telephone communication networks. In: *44th Annual Conference of the Operations Research Society of South Africa*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 91. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- SEYBOLD, J. S. *Introduction to RF propagation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. Citado na página 34.
- SILVA, D. J. A. d. *Algoritmos culturais com abordagem memética e multipopulacional aplicados a problemas de otimização*. Tese (Doutorado) — UFPA, 2012. Citado na página 46.
- SIVANANDAM, S.; DEEPA, S. *Introduction to genetic algorithms*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. Citado na página 41.
- SKAKOV, E.; MALYSH, V. Simulated annealing and evolutionary algorithm for base station location problem: a comparison of methods. *JITA-JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY AND APPLICATIONS*, v. 10, n. 2, 2016. Citado na página 21.
- SOUSA, M. C. d. *Alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais usando busca dispersa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015. Citado na página 47.
- SVERZUT, J. U. Redes gsm, gprs, edge e umts: evolução a caminho da quarta geração (4g). *Editora Érica, 2ª Edição Revisada e Atualizada*, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 9, 24, 25, 26 e 27.
- TAUMATURGO, C. N. d. O. *Uma investigação de algoritmos exatos e metaheurísticos aplicados ao nonograma*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013. Citado na página 46.
- TECHNOLOGIES, A. *Agilent 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges*. [S.l.], 2009. Citado 4 vezes nas páginas 9, 24, 25 e 27.
- TUTSCHKU, K.; GERLICH, N.; TRAN-GIA, P. An integrated approach to cellular network planning. In: CITESEER. *Proceedings of the 7th International Network Planning Symposium (Networks 96)*. [S.l.], 1996. p. 185–190. Citado na página 18.
- VALAVANIS, I. K.; ATHANASIADOU, G.; ZARBOUTI, D.; TSOULOS, G. V. Base-station location optimization for lte systems with genetic algorithms. In: *VDE. European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*. [S.l.], 2014. p. 1–6. Citado na página 21.
- WEINSTEIN, S. B. The history of orthogonal frequency-division multiplexing [history of communications]. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 11, p. 26–35, 2009. Citado na página 25.

YIN, B.; CAVALLARO, J. R. Lte uplink mimo receiver with low complexity interference cancellation. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Springer, v. 73, n. 2, p. 443–450, 2012. Citado na página 23.

ZANETTI, P. R. *Modelagem de canal sem fio para planejamento de rede celular de quarta geração em Brasília*. Dissertação (Mestrado) — UNB, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 16, 32, 33 e 34.

Apêndices

APÊNDICE A – Trabalho apresentado na
Seção de POSTERS com publicação nos
Anais do XLVIII SBPO 2016

Alocação de Antenas de Telecomunicações utilizando Algoritmo Genético Modificado

Vinicius Oliveira Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - Área de Informática
 AE 310 SUL, Avenida LO 05, s/n Plano Diretor Sul, Palmas-TO. CEP: 77.021-090
 vinius@ifto.edu.br

Marcelo Lisboa Rocha, George Lauro Ribeiro de Brito

UFT - Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Sistemas
 Bloco III, Sala 08, Campus Universitário de Palmas, UFT
 marcelolisboarocha@gmail.com, gbrito@uft.edu.br

RESUMO

Este trabalho trata do problema de alocação de antenas de telecomunicações, que consiste em dada uma determinada região geográfica, onde se encontram os possíveis clientes, dispor antenas, quantas forem necessárias, de modo a cobrir toda área. Porém, deve se alocar as antenas com o mínimo custo e a máxima cobertura. Cada antena pode ter um raio de alcance (antenas omnidirecional) e um custo. Toda a região geográfica é um possível ponto de demanda, pois pode haver um cliente em qualquer ponto da região. Para facilitar o problema, o espaço deve ser discretizado colocando-se nele pontos de demanda, onde cada ponto estará a uma distância "*dist*" um do outro. Quanto menor for o valor de "*dist*" mais preciso será o modelo e maior será o custo computacional. Por se tratar de um problema de natureza combinatória o algoritmo genético (AG) foi escolhido para resolvê-lo. Algumas modificações foram feitas no algoritmo genético tradicional (AGT) e funcionalidades foram acrescentadas transformando o no algoritmo genético modificado (AGM), para que assim melhores resultados fossem obtidos. A função objetivo (*fo*) é implementada como sendo a soma dos custos das antenas instaladas mais a soma das penalidades dos pontos de demanda não atendidos. Com isso, a melhor solução é aquela que atende o maior número possível de pontos de demanda com a menor quantidade possível de antenas. A formulação matemática da *fo* é:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } f &= \sum_{i=1}^n (C_i * a_i) + \sum_{j=1}^n (P_j * \alpha) \\ a_i &\in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n \\ P_j &\in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Onde: *C* conjunto dos custos das antenas ; $a_i = 1$ se no ponto $i \in C$ for instalada uma antena, caso contrário o valor de a_i será 0. *P* conjunto dos pontos de demanda, valerá 1 se o ponto j não for atendido por nenhuma antena ou 0 caso seja atendido por no mínimo uma antena. α representa a penalidade aplicada a cada ponto de demanda não atendido por nenhuma antena. n representa a quantidade de pontos de demanda e também os possíveis locais para instalação das antenas. Testes computacionais foram realizados para comparar o AGM com o AGT. Foram feitos 100 experimentos com ambos os algoritmos com os seguintes parâmetros: número de gerações igual a 100; tamanho da população 50; 500 pontos de demanda, abrangendo uma área de 20 Km². Então a média dos custos dos 100 experimentos feitos com o AGM foi de 1735 com erro de 57,2 e 95% de confiança, sendo assim a média real varia de 1677,8 a 1792,2. Já no caso do AGT obteve-se uma média dos custos de 94.842 com erro de 880,12 e 95% de confiança, ficando a média real entre 93.961,88 a 95.722,12. Após os experimentos e análise dos dados observou-se que o AGM, proposto neste trabalho, mostrou ser superior ao AGT.

PALAVRAS CHAVE. Algoritmos genéticos, alocação de facilidades, metaheurística.