

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

DEBORAH LUISA DETÂNICO VIEIRA

PLANEJAMENTO DA COBERTURA DE REDES MÓVEIS DE QUARTA GERAÇÃO  
ATRAVÉS DE METAHEURÍSTICA HÍBRIDA

SÃO LEOPOLDO  
2017



Deborah Luisa Detânico Vieira

PLANEJAMENTO DA COBERTURA DE REDES MÓVEIS DE QUARTA GERAÇÃO  
ATRAVÉS DE METAHEURÍSTICA HÍBRIDA

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Computação  
Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos  
Sinos — UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. Arthur Tórgo. Gómez

São Leopoldo  
2017

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Vieira, Deborah Luisa Detânico

Planejamento da cobertura de redes móveis de quarta geração através de metaheurística híbrida / Deborah Luisa Detânico Vieira — 2017.

83 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, 2017.

“Orientador: Prof. Dr. Arthur Tórgo. Gómez, Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação”.

1. Metaheurísticas. 2. Busca Tabu. 3. Algoritmo Genético. 4. Algoritmo Híbrido. 5. Recobrimento de conjuntos. 6. Cobertura de redes móveis. 7. LTE. I. Título.

CDU 004.732

Bruna Sant’Anna: — CRB 10/2360

(Esta folha serve somente para guardar o lugar da verdadeira folha de aprovação, que é obtida após a defesa do trabalho. Este item é obrigatório, exceto no caso de TCCs.)



## AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Dr. Arthur Tórigo Gómez, por ter me aceitado como orientanda, pelos ensinamentos e por ter acreditado no meu potencial quando eu mesma não acreditei.

Aos professores Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky e Dr. José Vicente Canto dos Santos pelos ensinamentos e disponibilidade.

Aos meus pais Fábio Silvio Vieira e Marta Detânico Vieira por transformarem meus sonhos em realidade e não me deixarem desistir quando tudo parecia dar errado. Ao meu irmãozinho de quatro patinhas, Sir. Frederico II, por todas as vezes que dormiu no meu colo enquanto eu escrevia, estudava e programava me impedindo de parar já que eu não ousaria perturbar seu confortável soninho. Pela colaboração, através da sua presença e companhia que sempre me trouxeram calma e paciência, aqui também tem sua patinha.

Ao meu amigo Leandro Lisboa Penz, pela inspiração, pelo exemplo e por toda a ajuda com o texto e ainda mais com programação. Obrigada pela paciência e pela incansável disponibilidade de me auxiliar e tirar minhas dúvidas com Python. À professora e amiga Margô Anesi pela ajuda com as regras gramáticas, pela revisão do texto e disponibilidade e interesse de me auxiliar. Aos meus queridos amigos que entenderam minhas ausências e não me odiaram por "alugar seus ouvidos" por só falar, reclamar e explicar sobre este trabalho.

Aos que nem sabem da existência desse trabalho mas que por vezes me mantiveram motivada e focada através de seus próprios trabalhos: os autores Ernest Cline, J.K. Rowling e Meg Cabot. Às bandas: Dead Fish, Menores Atos, Sugar Kane, Zander, Pense, Bullet Bane, Yellowcard, Pearl Jam e tantas outras por suas letras e por muitas vezes serem minhas únicas companhias em longas noites e longas jornadas de finais de semana durante o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigada.





*“So why do I talk about the benefits of failure? Simply because failure meant a stripping away of the inessential. I stopped pretending to myself that I was anything other than what I was and began to direct all my energy into finishing the only work that mattered to me. Had I really succeeded at anything else, I might never have found the determination to succeed in the one arena where I believed I truly belonged.*

*(...)*

*You might never fail on the scale I did, but some failure in life is inevitable. It is impossible to live without failing at something, unless you live so cautiously that you might as well not have lived at all, in which case, you fail by default. Failure gave me an inner security that I had never attained by passing examinations. Failure taught me things about myself that I could have learned no other way. I discovered that I had a strong will, and more discipline than I had suspected; I also found out that I had friends whose value was truly above the price of rubies.“*

*(J.K. Rowling - Very Good Lives)*

*“Estou alcançando o que antes eu dizia pra mim  
'Se você acha que consegue, então vai ser assim.'  
Tudo depende da vontade e a determinação,  
então vou ver se isso é um plano ou só uma ilusão.”  
(Pense - Eu prometo que vou tentar)*



## RESUMO

Com a crescente demanda de serviços de voz e, principalmente, dados móveis se fez necessário o desenvolvimento das tecnologias de quarta geração (4G). O padrão *Long Term Evolution* (LTE), desenvolvido pela *Third Generation Partnership Project* (3GPP), foi escolhido pela *International Telecommunications Union* (ITU) como tecnologia para atender os requisitos da quarta geração de serviços móveis. Para as operadoras inserirem esta nova tecnologia em suas redes existentes, se faz necessário um estudo meticuloso de planejamento, muito embora, na prática, este planejamento seja desenvolvido de forma empírica. O problema de planejamento de redes é conhecido e bem estudado no ramo da computação, conhecido como problema de recobrimento de conjuntos e classificado, pela sua complexidade, como NP-difícil. Dadas as características diferenciadas da arquitetura da rede do LTE, este trabalho busca resolver o problema de planejamento de redes de quarta geração (4G), utilizando uma modelagem matemática aplicada a uma metaheurística híbrida, composta de Algoritmo Genético e Busca Tabu. Almeja-se resolver o problema de cobertura de uma determinada região, cobrindo a maior área possível com o menor número possível de *Base Stations* (BS), visando ao planejamento com maior assertividade e redução do custo de implantação da rede 4G.

**Palavras-chave:** Metaheurísticas. Busca Tabu. Algoritmo Genético. Algoritmo Híbrido. Recobrimento de conjuntos. Cobertura de redes móveis. LTE.



## ABSTRACT

With the constantly demand of voice services and mostly in mobile data, there was the need the development of the mobile services of fourth generation (4G). The pattern Long Term Evolution, developed by the Third Generation Partnership Project (3GPP) was chosen by the International Telecommunications Union (ITU) as technology to attend the requirements of the fourth generation of mobile services. For the mobile operators introduce and apply this new generation in their own existing networks, they need to do an extensive research and planning, even if, in practical means, it is applied using the empirical way. The network planning problem is widely known and studied in computing area as set-covering problem and classified as NP-hard. Due the unique characteristics of network architecture of LTE, this work aims to solve the mobile's fourth generation planning problem using a mathematics modelling apply to a hybrid metaheuristics, composed with Genetic Algorithm and Tabu Search. It aims solve the coverage problem of a specific region, covering the largest area possible with the fewest number of Base Stations (BS) possible, seeking the best compliance and cost reduction of the LTE network deployment.

**Keywords:** Metaheuristics. Tabu Search. Genetic Algorithm. Set-covering Problem. Mobile Networks Coverage. LTE.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Evolução das tecnologias de comunicações móveis digitais. . . . .	27
Figura 2:	Ciclo de vida das tecnologias de comunicações móveis descritas em uma linha do tempo. . . . .	27
Figura 3:	Diferença entre as arquiteturas de redes do 3G e 4G. . . . .	29
Figura 4:	Comparação entre todas as tecnologias com as suas interfaces. . . . .	29
Figura 5:	Interfaces de comunicações entre eNodeBs e <i>core</i> de rede. . . . .	31
Figura 6:	Processo de handover de um usuário de um eNodeB para outro. . . . .	32
Figura 7:	Lista de frequências para o LTE definidas pela 3GPP. . . . .	34
Figura 8:	A modulação OFDM, utilizada no LTE. . . . .	35
Figura 9:	Processos gerais das etapas de planejamento de rede. . . . .	37
Figura 10:	Processos detalhados das etapas de planejamento de rede. . . . .	39
Figura 11:	Relação entre qualidade e investimentos da rede. . . . .	39
Figura 12:	Link budget da rede 4G. . . . .	41
Figura 13:	Comparação entre as funções de complexidade de tempo polinomial e exponencial. . . . .	44
Figura 14:	A classe de problemas NP. . . . .	45
Figura 15:	Fluxograma simples da Busca Tabu. . . . .	47
Figura 16:	Fluxograma simples do algoritmo genético. . . . .	52
Figura 17:	Cruzamento por um ponto e por dois pontos. . . . .	53
Figura 18:	Rede não simétrica e o raio teórico. . . . .	64
Figura 19:	Exemplo da região 2: $50 \times 50 u.a.$ dividida em regiões de $1 \times 1 u.a.$ . . . . .	65
Figura 20:	Arquitetura do Modelo Computacional . . . . .	66





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Valores dos Parâmetros para o <i>link budget de downlink</i> . . . . .	42
Tabela 2:	Valores dos Parâmetros para o <i>link budget de uplink</i> . . . . .	43
Tabela 3:	Dados para cálculo do raio teórico . . . . .	62
Tabela 4:	Média dos valores obtidos para uma rede com 100 pontos e área 25x25 u.a.	71
Tabela 5:	Média dos valores obtidos para uma rede com 500 pontos e área 50x50 u.a.	72
Tabela 6:	Média dos valores obtidos para uma rede com 1000 pontos e área 100x100 u.a. . . . .	72
Tabela 7:	Taxa de Cruzamento . . . . .	73
Tabela 8:	Taxa de Mutação . . . . .	74
Tabela 9:	Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 1: 100 pontos . . . . .	74
Tabela 10:	Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 2: 500 pontos . . . . .	74
Tabela 11:	Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 3: 1000 pontos . . . . .	74
Tabela 12:	Tamanhos da Lista Tabu . . . . .	75
Tabela 13:	Resultados da Busca Tabu no cenário 1: 100 pontos . . . . .	75
Tabela 14:	Resultados da Busca Tabu no cenário 2: 500 pontos . . . . .	75
Tabela 15:	Resultados da Busca Tabu no cenário 3: 1000 pontos . . . . .	75
Tabela 16:	Configuração do Algoritmo Genético e Busca Tabu para o Algoritmo Híbrido	76
Tabela 17:	Resultados obtidos . . . . .	76



## LISTA DE SIGLAS

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
ADSL	<i>Asynchronous Digital Subscriber Line</i>
AHC	<i>Agglomerative Hierarchical Clustering</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARP	<i>Automatic Radio Phone</i>
BS	<i>Base Station</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
DAB	<i>European Digital Audio Broadcasting</i>
DL	<i>Downlink</i>
DVB-T	<i>Terrestrial Digital Video Broadcasting</i>
EMM	<i>Evolved Packet System Mobility Management</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
E-SA	<i>Evolucionary Simutaed Annealing</i>
ESM	<i>Evolved Packet System Session Management</i>
E-UTRAN	<i>Evolved -Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duples</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>Packet Radio System</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Networks</i>
HSDPA	<i>High Speed Download Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSPA+	<i>High Speed Packet Access Plus</i>
HSUPA	<i>High Speed Upload Packet Access</i>
IMT-A	<i>International Mobile Telecommunications - Advanced</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-T	<i>Telecommunications Standardization Sector</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
MIP	<i>Mixed-integer Linear Program</i>
MME	<i>Mobile Management Entity</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex Access</i>
PAPR	<i>Peak-to-average Power Ratio</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature phase-shift keying</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAE	<i>Service Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single-Carrier - Frequency Division Multiple Access</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
SINR	<i>Relação sinal-ruído</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SON	<i>Self-Organizing Networks</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UA	<i>Unidade de área</i>
UL	<i>Uplink</i>
UM	<i>Usuário Móvel</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VoIP	<i>Voz sobre IP</i>
WCDMA	<i>Wide-Code Division Multiple Access</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	Objetivos do Trabalho	22
1.2	Estrutura do documento	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
2.1	A Evolução da Telefonia Celular no Mundo	25
2.2	O padrão <i>Long Term Evolution</i> (LTE)	28
2.2.1	<i>Enhanced Base Station</i>	30
2.2.2	O Processo de <i>Handover</i>	30
2.2.3	<i>CS Fallback</i>	32
2.2.4	Faixas de Frequências	33
2.2.5	OFDMA e SC-FDMA	35
2.2.6	<i>Self-Organizing Networks</i> (SON)	36
2.3	Planejamento de Redes LTE	36
2.3.1	Plano de Capacidade	38
2.3.2	Plano de Cobertura	40
2.4	Metaheurísticas	43
2.4.1	Busca Tabu	46
2.4.2	Algoritmo Genético	49
2.5	Problema de Recobrimento de Conjuntos	54
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>MODELAGEM</b>	<b>61</b>
4.1	Modelo de propagação do LTE	61
4.1.1	Modelagem para a Definição de eNodeBs	63
4.2	Arquitetura Computacional Modular	64
4.3	Algoritmo Genético	66
4.3.1	Geração da Rede e População Inicial	66
4.3.2	Avaliação da População	67
4.3.3	Operadores Genéticos	67
4.3.4	Critério de Parada	67
4.4	Busca Tabu	67
4.4.1	Solução Inicial	67
4.4.2	Estrutura de Vizinhança	68
4.4.3	Lista Tabu	68
4.4.4	Intensificação	68
4.4.5	Critério de Parada	68
4.5	Algoritmo Híbrido	68
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELOS</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>73</b>
6.0.1	Algoritmo Genético	73
6.0.2	Busca Tabu	74
6.0.3	Algoritmo Híbrido	76
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>79</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 81**

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por serviços de telecomunicações cresce exponencialmente a cada ano, especialmente a demanda por serviços multimídia, que se mostram em uma crescente entre os usuários. (HOLMA; TOSKALA, 2011) A quantidade de usuários móveis atingiu a marca de um bilhão de usuários em 2002, dois bilhões em 2005, três bilhões em 2007, quatro bilhões no final de 2008 e cinco bilhões em meados de 2010. (HOLMA; TOSKALA, 2011). Com o crescimento da demanda, a *Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) se encarrega de desenvolver os requisitos de novas tecnologias visando a atender o crescimento, e a indústria de telecomunicações se encarrega de atender os requisitos através dos seus produtos. Conforme a tecnologia evolui em gerações, as operadoras se encarregam de planejar e desenvolver suas redes da melhor forma possível.

Este planejamento deve ser preciso, conciso e eficiente devido ao custo total (planejamento, aquisição de equipamentos, implantação, otimização e manutenção) elevado. Da mesma forma, deve ser o mais abrangente possível, atendendo demandas de cobertura (maior quantidade de usuários possíveis) com a qualidade esperada ou determinada pela estratégia da operadora cumprindo as metas estipuladas pela agência reguladora (no caso do Brasil, a ANATEL).

A cada nova geração de tecnologias, as operadoras preparam suas redes para recebê-las e cada uma delas requer planejamento específico, dadas suas características. Embora o *Long Term Evolution* (LTE), assim como as tecnologias anteriores, venha para acrescentar melhorias, há diferenças consideráveis entre o planejamento de redes 2G e 3G e as redes 4G, por dois motivos principais: o primeiro deles é o conceito de *Base Station* (BS) heterogêneas (chamadas de eNodeBs ou eNBs), apresentando uma arquitetura de rede diferenciada chamada de *Evolved Packet System* (EPS), abrangendo o *Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) para acesso e o *Evolved Packet Core* (EPC) para *core* de rede; o segundo motivo é a migração completa do *core* para rede IP. Nas redes 2G, a transmissão e *core* de rede eram feitas puramente em SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). A terceira geração utilizava dois meios para transmissão: a rede SDH já existente e gradualmente migrando-as para IP. Já para o LTE, a transmissão e o *core* da rede devem ser puramente IP, inclusive para tráfego de voz através da tecnologia de *Voice over IP* (VoIP) (TIPMONGKOLSILP; ZAGHLOUL; JUKAN, 2011).

Com a mudança na arquitetura da rede e na rede de transmissão de voz e dados móveis, é esperado que a metodologia de planejamento da rede também sofra alterações. Dadas as distribuições de usuários e demandas de uma determinada região, o problema de planejamento de redes 4G heterogêneas é um problema computacional considerado como NP-difícil (WANG; CHUANG, 2015) e, portanto, utilizar metaheurísticas para resolvê-lo é mais adequado a qualquer outro método ou algoritmo conhecido. (YANG et al., 2007).

No planejamento da rede 4G, o ponto inicial principal é determinar quantas eNodeBs serão necessárias para prover uma cobertura mínima desejada. A partir deste ponto, já se pode estimar o custo da rede e o tempo de retorno do investimento para a operadora. Embora no presente

trabalho o custo não seja considerado, é válido salientar que este é um aspecto importante para as operadoras que, de fato, investem em redes de telefonia celular. Quanto maior a área ou região a ser estudada, mais assertivo deve ser o estudo da quantidade de eNBs.

Para estimar a capacidade das redes LTE, há numerosas ferramentas proprietárias disponíveis no mercado. Porém, para uma boa análise e consequente planejamento, é necessário excessivo tempo de coleta de dados de redes existentes, já que há muitos fatores envolvidos. O princípio básico de qualquer análise é considerar que a demanda de tráfego não é homogênea. Há diferentes tipos de usuários e, desta forma, uma distribuição cumulativa pode expressar bem a situação em uma determinada região. Mesmo assim, o desafio é fazer previsões realistas sobre a demanda do tráfego.

O método mais utilizado é uma análise do histórico das tecnologias anteriores e a evolução do comportamento da demanda do tráfego das redes de segunda e terceiras gerações (PENTTINEN, 2012). Esse histórico pode ser utilizado para guiar a previsão de demanda para as novas redes de quarta geração. O plano de cobertura pode ser estimado de forma mais simples através de modelos de propagação. Os modelos de propagação são modelos matemáticos generalistas que oferecem uma boa estimativa de como será a cobertura da região (PENTTINEN, 2012).

São muitas variáveis que influenciam no planejamento da rede e o problema estudado é classificado como de complexidade NP-difícil, e portando, de alta complexidade computacional. Desta forma, é mais eficiente tratar o problema utilizando metaheurísticas a fim de encontrar uma solução adequada para o problema.

## 1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um modelo computacional para planejamento da cobertura de redes móveis de quarta geração (4G), utilizando uma metaheurística híbrida, composta de Algoritmo Genético e Busca Tabu.

Dado o objetivo geral, busca-se ainda explorar o modelo de propagação padronizado pela *Third Generation Partnership Project (3GPP)*, estimando o alcance da cobertura que tal modelo pode oferecer. Busca-se também estudar o número mínimo de eNodeB's necessários para planejar uma rede móvel com cobertura adequada aos usuários. Ainda, busca-se analisar como as metaheurísticas e o modelo computacional proposto se comportam em termos de tempo de processamento, soluções apresentadas e como tratam problemas como o chamado poluição de piloto ou de sobreposição de cobertura. Ao final, busca-se comparar os resultados obtidos neste trabalho com outros trabalhos semelhantes que abordem o mesmo problema com métodos diferentes.



## 1.2 Estrutura do documento

Este trabalho está estruturado conforme segue. No segundo capítulo, são apresentados um breve histórico da telefonia móvel e os conceitos do padrão escolhido para redes de quarta geração, o LTE. Salienta-se as características do padrão, requisitos e a motivação para o seu desenvolvimento. São abordadas informações de faixas de frequência de operação, OFDMA e SC-FDMA e a nova arquitetura da rede padrão, comparando as tecnologias de gerações anteriores com o LTE. Também é introduzido o *Self-Organizing Network* (SON), existente somente no LTE. Ainda no segundo capítulo, é abordado o tema de planejamento da rede LTE, apresentando o processo e as etapas de planejamento para o correto dimensionamento da rede. São apresentados o processo de planejamento de cobertura e capacidade, trazendo o conceito de *Link Budget*, seu cálculo e fatores a serem considerados. Apresenta-se também, de forma sucinta, os tipos de modulações que o LTE utiliza com algumas características e usabilidade. Também traz-se um estudo sobre metaheurísticas: conceitos, arquiteturas e aplicabilidade. Aborda-se também o conceito de problemas P, NP-completo e NP-difícil. Neste capítulo, também é comentado sobre os tipos de metaheurísticas existentes (evolucionárias e de busca local), justificando a escolha pelas metaheurísticas Algoritmo Genético e Busca Tabu para abordar o problema de planejamento de redes de telefonia móvel. Ainda, nesse capítulo é abordado o problema de recobrimento de conjuntos, amplamente estudado na ciência da computação, ao qual o presente trabalho está relacionado.

O capítulo três faz uma análise dos trabalhos relacionados. O estudo do planejamento de redes móveis é vastamente estudado, abordando diferentes tecnologias e com focos variados. São relacionados trabalhos que estudaram o planejamento de redes em tecnologias de segunda e terceira geração, através de metaheurísticas evolucionárias e de busca local, comparando os resultados apresentados por ambas e também resultados obtidos através de softwares de simulação. É apresentado um trabalho relacionado que estuda o planejamento de redes LTE porém sem utilizar metaheurísticas. Todos os trabalhos relacionados apresentados são relevantes e embasam este estudo.

O capítulo quatro apresenta a modelagem matemática e modelo computacional que foram desenvolvidos para este trabalho e utilizados para a simulação computacional. A modelagem considera o modelo de propagação do LTE, definido pela 3GPP, e a modelagem para a definição da quantidade de eNodeBs mínimas necessárias, visando prover o máximo de cobertura possível para uma determinada região. É apresentada, também, a arquitetura computacional que será utilizada para a simulação computacional.

No capítulo cinco, são apresentados os procedimentos para validação do modelo, os experimentos, calibração do modelo comparando-o com os resultados obtidos em (WANG; CHUANG, 2015). Apresenta-se os resultados alcançados e as expectativas sobre a aplicabilidade do modelo e da simulação computacional em casos reais.

O capítulo seis descreve as conclusões obtidas durante a elaboração deste trabalho e, por

último, estão incluídas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo sete trata de possíveis campos de estudo de trabalhos futuros, correlacionando com este. Apresenta-se possíveis seguimentos do assunto, tais como desenvolvimento de novas tecnologias, aprimoramentos no modelo apresentado neste trabalho, onde é possível adicionar novas variáveis e focos de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a evolução das redes móveis no mundo e são introduzidos os conceitos do padrão escolhido para redes de quarta geração, o LTE. Apresentam-se as características do padrão, requisitos e a motivação para o seu desenvolvimento. São abordadas informações de faixas de frequência de operação, modulação OFDMA e SC-FDMA, a nova arquitetura da rede padrão, comparando-a com as arquiteturas das tecnologias de gerações anteriores. Também é introduzido o *Self-Organizing Network* (SON), uma inovação das tecnologias de comunicações móveis, desenvolvido especialmente para o LTE.

O objetivo deste capítulo é introduzir os conceitos básicos de telefonia móvel e do planejamento das redes, tema do presente trabalho. Busca-se fazer um levantamento do estado da arte oferecendo um breve histórico da evolução da telefonia móvel, desde o seu início, na sua primeira geração, até os dias atuais, onde a quarta geração apresenta-se como maior tendência para os próximos anos. Tal histórico é importante para situar o ponto de partida do presente trabalho.

Visa-se, promover o entendimento das diferenças entre as gerações e o porquê da importância de uma abordagem diferente para o planejamento de redes 4G, abrangendo, principalmente, conceitos de arquitetura de rede únicos desta nova geração. Tais conceitos são essenciais para a compreensão do escopo do trabalho e para sua contribuição, mostrando como as redes móveis chegaram à sua quarta geração e como as técnicas utilizadas para planejá-las evoluíram junto com elas.

### 2.1 A Evolução da Telefonia Celular no Mundo

As comunicações móveis de larga escala começaram em meados de 1970, com o chamado *Automatic Radio Phone* (ARP) na Finlândia. Por vezes, essa etapa é chamada de geração zero ou pré-primeira geração. O ARP se tornou bastante popular pelo mundo, incentivando a evolução, ou o início propriamente dito, das gerações de telefonia móvel (PENTTINEN, 2012). A primeira geração surgiu então na década de 1980, com tecnologias puramente analógicas. Houve diversas tecnologias espalhadas pelo mundo, sem uma padronização específica. Nos Estados Unidos, a tecnologia adotada foi o *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), desenvolvido pela Bell Labs e posteriormente pela Motorola. Na Europa, a tecnologia escolhida foi o *Nordic Mobile Telephone* (NMT) (TIPMONGKOLSILP; ZAGHLOUL; JUKAN, 2011; RAZA, 2013). No Brasil, nenhuma destas tecnologias foi amplamente desenvolvida tampouco comercializada.

As redes 2G (segunda geração) começaram a se desenvolver na década de 1990, novamente na Finlândia, tendo como principal tecnologia o *Global System Mobile* (GSM), caracterizando-se, principalmente, como uma tecnologia digital, e, com isto, trazendo benefícios de eficiência de espectro de frequência e mantendo a qualidade da voz (HALONEN; ROMERO; MELERO,

2003). Houve outros padrões de tecnologia 2G desenvolvidos, porém menos utilizados como o TDMA e o CDMA. Nesta época, as tecnologias 2G foram desenvolvidas para suportarem apenas tráfego de voz e, portanto, o planejamento da rede abrangia apenas fornecer capacidade para este tipo de tráfego. Apenas mais tarde surgiram as tecnologias 2.5G, em especial o *General Packet Radio System* (GPRS), a fim de acrescentar o tráfego de dados em redes 2G, porém com taxas de apenas 171,6 kbps. Nesta mesma etapa, o popular *Short Message Service* (SMS) foi também disponibilizado para os usuários (HALONEN; ROMERO; MELERO, 2003; PENTTINEN, 2012; MOSES, 2014).

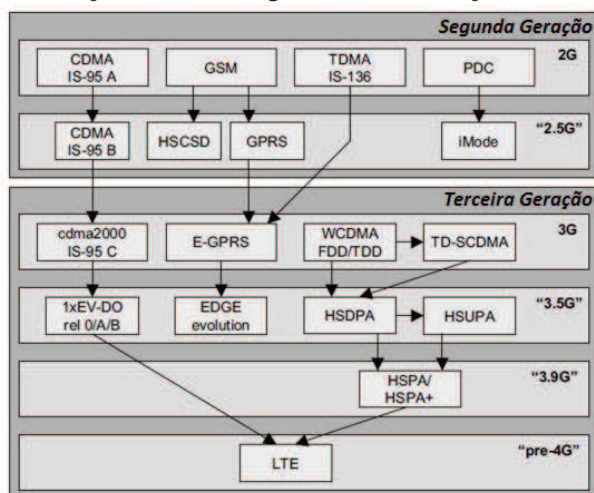
Com isto, a demanda por serviço de dados começou a crescer (MOSES, 2014). Para suprir a necessidade de maior capacidade e banda para dados móveis, surgiram as tecnologias de terceira geração. Em 1999, a *Third Generation Partnership Project* (3GPP) padronizou as redes de terceira geração. A terceira geração de comunicações móveis recebeu o nome de *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) e abrigou diversas tecnologias que atendiam aos seus requisitos (HALONEN; ROMERO; MELERO, 2003). A mais utilizada é o *Wide Code Division Multiple Access* (WCDMA), embora tenha havido outras menos utilizadas. A tecnologia 3G recebeu melhorias com o tempo, chegando a taxas de 3,1 Mbps.

Ainda na evolução da terceira geração, surgiram as tecnologias chamadas de 3.5G. As mais conhecidas são o *High Speed Packet Access* (HSPA), que abrange o *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) (HOLMA; TOSKALA, 2007). A principal função destas tecnologias de 3.5G é ampliar a capacidade do WCDMA, chegando a taxas de 14,4 Mbps. Houve ainda mais um passo antes de atingir, de fato, a quarta geração, o 3.9G. Houve somente uma tecnologia desenvolvida para o 3.9G, o *High Speed Packet Access Plus* (HSPA+) e, novamente, a função foi fornecer mais capacidade para as redes 3G.

Mesmo com as evoluções intermediárias, a demanda por serviços de dados móveis continuou a crescer e se fez necessário aumentar a disponibilidade de banda e a velocidade para estes serviços. Para atender tal demanda, a *International Telecommunication Union* (ITU) definiu os requisitos do *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-A) para a quarta geração de sistemas de comunicação. Neste contexto, a *Third Generation Partnership Project* (3GPP) propôs o *Long Term Evolution* (LTE) como tecnologia de pré-quarta geração para atender aos requisitos do IMT-A e, posteriormente o LTE-Advanced como tecnologia 4G. Esta última ainda está em desenvolvimento. A Figura 1 mostra a evolução das tecnologias móveis, desde a segunda geração, enquanto que a Figura 2 mostra o ciclo de vida das tecnologias de cada geração de comunicação móvel, em uma linha do tempo.

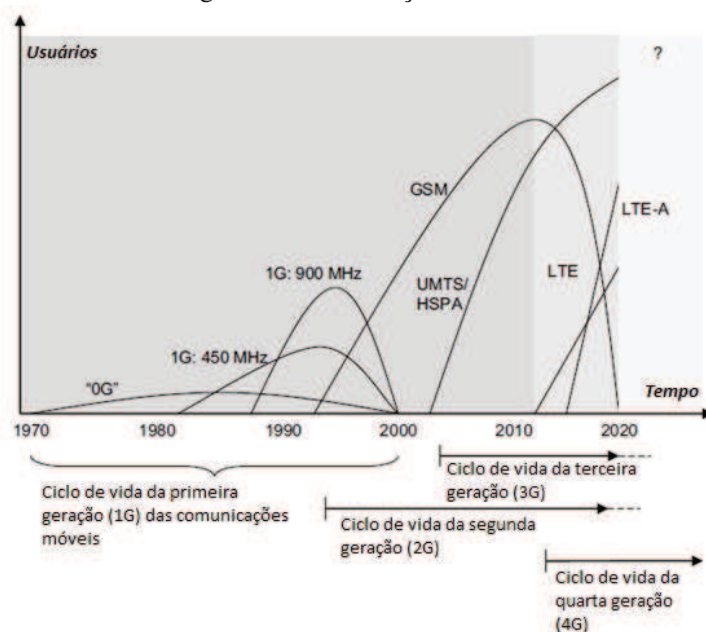
Nota-se, com a Figura 1, que para as primeiras gerações da telefonia móvel surgiram mais de uma tecnologia, cabendo a cada operadora decidir qual tecnologia seria desenvolvida na sua rede. Conforme as demandas de serviços foram surgindo e crescendo, estas tecnologias foram evoluindo, como no caso do CDMA, e outras sendo descontinuadas, como no caso do PDC. Ao final, nota-se que todas as tecnologias que remanesceram da segunda e terceira geração, evoluíram para uma única tecnologia de quarta geração, o *Long Term Evolution* (LTE).

**Figura 1:** Evolução das tecnologias de comunicações móveis digitais.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

**Figura 2:** Ciclo de vida das tecnologias de comunicações móveis descritas em uma linha do tempo.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

Na Figura 2, é mostrado o ascenso e descenso das tecnologias de comunicações móveis, bem como o ciclo de vida de cada geração. Percebe-se que a primeira geração foi extinta por volta dos anos 2000, enquanto que a segunda, terceira e quarta permanecem no mercado. A segunda geração tem previsão de extinção para meados de 2020, enquanto que a terceira geração atingirá o seu ápice e começará o seu descenso em torno do ano 2020. A quarta geração, recém iniciada, ainda se apresenta como uma incógnita quanto ao seu pico de uso e descenso.

## 2.2 O padrão *Long Term Evolution* (LTE)

Com a crescente demanda de serviços de dados móveis e crescente número de usuários, as tecnologias de segunda e terceira geração ficaram obsoletas e se fez necessária uma nova tecnologia, capaz de oferecer mais recursos. (MISHRA, 2007; HOLMA; TOSKALA, 2011) Desta forma, em meados de 2000, a *International Telecommunication Union* (ITU) definiu os requisitos do *International Mobile Telecommunications–Advanced* (IMT-A) para a quarta geração de sistemas de comunicação. Neste contexto, a *Third Generation Partnership Project* (3GPP) propôs o *Long Term Evolution* (LTE) como tecnologia de quarta geração para atender aos requisitos do IMT-A.

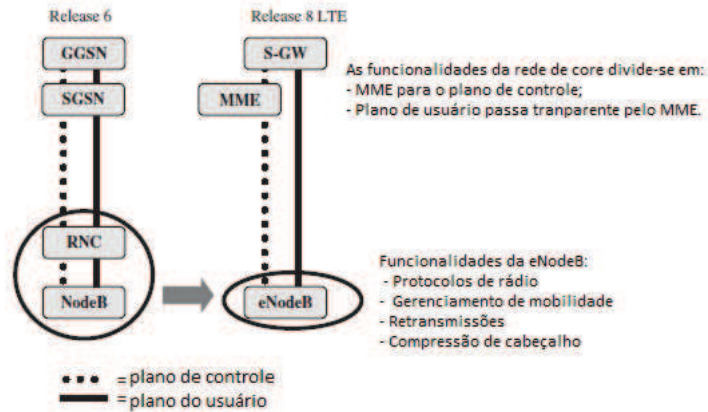
Inicialmente, existiam duas frentes para o desenvolvimento da tecnologia de quarta geração: o *Long Term Evolution* (LTE) e o *Service Architecture Evolution* (SAE). O LTE era focado para desenvolver uma nova arquitetura de rede de acesso, enquanto que o SAE era focado em desenvolver a uma nova arquitetura de serviços. Posteriormente, ambos os projetos foram unidos em um único, chamado de *Evolved Packet System* (EPS) (HOLMA; TOSKALA, 2011; PENTTINEN, 2012; RAZA, 2013).

Como mencionado anteriormente, a tecnologia da quarta geração de comunicações móveis deveria atender aos requisitos propostos pela ITU. Desta forma, o LTE, proposto pela 3GPP deveria ser capaz de atender os seguintes requisitos (DEHGHANI; ARSHAD, 2015; WANG; CHUANG, 2015):

- De duas a quatro vezes maior eficiência de espectro que o HSPA;
- Picos de velocidade acima de 100 Mbps no downlink e 50 Mbps no uplink;
- Tempo de ida e volta menor que 10 ms;
- Comutação de pacotes otimizados;
- Alto nível de mobilidade e segurança;
- Eficiência de potência dos terminais móveis otimizada;
- Flexibilidade de frequência, permitindo alocar canais de 1,5MHz a 20MHz.

Houve muita evolução das tecnologias anteriores para a tecnologia de quarta geração, incluindo diferenças na estrutura da rede. Talvez a maior das evoluções seja a evolução de redes de circuitos (*circuit switch* – CS) para redes de pacotes (*packet switch* – PS) (HOLMA; TOSKALA, 2011; ARANITI et al., 2013; RAZA, 2013). Com isso, a transmissão da rede é totalmente IP, diferente das tecnologias anteriores que utilizavam estruturas de E1 e, posteriormente, em alguns casos um misto de E1 e ethernet (TIPMONGKOLSILP; ZAGHLOUL; JUKAN, 2011; RAZA, 2013). A mudança na estrutura da rede se fez necessária, justamente, para prover maior banda e capacidade de transmissão sem aumentar custo nem a estrutura física

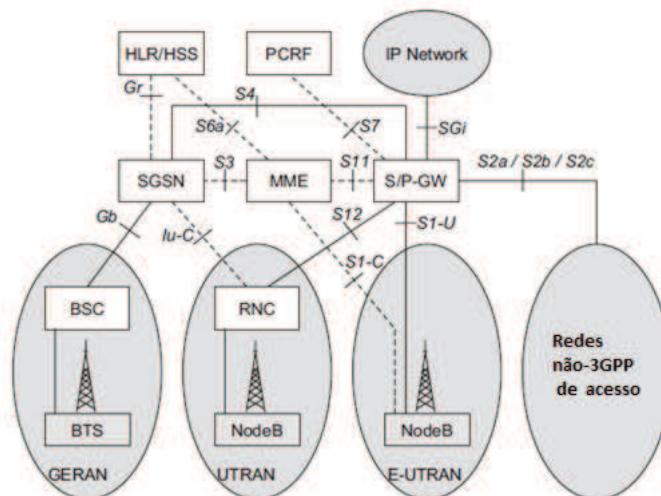
**Figura 3:** Diferença entre as arquiteturas de redes do 3G e 4G.



Fonte: (HOLMA; TOSKALA, 2011)

e mantendo a interoperabilidade entre as tecnologias existentes na planta. Depois desta primeira evolução, também foram necessárias outras mudanças na estrutura física da rede. A principal delas, e também o motivo do planejamento das redes 2G e 3G serem diferentes das redes 4G, é a exclusão das RNCs (*Radio Network Controller*, existentes em redes 3G) e BSCs (*Base Station Controller*, existentes nas redes 2G). No 4G, não existe um elemento intermediário entre o eNodeB (*enhanced NodeB*, equivalente ao NodeB do 3G) e os servidores MME da rede. A Figura 3 mostra essa diferença de forma sucinta evidenciando a divisão de responsabilidades da eNodeB e do MME, enquanto que a Figura 4 apresenta uma comparação entre todas as tecnologias com maior detalhe de interfaces e *core* de rede.

**Figura 4:** Comparação entre todas as tecnologias com as suas interfaces.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

### 2.2.1 *Enhanced Base Station*

No padrão LTE, a arquitetura desenvolvida inclui um novo elemento, chamado de *Enhanced NodeB* (eNodeB) e retira o RNC e a BSC da estrutura (HOLMA; TOSKALA, 2011; SANTOS, 2011; KREHER; GAENGER, 2011; HAMALAINEN; SANNECK; SARTORI, 2012; PENTTINEN, 2012; WANG; CHUANG, 2015; DEHGHANI; ARSHAD, 2015). Com isso, são atribuídas mais funções ao eNodeB, que agora deve realizar a função equivalente ao NodeB e algumas das funções da RNC das gerações anteriores. A ideia por trás da proposta de uma nova arquitetura, tanto de serviços quanto de acesso, é a simplificação da estrutura do LTE como um todo.

A principal função da eNodeB é fazer a interface entre a transmissão e a recepção entre o *core* da rede e o usuário móvel, incluindo a codificação/decodificação e multiplexação/demultiplexação do sinal. Isto quer dizer que ela é responsável por fazer com que o usuário móvel se comunique com a rede de forma eficiente. Uma das funções mais cruciais e difíceis da eNodeB é a alocação de recursos de DL/UL (*downlink/uplink*). Ela é completamente responsável e capaz de realizar medições da sua área atendida e remanejar os recursos disponíveis a ela a fim de otimizar a utilização dos mesmos. Além desta tarefa, a eNodeB ainda recebe a responsabilidade pela Qualidade de Serviço (QoS) dos serviços oferecidos (voz e dados) e também a de tomar a decisão de *handover* dos usuários em movimento entre as células e entre tecnologias, ambas funções do RNC em redes de terceira geração. Desta forma, há menos elementos na rede, diminuindo o custo e a complexidade e desafogando o processamento do *core* da rede.

### 2.2.2 O Processo de *Handover*

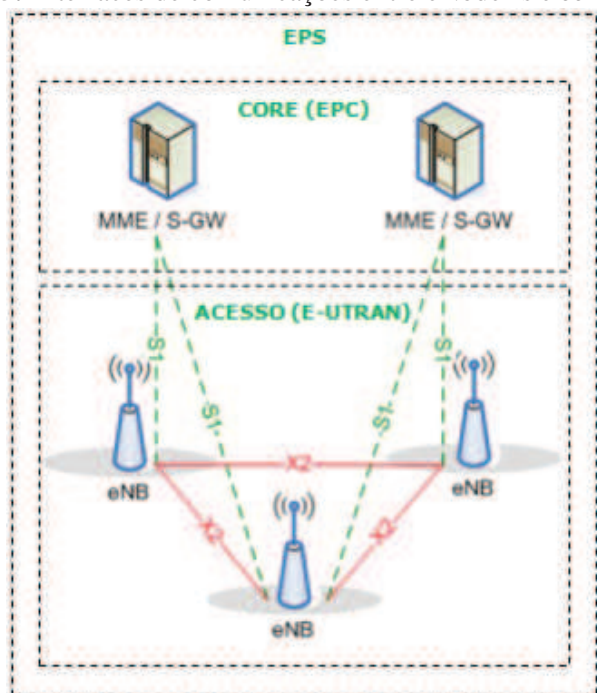
O *handover* é o processo pelo qual o usuário troca de servidor quando em movimento. É um processo de vital importância para o funcionamento da rede móvel, dado que é o processo que faz com que o usuário em movimento não sofra interrupção dos seus serviços. Quando uma rede é mal projetada, haverá severas e constantes quedas de serviços, como chamadas e dados (LAIHO; WACKER; NOVOSAD, 2006; KREHER; GAENGER, 2011; HOLMA; TOSKALA, 2011).

Durante todo o tempo, o usuário móvel recebe sinal de mais de um site e de mais de uma tecnologia. O site que irá atendê-lo é aquele que possui melhor nível de sinal no local em que o usuário está situado. Quando o usuário se move, o sinal do site que o atende começa a ficar mais fraco e o sinal de outro site vizinho passa a ficar mais forte. Quando isso acontece, o usuário é passado de um site para o outro sem a interrupção dos serviços que ele esteja utilizando. No LTE, há duas formas de *handover* entre dois eNodeBs: o *soft handover* e o *hard handover*. (LAIHO; WACKER; NOVOSAD, 2006; SANTOS, 2011)

A utilização da interface X2 é facultativa, porém é recomendada (KREHER; GAENGER, 2011). O *hard handover* acontece quando a interface X2 não é utilizada pela operadora, sendo



**Figura 5:** Interfaces de comunicações entre eNodeBs e *core* de rede.



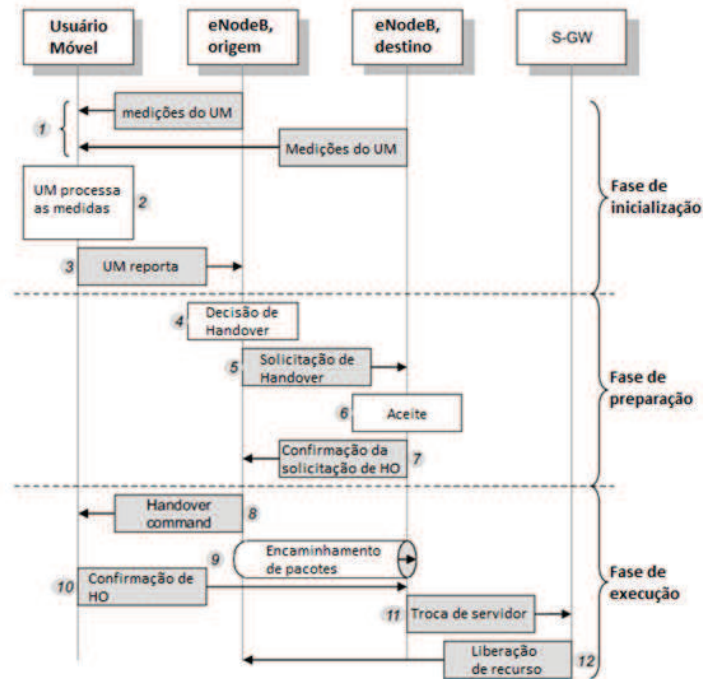
Fonte: (SANTOS, 2011)

necessário utilizar a interface S1 para tal processo. A interface X2 é a interface de comunicação entre eNodeBs, sem a intervenção dos servidores de MME, enquanto que a interface S1 é a interface utilizada para a eNodeB comunicar-se com os servidores MME. A Figura 5 exemplifica essas interfaces de comunicação entre eNBs e *core* da rede.

A eNodeB toma as decisões que antes eram de responsabilidade do RNC através das comunicações feitas por duas ou mais eNodeBs, utilizando suas interfaces X2 para tal. Caso a operadora não utilize a interface X2, a única forma de *handover* possível é o *hard handover*, onde a decisão e a passagem do usuário de uma célula para outra é feita por troca de mensagens entre a eNodeB e o servidor MME, através da interface S1. O *soft handover* acontece quando a interface X2 existe e está habilitada, fazendo com que duas eNodeBs se comuniquem diretamente, sem a intervenção e a necessidade que o servidor MME tome a decisão. Desta forma, a própria eNodeB toma as decisões de *handover* e também realiza a passagem de um usuário em movimento para outra célula. Ambas as formas são transparentes para o usuário final, porém a segunda forma é a mais recomendada, pois além de ser mais rápida, também evita gerar gargalos de comunicação e processamento no *core*, utilizando unicamente os recursos disponíveis da própria eNodeB.

O *handover* é uma parte importante das tecnologias móveis e é um dos fatores a ser analisado com cuidado durante o planejamento da rede. De forma mais detalhada, a ordem de sequência do *handover* é mostrada na Figura 6, onde há um processo de troca de mensagens entre o usuário móvel, ambas eNodeBs (atual e destino) e o MME. O processo é dividido em três fases: inicialização, preparação e execução.

**Figura 6:** Processo de handover de um usuário de um eNodeB para outro.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

Na primeira fase, o usuário móvel está recebendo sinal de ambas eNodeBs e medindo e reportando para a eNodeB atual. Na segunda fase, a eNodeB atual toma a decisão de *handover*, baseando-se nas medidas reportadas pelo usuário móvel. Uma vez tomada a decisão de realizar o *handover*, a eNodeB atual solicita para a eNodeB destino para que receba o usuário em movimento. A eNodeB destino avalia e decide se aceita o usuário ou não e reporta a decisão para a eNodeB atual. Caso o usuário seja aceito, inicia-se a fase de execução. A eNodeB atual anuncia ao usuário móvel que o handover foi autorizado e reencaminha a mensagem para a eNodeB destino. A eNodeB e o usuário móvel iniciam a sincronização e, quando for concluída e o usuário estiver acessando a rede através da nova eNodeB, o usuário envia uma mensagem de confirmação para a eNodeB de destino. A eNodeB de destino envia uma mensagem de comutação de caminho ao *Gateway* informando que o usuário trocou de célula e, logo em seguida, envia de uma mensagem de liberação de recurso para a eNodeB de origem. A eNodeB inicial recebe a mensagem de sucesso de *handover* e se desconecta do usuário móvel.

### 2.2.3 CS Fallback

O *CS Fallback* é uma característica do padrão LTE que permite que serviços de voz sejam realizados pela rede UMTS (3G) (KREHER; GAENGER, 2011; PENTTINEN, 2012). Esse recurso serve para otimizar o uso dos recursos da rede 4G, reservando-os para o uso de tráfego de dados. Assim, quando um usuário móvel que esteja utilizando a rede 4G realiza uma chamada de voz, ele é direcionado para a rede 3G e é retornado para a rede 4G quando a chamada é

terminada.(PENTTINEN, 2012)

Sabe-se que no padrão LTE, as chamadas de voz são realizadas através da tecnologia de voz sobre LTE (VoLTE) (TIPMONGKOLSILP; ZAGHLOUL; JUKAN, 2011). Porém, uma chamada de voz no LTE demanda mais recursos que em uma rede SDH, além de não garantir a qualidade do serviço (HOLMA; TOSKALA, 2011; RAZA, 2013).

Há a opção das operadoras implementarem uma estrutura própria para o LTE, separada das tecnologias de gerações anteriores, porém o investimento é alto e as redes 2G e 3G existentes oferecem um bom serviço para o tráfego de voz. A motivação para a evolução é aumentar a capacidade de transmissão de dados, já que o serviço de voz já está bem consolidado nas gerações anteriores (HOLMA; TOSKALA, 2011; KREHER; GAENGER, 2011).

Assim, é mais interessante utilizar a estrutura já existente para o serviço de voz e uma nova estrutura para o tráfego de dados móveis. Essa decisão é a mais vantajosa para as operadoras e implica em ter o LTE implementado onde já existe estrutura com tecnologias de gerações anteriores, já que ele faz uso das redes existentes (PENTTINEN, 2012). Assim, fica claro, sendo importante ressaltar, que para a escolha das localizações onde serão implantadas as eNodeBs que fornecerão tecnologia 4G, deve ser considerado apenas pontos onde já existem as tecnologias anteriores. O LTE é capaz de trabalhar, coexistir e direcionar os serviços de voz tanto para a rede 2G quanto para a rede 3G (KREHER; GAENGER, 2011).

#### 2.2.4 Faixas de Frequências

O 3GPP definiu as faixas de frequências para o uso do LTE e as dividiu em dois grupos conforme o modo de operação: *Time Division Duplex (TDD)* e *Frequency Division Duplex (FDD)*. Desta forma, cada país pode optar por utilizar a frequência que seu órgão regulador decidir. Na Figura 7, estão listadas as frequências definidas pela 3GPP até o momento, separadas por bandas FDD e TDD.

A maioria dos países escolheu, ou deve escolher, utilizar o modo FDD, por ser mais eficiente e mais desenvolvido quando comparado ao TDD. As diferenças entre os dois modos começa pelo método de multiplexação, enquanto que um utiliza multiplexação no tempo o outro é feito por frequência. Ainda, o FDD necessita um par de frequências, uma para *downlink* e outra pra *uplink*, enquanto o TDD requer apenas uma única frequência para *downlink* e *uplink*. Por este motivo, o TDD tem menor cobertura que o FDD.

Nos Estados Unidos, a banda escolhida para o desenvolvimento inicial do LTE foi a banda de 700MHz, 1700MHz/2100Mh, deixando para as operadoras optarem pelas faixa de frequência. No Japão a escolhida foi a de 2100MHz e para futura expansão as bandas 800MHz, 1500MHz e 1700MHz. No Brasil, as candidatas foram as bandas 1, 7 e 13, sendo escolhida a banda 7, de 2600MHz e, futuramente, a expansão do LTE será feita na banda de 700MHz, hoje utilizada para Televisão Analógica com previsão de desligamento e disponibilização do espectro nos próximos anos.

**Figura 7:** Lista de frequências para o LTE definidas pela 3GPP.

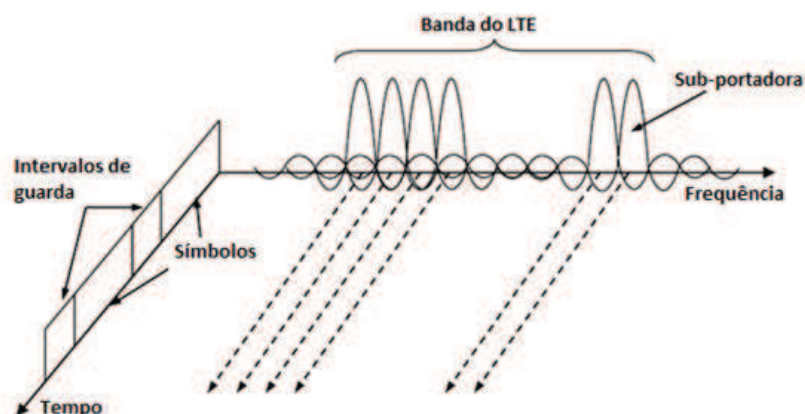
Banda	Nome	Downlink (MHz)			Banda DL/UL (MHz)	Uplink (MHz)		
		Baixa	Média	Alta		Baixa	Média	Alta
1	2100	2110	2140	2170	60	1920	1950	1980
2	1900 PCS	1930	1960	1990	60	1850	1880	1910
3	1800+	1805	1842.5	1880	75	1710	1747.5	1785
4	AWS-1	2110	2132.5	2155	45	1710	1732.5	1755
5	850	869	881.5	894	25	824	836.5	849
6	UMTS only	875	880	885	10	830	835	840
7	2600	2610	2655	2690	70	2530	2535	2570
8	900 GSM	925	942.5	960	35	880	897.5	915
9	1800	1844.9	1862.4	1879.9	35	1749.9	1767.4	1784.9
10	AWS-1+	2110	2140	2170	60	1710	1740	1770
11	1500 Lower	1475.9	1485.9	1495.9	20	1427.9	1437.9	1447.9
12	700a	729	737.5	746	17	699	707.5	716
13	700c	736	751	756	10	727	762	787
14	700PS	758	763	768	10	788	793	798
17	700b	734	740	746	12	704	710	716
18	800 Lower	860	867.5	875	15	815	822.5	830
19	800 Upper	875	882.5	890	15	830	837.5	845
20	800 DD	791	806	821	30	832	847	862
21	1500 Upper	1495.9	1503.4	1510.9	15	1447.9	1455.4	1462.9
22	3500	3510	3550	3590	80	3410	3450	3490
23	2000 S-band	2180	2190	2200	20	2000	2010	2020
24	1600 L-band	1525	1542	1559	34	1626.5	1643.5	1660.5
25	1900+	1930	1962.5	1995	65	1850	1882.5	1915
26	850+	859	876.5	894	35	814	831.5	849
27	800 SMR	852	860.5	869	17	807	815.5	824
28	700 APT	758	780.5	803	45	703	725.5	748
29	700 d	717	722.5	728	11 / 0	Downlink only		
30	2300 WCS	2350	2355	2360	10	2305	2310	2315
31	450	462.5	465	467.5	5	452.5	455	457.5
32	1500 L-band	1452	1474	1496	44 / 0	Downlink only		
65	2100+	2110	2155	2200	90 / 80	1920	1960	2000
66	AWS-3	2110	2155	2200	90 / 70	1710	1745	1780
252	U-NII-1	5150	5200	5250	100 / 0	Downlink only		
255	U-NII-3	5725	5787.5	5850	125 / 0	Downlink only		
<b>TDD</b>								
33	TD 1900	1900	1910	1920	20			
34	TD 2000	2010	2017.5	2025	15			
35	TD PCS Lower	1850	1880	1910	60			
36	TD PCS Upper	1930	1960	1990	60			
37	TD PCS Center gap	1910	1920	1930	20			
38	TD 2600	2570	2595	2620	50			
39	TD 1900+	1880	1900	1920	40			
40	TD 2300	2300	2350	2400	100			
41	TD 2500	2496	2593	2690	194			
42	TD 3500	3400	3500	3600	200			
43	TD 3700	3600	3700	3800	200			
44	TD 700	703	753	803	100			

Fonte: (SANTOS, 2011)

### 2.2.5 OFDMA e SC-FDMA

O *Orthogonal Frequency Division Multiplex Access* (OFDMA) é a técnica de multiplexação utilizada no downlink do LTE, enquanto o *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) é a variante do OFDMA utilizada no uplink do LTE. O OFDMA não é a técnica mais eficiente, porém oferece uma boa proteção para variações no meio de comunicação de radiofrequência, como o desvanecimento e as perdas de propagação por caminhos múltiplos. Quando o padrão LTE foi desenvolvido, optou-se por uma técnica de multiplexação diferente das tecnologias anteriores. Desta forma, o OFDMA permite que os dados do usuário sejam transmitidos em mais de uma portadora, transmitindo múltiplas subportadoras ortogonais entre si, no domínio da frequência, espaçadas em 15kHz entre si. A Figura 8 representa o funcionamento básico do OFDM.

**Figura 8:** A modulação OFDM, utilizada no LTE.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

A técnica de modulação OFDM é conhecida desde os anos 1960 e é amplamente utilizada em padrões de telecomunicações, como o *European Digital Audio Broadcasting* (DAB), *Terrestrial Digital Video Broadcasting* (DVB-T), *Asynchronous Digital Subscriber Line* (ADSL), entre outros (HOLMA; TOSKALA, 2011; KREHER; GAENGER, 2011; SANTOS, 2011; PENTTINEN, 2012).

O SC-FDMA segue o mesmo princípio do OFDM, porém com a característica de baixo *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR), diminuindo a complexidade do transmissor. Quando lembramos que o transmissor é o usuário móvel, que utiliza um *hardware* muito mais simples e com menor potência de transmissão que o sistema irradiante, é simples entender o motivo de utilizar o SC-FDMA para *uplink*. Enquanto que no OFDMA cada subportadora transmite uma única informação de um único símbolo, no SC-FDMA cada subportadora carrega informações de todos os símbolos transmitidos.

### 2.2.6 Self-Organizing Networks (SON)

Uma das grandes inovações das redes LTE é o sistema de auto-organização da rede. O próprio LTE possui diversas funções automáticas de otimização da rede. Embora a rede não seja completamente independente de interação humana, o SON ajuda a manter a otimalidade da rede economizando tempo e recursos. Através de leituras em tempo real da rede, quando detecta que algum limite estabelecido nas configurações da rede foi ultrapassado, o próprio LTE age, buscando uma solução para o problema (KREHER; GAENGER, 2011).

O foco do SON é minimizar a demanda de trabalho local, sabendo que por vezes, para resolver algum problema local, é necessário deslocar uma equipe, consumindo tempo e recursos. Como mencionado anteriormente, o SON não substitui a interação humana, porém exige maior profundidade no conhecimento da equipe de engenharia da operadora, pois, para funcionar corretamente, o SON deve ser configurado e ajustado corretamente, do contrário pode não contribuir para o desenvolvimento saudável da rede. Pode-se dizer que o SON oferece algo como “*plug-and-play*” de forma padrão, deixando a rede organizada e padronizada inicialmente, sofrendo apenas ajustes, quando necessário, para resolução de problemas (HAMALAINEN; SANNECK; SARTORI, 2012).

Nesta seção, foram apresentados, sucintamente, os conceitos do padrão escolhido para a quarta geração das comunicações móveis. Embora o tema seja vasto e amplo, foram apresentados apenas os conceitos necessários e importantes para fundamentar o assunto deste trabalho, o planejamento da rede 4G. Para tal, se faz importante ter um conhecimento básico do padrão, seu surgimento, requisitos para funcionamento e contexto atual. Faz-se necessário entender o conceito de eNodeB, as alterações na arquitetura da rede de tecnologias anteriores comparadas ao LTE. Também é importante salientar a frequência de operação já que esta tem influência direta na cobertura, o *handover* já que este depende da configuração física da rede (localização dos eNodeBs), a modulação utilizada já que esta tem influência no alcance, na capacidade e complexidade da rede. Com estes conceitos claros, a próxima seção tratará do planejamento da rede 4G. Os conceitos apresentados são essenciais para o planejamento da rede.

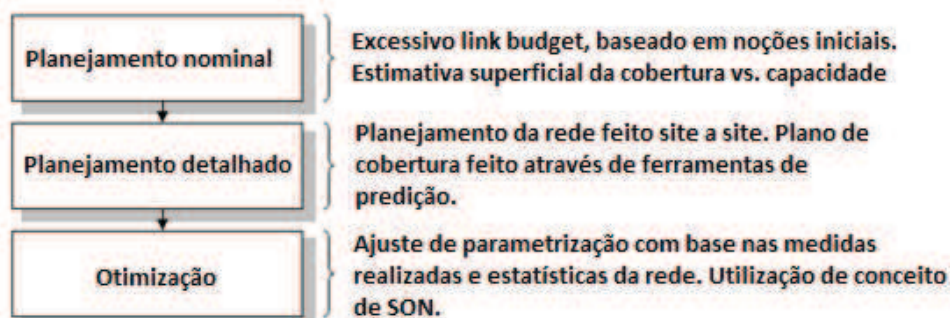
## 2.3 Planejamento de Redes LTE

O planejamento das redes, independente da tecnologia, visa abranger a maior quantidade possível de usuários com a uma qualidade aceitável e o mínimo de recursos demandados. Em (MABED; CANALDA; SPIES, 2014), foi mostrado que o planejamento geométrico da rede oferece melhor desempenho. Na prática, esta estratégia é muito bem aceita nos casos de uma planejamento e implantação de uma rede completamente nova. Quando se trabalha com redes existentes, ou seja, quando a operadora já possui uma rede móvel e deseja desenvolver uma nova tecnologia que coexista com as tecnologias existentes na planta, há outros fatores que influenciam no planejamento da rede. Como já mencionado, a demanda por recursos das redes

móveis cresce a cada ano e o planejamento deve ser realizado a longo prazo, que aos poucos deve atingir a otimalidade da rede. Porém, para o desenvolvimento inicial de uma nova tecnologia em uma rede existente, o fator com maior relevância é, obviamente, a região onde o retorno será maior, para aos poucos investir onde a demanda – e o retorno – sejam menores. Durante o desenvolvimento inicial de qualquer nova tecnologia, é normal optar-se por priorizar a cobertura à qualidade do serviço. Esta escolha deve-se, basicamente, à percepção que, no início de qualquer nova tecnologia, a demanda é baixa já que a quantidade de usuários desta tecnologia é mínima. Normalmente, para terem acesso à nova tecnologia, os usuários precisam trocar seus equipamentos móveis e é por este motivo que a demanda cresce. Conforme os usuários realizam a troca de equipamento, passam a usar os recursos novos e a rede precisa ser expandida.

O LTE ainda oferece o desafio de ser uma tecnologia completamente nova e com arquitetura de rede, de protocolos e de *core* completamente diferente das tecnologias anteriores. Portanto, o desafio de planejar a rede 4G inclui tratá-la como uma rede completamente nova e, ao mesmo tempo, que coexista com as tecnologias já existentes. Ou seja, ela não será capaz de ser planejada para utilizar a mesma arquitetura das redes 2G e 3G, porém, ao mesmo tempo, a fim de minimizar custos e burocracia, serão utilizadas as referências (de localização, de quantidade de usuários e de cobertura) das redes 3G e 2G para desenvolvê-la. De forma geral, o planejamento da rede 4G segue os passos descritos na Figura 9.

**Figura 9:** Processos gerais das etapas de planejamento de rede.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

Na primeira fase, identificada como planejamento nominal, é basicamente analisada a rede que a operadora já possui e são estimadas as regiões que devem receber a nova tecnologia primeiro. Inicialmente, a cobertura é o ponto crucial de interesse da operadora. É nesta etapa que é decidido quantos *sites* serão necessários para cobrir uma determinada região, com o mínimo de recursos possível.

Na segunda etapa, o planejamento detalhado é feito *site a site*. Nesta etapa, é feita a análise de cobertura de cada *site* e também é a etapa em que os parâmetros de cada site são determinados. Tais parâmetros incluem o tilt elétrico e mecânico das antenas, os azimutes, a demanda que se espera da região, entre outros. Tilt se refere à inclinação aplicada a uma antena, visando que

o sinal transmitido dela seja concentrado em uma região próxima (LAIHO; WACKER; NOVO-SAD, 2006; NAWROCKI; DOHLER; AGHVAMI, 2006). Tilt elétrico é um ajuste interno na antena enquanto que tilt mecânico significa aplicar uma inclinação fisicamente na antena.

Nesta segunda etapa, normalmente se utilizam *softwares* de predição e mapas de relevo e as características da região. Para o caso de existir uma rede legada 2G ou 3G, utiliza-se também os dados de medição de performance delas, como a quantidade de usuários, tráfego demandado, distância dos usuários do site, dados de crescimento de demanda, entre outros, para estimar e planejar a região.

Na terceira etapa, a otimização pode ser dividida em duas fases: pré-lançamento e pós-lançamento. Ou seja, após todo o planejamento e instalação do *site*, antes de disponibilizar os recursos aos usuários móveis, é possível realizar um *initial tuning*, ou "ajuste fino", da região. O *initial tuning* são os ajustes iniciais que são comumente feitos através de um *drive test*, ou seja, uma equipe da própria operadora realiza testes locais na região do site, com equipamento de medição e testes de chamadas e de dados, a fim de garantir que todos os recursos da rede estejam funcionando bem. Após os novos recursos serem liberados pela operadora aos seus usuários, faz-se a otimização pós-lançamento. Esta etapa diz respeito ao acompanhamento do desempenho e comportamento da rede, como um todo, com os usuários utilizando a rede. A Figura 10 mostra os processos de cada etapa de planejamento da rede, divididos em três etapas: o planejamento dos critérios da rede, abrangendo dados da cobertura esperada, capacidade a ser disponibilizada e a qualidade do serviço prestado; o planejamento detalhado da rede, onde é feito o plano de cobertura, o plano de capacidade e os parâmetros físicos e lógicos do sistema, visando a estar de acordo com os critérios planejados; e a otimização da rede LTE, através de coletas de dados de performance da rede, realiza-se ajustes de parametrização.

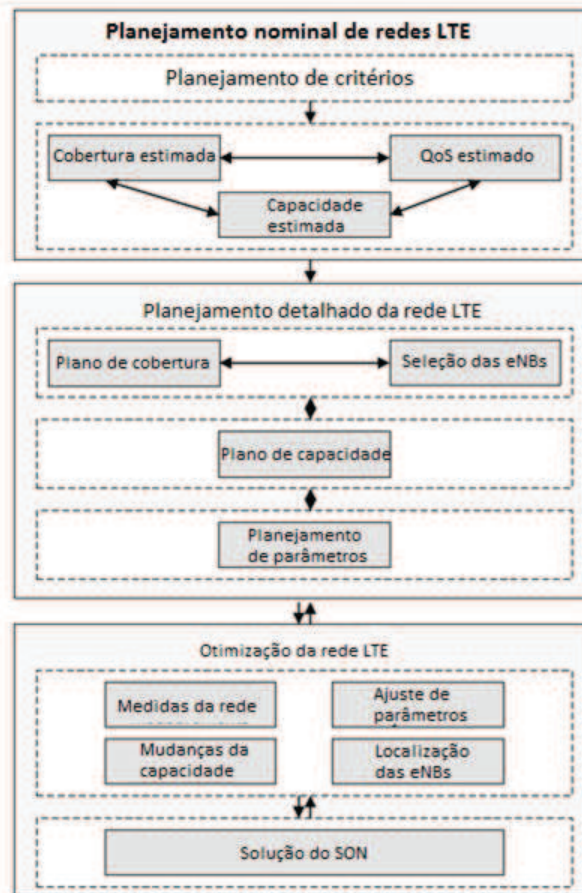
Uma rede ótima deve satisfazer as necessidades tanto de cliente, quanto de operadoras. Uma rede com uma qualidade muito alta satisfaz o cliente final, porém demanda muitos recursos da operadora para implantar e manter a rede desta forma (PARK; POBIL, 2013; HIERREZUELO; AAMIR, 2014). Como os recursos da operadora são finitos, eles devem ser bem distribuídos por toda a rede. De forma equivalente, uma rede com baixa qualidade demanda poucos recursos da operadora, porém não satisfaz a necessidade do cliente. O ideal é encontrar um meio termo entre o ótimo para o cliente e para a operadora. A Figura 11 mostra essa relação, juntamente com o ponto ótimo de uma rede.

### 2.3.1 Plano de Capacidade

A capacidade desejada está relacionada à banda demandada pelos usuários da rede (PENTTINEN, 2012; CHEVALLIER et al., 2006). Ela está relacionada ao tipo do serviço e também ao nível de qualidade de serviço esperado. A modulação utilizada tem uma relação direta com a capacidade, de tal modo que usuários próximos da eNodeB terão uma qualidade de serviço melhor que usuários mais distantes. Para alcançar estes usuários distantes, se faz necessário

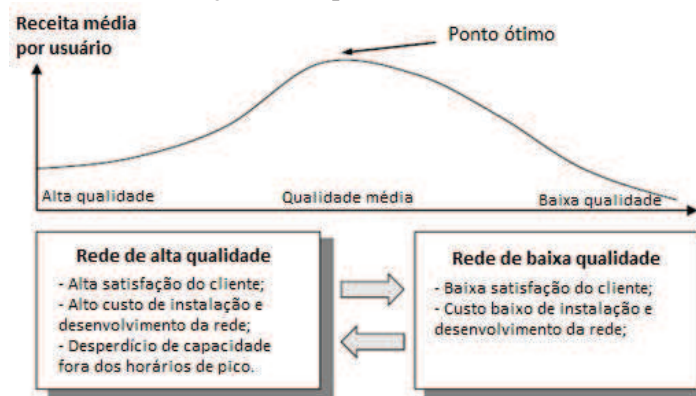


**Figura 10:** Processos detalhados das etapas de planejamento de rede.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

**Figura 11:** Relação entre qualidade e investimentos da rede.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

utilizar uma modulação mais robusta que, conseqüentemente, utiliza maior taxa de codificação (QPSK). Para usuários mais próximos, utiliza-se modulação com codificação com taxas mais baixas (16-QAM e 64-QAM). Quanto mais longe o usuário está, maior é a interferência do meio e, conseqüentemente, maior a taxa de erro, afetando a velocidade de transmissão e a banda do usuário distante.

O LTE aceita modulação adaptativa, o que significa dizer que ele próprio escolhe a modulação utilizada para cada usuário, baseada na distância e na melhor qualidade de serviço que possa ser oferecida ao usuário. A capacidade é afetada por vários aspectos, e para seu planejamento pode-se utilizar dados de cobertura de tecnologias e rede legadas ou, no caso de não existir uma, utiliza-se ferramentas de predição de rede. Já a performance da rede, depende da quantidade de usuários atendidos por uma eNodeB, altura da antena, tilts, relevo da região, vegetação, obstáculos (prédios e construções) e distância dos usuários a eNodeB.

O QPSK é a modulação mais robusta que o LTE utiliza, e ela requer uma relação sinal-ruído (SINR) entre 0 a 3dB enquanto que o 16-QAM requer um SINR entre 7 a 11 dB e o 64-QAM entre 12 a 15dB.

### 2.3.2 Plano de Cobertura

A cobertura de uma rede pode ser estimada, inicialmente e com poucos detalhes, aplicando um dos modelos de propagação já conhecidos (MISHRA, 2007). De acordo com as características da rede, escolhe-se o modelo que melhor se adapta para estimar a cobertura.

A cobertura varia com a tecnologia a ser disponibilizada. A frequência da tecnologia e suas demais características influenciam na cobertura. É comum encontrar tecnologias de segunda e terceira geração com melhor cobertura que o LTE. Para se estimar as perdas máximas aceitáveis, ou seja, as bordas de cobertura de uma eNodeB, utiliza-se o cálculo de *link budget*.

#### 2.3.2.1 *Link Budget*

O *link budget* serve para calcular a perda máxima de propagação que o sistema aceita sem afetar o acesso dos usuários à rede (PENTTINEN, 2012; SANTOS, 2011). Também pode-se determinar a área de cobertura de um site através do *link budget*, considerando o tipo da região (urbana, densa urbana, suburbana, rodovia, etc) e também considera-se o tipo de cobertura (*indoor, incar, outdoor*). Todos estes fatores influenciam nas perdas de propagação. Outros fatores que devem ser considerados envolvem o sistema irradiante (características das antenas, ganhos, abertura vertical, abertura horizontal).

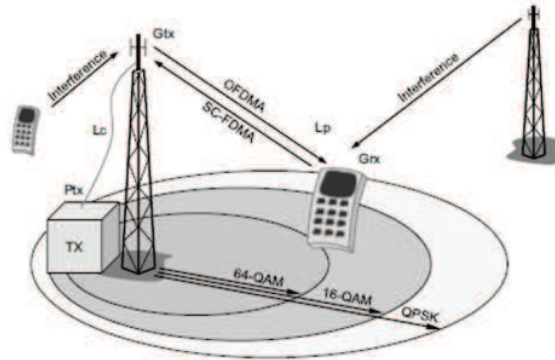
Como resultado, obtém-se as perdas no caminho entre a eNodeB e seus usuários, de acordo com os obstáculos entre eles. Este cálculo serve para estimar as perdas tanto para o *downlink* quanto para o *uplink*, permitindo ajustes e parametrização, conforme a necessidade. A diferença entre o *downlink* e *uplink* é o método de acesso. Enquanto que o *downlink* é feito através de

OFDMA, o *uplink* é feito através do SC-FDMA, e portanto há diferenças nos requisitos mínimos para funcionarem corretamente. Com um determinado valor de SINR, o usuário obtém uma taxa de dados conforme a sua localização e as perdas de multi-caminho entre ele e a eNodeB.

A vantagem de utilizar o *link budget* para planejar a rede é que, mesmo que teórico, ele oferece uma noção de como será a cobertura da rede. Após a implementação da tecnologia, ajustes se fazem necessários. Porém, este é o método mais assertivo para o planejamento da cobertura da rede (SANTOS, 2011; HOLMA; TOSKALA, 2011).

A Figura 12 apresenta os conceitos de planejamento da rede desenvolvidos até o momento, onde também são considerados e apresentadas as perdas de cabeamento, conectores ( $L_c$ ), a potência de transmissão ( $P_{tx}$ ), e os ganho da antena transmissora ( $G_{tx}$ ).

**Figura 12:** Link budget da rede 4G.



Fonte: (PENTTINEN, 2012)

As perdas máximas da propagação  $L$  são calculadas pra cada modulação, considerando os requisitos de nível de sinal mínimo de cada modulação e se a propagação é feita em lugares fechados (*indoor*) ou em área externa (*outdoor*). Como mostrado na figura 12, o QPSK é a modulação que fornece maior cobertura e menor capacidade. A modulação 64-QAM oferece boa capacidade porém limitada a uma área de cobertura pequena. A modulação intermediária, 16-QAM oferece boa capacidade juntamente com boa cobertura. O LTE oferece modulação automática e adaptação de codificação, obtendo a otimalidade de cobertura e capacidade (SANTOS, 2011)

O cálculo de *link budget* é estimado para fornecer os recursos mínimos da borda de cobertura desejada. É importante salientar que o cálculo de cobertura pode ser feito por duas abordagens: a operadora define até que ponto determinado site deve cobrir para depois calcular a capacidade e o investimento necessário para atender, ou supondo que o ponto de instalação do sistema irradiante já esteja definido, pode ser calculado até onde este sistema alcança com a capacidade mínima disponível.

O *link budget* é amplamente estudado em (SANTOS, 2011), sendo a equação básica para o cálculo do *link budget* é dada por:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M, \quad (2.1)$$

Onde:

$L$  = Perda máxima de *downlink* e *uplink*;

$P_{tx}$  = Potência de transmissão [dBm];

$G_{tx}$  = Ganho da antena transmissora [dBi];

$L_{tx}$  = Perdas de transmissão [dB];

$SNR_{req}$  = Relação sinal-ruído requerida [dB];

$S_{rx}$  = Sensibilidade requerida na recepção [dB];

$G_{rx}$  = Ganho da antena receptora [dB];

$L_{rx}$  = Perdas na recepção [dB];

$G_{dv}$  = Ganho de diversidade [dBi];

$M$  = Margem de desvanecimento [dB].

Os parâmetros tradicionais para cálculo de *link budget de downlink* são dados pela tabela 1. Estes valores podem variar de acordo com os elementos da rede. A sensibilidade de recepção requerida é um parâmetro que indica a potência mínima que um usuário móvel considera para acessar a rede. Segundo Santos (2011), este parâmetro é normatizados pela 3GPP. Para o presente trabalho, serão utilizados os parâmetros já estudados e bem desenvolvidos em (SANTOS, 2011).

**Tabela 1:** Valores dos Parâmetros para o *link budget de downlink*

Parâmetros	Valores
Potência de transmissão	60W, 48 dBm
Ganho da antena transmissora	18 dBi
Perdas na transmissão	3 dB
SNR	0 dB
Sensibilidade de recepção requerida	-92 dBm
Ganho da antena receptora	0 dBi
Perdas na recepção	0 dB
Ganho de diversidade	0 dBi
Margem de desvanecimento	4 dB

Fonte: adaptado de (SANTOS, 2011)

Desta forma, aplicando os valores da Tabela 1 na equação (2.1), tem-se:

$$L_{DL} = 48dBm + 18dBi - 3dB - 0 - (-92dBm) + 0 - 0 + 0 - 4dB \quad (2.2)$$

$$L_{DL} = 151dB \quad (2.3)$$

Já para o *uplink*, os parâmetros estão descritos na Tabela 2 e seu cálculo de *link budget* na equação (2.5)

$$L_{UL} = 23dBm + 0 - 0 - 0 - (-101,5dBm) + 18dBi - 3dB + 0dB - 4dB \quad (2.4)$$

**Tabela 2:** Valores dos Parâmetros para o *link budget de uplink*

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Potência de transmissão	23 dBm
Ganho da antena transmissora	0 dBi
Perdas na transmissão	0 dB
SNR	0 dB
Sensibilidade requerida na recepção	-101,5 dBm
Ganho da antena receptora	0 dBi
Perdas na recepção	0 dBi
Ganho de diversidade	0 dBi
Margem de desvanecimento	4 dB

Fonte: (SANTOS, 2011)

$$L_{UL} = 138,5dB \quad (2.5)$$

Este valores serão necessários para a modelagem do sistema, para o cálculo de propagação e raio teórico a ser apresentado em capítulo específico

## 2.4 Metaheurísticas

Grande parte da literatura (LEE; KANG, 2000; HURLEY, 2002; AMALDI; CAPONE; MALUCELLI, 2003; YANG et al., 2007; GENDREAU; POTVIN, 2010; BOUSSAÏD; LE-PAGNOT; SIARRY, 2013) descreve algoritmos que podem ser utilizados para a obtenção de soluções ótimas para diferentes tipos de problemas computacionais. Porém, alguns problemas são tão complexos que nem mesmo algoritmos avançados podem encontrar uma solução ótima. Para estes tipos de problemas, espera-se, então, encontrar uma solução adequada e com certa qualidade. Para tal, pode ser utilizada uma heurística (GLOVER; LAGUNA, 1997). Heurísticas são algoritmos conhecidos por apresentarem soluções para um problema, porém esta solução não é, necessariamente, uma solução ótima. Tampouco há qualquer garantia da qualidade da solução apresentada, porém uma heurística bem estruturada pode chegar a uma solução próxima de uma solução ótima. Uma heurística funciona baseada no senso comum e intuição de como buscar uma boa solução e pode ser adaptada para um problema específico.

Metaheurísticas, em sua definição original, são métodos que fazem uso de interações entre métodos de melhorias locais e estratégias de alto rendimento para criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e buscar uma solução robusta para um problema (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). Desta forma, uma metaheurística resulta em um método que fornece uma estrutura genérica e linhas de estratégia para desenvolver uma heurística específica, visando que esta se encaixe e sirva para apresentar uma solução adequada para o problema ao qual se deseja resolver (GLOVER; LAGUNA, 1997). Desde o surgimento das metaheurísticas, elas se tornaram bastante populares e amplamente utilizadas para a resolução de problemas de alta complexidade computacional. Tal popularidade se deve, principalmente, pela habilidade de

escapar dos ótimos locais. Ao longo do tempo, novas e evoluídas estratégias foram propostas, a fim de resolver problemas cada vez mais complexos, em especial abordagens que utilizam mais de uma estrutura de vizinhança como um meio de definir movimentos admissíveis para a transição de uma solução para outra, ou para construir ou destruir soluções em processos construtivos e destrutivos (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Dentro da teoria de complexidade computacional, existem os problemas que podem ser resolvidos em tempo polinomial e em tempo exponencial. A figura 13 exemplifica a diferença de tempo de processamento entre eles.

**Figura 13:** Comparação entre as funções de complexidade de tempo polinomial e exponencial.

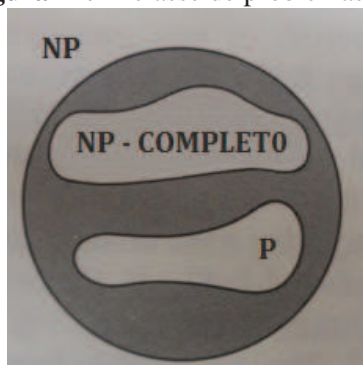
Função de complexidade de tempo	Tamanho $n$					
	10	20	30	40	50	60
$n$	0,00001 segundo	0,00002 segundos	0,00003 segundos	0,00004 segundos	0,00005 segundos	0,00005 segundos
$n^2$	0,0001 segundo	0,0004 segundo	0,0009 segundo	0,0016 segundo	0,0025 segundo	0,0036 segundo
$n^3$	0,001 segundo	0,008 segundo	0,027 segundo	0,064 segundo	0,125 segundo	0,216 segundo
$n^5$	0,1 segundo	3,2 segundo	24,3 segundos	1,7 minutos	5,2 minutos	13 minutos
$2^n$	0,001 segundo	1 segundo	17,9 minutos	12,7 dias	35,7 anos	366 séculos
$3^n$	0,059 segundo	58 minutos	6,5 anos	3.855 séculos	$2 \times 10^5$ séculos	$1,3 \times 10^{13}$ séculos

Fonte: (GAREY; JOHNSON, 1999)

Saber determinar a qual classe um problema pertence ajuda na escolha da metaheurística mais eficiente para resolvê-lo. Em geral, a eficiência de um algoritmo é medida pelo tempo que o algoritmo leva para apresentar uma solução (GAREY; JOHNSON, 1999).

Problemas de classe P são aqueles que se conhece um algoritmo para resolvê-los em tempo polinomial e, portanto, são relativamente fáceis de serem resolvidos. Problemas de classe NP são resolvíveis apenas por algoritmos não determinísticos em tempo polinomial porém podem ter suas soluções provadas em tempo polinomial. Sabe-se que problemas de complexidade P estão contidos dentro da classe NP, porém problemas NP abrangem também outras classes de problemas além da classe P. Dentro da classe NP estão os problemas chamados de NP-completos (NP-complete). Um problema é considerado NP-completo se qualquer outro problema NP puder ser transformado nele (ou reduzido a ele) em tempo polinomial. Desta forma, se houver um algoritmo para resolver o problema em questão em tempo polinomial, então o mesmo algoritmo será capaz de resolver qualquer problema de classe NP (GAREY; JOHNSON, 1999).

Ainda há os problemas classificados como NP-difícil (NP-hard). Estes problemas são de resolução tão complexos quanto problemas NP-completos ou ainda mais difíceis e não há um algoritmo que os resolva de forma eficiente. Um problema é considerado NP-difícil, se houver

**Figura 14:** A classe de problemas NP.

Fonte: (GAREY; JOHNSON, 1999)

um problema NP-completo que possa ser transformado (ou reduzido) no problema em questão. Porém nem todos os problemas NP-difícil estão incluídos na classe NP. Problemas NP são problemas de decisão e nem todos os problemas classificados como NP-difícil são problemas de decisão. Há problemas NP-difícil que não tem soluções verificáveis em tempo polinomial. Grande parte dos problemas de otimização são NP-difícil e não é possível resolvê-los em tempo polinomial (GAREY; JOHNSON, 1999). Porém, metaheurísticas são a melhor opção para resolvê-los e têm apresentado soluções adequadas para tais problemas (PHAM; KARABOGA, 2000; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Há três principais tipos de metaheurísticas: as evolutivas, as de busca de entornos e as híbridas (PHAM; KARABOGA, 2000). As evolutivas são aquelas baseadas no comportamento evolutivo de populações. A mais conhecida é o Algoritmo Genético. Elas funcionam a partir de uma população inicial que evolui, através da reprodução da população anterior, sendo manipulada pelo algoritmo que gera novas populações a fim de encontrar uma solução ótima (população evoluída) para o problema proposto. O segundo tipo de metaheurísticas, as de busca de entornos, pode ser definido como algoritmos que percorrem espaços de buscas, ou de soluções, sendo que a cada nova iteração o algoritmo compara a solução obtida na iteração anterior com a iteração atual e escolhe aquela que melhor se adequa ao problema. O terceiro tipo de metaheurísticas é um tipo especial chamado de metaheurísticas híbridas. Estas são metaheurísticas que não se enquadram nos tipos anteriores e que, na verdade, mesclam dois tipos diferentes de metaheurísticas visando oferecer uma solução de melhor qualidade. (GENDREAU; POTVIN, 2010) Desta forma, as metaheurísticas híbridas buscam unir as vantagens de cada uma das metaheurísticas utilizadas na união, a fim de construir uma metaheurística superior que consiga apresentar uma solução, no mínimo, adequada para o problema (PHAM; KARABOGA, 2000; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010).

### 2.4.1 Busca Tabu

O início do desenvolvimento da Busca Tabu começou nos anos 70, porém foi apresentada pela primeira vez na forma conhecida hoje em 1986, por Fred Glover. As mesmas ideias também foram propostas por Hansen, também em 1986. Uma versão mais completa e formal da Busca Tabu foi apresentada por Glover e também por de Werra e Hertz, ambos em 1989 (GLOVER; LAGUNA, 1997).

A Busca Tabu é uma metaheurística do tipo busca de entorno (*local search*) e é conhecida por ser um dos algoritmos mais inteligentes e utilizados para problemas de otimização. Um algoritmo de busca local pode ser descrito, de forma geral, como procedimento de busca iterativa que inicia com uma solução qualquer possível e a aprimora através de uma série de modificações locais (ou movimentos). A cada iteração, a solução sofre pequenas modificações que a levam a se tornar uma solução mais adequada que a anterior. A busca termina quando um ótimo local é encontrado, ou seja, qualquer movimento que a busca tente realizar não irá apresentar uma solução melhor que a solução atual. A Busca Tabu apresenta uma solução para a limitação do algoritmo de busca local, permitindo que o algoritmo consiga escapar de ótimos locais. O princípio básico da Busca Tabu para tal é a utilização de um mecanismo de memória, chamados de lista tabu. Esta lista guarda um histórico recente da busca (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

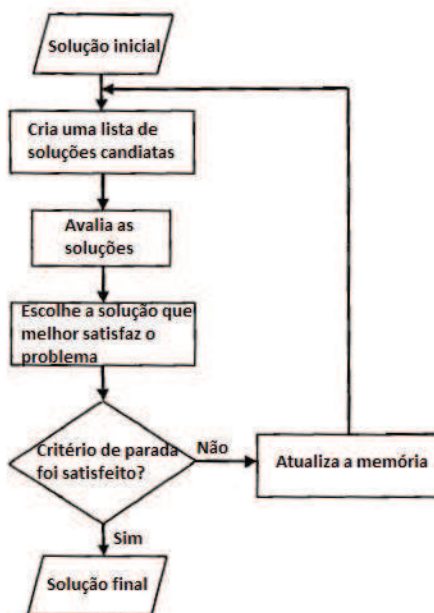
A Busca Tabu tornou-se popular por resolver problemas de otimização e a sua eficiência se deve, principalmente, a sua capacidade de escapar de ótimos locais. Dessa forma, o método evita retornar a um ótimo local já visitado anteriormente visando a um resultado ótimo global. A solução inicial do algoritmo não precisa ser ótima nem definitiva, deve ser apenas possível ao problema e viável para guiar o algoritmo. A Busca Tabu inicia procurando a melhor solução na vizinhança da solução inicial. A cada nova iteração, a Busca Tabu refaz a busca por soluções melhores, mantendo os movimentos já realizados em uma lista, a chamada lista tabu. A lista recebe este nome por ser uma lista de movimento proibidos, ou seja, contém os movimentos já realizados e descartados pelo algoritmo. Os movimentos armazenados nesta lista são mantidos ali por um determinado tempo ou quantidade de iterações. O algoritmo termina sua busca quando o ótimo global ou a solução mais próxima do ótimo é encontrada ou o número de iterações chegou ao limite estipulado inicialmente no algoritmo, ou ainda quando outro critério de parada definido do início do algoritmo, for alcançado. A Figura 15 mostra um fluxograma simples da Busca Tabu.

#### 2.4.1.1 Espaço de busca e estrutura de vizinhança

A parte mais básica da metaheurística da Busca Tabu é o conceito de espaço de busca e a estrutura de vizinhança. O espaço de busca é basicamente o espaço de todas as soluções possíveis que podem ser consideradas (visitadas) pelo algoritmo. Para o caso deste trabalho,



**Figura 15:** Fluxograma simples da Busca Tabu.



Fonte: Adaptado de (PHAM; KARABOGA, 2000)

onde é dada uma região atendida por uma operadora de telefonia celular e se deseja implementar uma nova tecnologia na rede, o espaço de busca são todas as estações rádio base existentes dentro da região em questão.

O conceito de estrutura de vizinhança está ligado ao espaço de busca. A cada iteração, a vizinhança da Busca Tabu é alterada e a solução final é desenhada baseada nas condições e na classificação dos movimentos como tabu. A definição da vizinhança  $N(s)$  também é crucial para que o algoritmo encontre a solução ótima, já que o algoritmo depende da trajetória que a vizinhança, em cada iteração, oferece ao algoritmo. A definição formal diz que  $N(s)$  é um subconjunto do espaço de busca definido por:

$$N(s) = \{\text{soluções obtidas através de transformações locais aplicadas em } s\} \text{ (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003)}$$

#### 2.4.1.2 Tabus

Como já mencionado, os tabus são movimentos proibidos na Busca Tabu, que servem para evitar que o algoritmo retorne a posições já visitadas e descartadas para a solução, assim escapando de ótimos locais. Quando a busca está em tal situação, para escapar do ótimo local o algoritmo proíbe movimentos que revertam a evolução e aprimoramento dos movimentos recentes. Um número fixo e limitado de movimentos tabus são armazenados em uma memória de curto prazo da busca (a lista tabu). Os tabus mais utilizados envolvem registrar as últimas transformações aplicadas na solução atual e proibir transformações inversas. Podem ser utilizadas

mais de uma lista tabu e, dependendo do problema, é aconselhável que se faça uso de mais de uma lista tabu (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010).

A prática padrão das listas tabu é determinar tamanhos fixos para elas e operarem em forma de lista circular, porém pode-se utilizar listas tabus com tamanhos que variam durante a busca ou gerar randomicamente o tempo que cada movimento permanecerá na lista tabu, conforme a necessidade do problema. (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010)

#### 2.4.1.3 Critério de Aspiração

Por melhor estruturado que um algoritmo da Busca Tabu esteja, por vezes ele pode proibir um movimento promissor, mesmo que não haja perigo de retorno a soluções já visitadas. Neste caso, o critério de aspiração serve para perdoar o caráter tabu do movimento, mantendo o movimento na lista tabu. A maneira mais simples e comum de funcionamento do critério de aspiração consiste em permitir um movimento, mesmo que ele esteja na lista tabu, caso tal movimento resulte em uma solução melhor que a melhor solução conhecida até o momento. A regra-chave do critério de aspiração é que um movimento tabu pode ser aceito, se ele puder oferecer melhoria à solução. (PHAM; KARABOGA, 2000; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010).

#### 2.4.1.4 Estratégias de intensificação e diversificação

Busca Tabu utiliza das estratégias de intensificação e diversificação para auxiliar no processo de pesquisa no espaço de soluções. Quando o algoritmo encontra uma área promissora, o algoritmo explora aquela área com mais empenho. A principal estratégia de intensificação é o retorno a uma boa solução obtida anteriormente para explorar a vizinhança desta solução mais minuciosamente, já que tal região é dada como promissora. No processo de intensificação, o algoritmo busca reunir os atributos das melhores soluções encontradas durante as iterações e estimular que estes atributos façam parte da solução corrente. Embora eficiente, não é sempre que se faz necessário utilizar a estratégia de intensificação, já que pode acontecer da busca tradicional ser suficiente. Nestes casos, utilizar esta estratégia pode fazer o algoritmo perder muito tempo explorando áreas do espaço de busca que já foram visitadas (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Já a estratégia de diversificação tem o objetivo contrário. Ela visa ampliar a busca para regiões do espaço de busca ainda pouco exploradas. Ao contrário da estratégia de intensificação, a diversificação procura gerar soluções com atributos diferentes dos já encontrados nas melhores soluções durante as iterações do algoritmo. Quando o algoritmo está há muitas iterações na mesma vizinhança sem alcançar melhoras significativas na solução atual, o mecanismo de diversificação força o algoritmo a explorar regiões do espaço de buscas ainda não exploradas. Há

duas formas de diversificar a busca: a primeira é chamada de diversificação por reiniciação que força a utilização de atributos raramente utilizados na solução corrente e reinicia a busca a partir deles. O segundo método é chamado de diversificação continuada e considera a diversificação em todos os seus movimentos, através da influência na avaliação de cada movimento da busca. A estratégia de diversificação é melhor aplicada em situações onde não existem movimentos que melhorem a solução atual, indicando que o algoritmo já esgotou as possibilidades daquela região e, portanto, deve diversificar a busca para outra região (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Enquanto que a estratégia de intensificação nem sempre se faz necessária para encontrar uma boa solução para o problema, a estratégia de diversificação é o procedimento mais crítico da Busca Tabu e da sua estrutura, devendo ser bem planejada e revisada caso o algoritmo não responda às expectativas (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

#### 2.4.1.5 Critério de parada

Em algum momento, o algoritmo precisa interromper a busca e apresentar uma solução, mesmo que esta não seja uma solução ótima. Para a definição do encerramento do algoritmo, de forma que o algoritmo tenha um final e apresente uma solução, é necessário estabelecer um critério de parada. Os critérios mais comuns para o término do algoritmo são: (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003)

- determinar um número fixo de iterações;
- determinar um número fixo de iterações seguidas que não apresentem melhoria na solução atual;
- quando o algoritmo encontrar uma solução que atinja o limiar mínimo esperado.

#### 2.4.2 Algoritmo Genético

O termo Algoritmo Genético foi usado pela primeira vez por John Holland da Universidade de Michigan no livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* de 1975. Porém, Holland não foi o único a pensar e a desenvolver a computação evolucionária. Ingo Rechenberg e Hans-Paul Schwefel desenvolveram, ainda nos anos de 1960 na Alemanha, a estratégia da evolução enquanto que na mesma época nos Estados Unidos Bremermann, Fogel e outros cientistas implementaram a ideia de programação evolucionária. O ponto em comum das ideias desses diferentes cientistas foi utilizar os conceitos básicos da teoria da evolução de Darwin, mutação e evolução na computação. Embora algumas conclusões tenham sido promissoras, foi apenas nos anos 1980 que a computação evolucionária começou a realmente mostrar resultados relevantes e adquirir certa popularidade. Embora tenha sido mencionado no livro de Holland pela primeira vez, o algoritmo genético ganhou notoriedade como metaheurística de otimização pelo trabalho

de Ken De Jong, orientando de Holland (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010).

Algoritmo genético é uma metaheurística considerada como uma aplicação de inteligência artificial, já que são algoritmos utilizados pela ciência de inteligência artificial para tentar simular o comportamento humano em máquinas. Da mesma forma são algoritmos populacionais, inspirado na natureza ou *Bio-Inspired*. Assim como a ideia da seleção natural de Darwin, este algoritmo segue o mesmo princípio: uma população de indivíduos evolui a partir de operadores genéticos, inspirado no processo de evolução natural e na competição. Esses operadores servem para manipular indivíduos de uma população durante várias gerações de modo a aprimorar a função de aptidão gradualmente (PHAM; KARABOGA, 2000).

Assim como na natureza, o Algoritmo Genético parte de uma população inicial onde cada indivíduo desta população representa uma possibilidade de solução. Para cada indivíduo, é atribuído um valor de aptidão (também chamado de *fitness*) que significa o quão esse indivíduo ou tentativa de solução é adequado para o problema. A cada etapa do algoritmo, alguns indivíduos são selecionados para gerarem uma nova população de indivíduos, seguindo a seleção natural, onde os indivíduos mais fortes (ou com melhor valor de aptidão) possuem uma tendência maior de sobrevivência. Os indivíduos se reproduzem através dos operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e mutação a fim de gerar novos indivíduos onde terão seu valor de aptidão e serão comparados aos indivíduos existentes a fim de determinar quais indivíduos formarão a próxima geração. Diferente de outros algoritmos de otimização, a estrutura do Algoritmo Genético não lida diretamente com os parâmetros do problema ao qual ele está sendo aplicado. Ele funciona com códigos que representam os parâmetros. Desta forma, a estrutura do algoritmo genético é universal para os problemas, com poucas adaptações. (PHAM; KARABOGA, 2000) Assim, uma das etapas da implementação do Algoritmo Genético diz respeito justamente a como codificar os parâmetros do problema dentro da estrutura do algoritmo.

Usualmente, os parâmetros são codificados como um conjunto de valores dentro de uma estrutura de vetor. Esse vetor é chamado de cromossomo. Os valores dentro de um cromossomo podem ser binários, numéricos ou combinações entre ambos.

Após esse estudo dos parâmetros, é necessário criar uma população inicial do problema. O algoritmo genético trabalha com um conjunto de possíveis soluções e não apenas uma solução. Assim, a população inicial do algoritmo deve ser um conjunto de soluções viáveis para o problema e deve ser criada como uma entrada para que o algoritmo evolua este conjunto de soluções através dos operadores genéticos.

Para evoluir o conjunto de soluções iniciais (ou população inicial), o algoritmo precisa conhecer a qualidade de cada solução do conjunto inicial para que possa aprimorá-la. Para ele conhecer a qualidade, é necessário que haja uma interface entre o ambiente do problema e o próprio Algoritmo Genético (PHAM; KARABOGA, 2000).

### 2.4.2.1 População Inicial

Para iniciar um processo de otimização, o Algoritmo Genético demanda um conjunto de soluções iniciais, também chamado de população inicial. Há dois fatores importantes para gerar uma população inicial adequada: o tamanho da população inicial e o método com que ela é gerada ou escolhida. Definir o tamanho da população inicial é um passo importante porque uma população muito grande compromete a eficiência do algoritmo, dado que tomaria muito tempo do algoritmo para que este conseguisse chegar em uma solução adequada. Já uma população inicial muito pequena não dá opções para o algoritmo explorar soluções dentro do espaço de busca. Portanto, ela deve ser bem dimensionada, buscando-se um tamanho de população que propicie um equilíbrio entre o tempo que demandará o algoritmo e as opções para que ele trabalhe as soluções (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Já para a formação da população inicial, há dois métodos para tal: o primeiro consiste em gerar um conjunto de soluções de forma aleatória e o segundo consiste em criar uma população inicial adequada a partir do conhecimento do problema a ser estudado, utilizando dados e requisitos dele próprio.

O primeiro método é melhor utilizado quando não existe dados iniciais do problema enquanto que o segundo é preferível quando se conhece suficientemente bem o problema a ser estudado, onde o cenário dele já existe e já se conhece uma solução inicial que se deseja aprimorar ou otimizar (PHAM; KARABOGA, 2000).

### 2.4.2.2 Avaliação

Os indivíduos são avaliados pela função objetivo do Algoritmo Genético e a partir dela recebem um valor de aptidão (*fitness*) que indica o quão adaptado ao meio o indivíduo está. Este valor não pode ser negativo e indica a possibilidade de sobrevivência de cada indivíduo.

É este valor que o algoritmo genético utiliza para avaliar toda a população e que os operadores genéticos consideram quando escolhem e classificam os indivíduos (soluções) (TALBI, 2009).

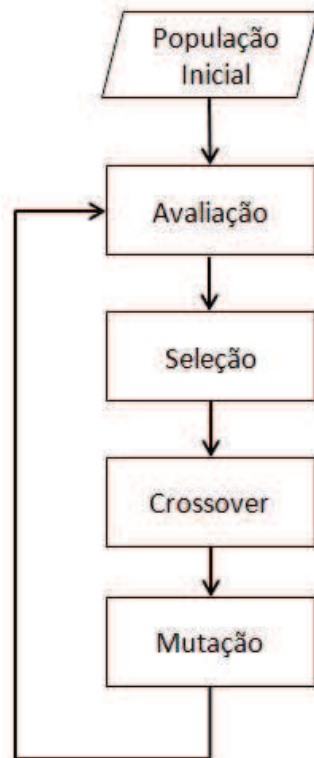
### 2.4.2.3 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são os responsáveis por fazer a população inicial evoluir. Eles são inspirados na natureza, na evolução das espécies. Eles são: seleção, cruzamento e mutação, reprodução e inversão.

Não é necessário implementar todos esses operadores para o algoritmo genético funcionar porque cada operador funciona de forma independente dos outros. A escolha sobre quais operadores utilizar varia conforme o problema a ser estudado.

Na figura 16, é apresentado um fluxograma básico de funcionamento do algoritmo genético.

**Figura 16:** Fluxograma simples do algoritmo genético.



Fonte: Adaptado de (PHAM; KARABOGA, 2000)

O primeiro operador genético é a seleção. O objetivo da seleção é utilizar mais cópias dos indivíduos com valores de aptidão alto que de indivíduos com valor de aptidão baixo. Este processo influencia diretamente a busca em direção de uma boa solução em pouco tempo (PHAM; KARABOGA, 2000). Há dois métodos de seleção: proporcional e por classificação.

O método por seleção proporcional tem diversos tipos como seleção por torneio ou por roleta (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). Ele funciona basicamente utilizando o valor de aptidão para aumentar ou diminuir as chances de um indivíduo ser selecionado. Desta forma, os indivíduos são selecionados aleatoriamente porém alguns com mais chances que outros em serem selecionados para a operação de cruzamento, dando origem à próxima geração (PHAM; KARABOGA, 2000). O segundo método evita que o algoritmo convirja muito rápido, limitando-se a um algoritmo que apenas este indivíduo gere a próxima população. A seleção por classificação é baseada neste princípio, assim, cada indivíduo gera um determinado número de descendentes, baseado no seu valor de aptidão. Dessa forma, todos indivíduos podem gerar uma nova prole, porém aqueles com maior valor de aptidão geram mais novos indivíduos que os que possuem valor de fitness baixo.

A etapa de *crossover* ou cruzamento é o que diferencia o algoritmo genético dos demais algoritmos. Este operador serve para criar novos indivíduos (prole) a partir de dois indivíduos existentes (pais) dentre os selecionados na etapa anterior. Este operador consiste na troca de material genético dos pais, gerando uma prole que apresente parte do material genético de cada

indivíduo que o gerou. O objetivo deste operador é, da mesma forma que na natureza, gerar uma prole mais forte que a anterior, ou seja, com um valor de aptidão melhor que os dos seus pais. Existe mais de um método para realizar o *crossover* entre dois indivíduos, sendo os mais comuns o *n - point*, cruzamento cíclico e o uniforme. (PHAM; KARABOGA, 2000). O método *n - point* seleciona um número de pontos  $n$  e uma posição  $k$ , onde a posição  $k$  indica o ponto dentro do cromossomo de cada indivíduo de onde a prole herdará o material genético de um pai e de outro. O número de pontos  $n$  é a quantidade de vezes que é trocado o pai que passará o gene para o filho. Na figura 17, há um exemplo de cruzamento por um ponto e dois pontos. Essas operações não alteram os valores dos cromossomos, apenas determinam qual valor a prole herdará de cada pai.

**Figura 17:** Cruzamento por um ponto e por dois pontos.

Cruzamento de um ponto	Pai 1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
	Pai 2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
	Filho 1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	Filho 2	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1

Cruzamento de dois pontos	Pai 1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
	Pai 2	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
	Filho 1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
	Filho 2	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1

Fonte: (PHAM; KARABOGA, 2000)

Após o cruzamento, todos os indivíduos da população são avaliados. Alguns bits podem ser modificados aleatoriamente, de acordo com uma taxa de mutação determinada. Essa taxa de mutação é determinada no momento que se desenha o algoritmo e indica a probabilidade de um gene sofrer uma modificação.

É importante ressaltar que essa operação insere uma operação muito pequena que serve para forçar o algoritmo a buscar em novas áreas (diversificação) e ajuda a evitar uma convergência prematura do algoritmo gerando uma pequena modificação, fazendo o algoritmo explorar soluções próximas (intensificação) (PHAM; KARABOGA, 2000).

O método de mutação uniforme consiste em sortear um cromossomo que sofrerá uma mutação e em seguida sortear um novo valor válido para uma determinada posição do cromossomo (TALBI, 2009). Esta é uma opção de operador de mutação, porém existem outros.

#### 2.4.2.4 Parâmetros de Controle

Os parâmetros de controle são determinantes para a eficiência do Algoritmo Genético. Entre eles estão o tamanho da população, a taxa de cruzamento, taxa de mutação e critério de parada. Uma população muito grande aumentará o esforço computacional do algoritmo enquanto que uma população pequena pode convergir muito rápido. A taxa de cruzamento determina a

frequência com que o cruzamento acontecerá. Uma frequência baixa diminui a velocidade de convergência e o algoritmo pode ficar preso, e se for muito alta aumentará a saturação em uma única solução e outras boas soluções serão retiradas muito rapidamente. Já a taxa de mutação quando muito alta, torna o algoritmo quase que aleatório e instável enquanto que muito baixa pode dificultar a busca por uma solução ótima global (PHAM; KARABOGA, 2000; GLOVER; KOCHENBERGER, 2003; GENDREAU; POTVIN, 2010).

O critério de parada determina quando o algoritmo termina a busca. Normalmente, é utilizado um número máximo de gerações ou um número de máximo gerações sem melhoria na medida de aptidão dos indivíduos (PHAM; KARABOGA, 2000).

## 2.5 Problema de Recobrimento de Conjuntos

O problema estudado no presente trabalho é uma aplicação de um problema clássico da ciência computação, conhecido como problema de recobrimento de conjuntos. O problema é estudado amplamente e de diferentes maneiras em (BEASLEY, 1987; BEASLEY; CHU, 1996; ALFANDARI; MONNOT, 2014; BILAL; GALINIER; GUIBAULT, 2014).

Em (BEASLEY, 1987), é estudado o problema clássico de recobrimento de conjuntos, através de um algoritmo simples. Em (BEASLEY; CHU, 1996), o mesmo problema é abordado, porém utilizando o Algoritmo Genético para resolvê-lo. Em (ALFANDARI; MONNOT, 2014), é estudada uma variação do problema, utilizando agrupamento. Nele, os subconjuntos são separados em  $K$  clusters e para cada agrupamento é designado um custo associado que deve ser pago quando um conjunto de recobrimento, ou mais, nele contido, for selecionado. Em (BILAL; GALINIER; GUIBAULT, 2014), uma variante do problema é estudada e resolvida através da Busca Tabu.

Formalmente, o problema pode ser definido por (CAPRARA; TOTH; FISCHETTI, 2000): Seja  $A = (a_{ij})$  uma matriz binária  $m \times n$ , e seja  $c = (c_j)$  um vetor inteiro  $n$ -dimensional. Seja  $M = \{1, \dots, m\}$  e  $N = \{1, \dots, n\}$ . O valor de  $c_j$  ( $j \in N$ ) representa o custo da coluna  $j$  e, assume-se, que  $c_j > 0 \quad \forall j \in N$ . Diz-se que uma coluna  $j \in N$  cobre uma linha  $i \in M$  se  $a_{ij} = 1$ .

Dessa forma, para um custo mínimo do problema, há um subconjunto  $S \subseteq N$  de colunas, sendo que cada linha  $i \in M$  está coberta por pelo menos uma coluna  $j \in S$ . A formulação matemática clássica para o problema é dada por:

$$v(SCP) = \min \sum_{j \in N} c_j x_j, \quad (2.6)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j \geq 1, \quad i \in M, \quad (2.7)$$



$$x_j \in \{0, 1\}, j \in N, \quad (2.8)$$

onde,  $x_j = 1$  se  $j \in S$ ,  $x_j = 0$  caso contrário. Por conveniência, para cada linha  $i \in M$  seja,  $J_i = \{j \in N : a_{ij} = 1\}$  o subconjunto de colunas cobrindo a linha  $i$ . Analogamente, para cada coluna  $j \in N$ , seja  $I_j = \{i \in M : a_{ij} = 1\}$  o subconjunto de linhas cobertas pela coluna  $j$ .

Em alguns casos, pode-se reduzir o tamanho do problema de recobrimento de conjuntos removendo colunas e linhas redundantes. O método mais comum para considerar a remoção de uma coluna  $j$  é existir uma coluna  $k \neq j$  para cada  $I_j \subseteq I_k$  e  $c_j \geq c_k$ , remove-se a coluna  $j$  desde que  $|I_j| \geq 1$  e  $c_j \geq \sum_{i \in I_j} \min\{c_k : k \in J_i\}$ . Considera-se a remoção de uma linha  $i$  se existir uma linha  $h \neq i$  para cada  $J_h \subseteq J_i$  e a inclusão de uma coluna na solução da coluna  $j$  sempre que  $J_i = \{j\}$  para alguma linha  $i$ .

Deve-se ter cuidado ao aplicar este método, já que o processamento de verificação das restrições pode aumentar, consideravelmente, para instâncias grandes, mesmo com o tamanho do problema reduzido. A maioria dos algoritmos para resolver esse problema contém alguma fase de pré-processamento, na qual as regras mencionadas acima são processadas antes da função objetivo do problema (CAPRARA; TOTH; FISCHETTI, 2000).

O problema de recobrimento de conjuntos é classificado como NP-difícil (GAREY; JOHNSON, 1999) e é amplamente aplicado para resolução de problemas reais (BEASLEY; CHU, 1996) e, portanto, muitos estudos direcionam-se para este problema, visando a encontrar algoritmos que o executam com melhor eficiência e melhores resultados. Atualmente, o que se sabe sobre o estado da arte do problema é que ele pode ser resolvido, com otimalidade provada, utilizando algumas centenas de linhas e algumas milhares de colunas. Com alguns milhares de linhas e milhões de colunas pode ser resolvido dentro de cerca de 1% do ideal em um tempo computacional razoável (CAPRARA; TOTH; FISCHETTI, 2000).



### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Desde o início do surgimento de tecnologias de telefonia celular, diversos autores desenvolveram estudos, visando à otimização de planejamento das redes. Com isso, e conforme estudado nos capítulos anteriores, o primeiro passo é a escolha da localização das BS (LEE; KANG, 2000; HURLEY, 2002; AMALDI; CAPONE; MALUCELLI, 2003; YANG et al., 2007; RAN; WANG; WANG, 2015; ST-HILAIRE; CHAMBERLAND; PIERRE, 2008; ST-HILAIRE; LIU, 2011; ST-HILAIRE et al., 2012; WANG; CHUANG, 2015).

Em (LEE; KANG, 2000), os autores propuseram um modelo de planejamento de redes de telefonia de segunda geração com base em dois tipos de BS: existentes e novas. Com isso, os autores propõem um modelo que considera tanto a rede já existente quanto a necessidade de expansão, visando atender a demanda e o crescimento da rede. Os autores estimam que, para uma taxa de bloqueio de 2%, os sistemas de segunda geração AMPS, GSM e CDMA necessitem, respectivamente, de 46 Erlangs, 107,4 Erlangs e 345,7 Erlangs de capacidade. Para a área de serviço, é utilizado um modelo tradicional de propagação com perdas no caminho e com isso a intensidade do sinal recebido pode ser estimada como uma função da potência transmitida, distância entre o transmissor e o receptor, ganhos e altura das antenas, porém os autores ignoram o fenômeno de *fading*. Os autores buscam por uma solução para a menor quantidade possível de BS para atender uma determinada região, conforme a demanda de tráfego aumenta. Para tal, os autores utilizam um índice  $\alpha$ , que varia de zero a um e indica a quantidade de tráfego demandada. Para resolver o problema, é implementada a metaheurística Busca Tabu, incorporando três componentes: estrutura de memória curta e longa; restrições tabu e critérios de aspiração; e estratégias de intensificação e diversificação. Os autores implementam a memória curta pela lista tabu e critério de aspiração. A solução inicial é dada por duas estratégias: “todos os candidatos a *base station*” e “candidatos randômicos viáveis”. Na primeira estratégia, as *base station* são colocadas em todos os candidatos existentes, porém apenas alguns destes são preparados para satisfazer a capacidade da rede dada as restrições de propagação. Cada área demandante de tráfego é atendida pela *base station* mais próxima até que a capacidade total da rede seja atingida. Pelo segundo método, as *base stations* são selecionadas em ordem decrescente de capacidade dos candidatos. A seleção das *base stations* é concluída quando todas as áreas que demandam tráfego forem atendidas. Para a política de intensificação, os autores utilizam a memória curta da Busca Tabu, através de duas listas tabu: lista de candidatos e lista de ativos. A diversificação é utilizada para expandir ou reduzir a capacidade da rede, ou seja, a capacidade de uma *base station* é aumentada ou diminuída conforme sua demanda. Os resultados encontrados para redes CDMA foram redução de 10% através das estratégias de diversificação, acima do resultado encontrado utilizando algoritmo genético. O resultado encontrado para redução de custo total, utilizando Busca Tabu, chega a quase 20%, comprovando a eficácia desta metaheurística para resolução de problemas de planejamento de redes.

Em (YANG et al., 2007), os autores propõem um modelo matemático para planejamento de

redes móveis de terceira geração (3G) voltado para o rápido controle de potência, *soft handover* e potência da portadora piloto tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Para tal, os autores utilizam e comparam os resultados entre três metaheurísticas: Algoritmo Genético (GA), *Simulated Annealing* (SA) e *Simulated Annealing* Evolucionário (E-SA). O problema de alocação de BS é modelado como problema de p-mediana simplificado. Em relação aos parâmetros, que os autores escolheram para serem considerados, é explicado que a importância do controle de potência se dá pelo fato da própria rede UMTS ser um sistema auto-interferente limitado. Portanto, é essencial manter a potência de transmissão no menor nível possível, porém garantindo que o usuário final receba sinal com qualidade suficiente para os serviços de telefonia móvel. Quanto ao *soft handover*, sabe-se que redes móveis funcionam por causa dele. *Soft handover* é a transição do usuário em movimento de uma BS para outra. Enquanto o usuário se movimenta, o sinal que ele recebe da BS que o está atendendo enfraquece, enquanto que o sinal de outra BS fica mais forte. Quando o sinal da nova BS se torna constantemente mais forte, a BS com o sinal mais fraco para de atender o usuário e o entrega para a nova BS com melhor sinal. Esta transição ocorre sem que o usuário perceba (queda da chamada, interrupção de voz ou dados). Os ganhos que o *soft handover* agrega à transmissão são vastamente descritos e explicados na literatura. Para o modelo matemático, os autores consideram a localização das BS, a potência da portadora piloto e a potência de transmissão do sinal como variáveis de decisão, porém, nos experimentos, somente é considerada a localização das BS. Os autores propõem o modelo matemático como formalização do problema de planejamento de redes. Para os experimentos, é proposta uma área retangular com dezenove BS, cada uma com três setores, totalizando 57 células. Para cada BS, foram consideradas cinco localidades candidatas, dentre as quais apenas uma será escolhida para a instalação da BS. Os autores escolheram o modelo de propagação Cost-231-Hata para áreas urbanas, porém o experimento considera a distribuição da demanda de tráfego uniforme, diferentemente do que se encontra em casos reais, onde a demanda de tráfego varia de região para região. Os autores executaram os testes para as três metaheurísticas citadas, com critérios de parada de 6.000, 10.000 e 15.000 iterações. Os resultados mostraram que a metaheurística *Simulated Annealing* Evolucionária e o *Simulated Annealing* apresentaram resultados consideravelmente melhores que o Algoritmo Genético em termos de média, desvio padrão e na capacidade de encontrar uma solução ótima para o problema.

Em (ST-HILAIRE; CHAMBERLAND; PIERRE, 2008), os autores utilizam a Busca Tabu para resolver o problema de planejamento de redes móveis de terceira geração integralmente, ou seja, abrangendo três problemas NP-difícil: as células, as redes de acesso e a rede de *core*. Desta forma, o problema integrado de planejamento se refere em determinar a quantidade, a localização e o tipo de NodeBs. O primeiro subproblema abordado é o planejamento físico propriamente dito. Nesta parte, a capacidade e a cobertura são estudadas, através de modelos de propagação. A literatura é vasta e definitiva sobre esses modelos. O objetivo deste subproblema é encontrar as melhores localidades (em termos de propagação) das NodeBs, altura das antenas, tilt e azimutes. Os autores também consideram o estudo do controle de potência e os *handover*

vers, através de uma estimativa confiável da quantidade de usuários. O segundo subproblema trata da rede de acesso, envolvendo a localização, a quantidade e a capacidade necessária para prover às NodeBs. Também envolve as interconexões entre *Radio Network Controllers* (RNC), de tal forma que a rede se estabeleça de forma confiável e robusta. O terceiro subproblema abordado pelos autores trata-se do planejamento do *core* da rede. A rede *core* deve estar bem dimensionada, pois ela atua como um concentrador de tráfego, ou seja, todo o tráfego de voz e dados atendido pelas NodeBs, que são concentrados por regiões em RNCs, são novamente concentrados para entrar na rede de *core*. O *core* precisa dar vazão para toda a quantidade demandada, evitando atrasos e quedas. Os autores utilizam a Busca Tabu para dimensionar os três subproblemas e analisam o resultado obtido, comparando com o CPLEX e trabalhos precedentes. Os resultados apresentados indicam que, para todos os experimentos executados, o Busca Tabu esteve, em média, 0,56% da solução ótima e os autores consideram o resultado bom, dada a complexidade do problema estudado.

Em outro estudo, dos mesmos autores (ST-HILAIRE; LIU, 2011), o mesmo problema é abordado, porém de forma diferente. Enquanto o estudo anterior analisa o problema global de planejamento de redes móveis, dividindo-o em três subproblemas (célula, acesso e *core*), neste os autores propõem uma abordagem completa do problema. Quando o problema global é dividido e analisado em cada subproblema, a solução ótima para cada um dos subproblemas não necessariamente compõe a solução ótima global. Nesta segunda abordagem, o três subproblemas são analisados simultaneamente, através de um único modelo matemático. Desta forma, as decisões são tomadas com base em toda a rede, visando à solução ótima para toda a rede. O objetivo permanece o mesmo: reduzir o custo da rede. Os autores compararam os resultados obtidos, através de uma modelagem *mixed-integer linear program* (MIP), com uma heurística de busca local, um método sequencial e um método híbrido proposto no estudo. Os resultados mostraram que apenas modelos pequenos podem ser resolvidos de forma ótima pelo MIP. A heurística de busca local apresentou resultados pouco satisfatórios em termos de encontrar a solução ótima. O método sequencial apresentou um resultado relativamente bom, próximo do ótimo e de forma rápida. O método híbrido proposto pelos autores apresentou o melhor resultado do experimento, alcançando a solução ótima em cerca de 80,5% das vezes.

No estudo (ST-HILAIRE et al., 2012), os autores apresentam um comparativo entre três metaheurísticas para o problema de planejamento de redes de telefonia móvel de terceira geração, com o objetivo de encontrar uma boa solução viável para o problema. Da mesma maneira que trabalhos anteriores, os autores dividem o problema em três partes (célula, acesso e *core*) e através das metaheurísticas Busca Tabu, Algoritmo Genético e *Simulated Annealing*, os autores comparam as soluções encontradas. As três metaheurísticas propostas apresentam boas soluções, com diferenças menores que 5% entre si. Porém, a Busca Tabu oferece a melhor solução em relação ao custo. Da mesma forma, a Busca Tabu se sobressai na busca pela solução ótima: do total de 126 problemas resolvidos, a Busca Tabu encontrou a solução ótima 57 vezes (45,2% do total) enquanto que *Simulated Annealing* alcançou a solução ótima 9 vezes e o Algoritmo

Genético apenas 2 vezes.

Em (WANG; CHUANG, 2015), os autores desenvolveram uma estratégia de quatro estágios para resolver o problema de planejamento de redes móveis de quarta geração (4G), aplicada às redes heterogêneas (HetNet). Os autores apresentam as diferenças de planejamento de redes de segunda e terceira geração em relação ao planejamento de redes 4G. O principal fator é a diferença da arquitetura da rede. Em redes 4G, é apresentado o conceito de eNodeBs e a ausência de RNCs ou BSCs na rede. Também são apresentados os conceitos de *macro-cell*, *micro-cell*, *pico-cell* e *femto-cell* e como os quatro tipos de células podem coexistir na mesma rede, porém o artigo trata apenas dos três primeiros tipos, visando o custo mínimo da rede. Os autores propõem, primeiramente, desenvolver *macro-cells* para prover cobertura a todos os usuários. Após, a estratégia proposta pelos autores verifica, em cada célula, se a potência do sinal e banda disponíveis estão adequadas e bem dimensionadas para os usuários. Caso não estejam, a célula é ajustada. Por final, *small-cells* são adicionadas para reforçar a rede em áreas com alta demanda. A estratégia proposta no artigo é dividida em quatro fases: estimar a quantidade de eNodeBs necessária, onde os autores utilizam a localização dos usuários (chamada de *propagation delay*) para calcular a quantidade mínima de *macro* e *micro cells*, para assim prover cobertura básica através do emprego de uma versão modificada do *agglomerative hierarchical clustering* (AHC); desenvolvimento preliminar de *macro-cells*, onde com o resultado adquirido na primeira fase, a segunda fase resulta em um desenvolvimento preliminar através de uma abordagem de K-mediana com pesos; a terceira fase gera uma extensão de variação dos parâmetros de ajustes de cada célula, a fim de garantir que cada célula tenha recursos suficientes para atender a demanda que lhe é solicitada. Este ajuste serve tanto para aumentar os recursos quanto para diminuir, caso seja necessário; e a última parte da estratégia diz respeito sobre adicionar *pico-cells* na rede, a fim de cobrir pequenas áreas que por ventura permaneceram sem cobertura.

Este artigo não utiliza metaheurísticas para resolver o problema, e sim módulos de simulação do MATLAB. Apesar deste fato, o trabalho proposto pelos autores tem semelhança e relação direta com o desenvolvido neste trabalho. Os conceitos de redes 4G apresentados são importantes e claros, assim como a estratégia de quatro estágios proposta, aliada à modelagem matemática apresentada, é compatível com a proposta deste trabalho. A maior diferença é a utilização de duas metaheurísticas, o Algoritmo Genético e a Busca Tabu combinadas, formando uma metaheurística híbrida e o foco no desenvolvimento de uma rede ótima utilizando apenas *macro-cells*.

Mesmo com uma vasta literatura tratando o problema de planejamento de redes móveis através de diferentes métodos, estes estudos se concentram, na sua maior parte, em planejar redes de terceira geração. Ainda há pouca literatura sobre o planejamento de redes de quarta geração (4G). Este trabalho visa ao planejamento de redes de quarta geração, dadas redes 2G e 3G existentes e a necessidade que estas coexistam na planta das operadoras.

## 4 MODELAGEM

Existe mais de um modelo de propagação para redes móveis e estes são escolhidos de acordo com a tecnologia e frequência escolhida para o LTE. A 3GPP definiu as faixas de frequências de operação para o LTE e adiciona mais faixas periodicamente. Cada país, através dos seus órgãos reguladores, no caso do Brasil a ANATEL, decide com base no seu espectro de frequências qual faixa será reservada para o LTE. Os modelos de propagação mais conhecidos são: Okumura-Hata, Ikegami-Walfisch e Ercerg (MISHRA, 2007). O modelo Okumura é um modelo empírico e foi proposto em 1968 por Okumura e, em 1980, Hata adicionou as fórmulas matemáticas para descrever o modelo de Okumura, tornando possível a análise computacional do modelo. O modelo então ficou conhecido como Okumura-Hata e é efetivo e serve para os três tipos de ambientes (rural, urbano e suburbano), porém é restrito às bandas de 150 a 1500MHz (entre outras restrições, como distância entre células e altura de antenas). O modelo Ikegami-Walfisch é aplicado somente para o ambiente urbano e também há restrições de frequência: de 800 a 2000Mhz. O terceiro modelo é dividido em três submodelos, de acordo com o ambiente a ser utilizado e é restrito às frequência de 1900 a 3500MHz (SANTOS, 2011).

O presente trabalho utiliza da mesma modelagem desenvolvida por (LEE; KANG, 2000), com algumas alterações. Enquanto que no trabalho citado são consideradas *macro-cells*, *small-cells*, *pico-cells* e *femto-cells*, o presente trabalho considera apenas *macro-cells*. *Macro-cells* são as estações rádio base como conhecemos: torre ou telhado de prédios com antenas de mais de 2 metros de altura, cuja primeira função é prover vasta cobertura. Os demais tipos são amplamente utilizados em pequenas regiões com alta demanda de tráfego e lugares em que o sinal das *macro-cells* não conseguem penetrar, como por exemplo regiões de alta densidade de fluxo de pessoas cercadas por muitos prédios muito altos. Normalmente, são colocados em postes de rua, porém, na prática, no Brasil estes tipos são pouco utilizados devido ao vandalismo, pelo custo e pela pouca praticidade para a operadora, necessitando muitas obras de infraestrutura e, conseqüentemente, não justificando o investimento.

Como neste trabalho é estudado o apenas o problema da cobertura da rede LTE, apenas o primeiro tipo é considerado (*macro-cells*). Assim, da mesma forma, apenas uma parte da modelagem utilizada em (LEE; KANG, 2000) é adaptada ao presente trabalho.

### 4.1 Modelo de propagação do LTE

Quando o LTE foi definido em meados dos anos 2000, também foi desenvolvido um novo modelo matemático (LTE, 2013; LEE; KANG, 2000) que abrange todas as frequências disponíveis para o LTE (a ITU definiu 44 faixas de frequência para uso do LTE). No Brasil, inicialmente, foram leiloadas as faixas de frequência de 450 MHz e 2600 MHz. Não houve interesse por parte das operadoras na faixa dos 450 MHz e, portanto, apenas a banda de 2.600 MHz ficou destinada ao LTE. Mais recentemente, prevendo uma futura necessidade de expansão da banda

do 4G no Brasil, a ANATEL pôs em leilão a faixa dos 700 MHz para a ampliação do LTE, esta sendo de interesse das operadoras.

O modelo de propagação do LTE foi padronizado pela ITU-T na norma ITU-R P.1546-4 (LTE, 2013). A norma abrange uma série de recomendações para o planejamento de redes de quarta geração, atendendo às frequências de 30MHz a 3000MHz e distâncias de 1 km a 1.000 km. Porém, no Release 9 do padrão LTE (LTE, 2013), o modelo de propagação é dado por (4.1):

$$L = 40 \times (1 - 4 \times 10^{-3} \times D_{hb}) \times \log_{10} R - 18 \times \log_{10} D_{hb} + 21 \times \log_{10} f + 80dB \quad (4.1)$$

onde:

$L$  é a perda máxima, calculada previamente na equação 2.1 ;

$R$  é a distância entre a eNodeB e o usuário mais distante [km];

$D_{hb}$  é a altura da antena, acima da altura média dos prédios [m];

$f$  é a frequência do LTE [MHz].

O modelo de propagação servirá para calcular o raio teórico das células LTE, ou seja, o alcance do sinal de cada célula e, assim, estimar a cobertura. Dessa forma, com os valores de *link budget* de *downlink* e *uplink*, desenvolvidos nas equações (2.3) e (2.5), e os dados de altura da antena e frequência utilizados são reunidos na Tabela 3:

**Tabela 3:** Dados para cálculo do raio teórico

Parâmetro	Valor
<i>Link budget downlink</i>	151 dB
<i>Link budget uplink</i>	138,5 dB
Altura das antenas	15 m
Frequência	2.600 MHz

Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, aplicando os valores dos parâmetros da Tabela 3 na equação (4.1), tem-se:

$$138,5 = 40 \times [1 - (4 \times 10^{-3} \times 15)] \times \log_{10} R - 18 \times \log_{10} 15 + 21 \times \log_{10} 2.600 + 80dB \quad (4.2)$$

$$138,5 = 39,2 \times \log_{10} R - 18 \times \log_{10} 15 + 21 \times \log_{10} 2.600 + 80dB \quad (4.3)$$

$$138,5 = 39,2 \times \log_{10} R + 130,55 \quad (4.4)$$

$$R \cong 1,6km \quad (4.5)$$



Com o valor do raio teórico de propagação do LTE definido, pode-se desenvolver o modelo matemático para a cobertura de uma região.

#### 4.1.1 Modelagem para a Definição de eNodeBs

Seja  $S$  o conjunto de possíveis localidades onde já existam redes 2G e 3G operacionais em uma região de área  $A_{total}$ , onde se deseja desenvolver a nova rede 4G.

O problema consiste no desenvolvimento inicial da rede 4G, ou seja, escolher o número mínimo de localidades para introduzir a rede 4G, considerando que, inicialmente, a demanda por tráfego 4G é baixa e sofrerá aumento ao longo do tempo. Considera-se  $e_i$  como a variável de escolha de seleção dos *sites* escolhidos para receber a tecnologia 4G:

$$e_i = \begin{cases} 1; & \text{caso a localidade } i \text{ seja selecionada para receber a tecnologia LTE;} \\ 0; & \text{caso contrário} \end{cases}$$

considerando  $\forall i \in S$ .

Então, a função objetivo do problema de planejamento da rede é dada por:

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in S} e_i, \quad (4.6)$$

sujeito à:

$$\frac{3}{2}R \leq D_{ij} \leq \frac{9}{2}R, \text{ para } i, j \in S \quad (4.7)$$

$$A_{cob} \geq 0,9 \times A_{total}, \quad (4.8)$$

e, ainda:

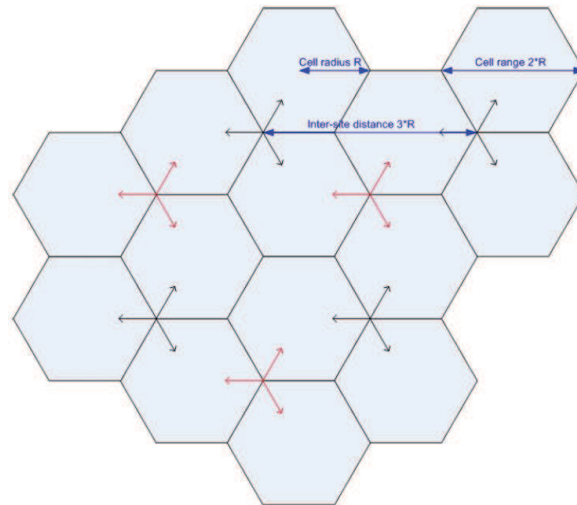
$$A_{total} \geq 0, \quad (4.9)$$

$$\forall i \in S, \forall j \in S. \quad (4.10)$$

Para o problema deste trabalho, a equação objetivo (4.6) é minimizar a quantidade de eNodeBs selecionadas, provendo cobertura mínima de 90% da área.

O raio teórico calculado na equação (4.5) indica o raio teórico de propagação de uma eNodeB e serve para determinar a restrição de distância mínima e máxima entre duas eNodeBs  $i$  e  $j$ , descrita na equação (4.7) e representada por  $D_{ij}$  visando continuidade de cobertura. A recomendação para distância entre duas eNodeBs é  $3R$  (LTE, 2013). Porém, em redes que não

**Figura 18:** Rede não simétrica e o raio teórico.



Fonte: (LTE, 2013)

tem sua geometria simétrica, ajustes podem ser feitos. A figura 18 exemplifica.

A restrição descrita na equação (4.8) indica a cobertura mínima que a rede deve oferecer, representada por  $A_{cob}$ . A cobertura mínima não deve ser menor que 90% da área total estudada, representada por  $A_{total}$ .

A área da região a ser estudada deve ser diferente de zero e todas as localidades  $i$  e  $j$  a serem consideradas devem existir em  $S$ , onde  $S$  é o conjunto de todas as localidades onde já existem redes de segunda e terceira gerações operacionais e aptas para a inserção da rede 4G.

A implementação deste trabalho foi feita em linguagem python, em uma máquina com processador Intel core i5, utilizando as metaheurísticas Algoritmo Genético e Busca Tabu, gerando um algoritmo híbrido, para encontrar uma solução adequada para o problema proposto.

A linguagem python foi escolhida por dois motivos: a facilidade de implementação e a escassa existência de trabalhos utilizando a linguagem python para problemas semelhantes e relacionados. Dessa forma, pode-se enriquecer o assunto com mais uma linguagem sendo testada para este conhecido problema.

## 4.2 Arquitetura Computacional Modular

Para o problema apresentado, serão geradas três regiões de tamanhos diferentes: a primeira de  $25 \times 25$ , a segunda  $50 \times 50$  e a terceira  $100 \times 100$  unidades de área, cada uma delas dividida em  $1 \times 1$  unidades de área.

As NodeBs existentes serão tratadas como lista inicial, ou solução inicial  $s$ . Desta forma, seleciona-se, de forma aleatória, um determinado número de *sites* ou localidades candidatas a receberem a nova tecnologia. Cada localidade do site é codificada conforme sua posição na área. Como a região será dividida em pequenas unidades de área quadradas, cada pequena região recebe uma numeração conforme exemplo da figura 19.

O Algoritmo Genético utiliza os sites selecionados como população inicial, analisando a

**Região 1 - 50x50 unidades de área**

	1	2	3	4	5	6	...	48	49	50
1	11									
2			23							
3									399	
4								498		
5				54	55					
6								648	649	
...										
48					485	486				
49								4948		4950
50									5049	

Fonte: Elaborado pela autora

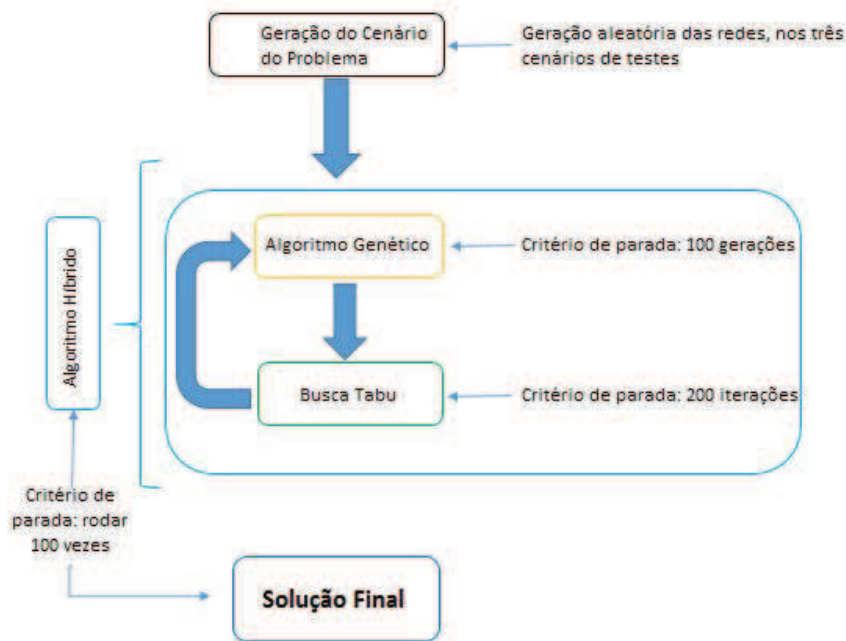
cobertura de cada *site*. Cada *site* da solução é avaliado, pela sua distância dos outros *sites* candidatos, pela cobertura da área oferecida pela solução e pela quantidade de *sites* selecionados. Inicialmente, todos os *sites* são soluções possíveis, visto que todos são existentes. Após, são aplicados os operadores genéticos, gerando uma nova população de *sites* candidatos. O algoritmo avalia a solução encontrada, comparando com a solução anterior pelos mesmos parâmetros. Caso sirva como solução para o problema, atendendo a cobertura mínima requerida, o programa para e apresenta o resultado encontrado. Caso não seja suficiente, o algoritmo prossegue até que seja encontrada uma solução que seja adequada ao problema, ou atinja o máximo de 100 gerações. Pode ocorrer de, ao atingir 100 gerações, o algoritmo não tenha encontrado uma solução adequada. Porém, visando manter experimentos semelhantes aos realizados em trabalhos relacionados, utiliza-se 100 gerações como limite.

Após, a solução encontrada pelo Algoritmo Genético serve como solução inicial para a Busca Tabu, onde o modelo matemático avalia novamente a propagação medindo o alcance e a cobertura de cada *site*. Caso haja dois *sites* selecionados cobrindo a mesma região ou com cobertura forte se sobrepondo, um deles é selecionado como parte da solução e o outro movido para a lista tabu.

Caso o algoritmo não consiga melhorar a solução por 10 iterações e ainda não tenha atingido 90% da cobertura da região, utiliza-se a técnica da diversificação, deslocando a busca para uma região que ainda não faça parte da solução ou que não possua cobertura. Após, é montada uma lista com as possíveis soluções. Essa lista deve consistir em um número mínimo de NodeBs encontradas pelo algoritmo para cobrir 90% da região estudada.

A solução encontrada retorna ao Algoritmo Genético, fazendo-a novamente passar pelo mesmo processo por 100 vezes, compondo o Algoritmo Híbrido.

A figura 20 ilustra o modelo computacional explicado neste capítulo.

**Figura 20:** Arquitetura do Modelo Computacional

Fonte: Elaborado pela autora

### 4.3 Algoritmo Genético

O módulo do Algoritmo Genético é o primeiro a ser executado e seu funcionamento para este trabalho é conforme descrito nas seções seguintes.

#### 4.3.1 Geração da Rede e População Inicial

A população inicial do algoritmo é gerada de maneira aleatória. Ela representa a rede existente, com tecnologias anteriores ao 4G que podem ser utilizadas para implantação da nova tecnologia. Ela é gerada em forma de matriz, de acordo com o tamanho da rede. Uma rede com região de  $25 \times 25$  unidades é gerada através de uma matriz de  $25 \times 25$ .

Essa matriz é preenchida aleatoriamente com 1 e 0, limitada pelo número de pontos do problema, ou seja, 100, 500 e 1000 pontos. Onde existir 1 na matriz, entende-se que naquele ponto há um *site*. Onde houver 0 entende-se que não há nenhum *site* naquele ponto.

Para o algoritmo genético iniciar, esses pontos são codificados como números, juntando o índice da linha com o índice da coluna de cada ponto. Esse conjunto de 100, 500 e 1000 pontos gerados e codificados são utilizados pelo Algoritmo Genético como população inicial.

### 4.3.2 Avaliação da População

Com a população inicial gerada, o algoritmo avalia cada indivíduo e ranqueia conforme a função de *fitness* de cada indivíduo. Os indivíduos são avaliados de acordo com a proximidade de outros pontos, ou seja, a proximidade com outros *sites*. Conforme calculado na equação (4.5), a distância aproximada entre dois *sites* deve ser 1,6km e, pela modelagem deste trabalho descrita na equação (4.7) utiliza-se a distância entre dois *sites* variável. Dessa forma, um *site* que possua outros *sites* próximos terá um valor de *fitness* mais baixo que pontos (ou *sites*) sem outros na proximidade (distância entre dois *sites*, descritas na equação (4.7)).

### 4.3.3 Operadores Genéticos

Como operador de cruzamento, este trabalho utiliza o cruzamento por um ponto, cujo funcionamento está descrito na seção 2.4.2.3. Já para a mutação, é utilizada aleatoriamente com uma taxa de 10%. O funcionamento deste operador também é descrito na seção 2.4.2.3

### 4.3.4 Critério de Parada

O critério de parada deste trabalho para o Algoritmo Genético é de 100 gerações. Quando atingidas 100 gerações, o algoritmo para e entrega a solução encontrada como entrada para a Busca Tabu.

## 4.4 Busca Tabu

Conforme o que já foi discutido sobre a Busca Tabu na seção 2.4.1, o módulo implementado tem um funcionamento e estrutura semelhante ao da figura 15.

O algoritmo inicia com a solução dada pelo Algoritmo Genético e inicializam-se as demais variáveis de controle. O critério de parada verifica se a quantidade de iterações chegou ao limite estipulado no experimento, no caso deste trabalho 200 iterações. O critério de intensificação verifica a quantidade de iterações realizadas sem apresentar melhoria da solução. Neste caso, gera-se nova vizinhança para gerar novas soluções. Caso a quantidade de iterações sem melhora não atinga o critério de 10 iterações sem melhoria da solução, utiliza-se vizinhança intensificada, visando a aprimorar a solução, respeitando a Lista Tabu e o Critério de Aspiração.

### 4.4.1 Solução Inicial

Conforme já mencionado, a solução inicial da Busca Tabu é dada pela solução do Algoritmo Genético em formato numérico, onde cada número equivale a uma posição no mapa representado por uma matriz. Para exemplificar, o número "12" representa a linha 1 e coluna 2 da matriz.

Cada posição dentro da matriz representa um ponto do mapa onde há um *site* 2G ou 3G e será utilizado para implantar a nova rede 4G.

#### 4.4.2 Estrutura de Vizinhança

A geração de vizinhança consiste em utilizar a técnica de *swap*, que consiste na troca de posições de dois pontos existentes no mapa (representado em forma de matriz), sendo um deles selecionado na solução e o segundo ponto não selecionado, porém próximo do primeiro ponto, visando não perder a cobertura da região.

O *swap* só pode ser realizado entre pontos próximos, no máximo, de 3R. Assim, o algoritmo busca um ponto próximo para fazer o *swap*. Caso encontre mais de um ponto possível para o *swap*, o algoritmo escolhe aleatoriamente um dos pontos.

#### 4.4.3 Lista Tabu

A Lista Tabu é um recurso da Busca Tabu que guarda os movimentos proibidos do algoritmo. Neste trabalho, a Lista Tabu é aplicada de forma que, quando ocorre um *swap* o ponto selecionado que foi trocado com outro é colocado na Lista Tabu, para que nenhum outro *swap* o coloque de volta na solução.

O Tamanho da Lista Tabu é variado de acordo com o tamanho de cada cenário de teste.

#### 4.4.4 Intensificação

A Intensificação tem o objetivo de direcionar o algoritmo em soluções promissoras. Para este trabalho, foi utilizada uma lista com as 10 melhores soluções encontradas, sendo estas exploradas pelo algoritmo quando o limite de 10 iterações sem melhoria for atingido.

Visa-se intensificar a busca, gerando mais vizinhos a partir de uma solução classificada como promissora. A técnica é aplicada realizando trocas dois-a-dois de todos os pontos selecionados e um ponto não selecionado em uma área pequena de no máximo 3R.

#### 4.4.5 Critério de Parada

O Critério de Parada utilizado neste trabalho é o número máximo de iterações, estipulado em 200 iterações.

### 4.5 Algoritmo Híbrido

Conforme mencionado e apresentado na figura 20, o Algoritmo Híbrido roda 100 vezes. Ele inicia chamando o Algoritmo Genético, o qual roda até alcançar 100 gerações. A solução

encontrada por ele é usada como solução inicial da Busca Tabu. A Busca Tabu roda, então, até alcançar a marca de 200 iterações. Então o algoritmo híbrido reusa a solução apresentada pela Busca Tabu como solução inicial do Algoritmo Genético e assim sucessivamente. O Algoritmo Híbrido faz este *loop* 100 vezes e então apresenta o resultado final do problema.





## 5 VALIDAÇÃO DO MODELOS

Foram realizados testes para validação do modelo a fim de garantir que o modelo esteja adequado e coerente. Foram analisados os resultados dos testes comparando com os dados de entrada do modelo, analisando as variáveis críticas de decisão, tais como quantidade de eNodeBs e alcance da cobertura de cada eNodeB, verificando se o comportamento do modelo está de acordo com o que prevê a literatura.

Para fins de validar o modelo, foram rodadas 30 execuções considerando redes pequenas, de 10, 20 e 30 pontos (10 execuções para cada instância). Foram analisadas as respostas de cada algoritmo (Algoritmo Genético e Busca Tabu) separadamente. Dessa forma, foram realizadas um total de 90 execuções para validação. A validação dos resultados encontrados pelos algoritmos foi feita através de comparação com os resultados encontrados em (WANG; CHUANG, 2015).

Já para o experimento, foram geradas três regiões de tamanhos diferentes, simulando a região que se desejam implantar a nova tecnologia: a primeira de 25x25, a segunda 50x50 e a terceira 100x100 unidades de área, cada uma delas divididas em 1x1 unidades de área. Assim, foram gerados, 100 pontos na primeira região, 500 pontos na segunda e 1000 pontos na terceira região aleatoriamente, representando as localidades dos *sites* existentes e candidatos à nova rede.

Para os experimentos, adotou-se na Busca Tabu nbmax de 500 e Lista Tabu de 15. O Algoritmo Genético utiliza elitismo e taxa de cruzamento de 90% e mutação de 10%. O Algoritmo Híbrido utiliza taxas um pouco mais agressivas, Lista Tabu de 10, taxa de cruzamento de 95% e mutação de 40%.

**Tabela 4:** Média dos valores obtidos para uma rede com 100 pontos e área 25x25 u.a.

<b>Algoritmo</b>	<b>FO</b>	<b>% Cobertura</b>	<b>Desvio padrão</b>
Algoritmo Genético	106	94%	7,57
Busca Tabu	92	91%	7,18
Algoritmo Híbrido	81	92%	6,99

Fonte: Elaborada pela autora.

observa-se que o Algoritmo Híbrido obteve os melhores resultados durante os testes. Na realidade, nenhum dos três algoritmos apresentou resultados ruins. Todos resultados estão coerentes e compatíveis com os trabalhos relacionados. Também estão compatíveis com as características dos algoritmos, onde a Busca Tabu por ser algoritmo baseado em um processo de busca local, tende a explorar mais uma determinada região do espaço de soluções. O Algoritmo Genético tende a focar suas buscas conforme a evolução da população. Já o Algoritmo Híbrido tende a mesclar as características de ambos algoritmos, encontrando, normalmente, soluções mais eficientes.

Para o segundo problema, com uma rede maior e com mais pontos, a Tabela 5 apresenta os

resultados alcançados durante os experimentos

**Tabela 5:** Média dos valores obtidos para uma rede com 500 pontos e área 50x50 u.a.

<b>Algoritmo</b>	<b>FO</b>	<b>% Cobertura</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Algoritmo Genético	480	94%	8,43
Busca Tabu	461	91%	8,49
Algoritmo Híbrido	452	90%	8,18

Fonte: Elaborada pela autora.

Novamente, o Algoritmo Híbrido apresentou melhores resultados. A quantidade de pontos, ou seja, o tamanho da rede dificultou a busca por resultados de qualidade superior. Por se tratar de uma rede com maior região geográfica e mais pontos distribuídos, a configuração do problema se mostrou um pouco mais complicada que o primeiro problema.

Para o terceiro problema, rede com 1000 pontos em uma região de 100x100 unidades de área, foram obtidos os resultados conforme a Tabela 6.

**Tabela 6:** Média dos valores obtidos para uma rede com 1000 pontos e área 100x100 u.a.

<b>Algoritmo</b>	<b>FO</b>	<b>% Cobertura</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Algoritmo Genético	952	91%	27,84
Busca Tabu	951	92%	28,13
Algoritmo Híbrido	933	91%	27,99

Fonte: Elaborada pela autora.

Novamente, os melhores resultados foram alcançados pelo Algoritmo Híbrido. Porém pode-se salientar que a diferença entre as soluções apresentadas pelos três algoritmos diminuiu consideravelmente. Isso se deve pelo fato de terceiro problema ser maior e mais complicado que os anteriores e a tendência de serem obtidas soluções de qualidade mais próximas mesmo com algoritmos diferentes.

A intenção foi testar os algoritmos para identificar a quantidade de *sites* 4G necessária em uma determinada região para prover a maior cobertura possível, e avaliar qual algoritmo apresentava melhores soluções. Nos três casos, o Algoritmo Híbrido apresentou melhores resultados, porém, conforme o problema ficou mais complexo, os resultados obtidos pelos algoritmos foram mais próximos, garantindo a eficácia dos mesmo.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os experimentos realizados envolvendo a Busca Tabu, Algoritmo Genético e Algoritmo Híbrido. Busca-se, além de apresentar os resultados, analisar os processos dos algoritmos.

Para realizar os experimentos, foi utilizado método semelhante ao estudado em (WANG; CHUANG, 2015) comparando os resultados obtidos em ambos trabalhos.

O algoritmo foi rodado 50 vezes para cada tamanho de rede, conforme proposto. Foram geradas três regiões de tamanhos diferentes: a primeira de 25x25, a segunda 50x50 e a terceira 100x100 unidades de área, cada uma delas divididas em 1x1 unidades de área. Para cada tamanho de rede, foram gerados aleatoriamente: 100 pontos na primeira região, 500 pontos na segunda e 1000 pontos na terceira região, cada ponto representando uma localidade de *site* existente e candidato à nova rede.

Para o Algoritmo Genético será apresentada a análise da taxa de mutação e cruzamento. Para a Busca Tabu será apresentada a análise de resultados de diferentes tamanhos de Lista Tabu e para o Algoritmo Híbrido os impactos nos resultados por conta da variação dos parâmetros do Algoritmo Genético e Busca Tabu.

### 6.0.1 Algoritmo Genético

Esta etapa busca estudar o impacto da taxa de cruzamento e da mutação nos resultados dos três cenários propostos. O tamanho da população inicial varia de acordo com o cenário de teste. Para o primeiro cenário a população inicial é de 100 indivíduos. No segundo cenário 500 indivíduos e no terceiro cenário 1000 indivíduos. As Tabelas 7 e 8 mostram os valores utilizados para Taxa de Cruzamento e Mutação.

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram os resultados médios obtidos nos experimentos para cada cenário, com cada Taxa de Mutação e Cruzamento utilizados. As Taxas de Mutação estão representadas nas linhas enquanto que as Taxas de Cruzamento estão representadas nas colunas e as células mostram os resultados obtidos (número mínimo de pontos selecionados para a nova tecnologia de rede).

Dados os resultados obtidos, percebe-se que, nos três casos, de forma geral, conforme as

**Tabela 7: Taxa de Cruzamento**  
**Taxa de Cruzamento**

10
25
50
75
90

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 8:** Taxa de Mutação

<b>Taxa de Mutação</b>
5
10
15

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 9:** Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 1: 100 pontos

<b>Taxa de Mutação</b>	<b>Taxa de Cruzamento</b>				
	10	25	50	75	90
5	115	109	108	103	102
10	110	109	109	101	99
15	106	105	102	98	98

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 10:** Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 2: 500 pontos

<b>Taxa de Mutação</b>	<b>Taxa de Cruzamento</b>				
	10	25	50	75	90
5	506	498	499	490	488
10	490	489	480	474	472
15	488	481	477	470	467

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 11:** Resultados do Algoritmo Genético no Cenário 3: 1000 pontos

<b>Taxa de Mutação</b>	<b>Taxa de Cruzamento</b>				
	10	25	50	75	90
5	985	952	943	935	930
10	951	941	930	922	917
15	977	951	915	933	911

Fonte: Elaborada pela autora.

Taxas de Mutação e Cruzamento aumentam os resultados melhoram. Percebe-se também que no primeiro cenário, com menos pontos, os resultados não apresentam grande variação, enquanto que, no segundo e terceiro cenários essas diferenças tendem a aumentar, destacando os resultados obtidos com maiores taxas de Mutação e Cruzamento.

## 6.0.2 Busca Tabu

A segunda etapa dos experimentos foi dedicada à análise do impacto do tamanho da Lista Tabu nos resultados, para cada um dos três cenários de teste. A Tabela 12 apresenta os valores de Lista Tabu utilizados.

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados obtidos com os tamanhos de Lista Tabu propostos na Tabela 12 para cada cenário de teste. Os resultados significam o número mínimo

**Tabela 12:** Tamanhos da Lista Tabu  
**Lista Tabu**

---

20  
40  
60  
80  
100

---

Fonte: Elaborada pela autora.

de pontos encontrados para implantar a nova rede de telefonia móvel.

**Tabela 13:** Resultados da Busca Tabu no cenário 1: 100 pontos

<b>Tamanho da Lista Tabu</b>	<b>Resultado encontrado</b>
20	96
40	95
60	91
80	91
100	88

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 14:** Resultados da Busca Tabu no cenário 2: 500 pontos

<b>Tamanho da Lista Tabu</b>	<b>Resultado encontrado</b>
20	482
40	477
60	471
80	470
100	466

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 15:** Resultados da Busca Tabu no cenário 3: 1000 pontos

<b>Tamanho da Lista Tabu</b>	<b>Resultado encontrado</b>
20	914
40	905
60	881
80	875
100	877

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que, nos dois primeiros cenários, com a Lista Tabu maior, os resultados encontrados foram melhores. Já no terceiro cenário, os resultados do experimento com Lista Tabu de tamanho 80 foram melhores que os resultados obtidos com Lista Tabu de tamanho 100.

### 6.0.3 Algoritmo Híbrido

Para os experimentos do Algoritmo Híbrido, as técnicas Algoritmo Genético e Busca Tabu foram executados em conjunto. Para estes experimentos, os Algoritmos Genético e Busca Tabu foram parametrizados de acordo com os melhores resultados encontrados quando rodados separadamente. A Tabela 16 apresenta os parâmetros utilizados.

**Tabela 16:** Configuração do Algoritmo Genético e Busca Tabu para o Algoritmo Híbrido

<b>Busca Tabu</b>	<b>Algoritmo Genético</b>	
Tamanho da Lista Tabu	Taxa de Cruzamento	Taxa de Mutação
100	90	15

Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, a Tabela 17 apresenta o melhor, pior e resultado médio de cada cenário de experimento do Algoritmo Híbrido. Para os experimentos, os algoritmos não foram rodados separadamente, apenas na sua forma completa (híbrida).

**Tabela 17:** Resultados obtidos

<b>Tamanho da rede</b>	<b>Resultado</b>	<b>FO</b>	<b>% Cobertura</b>	<b>Desvio Padrão</b>
100 pontos	Melhor	86	90%	
100 pontos	Pior	116	92%	9,08
100 pontos	Médio	95	93%	
500 pontos	Melhor	452	81%	
500 pontos	Pior	498	96%	36,18
500 pontos	Médio	473	89%	
1000 pontos	Melhor	853	80%	
1000 pontos	Pior	977	90%	88,06
1000 pontos	Médio	902	91%	

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme os resultados obtidos apresentados, nota-se uma piora na solução conforme aumenta-se a rede. Em grande parte dos casos (58% do total de resultados obtidos), o algoritmo não foi capaz de encontrar uma solução que atendesse a restrição de 90% de cobertura da rede, sendo terminado pelo critério de parada estabelecido.

Para o Algoritmo Genético, foi estabelecido 100 gerações. Para a Busca Tabu também foram estabelecidas 200 iterações. Já para o Algoritmo Híbrido foram estabelecidas 100 execuções para finalizar cada teste.

A análise dos dados é feita com base na função objetivo, que exigia a menor quantidade possível de pontos. Porém, nem sempre a cobertura desejada foi alcançada, dessa forma observa-se que mesmo os melhores resultados alcançados, para redes de 500 e 1000 pontos, a cobertura mínima não foi atingida. Apenas quando o número de pontos selecionados na solução é aumentado que a cobertura mínima é satisfeita.

No caso das redes pequenas (100 pontos), 94% dos resultados obtidos atingiram a cobertura mínima estabelecida. Já para as redes médias (500 pontos) apenas 65% dos resultados foram satisfatórios em questão da premissa de cobertura. Para redes maiores (1000 pontos) 31% dos resultados atingiram a premissa de cobertura.

Os tempos de processamento tiveram variações significativas. Como o algoritmo foi desenvolvido em python, sabe-se que, por se tratar de uma linguagem de interpretada, o tempo de processamento é maior que outras linguagens como C e C++.

Já nos experimentos do algoritmo híbrido, os tempos foram maiores. Para redes pequenas (100 pontos), o tempo de processamento variou entre 10 e 20 minutos. No segundo cenário, com 500 pontos, o tempo de processamento ficou em torno de 30 minutos, enquanto que, para redes maiores (1000 pontos), o tempo de processamento chegou a ultrapassar 1h 30 min.





## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma dissertação, tendo como objetivo planejar uma rede de quarta geração de telefonia móvel, através de uma metaheurística híbrida. Dado o crescimento da demanda de serviços móveis, se faz necessária a evolução das tecnologias móveis, visando atender às demandas crescentes. Cada geração de tecnologias se desenvolveu de tal maneira a suprir necessidades e demandas dos seus usuários: inicialmente apenas voz, e ao longo do tempo, dados. Esta última crescendo a cada ano.

Sabe-se que a quarta geração de comunicações móveis apresenta uma arquitetura inovadora e diferente das arquiteturas de rede previamente conhecidas: redes totalmente IP. O 4G também apresenta evoluções em relação ao 2G e 3G, tais como o conceito de eNodeB, a não existência de uma RNC e BSC atuando como concentradores, a modulação e o SON (*Self-Organizing Network*), visando à manutenção inteligente da rede.

Diante das inovações apresentadas nesta quarta geração, é natural que o planejamento da rede também sofra mudanças. A primeira delas é justamente a ausência dos concentradores RNC e BSC que existiam previamente. Dadas as mudanças e inovações na arquitetura da rede, nos protocolos, na modulação e nas interfaces, o planejamento da cobertura e da capacidade é analisado de forma diferente, utilizando os dados da rede legada como ponto de início. Também é importante lembrar que mesmo que o 4G seja totalmente diferente, ele ainda precisa, de forma prática, da rede 3G legada para trafegar voz. Para tal planejamento, para escolher onde será iniciado o desenvolvimento de uma rede 4G, foi apresentado um modelo matemático para tal, respeitando o modelo de propagação estipulado pela própria 3GPP, buscando maximizar a cobertura inicial com o mínimo de investimento possível, ou seja, o menor número de eNodeBs possível.

Na prática, o desenvolvimento das redes de quarta geração é feito de forma empírica, através de suposições. Esta forma até funciona, mas não de forma ótima. Assim, este trabalho busca contribuir para a eficiência do planejamento das redes, reduzindo os custos de projeto e implantação, maximizando o retorno financeiro para a operadora e também melhorando a assertividade do projeto. Almeja-se que estes desafios sejam alcançados de forma mais efetiva que a utilizada hoje, utilizando metaheurística híbrida para estipular a quantidade e a localização das eNodeBs para a melhor cobertura possível. Desta forma, o planejamento da rede pode ser feito de forma mais eficiente e justificada. No capítulo dois, foram explorados conceitos básicos do padrão LTE, escolhido como tecnologia de quarta geração, a sua arquitetura da rede, salientando as diferenças das gerações anteriores para essa. Nesse capítulo, também foram estudadas as metaheurísticas Busca Tabu e Algoritmo Genético, além da apresentação do problema clássico da ciência da computação de recobrimento de conjuntos, o qual abrange o tema do presente trabalho.

O problema do planejamento de redes móveis foi amplamente estudado na literatura e, ao longo do capítulo três, foram apresentadas as pesquisas mais relevantes para o desenvolvimento

desta proposta. Artigos que exploraram o planejamento de rede desde redes de segunda geração, consideram tanto redes novas como legadas, utilizando metaheurísticas. Para resolver o problema e comparar os resultados com trabalhos similares, foi proposto um algoritmo híbrido. Também foi apresentado o modelo matemático utilizado neste trabalho para resolver o problema de planejamento. Foi utilizado o modelo de propagação proposto pela 3GPP e desenvolvido um modelo visando o mínimo de eNodBs possíveis provendo uma cobertura da rede em toda a região do cenário. Consequentemente, foi apresentada a arquitetura computacional utilizada, bem como a validação do modelo e os experimentos realizados.

Os resultados, embora não tão bons quanto de trabalhos relacionados, são importantes para enriquecer a literatura sobre o assunto, testando e apresentando resultados através de uma abordagem diferente e deixando o caminho aberto para trabalhos futuros.

Para tal, pode-se considerar o aprimoramento tanto da modelagem matemática utilizada neste trabalho como também aprimorar os testes deste trabalho, abordando e apresentando os resultados do Algoritmo Genético e Busca Tabu separadamente e, posteriormente, comparar com os resultados do Algoritmo Híbrido. Também, pode-se prever novos cenários de testes, bem como mesclar os testes aqui apresentados.

Sugere-se aprimoramento da modelagem matemática, considerando relevo, alturas de antenas diferentes, bem como características de tilt elétrico, mecânico, azimutes e características técnicas de antenas diferentes (tais como abertura vertical e ganho de antenas), dado que há mais de um fabricante na maioria das plantas das operadoras.

Também sugere-se aplicar estes mesmos testes para diferentes frequências, visto que, no Brasil, pelo menos duas operadoras já utilizam duas frequências para o 4G. Dessa forma, pode-se ampliar esta abordagem na modelagem também.

Assim, fica claro que ainda há suficiente expansão para o assunto tratado neste trabalho, bem como para cenários de testes e aplicações futuras com diferentes abordagens.

## REFERÊNCIAS

- ALFANDARI, L.; MONNOT, J. A note on the Clustered Set Covering Problem. **Discrete Applied Mathematics**, [S.l.], v. 164, n. 1, p. 13–19, 2014.
- AMALDI, E.; CAPONE, A.; MALUCELLI, F. Planning UMTS Base Station Location: optimization models with power control and algorithms. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, [S.l.], v. 2, n. 5, p. 939–952, sep 2003.
- ARANITI, G.; CAMPOLO, C.; CONDOLUCI, M.; IERA, A.; MOLINARO, A. LTE for Vehicular Networking: a survey. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], p. 148–157, may 2013.
- BEASLEY, J. An algorithm for set covering problem. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], n. 1, p. 85–93, 1987.
- BEASLEY, J.; CHU, P. A genetic algorithm for the set covering problem. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], n. 2, p. 392–404, 1996.
- BILAL, N.; GALINIER, P.; GUIBAULT, F. An iterated-tabu-search heuristic for a variant of the partial set covering problem. **Journal of Heuristics**, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 143–164, 2014.
- BOUSSAÏD, I.; LEPAGNOT, J.; SIARRY, P. A survey on optimization metaheuristics. **Information Sciences**, [S.l.], v. 237, p. 82–117, 2013.
- CAPRARA, A.; TOTH, P.; FISCHETTI, M. Algorithms for the Set Covering Problem. **Annals of Operational Research**, [S.l.], v. 98, p. 353–371, 2000.
- CHEVALLIER, C.; BRUNNER, C.; GARAVAGLIA, A.; MURRAY, K. P.; BAKER, K. R. **WCDMA (UMTS) Deployment Handbook. Planning and Optimization Aspects**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2006.
- DEHGHANI, M.; ARSHAD, K. LTE-Advanced Radio Access Enhancements: a survey. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 80, p. 891–921, 2015.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness**. twenty-first. ed. [S.l.]: W. H. Freeman, 1999.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. **Handbook of Metaheuristics**. second. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer, 2010.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of Metaheuristics**. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu Search**. Boston, MA: Kluwer Academic, 1997.
- HALONEN, T.; ROMERO, J.; MELERO, J. **GSM, GPRS, and EDGE Performance. Evolution Towards 3G/UMTS**. second. ed. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2003.
- HAMALAINEN, S.; SANNECK, H.; SARTORI, C. **LTE Self-Organizing Networks (SON): network management automation for operational efficiency**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2012.

- HIERREZUELO, J. P. G. G. A.; AAMIR, F. J. L.-m. M. Quality Assessment in 3G/4G Wireless Networks. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 76, p. 363–377, 2014.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. **WCDMA for UMTS, HSPA Evolution and LTE**. fourth. ed. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2007.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE for UMTS, Evolution to LTE-Advanced**. second. ed. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2011.
- HURLEY, S. Planning Effective Cellular Mobile Radio Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v. 51, n. 2, p. 243–253, mar 2002.
- KREHER, R.; GAENGER, K. **LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2011.
- LAIHO, J.; WACKER, A.; NOVOSAD, T. **Radio Network Planning and Optimisation for UMTS**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2006.
- LEE, C. Y.; KANG, H. G. Cell Planning with Capacity Expansion in Mobile Communications: a tabu search approach. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v. 49, n. 5, p. 1678–1691, 2000.
- LTE, E. T. S. I. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) scenarios. , [S.l.], 2013. ETSI TR 36.942 V13.0.0 Release 13.
- MABED, H.; CANALDA, P.; SPIES, F. Geometry modeling in cellular network planning. **Wireless Networks**, [S.l.], v. 20, n. 6, p. 1251–1263, 2014.
- MISHRA, A. R. **Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2007.
- MOSES, K. B. Mobile Communications Evolution. **I.J. Moderns Education and Computer Science**, [S.l.], v. 1, p. 25–33, 2014.
- NAWROCKI, M. J.; DOHLER, M.; AGHVAMI, A. H. **Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: theory and practice**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2006.
- PARK, E.; POBIL, A. P. Modeling the user acceptance of long-term evolution (LTE) services. **Annals of Telecommunications**, [S.l.], v. 68, p. 307–315, 2013.
- PENTTINEN, J. T. J. **The LTE/SAE Deployment Handbook**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2012.
- PHAM, D.; KARABOGA, D. **Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks**. Londres, Inglaterra: Springer, 2000.
- RAN, C.; WANG, S.; WANG, C. Cellular networks planning: a workload balancing perspective. **Computer Networks**, [S.l.], v. 84, p. 64–75, 2015.
- RAZA, H. A Brief Survey of Radio Access Network Backhaul Evolution: part ii. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. may, p. 170–177, 2013.

SANTOS, D. dos. **Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE**. 2011. 91 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUC, Rio de Janeiro, 2011.

ST-HILAIRE, M.; CHAMBERLAND, S.; PIERRE, S. A tabu search algorithm for the global planning problem of third generation mobile networks. **Computers and Electrical Engineering**, [S.l.], v. 34, p. 470–487, 2008.

ST-HILAIRE, M.; CHINNECK, J. W.; CHAMBERLAND, S.; PIERRE, S. Efficient solution of the 3G network planning problem. **Computers & Industrial Engineering**, [S.l.], v. 63, n. 4, p. 819–830, 2012.

ST-HILAIRE, M.; LIU, S. Comparison of different meta-heuristics to solve the global planning problem of UMTS networks. **Computer Networks**, [S.l.], v. 55, n. 12, p. 2705–2716, 2011.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics** : from design to implementation. Hoboken, N.J.: Jonh Wiley & Sons, 2009.

TIPMONGKOLSILP, O.; ZAGHLOUL, S.; JUKAN, A. The Evolution of Cellular Backhaul Technologies: current issues and future trends. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 97–113, 2011.

WANG, Y.-c.; CHUANG, C.-a. Efficient eNB deployment strategy for heterogeneous cells in 4G LTE systems. **Computer Networks**, [S.l.], v. 79, p. 297–312, 2015.

YANG, J.; AYDIN, M. E.; ZHANG, J.; MAPLE, C. UMTS base station location planning: a mathematical model and heuristic optimisation algorithms. **IET Communications**, [S.l.], v. 1, n. 5, p. 1007–1014, 2007.