

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

MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO
UTILIZANDO TÉCNICAS DE *CLUSTERIZAÇÃO* E DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL

FÁBIO DE OLIVEIRA TORRES

DM 30/2016

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

FÁBIO DE OLIVEIRA TORRES

MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO
UTILIZANDO TÉCNICAS DE *CLUSTERIZAÇÃO* E DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL

DM: 30/2016

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

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

FÁBIO DE OLIVEIRA TORRES

MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO
UTILIZANDO TÉCNICAS DE *CLUSTERIZAÇÃO* E DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL

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

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

Torres, Fábio de Oliveira, 1985-

Mitigação de interferência em redes de próxima geração utilizando técnicas de clusterização e de inteligência computacional / Fábio de Oliveira Torres.- 2016.

Orientador : Diego Lisboa Cardoso

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Inteligência computacional.3. Cluster (sistema de computador).. 4. Interferência elétrica. I. Título.

CDD 23. ed. 621.38456

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

**MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES DE PRÓXIMA GERAÇÃO
UTILIZANDO TÉCNICAS DE *CLUSTERIZAÇÃO* E DE INTELIGÊNCIA
COMPUTACIONAL**

AUTOR: FÁBIO DE OLIVEIRA TORRES

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

APROVADA EM:

Professor Dr. Diego Lisboa Cardoso - UFPA
ORIENTADOR

Professor Dr. Marcelino Silva da Silva
MEMBRO INTERNO – FCT/UFPA

Professor Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior
MEMBRO EXTERNO – CCAST/UFPA

Visto:

Professor Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes - UFPA
COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me proporcionado esta oportunidade e me concedido forças para iniciar e finalizar esta etapa tão importante em minha vida acadêmica e profissional.

A minha esposa Mara Priscila por ter aceitado este desafio juntamente comigo, pois não foram poucas as noites que passei aos estudos sem poder estar ao seu lado lhe proporcionando acalantos e ter dedicado tempo a mais para cuidar de nosso filho enquanto eu realizava simulações, colhia dados e criava gráficos.

Ao meu filho Luis Fernando por todas as vezes que estava brincando com ele e o mesmo dizia-me “Vai estudar papai!”. Isto porque ele não veio ao mundo para ser empecilho, mas sim, para ser benção em minha vida. Te amo filho.

Aos meus pais José Milton e Joana D’arc por me apoiarem nos momentos mais difíceis de minha vida e me incentivarem a chegar mais longe do que eu sempre imaginei que poderia chegar.

Ao meu eterno amigo e orientador professor Dr. Diego Lisboa Cardoso por ter acreditado que eu poderia fazer um trabalho de qualidade a partir de suas indicações, por sempre, mesmo em seu período de pós doutorado, responder às minhas dúvidas sem demorar mais que 5 minutos e até mesmo ter me auxiliado em expensas, das quais eu não tinha condições, para que eu cumprisse atividades diante de requisitos obrigatórios para a minha formação.

Sou grato ao Sr. Luiz Felipe Coelho e Silva, por compartilhar seus conhecimentos sobre algoritmos genéticos e informações de suas pesquisas comigo, onde estas atitudes, transformaram esta dissertação, que era algo abstrato, em realidade.

Ao meu líder de equipe Hugo Pereira Kuribayashi, então Diretor do Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação da Unifesspa, que também acreditou no meu trabalho e perfil profissional e me concedeu as dispensas, dentro da legalidade, necessárias para cursar as disciplinas obrigatórias para a minha formação.

Aos queridos professores do Dinter/Minter, cursos realizados na Unifesspa durante os anos de 2015 e 2016, os quais dispenderam horas de dedicação para nos ensinar a como buscar a excelência em pesquisas voltadas para resoluções de problemas reais da sociedade ao qual fazemos parte.

Agradeço imensamente o auxílio e a paciência que os Sr. Edinaldo João Costa de La-Roque teve comigo nos momentos em que eu precisei entender algumas funcionalidades básicas do simulador discreto, o qual foi usado nesta pesquisa, e de outras informações sobre como estruturar artigos científicos.

Não poderia esquecer do meu colega de trabalho Fernando Alves Miranda, que passou semanas me auxiliando com a depuração de códigos de uma aplicação depois do seu período de expediente junto ao CTIC da Unifesspa, até mesmo em finais de semana.

Aos meus colegas da turma Dinter/Minter 2015/2016 por terem me auxiliado com suas explicações sobre as disciplinas as quais tinha dificuldade em dominar os conceitos.

“Se consegui ver mais longe é porque estava aos ombros de gigantes”
Isaac Newton

SUMÁRIO

SUMÁRIO	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVI
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	21
1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	22
1.2. PROPOSTA.....	23
1.3. OBJETIVOS.....	23
1.3.1. Objetivo Geral	23
1.3.2. Objetivos específicos	24
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	25
CAPÍTULO 2 – <i>SMALL CELLS</i>	26
2.1. TIPOS DE <i>SMALL CELLS</i>	28
2.2. INTERFERÊNCIA ENTRE <i>SMALL CELLS</i>	29
2.3. TIPOS DE INTERFERÊNCIAS	31
2.4. REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIAS EM AMBIENTES 4G E 5G.....	33
2.5. AS REDES DE TELEFONIA MÓVEL.....	35
2.6. QUARTA GERAÇÃO - 4G	36
2.7. LONG TERM EVOLUTION (LTE).....	37
2.8. A QUINTA GERAÇÃO (5G)	42

CAPÍTULO 3 – INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	45
3.1. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS.....	47
3.2. ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs) – DEFINIÇÃO	49
3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AGs E SEUS ELEMENTOS	49
3.4. APLICAÇÕES	52
CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	55
4.1. ABORDAGEM SISTEMÁTICA DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	56
4.2.1. Modelagem	58
4.2.2. Modelagem Analítica	58
4.2.3. Simulação	59
4.2.4. Simulação de Monte Carlo	60
4.2.5. Simulação baseada em <i>traces</i>	60
4.2.6. Simulação baseada em eventos discretos	61
4.2.7. Aferição	61
CAPÍTULO 5 – TRABALHOS CORRELATOS.....	63
5.1. INOVAÇÃO DESTE TRABALHO.....	68
CAPÍTULO 6 – DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO	70
6.1. MODELAGEM DO PROBLEMA.....	70
6.2. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO	76
6.2.1. Composição dos cenários de simulação	78
6.3. SIMULADORES DE REDES.....	83
6.4. CENÁRIO CRIADO NO OPNET	83
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS.....	88
7.1. UTILIZANDO O MATLAB.....	88

7.1.1.	Cenário fixo	88
7.2.	UTILIZANDO O OPNET	91
7.2.1.	Resultados globais – Média do atraso	91
7.2.2.	Resultados globais – Média da vazão.....	92
7.2.3.	Resultados individuais.....	94
7.2.3.1.	<i>File Sharing</i> (compartilhamento de arquivo) – Cenário Fixo	94
7.2.3.2.	<i>File Sharing</i> – Cenário Aleatório	96
7.2.3.3.	Web Browsing - Cenário fixo.....	98
7.2.3.4.	Web Browsing – Cenário Aleatório	100
7.2.3.5.	Video – Cenário Fixo	101
7.2.3.6.	Video – Cenário Aleatório.....	103
7.2.4.	Desempenho do módulo de bateria	105
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES		108
8.1.	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	109
8.2.	DIFICULDADES ENCONTRADAS	110
8.3.	TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS		113
ANEXO A.....		121

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cobertura Celulares	32
Figura 2: Arquitetura completa do LTE.....	39
Figura 3: Comparação FDM com OFDM.....	40
Figura 4: MIMO usando múltiplos caminhos para impulsionar vazão e capacidade.....	41
Figura 5: Características do 5G.....	44
Figura 6: Esquema de trabalho de um Algoritmo Genético.....	48
Figura 7: Representação do método roleta.....	51
Figura 8: Cenário sem clusterização	71
Figura 9: Sequência do modelo proposto.....	71
Figura 10: Indivíduo ou possível solução	74
Figura 11: Pseudocódigo do algoritmo genético.....	75
Figura 12: 60 Small Cells dispostas a) de 10 x 10 e b) aleatoriamente.....	77
Figura 13: Exemplo de indivíduo ou possível solução com 60 <i>Small Cells</i>	78
Figura 14: Cenário fixo com as 60 <i>Small Cells</i>	86
Figura 15: Cenário aleatório com as 60 <i>Small Cells</i>	86
Figura 16: Cenário Fixo – SINR antes e depois da <i>clusterização</i> – 4 <i>clusters</i>	89
Figura 17: Cenário Fixo – SINR antes e depois da <i>clusterização</i> – 6 <i>clusters</i>	89
Figura 18: Cenário Aleatório - SINR antes e depois da <i>clusterização</i> – 4 <i>clusters</i>	90
Figura 19: Cenário Aleatório – SINR antes e depois da <i>clusterização</i> – 6 <i>clusters</i>	90
Figura 20: Cenário fixo – Média do atraso global – 4 <i>clusters</i>	91
Figura 21: Cenário fixo – Média do atraso global – 6 <i>clusters</i>	91
Figura 22: Cenário Aleatório – Média do atraso global – 4 <i>clusters</i>	92
Figura 23: Cenário Aleatório – Média do atraso global – 6 <i>clusters</i>	92
Figura 24: Cenário fixo – Média da vazão global – 4 <i>clusters</i>	93
Figura 25: Cenário fixo – Média da vazão global – 6 <i>clusters</i>	93

Figura 26: Cenário aleatório – Média da vazão global – 4 <i>clusters</i>	93
Figura 27 Cenário aleatório – Média da vazão global – 6 <i>clusters</i>	94
Figura 28: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	95
Figura 29: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	95
Figura 30: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	95
Figura 31: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	96
Figura 32: Cenário Aleatório – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	97
Figura 33: Cenário Aleatório – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	97
Figura 34: Cenário Aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	97
Figura 35: Cenário Aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	98
Figura 36: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	98
Figura 37: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	99
Figura 38: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	99
Figura 39: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	99
Figura 40: Cenário Aleatório – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	100
Figura 41: Cenário Aleatório – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	100
Figura 42: Cenário aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	101
Figura 43: Cenário aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	101
Figura 44: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	102
Figura 45: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	102
Figura 46: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	102
Figura 47: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	103
Figura 48: Cenário aleatório – Média do atraso – 4 e 6 <i>clusters</i>	103
Figura 49: Cenário aleatório – Média da vazão – 4 e 6 <i>clusters</i>	104
Figura 50: Cenário aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	104
Figura 51: Cenário aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 <i>clusters</i>	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de células e suas características	29
Tabela 2: Comparação entre as tecnologias 4G e 5G.....	43
Tabela 3: Analogias sobre evolução natural e os AGs	50
Tabela 4: Critérios para a seleção de uma técnica de avaliação.....	62
Tabela 5: Comparação entre os trabalhos correlatos.....	67
Tabela 6: IC – Cenário fixo - 4 clusters	767
Tabela 7: IC – Cenário fixo - 6 clusters	767
Tabela 8: IC – Cenário aleatório - 4 clusters.....	767
Tabela 9: IC – Cenário aleatório - 6 clusters.....	767
Tabela 10: Parâmetros de geração de tráfego para simulação.....	79
Tabela 11: Parâmetros genéricos dos cenários da simulação.....	80
Tabela 12: Variáveis para avaliação do modelo.....	80
Tabela 13: Parâmetros usados no modelo de bateria	82
Tabela 14: Faixas de frequência usadas na simulação	84
Tabela 15: Arranjo do ambiente de <i>Small Cells</i> no cenário fixo.....	85
Tabela 16: Arranjo do ambiente de <i>Small Cells</i> no cenário aleatório	85
Tabela 17: SINR (dB) – Cenário fixo	105
Tabela 18: SINR (dB) – Cenário aleatório.....	107
Tabela 19: Vazão global (b/s) – Cenário fixo – 4 <i>clusters</i>	105
Tabela 20: Vazão global (b/s) – Cenário fixo – 6 clusters	105
Tabela 21: Vazão global (b/s) – Cenário aleatório – 4 clusters.....	105
Tabela 22: Vazão global (b/s) – Cenário aleatório – 6 clusters.....	105
Tabela 23: Atraso global (b/s) – Cenário fixo – 4 clusters.....	106
Tabela 24: Atraso global (b/s) – Cenário fixo – 6 clusters.....	106
Tabela 25: Atraso global (b/s) – Cenário aleatório – 4 clusters	106

Tabela 26: Atraso global (b/s) – Cenário aleatório – 6 clusters	106
Tabela 27: Comparação da descarga de bateria - Cenário fixo - modelo linear.....	106
Tabela 28: Comparação da descarga de bateria - Cenário aleatório - modelo linear	107

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AAS	Adaptive Antenna System
ABS	Almost Blank Subframe
AGs	Algoritmos Genéticos
AMPS	Advanced Mobile Phone System
APs	Access Points
BS	Base Station
CAPEX	Capital Expenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CH	<i>Cluster</i> Header
CoMP	Coordinated Multi-Point
DCSA	Dynamic <i>clustering</i> Based Sub-Band Allocation
DSL	Digital Subscriber Line
D-TXAA	Duplo Transmit Adaptive Array
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial broadcasts
EB	Exabyte
eICIC	Enhanced Inter-cell interference coordination
eNBs	Evolved NodeB
EPS	Evolved Packet Systems
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiplexing Access
GB	Gigabyte
GSM	Global Systems for Mobile Communications
HeNB	Home eNodeB

HetNet	Heterogeneous Network
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
IA	Inteligência Artificial
IC	Inteligência Computacional
ICIC	Inter-cell Interference Coordination
IEC	International Engineering Consortium
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFI	Inter Femtocell Interference
IMT 2020	International Mobile Telecommunications – 2020
IN	Interference Nulling
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting
ITU	International Telecommunication Union
LDA	Linear Discriminant Analysis
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input - Multiple Output
MRT	Maximum Ratio Transmission
NGN	Next Generation Networks
NMT	Nordic Mobile Telecommunications
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PMX	Partially Mapped Crossover
QoS	Quality of Service
RAN	Rede de Acesso Rádio
SAE	System Architecture Evolution

SC-A	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
SINR	Signal Interference Plus Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SON	Self-Organizing Networks
UCIIN	User-Centric Intercell Interference Nulling
VoIP	Voice Over Internet Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
Wimax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLANS	Wireless Local Area Networks

RESUMO

Devido ao sucesso das redes de banda larga e ao crescente uso dos *smartphones*, as operadoras de telefonia móvel estão na busca de oferecer o mesmo padrão dos serviços das redes cabeadas, como velocidade e estabilidade, aos usuários das redes sem fio e desta forma, novas tecnologias surgiram, dentre elas as *Small Cells*. Estas são pequenas estações rádio base que em relação as macro-células apresentam um custo muito inferior, entretanto, oferecem um menor espaço de cobertura. Por isso, em um cenário onde uma grande quantidade deste equipamento será instalada, geralmente denominado *DenseNets* ou redes densas, e esta implementação não for realizada com base em um planejamento adequado, inúmeros problemas podem surgir, dentre eles a interferência co-canal, que em algumas situações, inviabiliza qualquer tipo de troca de informações. Por este motivo o modelo proposto nesta dissertação pretende auxiliar os analistas de projetos e arquitetos de soluções no planejamento de redes densas oferecendo, a partir das informações sobre as localizações das *Small Cells*, quais serão as faixas de frequências adequadas ao uso de cada uma, a fim de que as novas aplicações, suportadas pelos *smartphones*, não sofram uma degradação de sinal a ponto de que suas funções não sejam executadas e haja um aumento na qualidade dos serviços que são oferecidos aos usuários destas redes. Nos testes realizados, o modelo apresentou uma melhora no tráfego em mais de 80% das *Small Cells*, reduziu o valor do atraso dos pacotes comutados e ainda colaborou para a diminuição do número de pacotes descartados. Não obstante, também analisou-se o desempenho dos módulos de bateria dos dispositivos móveis quando o modelo foi empregado e percebeu-se que ele não aumentou o consumo de bateria destes equipamentos.

Palavras Chave: *Small Cells*, Redes densas, Interferência.

ABSTRACT

Due to the success of broadband networks and the growing use of smartphones, mobile operators are in search to offer the same standard of wired network services, such as speed and stability, to wireless users and thus new technologies have emerged, among them there are the Small Cells. These are small radio base stations that in relation to the macrocells present a much lower cost, however, offer a smaller space of coverage. Therefore, in a scenario where a large amount of this equipment will be installed, usually called *DenseNets* or dense networks, and this implementation is not carried out based on a suitable planning, numerous problems can arise, among them the co-channel interference, that in some situations, makes any type of information exchange impossible. For this reason, the model proposed in this thesis intends to assist the project analysts and solution architects in the planning of dense networks, offering, based on the information about the locations of the Small Cells, which frequency bands are appropriate for the use of each one, that so the new applications, supported by smartphones, do not suffer a degradation of signal to the point that their functions are not executed and there is an increase in the quality of the services that are offered to the users of these networks. In the tests carried out, the model showed an improvement in the traffic in more than 80% of the Small Cells, reduced the value of the delay of the switched packets and also collaborated to reduce the number of discarded packets. Nevertheless, we also analyzed the performance of the battery modules of mobile devices when the model was employed and it was noticed that it did not increase the battery consumption of these devices.

Key Words: Small Cells. Dense Networks. Interference.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desde o surgimento das telecomunicações as sociedades se beneficiam do seu uso, dos serviços e dos avanços tecnológicos que ela lhes proporciona. Segundo a *International Telecommunication Union - ITU* (2015), analisando o cenário global, cerca de 1 bilhão de pessoas tem acesso à telefonia fixa, número extremamente baixo se comparado às mais de 6 bilhões de pessoas que fazem uso da telefonia móvel, comprovando que esta tecnologia proporcionou a uma grande quantidade de indivíduos desfrutar das novas tendências. A *GSM Association* em seu relatório intitulado *The Mobile Economy* (2015), demonstrou que o ecossistema móvel é o maior impulsor de progresso e bem-estar econômico que se tem atualmente, pois o mesmo participou em 2014 com 3,8% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Baseado em fundamentos econômicos pôde-se constatar que a internet contribui com 3,4% do PIB nos países desenvolvidos e em média 1,9% nos países em desenvolvimento (WEF, 2015).

Ultimamente, diante de uma mesma perspectiva, rotula-se a internet como o principal responsável pelo avanço na área das telecomunicações, pois considera-se os quase três bilhões de consumidores que usufruem dos negócios digitais para fazer compras, realizar transações bancárias ou simplesmente interagir com outras pessoas. Estimativas mostram que o potencial das tecnologias digitais que impulsiona o crescimento econômico, aumenta significativamente o nível de vida e a produtividade das corporações em todas as economias à nível global. (WEF, 2015)

O crescente desenvolvimento destas tecnologias e a tendência dos novos usuários pelo uso dos *smartphones* e seus aplicativos (LA-ROQUE, 2015) originam uma grande revolução digital que por sua vez, potencializa a transformação em larga escala dos serviços e infraestruturas das redes celulares e conseqüentemente gera novas oportunidades para as operadoras de telecomunicações.

No entanto, para manter a competitividade e a eficácia simultaneamente, as empresas precisam se concentrar na prestação eficiente dos serviços e na criação de novos modelos de negócios. Neste contexto, buscando alternativas que suportem estas novas tendências, padrões e tecnologias surgiram como o *Long Term Evolution – LTE* e as *Small Cells*.

A partir da especificação TS 36.414 versão 8.3.0 (2009) e do relatório da então 4G Americas intitulado *Beyond LTE: Enabling the Mobile Broadband Explosion* (2014), pode-se concluir que o padrão LTE, dentre todas as suas características, é uma tecnologia de redes móvel celular que possui toda sua arquitetura desenvolvida para ser simples, quando comparada a outros modelos, por exemplo, o *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS); realiza o tráfego de informações com o uso do protocolo *Internet Protocol* (IP); oferece redução da latência, que é o tempo entre o envio de um pacote e a chegada da resposta de recebimento deste ou não, oferecendo maior interatividades aos seus usuários; disponibiliza compatibilidade com os sistemas anteriores; e proporciona uma melhor utilização dos recursos de rádio onde se planeja um fluxo de dados com altas taxas de transferência, baixa latência e eficiência espectral.

Já as *Small Cells* são consideradas pelas operadoras uma possível solução para melhorar a cobertura e capacidade da rede em ambientes *indoors*, através da reutilização espacial de recursos sem fio, isso devido a estudos mostrarem que aproximadamente 60% das chamadas de voz e 90% das comunicações por dados são realizadas em ambientes internos (CHANDRASEKHAR, ANDREWS e GATHERER, 2008). Entretanto, existem problemas para entregar estes serviços com qualidade nestas localidades devido a vários fatores, dentre eles a interferência intercelular, o desvanecimento do sinal e a geometria dos ambientes (ANDRONE e PALADE, 2012).

1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Em dezembro de 2013 o *Small Cell Forum* em seu documento 008.05.02 (2012) expôs que a gestão da interferência é uma das atividades precípua da tecnologia móvel celular, permitindo o gozo de uma capacidade essencialmente ilimitada a partir de quantidades finitas de espectro. O Fórum demonstrou que em 50 anos de evolução da capacidade da rede sem fio a reutilização de espectro, pela introdução de novas células de pequeno porte, é de longe, o maior contribuinte para o desenvolvimento destas redes.

Uma característica importante é que as *Small Cells* cobrem uma área menor do que as macro-células, assim elas precisam estar dispostas a distâncias menores, criando os cenários denominados densos ou *DenseNets* que podem comprometer ou mesmo inviabilizar a troca de

informações devido à interferência co-canal. Este problema ocorre porque duas ou mais *Small Cells*, alocadas próximas umas das outras, podem estar usando a mesma faixa de frequência para realizar o tráfego das informações de/para os aparelhos móveis dos usuários (HUANG, J. et al., 2013) (AHMADI, H. et al., 2015).

1.2. PROPOSTA

Com base nos levantamentos realizados, percebe-se que as implantações das *Small Cells* devem ser precedidas de um planejamento acurado, a fim de que os problemas oriundos das características físicas da instalação ligadas a funções destes *Access Points* - APs possam ser mitigados ou totalmente resolvidos.

Assim, se faz necessário a busca por novas maneiras de inserir qualidade nos serviços que são ofertados aos usuários das redes celulares formadas por *Small Cells* e isto é oferecido nesta dissertação através do uso de um modelo que reduz a interferência co-canal existente entre estes APs em ambientes *indoor* usando a *clusterização* e um método inspirado na computação evolucionária: os Algoritmos Genéticos – AGs.

Além disso, foi implementado em um dos simuladores usados o modelo linear de descarga de bateria, a fim de que também fosse analisado o consumo de carga de bateria dos equipamentos móveis dos usuários, nos momentos em que se usava ou não o modelo aqui proposto.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Avaliar e analisar, a partir de um número satisfatório de simulações, o desempenho de um modelo de redução da interferência co-canal entre *Small Cells* dispostas em um cenário denso, baseado em uma abordagem classificatória de dados não-supervisionada em conjunto com uma técnica proveniente da inteligência computacional.

E como a eficiência energética está ligada à qualidade que os usuários esperam dos seus aparelhos, ou seja, usar o dispositivo móvel o maior período de tempo possível sem ter que recarregar sua bateria, também foi levado em consideração nesta pesquisa o consumo de carga das baterias dos equipamentos dos usuários, haja vista que foi avaliado o comportamento da descarga do módulo de bateria durante as simulações.

1.3.2. Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral proposto anteriormente, várias ações foram definidas, as quais estão descritas abaixo:

1. Realizar ampla pesquisa sobre o “estado da arte” do problema que se espera resolver, pois sabia-se da existência de métodos que tentavam alcançar o mesmo objetivo, porém pretendia-se identificar, dentre eles, quais as metodologias aplicadas em cada um;
2. Escolher, dentre as soluções encontradas, a que apresentava melhor desempenho na resolução de problemas similares ao abordado nesta dissertação;
3. Modelar o problema de forma analítica a fim de recriar o modelo proposto na solução escolhida, o qual terá como objetivo final a *clusterização* das *Small Cells*;
4. Remodelar parte do algoritmo selecionado, totalmente baseado em processos determinísticos, a fim de que ele pudesse, em determinado momento, agir de forma probabilística no oferecimento da melhor solução para o problema;
5. Desenhar e agregar à parte da solução escolhida um algoritmo genético baseado em meta-heurísticas, o qual definiria em quais *clusters* (sub-canais de frequências) cada *Small Cell* disposta nos cenários definidos como densos, estaria alocada, a fim de que houvesse a maximização de uma função objetivo a qual visa a redução da interferência co-canal;

6. Codificar em linguagem de programação C++ o modelo linear de controle de descarga de bateria, que fará parte da avaliação e validação do modelo proposto nesta dissertação; e
7. Validar, através de simulações, o desempenho do modelo aprimorado a partir da modelagem de cenários reais implementados em um simulador discreto.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Primeiro são abordados os conceitos sobre as *Small Cells* a fim de que o leitor entenda sobre o que foi usado como tecnologia de base para esta pesquisa. Após isto, tratou-se de explicar o que são e como se dão as técnicas ligadas a inteligência computacional, as quais deram forma ao modelo proposto. Também foi realizado um levantamento sobre as metodologias de avaliação de desempenho computacional.

Logo após, são apresentados trabalhos que detém pesquisas correlatas ao tema aqui proposto e tentou-se, de forma minuciosa, apresentar toda a metodologia utilizada nesta dissertação, desde o conceito de algoritmos genéticos até as explicações sobre como as variáveis foram coletadas e analisadas a partir das simulações. Os resultados também foram expressos em gráficos para uma melhor visualização e compreensão, nos quais as razões destes serem desejadas ou não foram amplamente comentadas, seguido da conclusão sobre tudo o que foi feito no decorrer da pesquisa e a declaração sobre o alcance dos objetivos.

CAPÍTULO 2 – *SMALL CELLS*

Considerando a consolidação no mercado de telefonia móvel de novos equipamentos como *tablets* ou *smartphones*, os quais apresentam uma quantidade de memória e poder de processamento elevados, novas aplicações que demandam maior velocidade e largura de banda encontram-se inseridas no ambiente operacional e isto ocasiona uma busca incansável da academia e dos setores privados por novas maneiras para atender a estes requisitos.

O relatório denominado *Ericsson Mobility* (2016) apresenta inúmeras prospecções sobre os padrões de uso das redes celulares, como o tráfego de dados por cada *Smartphone* que em 2015 era de aproximadamente 1,4 GB/mês, passando para 8,9 GB/mês em 2021 ou o total de tráfego de dados móveis por mês que passaria dos 5,3 EB em 2015 para 52 EB em 2021, isto é, um crescimento de quase 10 vezes em relação aos dados de 2015. Segundo Trong e Le (2014) a taxa de tráfego de dados quase dobrou seu valor nos últimos anos e há indícios de que este fato é uma tendência que irá permanecer por um longo tempo.

Segundo Tuna et al. (2015), com os novos padrões de consumo de dados por meio da telefonia celular, surge um novo paradigma aplicado as redes inteligentes, o qual faz uso do protocolo *Internet Protocol* (IP) ou Protocolo da Internet que substitui o transporte de informação da forma comutada pela transmissão de dados por pacotes e ainda, de acordo com o Consórcio Internacional de Engenharia (*International Engineering Consortium* - IEC, 2002), tem por objetivo a redução dos custos ligados à infraestrutura. Este novo modelo é denominado Redes de Próxima Geração (*Next Generation Networks* - NGN), onde existe uma mistura de macrocélulas, células pequenas e, em alguns casos, pontos de acesso sem fio com tecnologia (*Wireless Fidelity* - Wi-Fi), os quais são empregados de forma colaborativa visando o fornecimento de uma melhor cobertura e de uma melhor capacidade de alternância de clientes conectados entre elas.

Os serviços baseados em IP oferecidos aos assinantes de linhas móveis com um alto valor agregado à Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) é uma das maiores razões para a evolução da tecnologia celular, cujos fluxos de vídeo em alta resolução, jogos *on-line* interativos e outros serviços de multimídia devem ser entregues sem degradação.

A questão atual é a forma como essa enorme quantidade de dados será entregue, respeitando o anseio dos usuários por velocidade e cobertura que excede os padrões atuais e ainda, continuar sendo economicamente sustentável para as operadoras de telecomunicações resguardando a saúde de suas despesas com aquisição de equipamentos (*Capital Expenditure* - CAPEX) e os custos contínuos operacionais (*Operational Expenditure* - OPEX).

Portanto, visando atender a todas as expectativas dos usuários em relação à entrega dos serviços, várias tecnologias vêm sendo estudadas, algumas ainda em estado embrionário, porém, outras mesmo que com sua maturidade ainda baixa em relação à quantidade de ambientes reais que as possui, já aparecem como propostas concretas feitas por grupos de pesquisadores em união com grandes empresas da área de telecomunicações como é o caso das Pequenas Células (*Small Cells*).

O Fórum *Small Cell* (2013), uma organização sem fins lucrativos a qual participam 137 membros incluindo 63 operadoras de vários países, representando mais de 1,71 bilhões de usuários móveis, em um de seus relatórios, conceitua as *Small Cells* da seguinte maneira:

Small Cells são pontos de acesso sem fio (*Access Point* – AP) de baixa potência que operam em espectro licenciado, são gerenciadas pelo operador e apresentam inteligência baseada em borda. Elas fornecem uma melhor cobertura celular e podem ser aplicadas em residências, empresas, bem como em espaços públicos metropolitanos ou rurais. Elas incluem várias tecnologias descritas como: *femtocell*, *picocell*, *microcell* e *metrocell*. (*SMALL CELL FORUM*, 2012, p. 2)

Podemos ter várias definições sobre as *Small Cells*, porém, algumas de suas características são observadas em unanimidade pelos pesquisadores as quais são: o trabalho com potências reduzidas, se comparadas as utilizadas pelas macro-células; sua economia de energia; seu menor tempo para instalação com vários dispositivos “*plug-and-play*”, ou seja, “conecte-e-use”; e seu menor custo, tanto na fase de fabricação quanto no momento de implantação. Assim, para todos os fins, considera-se as *Small Cells* como estações base de curto alcance utilizadas para complementar o serviço de telefonia móvel a partir de torres maiores denominadas *macrocells*. As *Small Cells* variam em relação ao seu tamanho e área de cobertura.

Estes APs se conectam em uma rede de banda larga padrão de internet, como *links* com fibra ou da família *Digital Subscriber Line* - xDSL, no intuito de realizar o

encaminhamento dos pacotes de dados aos destinos corretos. Elas tem sido desenvolvidas tanto para o uso em redes *Long Term Evolution* (LTE) 3G, 4G quanto para as mais recentes redes 5G e nesta última, pretendem apresentar todo o seu potencial em cenários desafiadores de alta densidade.

Nesta dissertação as *Small Cells* estarão desempenhando um papel dentro de um cenário enquadrado como de 4ª geração, pelos seguintes motivos: as faixas de frequências de rádio utilizadas nas simulações e o perfil das cargas de tráfego introduzidas no sistema a fim de simular os serviços desejados pelos usuários destas redes.

2.1. TIPOS DE *SMALL CELLS*

De acordo com a pesquisa intitulada *LTE and 5G Innovation Igniting Mobile Broadband* (2015) realizada pela então *4G Americas*, as operadoras detém várias opções para contribuir grandemente no aumento da capacidade e no escoamento das redes de próxima geração, pois cada um dos tipos de *Small Cells* está ligado, até mesmo denominado, em razão do perímetro de cobertura geográfica de cada equipamento, como mostra a tabela 1.

No intuito de provocar a maturidade nesta nova tecnologia, ou seja, aumentar a adoção das implantações de *Small Cells* visando atender as demandas das NGN, inúmeras reuniões, congressos, debates vem sendo construídos. Por exemplo, uma das pautas de discussões é o estudo do uso de 11 (onze) novas bandas do espectro rádio elétrico para uso das tecnologias IMT – 2020 (*International Mobile Telecommunications - 2020*) ou *5G Spectrum recommendations* (2015).

As 11 bandas sugeridas pela ITU para a rede 5G estão acima dos 6 GHz, ou seja, são frequências que proporcionam capacidades de transmissão em altas velocidades, entretanto servem para distâncias relativamente curtas, o que ocasionará um aumento na densidade destas redes, pois as operadoras deverão dispor as antenas próximas umas das outras e dos equipamentos dos usuários.

Estudos são realizados com o objetivo de encontrar as várias formas de interferências em sistemas móveis, suas principais causas e buscar meios de conter este problema. De acordo com BenMimoune et al. (2015), vários deles discorrem sobre a interferência entre as

Small Cells e as macro-células, ambiente conhecido como redes heterogêneas ou *HetNets*, com vistas a reduzir o problema de associação de usuários com as estações base, outros como Androne e Palade (2012) sugerem algoritmos para mitigar o nível de interferência das *Small Cells* com as macro células, no entanto, Mutairi (2015) indica que não existem muitos estudos ligados a observação do comportamento da interferência entre as próprias *Small Cells*.

Tabela 1: Tipo de células e suas características

Tipo de célula	Características
Macro célula (Macrocell)	Usada para cobrir uma grande área geográfica, ou seja, pode ter um tamanho de célula com até 100 Km e sempre são instaladas em ambientes externos (<i>outdoor</i>)
Micro célula (Microcell)	Cobre uma área pequena, como hotéis ou mercados, algo em torno de 2 Km usando de 5 a 10 W de potência e suportando 256 a 512 usuários. Usualmente é instalada em ambiente externo
Pico célula (Picocell)	Pode ser instalada tanto em ambientes internos (<i>indoor</i>) quanto externos (<i>outdoor</i>). Caso ela seja instalada externamente, ela é comumente chamada de “ <i>Metrocell</i> ”. Ela cobre aproximadamente de 15 a 200 metros caso esteja em ambiente externo, caso contrário, ela pode cobrir entre 10 a 25 metros. Usa uma potência de 1 a 2 W e suporta entre 64 a 128 usuários.
Femto célula (Residencial)	Aplicada em ambientes internos. Cobre uma área de aproximadamente 10 metros usando frequências inferiores a 50 mW onde suporta de 4 a 6 usuários.
Femto célula (Cooperativa)	Aplicada em ambientes internos. Cobre uma área de aproximadamente 25 metros usando frequências entre 100 e 250 mW onde suporta de 16 a 32 usuários.

Fonte: Adaptada de *LTE and 5G Innovation Igniting Mobile Broadband* (2015)

2.2. INTERFERÊNCIA ENTRE *SMALL CELLS*

Por intermédio de vários estudos como o de Huang et al. (2013) e o de Ahmadi et al. (2015), observa-se uma preocupação com a falta de planejamento para a implantação de ambientes densos de *Small Cells*, pois demonstrando que por razão delas apresentarem um perímetro menor de cobertura devido ao uso de baixa potência e altas frequências de trabalho,

comparadas às macro-células, várias delas devem ser alocadas próximas umas das outras para que haja uma maior cobertura do ambiente e melhor captação do sinal rádio pelos dispositivos móveis, fato este que ocasiona uma implementação densa, formando *DenseNets*, o que aumenta a probabilidade de ocorrer graves interferências.

As interferências eletromagnéticas podem ocorrer dentro ou fora do sistema de comunicação, porém sua causa se dará por meio das perturbações eletromagnéticas. Existe uma diferença entre os termos "perturbações eletromagnéticas" e "interferências eletromagnéticas", comumente utilizadas nos estudos técnicos. O primeiro termo representa a causa e o segundo a consequência que é observada nos sistemas de comunicação.

A interferência eletromagnética é uma anomalia provocada por circuitos internos de alguns equipamentos como rádios, computadores, lâmpadas, entre outros, ou por eventos naturais como descargas atmosféricas, ocasionando uma resposta incoerente, mau funcionamento ou redução no desempenho de equipamentos elétrico-eletrônicos. Segundo Sanches (2010) o conhecimento de suas causas ou formas de controle possibilitarão uma operação adequada e confiável destes sistemas nos seus respectivos ambientes de produção. Ela é um dos principais fatores limitantes do desempenho dos sistemas de comunicações celulares, podendo ser o maior empecilho para o aumento de sua capacidade quando esta se transforma em uma espécie de “gargalo”.

Para um equipamento móvel, o qual se encontra conectado a uma célula, muitas são as formas deste dispositivo sofrer interferência, como alguns outros aparelhos móveis conectados à mesma célula; outras estações base operando na mesma banda de frequência ou; qualquer sistema não celular, no qual frequências próximas à usada pelo equipamento móvel, se espalhem para outras faixas de frequências próximas a elas.

Se alguns destes tipos de interferência ocorrerem em um canal de voz, um fenômeno que poderá ser observado é o de *Crosstalk* ou Diafonia, onde o assinante ouve algumas outras vozes, dentro de uma mesma sessão de comunicação, sem ter noção de quem são as pessoas que estão falando, ou seja, são fluxos de áudio, muitas vezes, indesejáveis e que atrapalham a conversação. Porém, se estas interferências se derem em canais de controle, o sistema poderá evitar esta anomalia bloqueando a ligação devido a erros no fluxo dos sinais, ocasionando uma “chamada perdida”.

Mesmo com sinais interferentes sendo gerados no interior do próprio sistema celular, eles ainda são difíceis de serem controlados (devido a aleatoriedade dos efeitos de propagação). Em ambiente real, os transmissores de portadoras do sistema celular que concorrem entre si, se apresentam como uma fonte significativa de interferência de fora da banda, haja vista que estes frequentemente são alocados em locais próximos, com o intuito de proporcionar a uma empresa a mesma cobertura de seus concorrentes.

Dentre os inúmeros ambientes nos quais o espectro eletromagnético se encontra demasiadamente utilizado e que a atividade de controle da interferência nos meios de comunicação via rádio se apresenta como imprescindível, a fim de mitigar o surgimento de interferências, as áreas urbanas são as mais afetadas, pois nela encontra-se uma enorme gama de ruídos provocados por muitos equipamentos que fazem uso do espectro radioelétrico.

Em projetos atuais de redes de comunicações móveis em centros urbanos, decorrentes da implantação de redes *HetNet*, a fim de suprir as atuais necessidades dos assinantes das linhas digitais móveis e com a perspectiva de associação de milhares de conexões, duas preocupações não devem sair do plano do projeto, uma refere-se à interferência de canal adjacente, enquanto a outra a de mesmo canal (SBIT, DADI e CHIBANI, 2015).

2.3. TIPOS DE INTERFERÊNCIAS

Para o entendimento das explicações posteriores à respeito dos tipos de interferências eletromagnéticas, vamos recordar o princípio da rede de telefonia celular, a qual se define pela substituição do transmissor único de elevada potência, o qual criava uma única área de cobertura, ou seja, uma grande célula, por muitos transmissores de baixa potência e altas frequências, instalados em estações base, onde cada um deles faz a cobertura de um pequeno pedaço de toda a área que se pretenda atender, criando assim várias células pequenas, como visto na figura 1.

As células podem ter tamanhos diferentes e sua capacidade de transmissão, ou seja, o número de aparelhos móveis sem fio que serão atendidos simultaneamente na região a que se destina, urbana ou rural, é dependente da potência dos sinais e da quantidade de dispositivos móveis que podem ser tratados no mesmo instante pelos circuitos utilizados, assim como o tipo de tecnologia de interface aérea que está sendo usada.

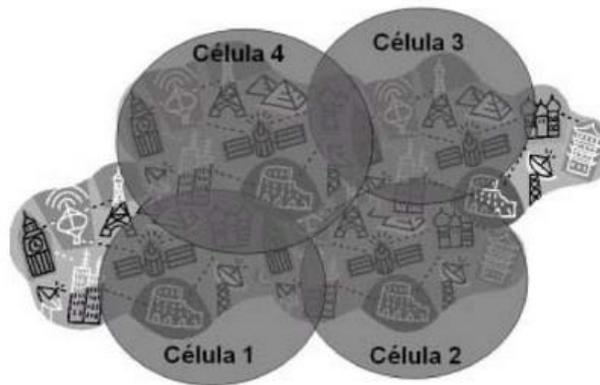


Figura 1: Cobertura Celulares
 Fonte: Virgilio Fiorese (2005)

A cada estação base atribui-se uma parte do número total de canais de rádio frequência disponíveis e visando uma melhor utilização do espectro eletromagnético, para as estações-base vizinhas, atribuem-se grupos de canais com frequências completamente diferentes, a fim de evitar a interferência entre estas estações. Desta maneira os conjuntos de canais podem ser reutilizados tantas vezes quanto necessário, porém, respeitando o limite de interferência que pode ser causada entre os mesmos para não comprometer a comunicação. Segundo Sbit, Dadi e Chibani (2015), dentre várias, duas situações devem ser observadas quando ambientes densos estão para serem criados, uma refere-se a interferência de canal adjacente enquanto a outra, a de mesmo canal.

A causa das interferências de canal adjacente são as imperfeições nos filtros dos receptores as quais permitem que frequências próximas atravessem a banda passante até o canal adjacente. A fim de que este problema seja reduzido separam-se, pela distância necessária, as frequências dos canais em uma dada célula. Assim, ao invés de entregar canais que formem uma banda contígua de frequências entre duas células dispostas perto uma da outra, são atribuídos diferentes canais com altos intervalos entre elas, de tal forma que a separação entre frequências seja maximizada e a interferência seja reduzida.

Entretanto, a principal fonte de interferência em um sistema de comunicação celular é a reutilização das frequências, as quais são reaproveitadas em localizações espacialmente distantes, no intuito de aumentar a eficiência espectral. O problema se dá pelo uso, em uma determinada área de cobertura, do mesmo conjunto de frequências por várias células. Este tipo de interferência denominado de co-canal ocorre em vários momentos, de maneira tão incisiva, que reduz a níveis muito baixos a *Signal Interference Plus Noise Ratio* (SINR), inviabilizando qualquer tipo de troca de informações.

Diferentemente do modelo de mitigação que é aplicado quando ocorre interferência ligada ao ruído térmico, que pode ser combatido aumentando a relação sinal/ruído, a interferência co-canal não pode ser combatida desta maneira, pois se aumentarmos a potência obteremos, ao invés de uma redução, um aumento na interferência. Assim, para mitigar este tipo de interferência, as células dispostas na mesma área de cobertura devem usar frequências diferentes e se for necessário o uso de uma mesma frequência, elas deverão estar a uma distância mínima, de forma que exista um isolamento entre elas.

2.4. REDUÇÃO DE INTERFERÊNCIAS EM AMBIENTES 4G E 5G

Historicamente, sempre que houvesse a necessidade do aumento da capacidade em redes celulares, novas estações base eram instaladas e esta forma de resolver o referido problema continua se mostrando bastante aplicável nos novos ambientes. De acordo com Soret, Pedersen e Lopez (2015), redes muito densas (*DenseNets*) podem ser vistas como uma evolução natural das novas redes heterogêneas (*HetNets*), herdando a maior parte de seus prós e contras. Portanto, as operadoras sabendo que as atuais exigências por maiores taxas de dados originam-se em pequenas áreas geográficas, passam a utilizar das *Small Cells*, por causa dos benefícios que elas apresentam.

Pelo fato das *DenseNets* estarem em um momento ascendente relacionado à quantidade de suas implementações e o *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* estar ciente de que a tecnologia LTE foi criada, levando em consideração algumas premissas como a reutilização de frequência, não existia planejamento celular para lidar com os problemas de interferência. Desta forma, havia uma alta probabilidade de que um bloco de recursos programados para uma área de cobertura, fosse transmitido para células vizinhas, o que resulta em alta interferência com baixa taxa de transferência, onde também o tráfego de canal pode sustentar até 10% da *Block Error Rate (BLER)*, esta que é a taxa de blocos de dados incorretos recebidos a partir de um total transmitido em um circuito digital, em baixa SINR, mas canais de controle não podem. Por estas razões, algumas técnicas foram apresentadas.

A partir da *Release 8* do 3GPP, surgiram opções como a coordenação de interferência entre células ICIC (*Inter-cell Interference Coordination*) o qual apresentava alguns esquemas de implementação como:

- No primeiro esquema duas eNBs (*Evolved NodeB*), que são as estações rádio base dos sistemas LTE responsáveis pela alocação dinâmica dos recursos nos canais de *downlink* e *uplink*, vizinhas usam conjuntos de blocos de recursos diferentes em determinado momento, melhorando a relação SINR da célula. A desvantagem é a diminuição da taxa de transferência ao longo da célula, uma vez que os blocos de recursos não são usados em sua totalidade;
- O segundo esquema aborda que nós localizados no centro das células, onde a potência do sinal é dada como ótima, utilizem a gama completa dos blocos de recursos, mas para nós que estão na borda das células, não pode haver dois deles compartilhando o mesmo conjunto de blocos de recursos em um mesmo tempo.

Existe ainda uma opção para o gerenciamento e controle da interferência em ambientes com *Small Cells* denominada *Enhanced Inter-cell Interference Coordination* (eICIC), a qual foi introduzida pela *Release 10* do 3GPP, a qual apresenta sua abordagem voltada à redes heterogêneas densas onde introduz o conceito de Sub Quadro Quase Branco (*Almost Blank Subframe - ABS*). Segundo Hu e Qian (2013) os *subframes* regulares transmitem dados relacionados aos canais de controle ou mesmo informações sobre canais compartilhados. No ABS a única carga de informação é a usada para trabalhar com sistemas legados, ou seja, *Release 8 e 9* do LTE.

Há uma considerável gama de estudos sobre as interferências inter-camadas no modelo LTE – *HetNets*, ou seja, entre a camada da macro-célula e as *Small Cells* (PEDERSEN, K.I. et al., 2013), porém, com o crescente número de implementação destes APs, o trabalho para desenvolver novos métodos de redução da interferência continuou, não somente observando as possíveis causas mas também as soluções para interferências entre as camadas, principalmente entre as próprias *Small Cells*, como pode-se ver na *Release 12* do LTE, a exemplo do método de coordenação em um arranjo multicelular de pacotes, referenciado como um reforço para o *Coordinated Multi-Point - CoMP* (3GPP, TR 36.872, 2013).

Desta forma, percebe-se que instituições ou conglomerados público-privado buscam soluções ou meios de mitigar os problemas relacionados com as formas de interferência, seja ela co-canal ou de canal adjacente, causadas nas redes heterogêneas densas, não deixando de

observar o seu impacto no oferecimento de serviços aos usuários assinantes e aferindo suas expectativas.

2.5. AS REDES DE TELEFONIA MÓVEL

De acordo com Al-Shahrani e Al-Olyani (2008) o primeiro sistema celular, o qual era analógico, foi o *Nordic Mobile Telecommunications (NMT)* que começou a ser usado na Escandinávia em 1979. Porém, com o lançamento da tecnologia de Sistema Avançado de Telefone Móvel (*Advanced Mobile Phone System - AMPS*) cujos primeiros sistemas entraram em operação em 1983 nos Estados Unidos, utilizando o padrão de multiplexação denominado Acesso Múltiplo por Divisão da Frequência (*Frequency Division Multiplexing Access – FDMA*) no qual a largura de banda é segmentada em canais de rádio frequência onde cada canal forma-se através das junção de um par de frequências, isto é, uma para a transmissão e outra para recepção, com 30 Khz, surgiu a primeira geração móvel (1G), ainda totalmente analógica.

Com a implantação dos padrões Sistema Móvel de Comunicação Global (*Global Systems for Mobile Communications - GSM*) que apresenta possibilidades de *roaming* internacional, alta flexibilidade e baixo custo dos equipamentos de núcleo da rede juntamente com os terminais de usuário (ALENCAR, 2004) e a Divisão de Código por Múltiplos Acessos (*Code Division Multiple Access - CDMA*), o qual disponibiliza acesso múltiplo aos canais que compartilham a mesma banda de frequências usando códigos diferentes via inúmeros terminais, estas duas tecnologias concorrentes entre si por sinal digital para voz e pelo uso característico da comutação de circuitos, surge a segunda geração (2G).

No ano de 1999, a ITU apresenta à comunidade empresarial e científica um novo padrão global que incorpora, em sua estrutura, o oferecimento de serviços de tráfego de dados sem o uso de uma conexão permanente com taxas de até 2Mbps, o que levou as operadoras a promoverem uma atualização em suas redes.

Desses fatos, surgiram duas vertentes de pesquisa para a nova tecnologia 3G, a primeira, denominada *3rd Generation Partnership Project - 3GPP*, esta é uma união entre sete organizações de desenvolvimento de padrões normativos a qual também participam mais de 400 empresas visando a implantação de redes 3G e suas inovações. A segunda, *3rd*

Generation Partnership Project 2 - 3GPP2 é um projeto colaborativo entre operadoras norte americanas e asiáticas, tendo como objetivo desenvolver especificações globais que auxiliem as empresas que usavam os modelos ANSI/TIA/EIA - 41 (CDMA), atendendo a IMT 2000, a convergirem para os padrões da tecnologia 3G

Neste momento da história das redes de telefonia móvel, chega-se aos prelúdios da tecnologia 4G ou quarta geração. O ITU, com vistas a acompanhar o aumento das taxas de transmissão de dados, lança o IMT *Advanced* ou ITU-R M.2134 onde são especificados requisitos que devem ser respeitados para que uma tecnologia possa ser enquadrada como de quarta geração ou 4G. Obedecendo a recomendação ITU-R M.1645 (ITU-R M.2134, 2008, pg. 2) descreve-se a taxa de 100 Mbps, quando os dispositivos móveis estiverem com deslocamento em alta velocidade, entre 60 Km/h e 250 Km/h, isto é, em rodovias ou mesmo no interior de um trem rápido e 1 Gbps em baixa velocidade, como a de um pedestre.

A mais forte diferença existente entre os padrões 3G e 4G são as tecnologias associadas a cada um deles, pois todos os sistemas 3G tem como base de projeto os padrões de tecnologias de telefonia de voz, herdados do velho sistema analógico. Entretanto, os sistemas 4G foram projetados para o uso basilar do protocolo IP e a transmissão de voz é a aplicação específica.

2.6. QUARTA GERAÇÃO - 4G

Como o seu nome já apresenta, a 4G é uma tecnologia fruto da evolução tecnológica temporal das redes de telefonia móvel, ou seja, ela é um conjunto diferenciado de padrões de comunicações relacionado a redes de telefonia celular, a exemplo, estão os novos protocolos de comunicação para fins de melhoria no uso do espectro eletromagnético. Um dos seus maiores objetivos foi a criação de uma plataforma que assegure níveis aceitáveis de funcionamento para os novos serviços e aplicações.

Para que fossem respeitados os requisitos da 4G, quatro padrões para troca de informações foram estudados, sendo eles: HSPA+ (*Evolved High Speed Packet Access*), HTC Evo 4G, Wimax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e o LTE. Nenhuma das três primeiras alternativas conseguiu dar suporte aos requisitos específicos da quarta geração,

mas a ITU concedeu uma autorização para que os fornecedores divulgassem alguns dos seus sistemas como sendo de 4G.

O LTE conseguiu atingir inúmeros objetivos propostos pela IMT- *Advanced* e passou a ter uma maior visibilidade neste contexto, pois a mesma apresentou taxas nos estudos em laboratório de 300 Mbps para downloads e 75 Mbps para upload. Neste ínterim, outras normas foram desenvolvidas as quais a ITU classificou como verdadeira, isto é, “4G verdadeiro”, são elas: LTE – *Advanced (Release 8)* do 3GPP e *WiMAX Advanced*.

2.7. LONG TERM EVOLUTION (LTE)

As expectativas dos usuários por mais velocidade em redes de banda larga sem fio e maior largura de banda foram as maiores razões, dentre as que levaram as operadoras de telecomunicações e as instituições de pesquisa a desenvolverem um novo padrão de arquitetura e infraestrutura para este novo cenário das redes móveis.

A fim de atender a estas ansiedades, observou-se que seria necessário uma transformação dos padrões existentes à época em algum outro que proporcionasse maior controle sobre os meios lógicos e físicos, onde este também apresentasse uma certa maturidade, a fim de que não houvesse uma demora nas suas futuras implantações, por exemplo, que o mesmo fosse parecido com o padrão das redes baseadas em IP.

Desta maneira, o 3GPP começou a trabalhar em dois projetos paralelos, o *System Architecture Evolution (SAE)* – Evolução da Arquitetura de Sistemas e o *Long Term Evolution (LTE)* – Evolução a Longo Prazo, integrantes da *Release 8* do 3GPP, que por um certo tempo eram agregadamente descritos pelo termo LTE/SAE, mas agora são conhecidos como *Evolved Packet Systems (EPS)*, os quais se destinam a definir tanto a *Radio Access Network (RAN)* ou Rede de Acesso Rádio como o núcleo da rede do sistema.

O projeto SAE tinha como premissa o desenvolvimento de um *framework* que visasse uma evolução ou migração dos sistemas 3GPP para um novo modelo, o qual agregasse altas taxas de transferências de dados com baixa latência, a fim de que esta nova arquitetura suportasse múltiplas tecnologias de acesso rádio. Observou-se que estes objetivos poderiam ser alcançados com a simplificação da arquitetura das redes de comunicação celulares, por

exemplo, usando um número mínimo de nós nos projetos de rede, simplificando o processo de operação e manutenção destes sistemas.

Segundo Pentinnen (2016) os principais objetivos ligados aos estudos destes novos padrões arquiteturais eram: entender o impacto que poderia ser causado pela implantação das funções das RANs LTE em um projeto; observar os resultados causados pela implantação do novo conceito de redes de comunicações totalmente baseadas em IP; e avaliar o desempenho desta nova arquitetura, tendo em vista a necessidade de suporte à mobilidade entre redes de acesso heterogêneas.

O segundo projeto iniciado pelo 3GPP, o LTE, foi iniciado em 2004 e dentre as razões de sua concepção estão inclusos o desejo de uma redução do custo por bit, o oferecimento de serviços de baixo custo e que proporcionassem uma melhor experiência ao usuário assinante, a utilização flexível das novas e existentes bandas de frequência, uma rede de custos simplificada com interfaces abertas, uma redução na complexidade do uso do terminal do usuário juntamente com o consumo econômico de bateria.

Uma das principais características das redes com tecnologia LTE é a sua arquitetura, pois a mesma foi desenvolvida visando a simplificação das redes atuais, o que pode ser visto através da figura 2, na qual seu o núcleo terá como base o uso do protocolo IP. Esta ação permite admitir que todo o tráfego de voz será realizado usando a tecnologia denominada *Voice Over Internet Protocol (VoIP)*, pois ela tem se apresentado como uma método bastante eficiente na execução deste tipo de serviço.

A flexibilidade no uso de várias larguras de bandas por cada canal, isto é 1,4, 3, 5, 10, 15, e 20 MHz em ambos os sentidos, se apresenta como característica essencial neste padrão. Isto permite que o LTE possa ser implantado em ambientes onde já existam outros sistemas ativos, incluindo os de banda estreita, como GSM e alguns sistemas baseados em 1,25 MHz de largura de banda.

LTE é a primeira tecnologia criada, explicitamente, para atender aos novos requisitos das redes de próxima geração ou NGN. Ela se aproveita das capacidades destas novas redes para fornecer aos seus usuários a mesma experiência de uso que eles tem quando estão conectados a uma rede cabeada.

O projeto METIS (2012) descreveu cinco características que estão presentes nestes novos sistemas de redes de comunicações móveis:

1. Alta velocidade;
2. Ótimo serviço oferecido as grandes concentrações de pessoas;
3. “Coisas” que se comunicam em qualquer lugar a qualquer momento;
4. Elevada experiência para os assinantes dos serviços móveis; e
5. Conexões confiáveis em tempo real.

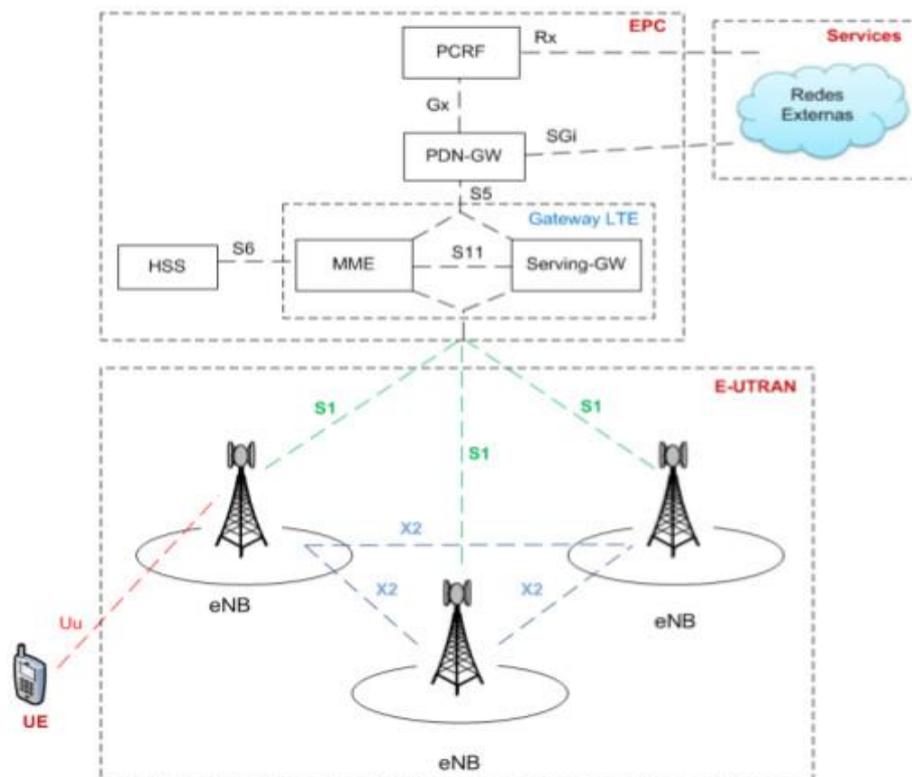


Figura 2: Arquitetura completa do LTE

Fonte: Cardoso (2016)

Porém, o LTE ou *Release 8* do 3GPP ainda era considerado uma tecnologia 3.9G, pois alguns requisitos ainda deviam ser atendidos como a agregação de portadoras, coordenada de multiponto e apoio as redes heterogêneas.

O LTE-Advanced foi projetado para atender a todos os requisitos da ITU, declarados nas especificações do IMT - Advanced. Os principais critérios deste projeto são o custo por escalabilidade de bit e a entrega do sistema. Além disso, a redução da latência e eficiência energética são abordadas.

Outras importantes tecnologias que proporcionam a base da garantia de alta eficiência espectral do LTE são: OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais que é uma técnica de modulação de dados; e MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*) onde múltiplas antenas de transmissão e recepção trabalham, simultaneamente, para alcançar os índices relacionados as taxas de transferência de dados associados ao padrão LTE.

A técnica de modulação com multiplexação por divisão de frequências ortogonais – OFDM, cuja ideia central está na transformação de um fluxo de dados serial de uma taxa de transmissão elevada em múltiplos sub-fluxos paralelos a uma taxa de transmissão baixa, auxilia o padrão LTE a alcançar os requisitos ligados a economia sobre o uso do espectro de rádio, proporcionando soluções com excelentes “custo x benefício”. Nesta técnica o espectro das faixas estreitas, isto é, sub-bandas se sobrepõem uns aos outros, entretanto, os sinais das sub portadoras ainda são ortogonais.

Essa forma de modulação é derivada da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*) – Multiplexação por Divisão de Frequência, onde há uma maneira particular de realizar a sobreposição espectral de sub-portadoras com vistas a aumentar a capacidade do meio de comunicação, como pode ser visto através da figura 3.

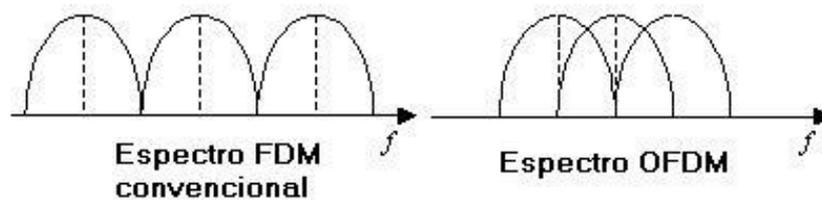


Figura 3: Comparação FDM com OFDM
Fonte: Adaptado de Pinheiro(2015)

Segundo Hermann Rohling (2011) a transmissão de sinais usando a técnica OFDM consiste em N sub-portadoras adjacentes e ortogonais espaçadas pela distância de frequência de Δf . Todos os sinais das sub-portadoras são mutuamente ortogonais dentro da duração dos símbolos de largura T_s . Assim, a distância da sub-portadora e a duração de um símbolo são escolhidos de forma que $T_s = 1/\Delta f$.

Esse tipo de modulação é adotada por inúmeros padrões de transmissão como os relacionados as redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks - WLANs*) IEEE 802.11a, HYPERLANC 2 ou ARIBMMAC. Como também, por padrões de radiodifusão, tais como DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial broadcasts*) e o ISDB (*Integrated Services*

Digital Broadcasting) devido a qualidade apresentada diante da economia espectral e maior robustez no trabalho de redução da interferência causada pelo efeito multipercurso.

Com o objetivo de compartilhar o uso do espectro por vários usuários, uma técnica foi desenvolvida, fruto do aprimoramento da OFDM e que é requisito para o enquadramento em redes 4G pelo ITU em *IMT-Advanced*, esta denomina-se OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). O OFDMA é um método de acesso múltiplo permitindo transmissões simultâneas de/para inúmeros usuários, ela apresenta um ótimo padrão de funcionamento quando está em conjunto com o Sistema de Antena Adaptativo (*Adaptive Antenna System - AAS*) e MIMO, com vistas a melhorar significativamente a vazão, aumentar o alcance e reduzir interferências.

Uma outra técnica derivada da FDMA e que também se apresenta nas descrições do padrão 3GPP-LTE é a SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) - Múltiplo Acesso por Divisão de Frequências por Portadora Única que é utilizada no *uplink*, diferente da OFDMA que é usada no *downlink*.

A MIMO é uma outra tecnologia usada para garantir os padrões de qualidade dos serviços que devem ser oferecidos pelo modelo LTE. Ela emprega múltiplas antenas na transmissão e múltiplas antenas na recepção dos dados, combinando vários rádios e múltiplos fluxos de dados em paralelo. Observa-se através da figura 4 que essa técnica consiste no envio de fluxos de dados diferentes ao longo de cada antena.

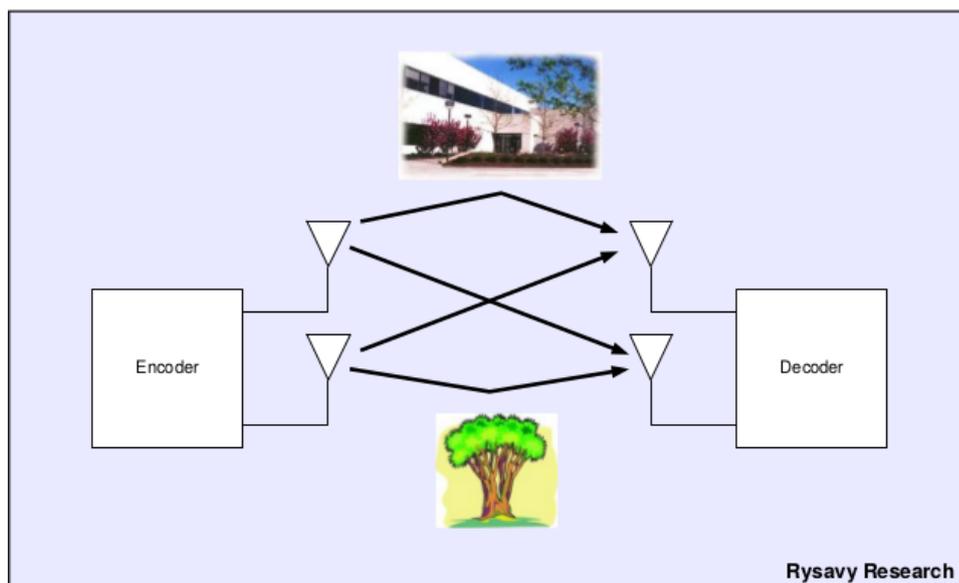


Figura 4: MIMO usando múltiplos caminhos para impulsionar vazão e capacidade
 Fonte: *Rysavy Research - LTE and 5G innovation* (2016, p. 98)

Ciente da problemática do multipercurso em outros ambientes que usufruem da comunicação por rádio frequência, esta tecnologia tenta se aproveitar deste fato, propondo que vários caminhos de dados operem, efetivamente, em paralelo e com decodificação apropriada, ocorrendo em um ganho multiplicativo na taxa de transferência.

Segundo a 5G Americas (2016), vários testes comprovam que a aplicabilidade desta tecnologia em ambientes WLAN, onde a interferência não é um fator dominante, se apresenta expressamente eficiente e eficaz. Entretanto, em redes que apresentam elevados índices de interferência a partir de células adjacentes, os ganhos de capacidade global, em termos de vazão, serão mais modestos, ou seja, em torno de 20% a 33% levando em consideração a diversidade das arquitetura de hardware presentes no ambiente.

Para fins de comparação, diferentemente de um sistema de antena 1 X 1, a opção de 2 X 2 MIMO pode proporcionar vantagens na taxa de transferência entre células de cerca de 80%. O 3GPP padronizou a MIMO de multiplexação espacial na *Release 7* usando um Arranjo Duplo de Transmissão Adaptativa - *Duplo Transmit Adaptive Array (D-TxAA)*, como padrão na comunicação de *uplink* que usa a tecnologia *beamforming* com duas antenas, ou seja, 2X2 MIMO para HSPA no *Release 11*.

Basicamente, com mais antenas no transmissor e no receptor, aumentam o número de caminhos possíveis para a comutação dos dados e observa-se um melhor desempenho no que tange ao aumento nas taxas de dados e confiabilidade do link. O preço a pagar é o aumento da complexidade do hardware (número de interfaces amplificador de Rádio Frequência - RF) e da complexidade e consumo de energia do processamento de sinal em ambas as extremidades.

2.8. A QUINTA GERAÇÃO (5G)

A indústria das comunicações móveis se encontra em uma intensa fase de transformação, na qual novas tecnologias são desenvolvidas, aprimoradas e outras já estão prontas para entrarem em operação, tais eventos ocorrem almejando atender a necessidade atual de empresas e da sociedade pela aquisição e distribuição de mais informações em menos tempo com baixo custo.

As etapas de transição da tecnologia 3G para 4G, de acordo com a *5G Americas* (2016) foram difíceis, entretanto, avanços ainda serão feitos e basear-se-ão inicialmente, na tecnologia LTE e posteriormente, de maneira bem mais acentuada, na tecnologia 5G. Diferente do que muitos pensam, a 5G não substituirá a LTE, mas na verdade, na maioria das implantações elas irão coexistir de maneira integrada, transparente para os usuários pelo menos até o final de 2020.

Há também uma outra tendência de mercado, a qual tem suas pesquisas evoluídas e aplicabilidades comprovadas ao longo de cada dia, trata-se da Internet das Coisas – *Internet of Things* (IoT), que promete milhares de milhões de novas conexões sem fio. Melhorias na LTE, seguida de capacidades da 5G irão conectar computadores portáteis a uma enorme quantidade de sensores e outros dispositivos, tornando possível o uso de aplicações que hoje não teriam condições de estar em operação por necessitarem de alta confiabilidade e baixa latência, como os aplicativos voltados aos cuidados com a saúde dos usuários em tempo real, aplicações econômicas entre outros.

Para melhor compreender o avanço desejado entre as tecnologias 4G até 5G, apresenta-se na tabela 2 comparações entre os objetivos da ITU para o IMT-2020, que descreve os requisitos técnicos para a 5G em relação ao IMT-Advanced que apresenta as características da tecnologia 4G, segundo o *Rysavy Rysearch* (2016):

Tabela 2: Comparação entre as tecnologias 4G e 5G

Características	IMT-Advanced	IMT-2020
Pico de taxa de dados	DL: 1 Gbps UL: 0.05 Gbps	DL: 20 Gbps UL: 10 Gbps
Experiência de taxa de dados do usuário	10 Mbps	100 Mbps
Eficiência espectral	1 (normalizado)	3X sobre IMT-Advanced
Pico de eficiência espectral	DL: 15 bps/Hz UL: 6.75 bps/Hz	DL: 30 bps/Hz UL: 15 bps/Hz
Mobilidade	350 km/h	500 km/h
Plano de latência do usuário	10 ms	1 ms
Densidade de conexão	100 mil dispositivos/km ² .	1 milhão de dispositivos/km ² .
Eficiência energética de rede	1 (normalizado)	100X sobre IMT-Advanced
Capacidade de tráfego de área	0.1 Mbps/m ² .	10 Mbps/m ² . (hot spots)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Projetos de redes 5G enfatizam maneiras de combinar as tecnologias da 4G LTE existentes com recursos fornecidos pelo 5G. Tal abordagem dá ênfase a utilização de LTE e seus avanços em bandas de frequências existentes, para fornecer interoperabilidade com acesso em novas bandas que se estendem por uma ampla gama de frequências. Algumas outras características das redes 5G podem ser vistas na figura 5.

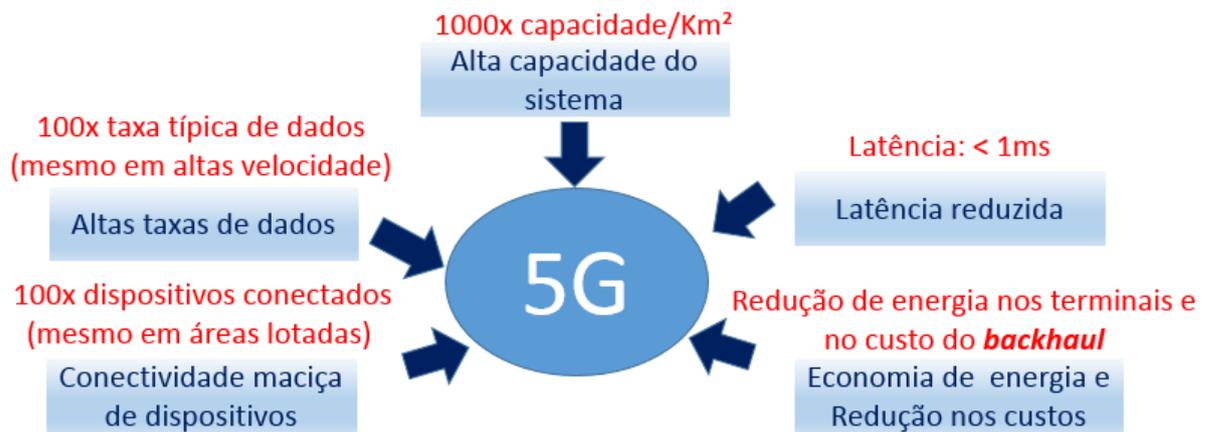


Figura 5: Características do 5G
Fonte: Elaborada pelo autor

A 5G será um grande salto no ciclo de vida da comunicação móvel celular e acabará por desempenhar um papel importante neste ambiente, porém deve-se ter em mente que os investimentos feitos até o presente momento, devem ser levados em consideração pelos órgãos padronizadores. Muitos dos recursos planejados para 5G podem, de fato, ser implementado como LTE-Advanced Pro que se apresentam como extensões anteriores à plena disponibilidade da 5G.

CAPÍTULO 3 – INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

Pelo fato das atuais redes de comunicações celulares estarem passando por extremas mudanças em suas características arquiteturais e de negócios, as quais estão diretamente ligadas aos novos padrões de comunicações e novas aplicações que estão sendo consumidas por um maior número de usuários e dispositivos, existem várias entidades, com ou sem fins lucrativos, que estão realizando pesquisas destinadas a criar meios para que estas novas necessidades possam ser supridas.

Segundo a 5G Americas (2016) em seu relatório executivo sobre os avanços nos estudos sobre a Release 13 do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) – este um conglomerado de órgãos que trabalham no desenvolvimento de normas ligadas às telecomunicações – para que isso aconteça, todo o sistema de comunicação celular deve ser repensado e reelaborado, pois a infraestrutura atual não detém condições de suportar a carga de tráfego que tende a passar por ela. Através desse documento percebe-se que vários desafios sem precedentes serão enfrentados como: o salto no crescimento do tráfego em meio a uma escassez de espectro, a escalada da Internet das Coisas e uma visão para a transformação da rede que irá criar um ambiente totalmente IP.

Neste contexto a computação desempenha um papel imprescindível, pois pode apresentar respostas a estes problemas, os quais eram considerados difíceis ou até mesmo impossíveis de serem solucionados, em um curto espaço de tempo. Alguns exemplos de problemas que estão sendo resolvidos através do uso da computação são: previsão de ações no mercado financeiro (economia), a obtenção de novos compostos poliméricos (química), controle de trens de alta velocidade (mecânica), análise entre a influência do clima atual frente à taxa de crescimento das árvores (ecologia), solução de modelos matemáticos complexos (matemática) e etc. (DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO, 2010)

Por intermédio de duas dessas vertentes, a inteligência artificial e a computacional, inúmeras proposições puderam ser construídas ou colocadas em produção. A primeira vertente, denominada Inteligência Artificial (IA) é descrita de maneira clássica no livro *The Handbook of Artificial Intelligence* (COHEN e FEIGENBAUM, 1981) como sendo a parte da ciência da computação que está preocupada em construir sistemas computacionais

inteligentes, ou seja, desenvolver um conjunto arquitetural que apresente as características que estão associadas à inteligência do comportamento humano como a compreensão da linguagem, raciocínio e aprendizagem, resolução de problemas, entre outras. A IA engloba várias linhas de pesquisas como teoria dos jogos, sistemas especialistas e representação do conhecimento.

O sucesso das aplicações da Inteligência Artificial tradicional, pautada na precisão, certeza e rigor, passou a se mostrar ineficiente no tratamento de problemas complexos e dinâmicos, os quais exigem uma alta capacidade de adaptação (ZADEH, 1994). Assim, em meados da década de 1990, Lotfi Zadeh criou um novo termo que representava as técnicas que possuíam a capacidade de serem tolerantes a imprecisão, incerteza e verdade parciais. Essa nova área, aqui denominada de segunda vertente, foi chamada de Inteligência Computacional (IC) (KONAR, 2006).

A IC é descrita em Tadaiesky (2015) como uma disciplina que estuda e projeta agentes inteligentes, a qual tem como uma de suas principais atividades a tarefa de otimização de um sistema, a qual se faz presente junto ao processo de desenvolvimento e execução de diversas aplicações. O autor ainda cita que a alta complexidade atribuída a alguns problemas, às vezes, tornam as tradicionais técnicas de otimização ineficazes na obtenção do melhor resultado, a exemplo dos problemas NP-completos (*NP-hard*) e nestes casos a aplicação de IC se torna uma ótima opção.

O autor Arthur K. Kordon enfatiza em seu livro denominado *Applying Computational Intelligence: How to Create Value* (2010), que existem muitas diferenças entre IA e IC, porém ele considera que as 3 (três) maiores e mais fortes são:

- 1 - Na principal fonte de representação da inteligência: enquanto a IA baseia-se na representação do conhecimento feita por especialistas humanos nos domínios específicos; a IC extrai o conhecimento dos dados que estão disponíveis pelos sistemas de informação;
- 2 - Nos mecanismos de processamento de inteligência: no núcleo da IA clássica estão os métodos de raciocínio simbólico; enquanto a inteligência computacional é baseada em métodos numéricos; e

3 – Nas interações com o ambiente: a aplicação da IA tenta ajustar o ambiente às soluções conhecidas, isto é, através de bases de conhecimento estáticas. De uma outra forma, a inteligência computacional usa todas as oportunidades para aprender com o meio ambiente e criar novos conhecimentos.

Assim, com base nos conceitos supracitados, esta pesquisa propõe o uso de uma especialidade da Computação Evolucionária, o Algoritmo Genético (AG), a fim de buscar uma resposta ótima ou a melhor em um curto espaço de tempo, dentre um conjunto finito de soluções, no que diz respeito ao arranjo de *Small Cells*, aqui representado por um cromossomo, em um cenário denso a fim de viabilizar o uso de dispositivos móveis, onde haja a redução da interferência co-canal entre as células e redução no consumo de carga das baterias dos equipamentos dos usuários.

3.1. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

Em uma de suas obras, Roberto Pontes (2011) descreve os algoritmos evolucionários como os que são construídos com base na evolução biológica e que desencadearam a criação de outros paradigmas, como os algoritmos genéticos e a programação genética. O pesquisador expõem que a ideia de construir modelos computacionais baseados na natureza se deu pela forma com que esta usa seus recursos no tratamento de problemas com alto nível de complexidade, onde a solução é encontrada por vias de adaptação dos seres vivos nestes ambientes. Segundo Goldschmidt (2010) “Todo problema de difícil modelagem matemática ou com um número muito grande, possivelmente infinito, de soluções é considerado um problema complexo.”.

Em um problema de otimização, mesmo que uma grande parte das variáveis deste ainda sejam desconhecidas, há a possibilidade de se encontrar uma solução ótima ou que detenha boa qualidade, por meio de algoritmos evolutivos ou suas variações. Isto é, estes algoritmos podem trabalhar na resolução de problemas sobre os quais ainda não se tenha conhecimento total sobre suas nuances. Entretanto, existe uma premissa que deve ser levada em consideração quando do trato com estes tipos de algoritmos, que é a avaliação das

probabilidades de aplicação de todas as possíveis soluções do domínio e não somente de um subconjunto destas.

Deve-se deixar claro que as soluções para um determinado problema, descritas anteriormente, são denominadas “indivíduos” pelo paradigma usado nesta pesquisa, o Algoritmo Genético, os quais são representados por cromossomos onde cada símbolo do cromossomo é chamado de gene. Este por sua vez armazena informações: os alelos. Na maioria das vezes os cromossomos são implementados como um vetor, ou seja, uma cadeia de bits, servindo como uma estrutura de armazenamento.

E para que estas soluções possam ser implementadas, há a necessidade de realizar os processos de codificação e decodificação destes indivíduos, como pode ser observado na figura 6, onde esta atividade é feita através de uma sequência de símbolos gerados a partir de um alfabeto finito.

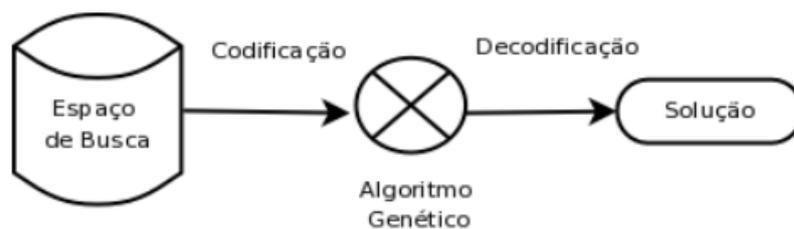


Figura 6: Esquema de trabalho de um Algoritmo Genético
Fonte: Elaborada pelo autor

Percebe-se que em Holland (1975) a codificação binária, usando-se os números zero e um (0 e 1), foi a primeira a ser utilizada, pois o autor afirmou que todos os problemas poderiam ser satisfatoriamente representados por esta codificação, mas não existe somente esta forma de cifrar os dados. Outras codificações podem ser construídas, já que as respostas estão ligadas as especificidades de cada problema. Assim, elas podem oferecer resultados melhores quando usam estas outras formas de codificação, por exemplo, a codificação inteira, que tem os genes representados por números inteiros; ou a codificação por strings, na qual os cromossomos são as letras de um alfabeto, entre outras.

3.2. ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs) – DEFINIÇÃO

Quando deseja-se realizar a otimização de um sistema, independente de qual ambiente este esteja alocado, faz-se referência a maximização ou minimização de uma função, a qual denomina-se função objetivo (ou avaliação), onde podem existir uma ou mais variáveis, entretanto, na maioria dos casos há restrições relacionadas a estas variáveis.

O Algoritmo Genético (AG) é um método meta-heurístico de otimização, onde técnicas de heurísticas e ações probabilísticas são mescladas para guiar uma busca pela melhor solução de um problema complexo em todo o espaço de pesquisa, onde não se deseja parar quando se encontra soluções boas, mas sim diante da solução ótima. Eles adotam um processo adaptativo e paralelo de busca de soluções em problemas complexos. Disse-se que o processo é adaptativo, haja vista que as respostas existentes em cada momento influenciam a busca por futuras soluções e o paralelismo deste processo é decorrência natural do fato de que uma variedade de soluções são consideradas a cada momento. (GOLDSCHMIDT, 2010)

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AGs E SEUS ELEMENTOS

Os algoritmos usados para resolver problemas de otimização podem ser classificados em determinísticos ou probabilísticos. Os AGs usam regras probabilísticas (ou estocásticas) e não determinísticas de transição, as quais baseiam-se em processos aleatórios, nos quais são feitas repetições gerando iterações, onde ao fim de um número pré-estabelecido, soluções ótimas ou com alta qualidade podem ser encontradas.

Eles são classificados como métodos evolutivos, pois considerando sua base fundamentada na teoria da evolução de Darwin e como vantagens de seu uso, tem-se o fato de uma gama de valores serem verificados e não somente uma única solução. Esta ação promove uma facilidade na busca por todo espaço de pesquisa.

Partindo do pressuposto que os AGs foram desenvolvidos a partir da observação da natureza, Goldschmidt (2010) apresenta a seguinte tabela de analogias.

Tabela 3: Analogias sobre evolução natural e os AGs

Evolução Natural	Algoritmos Genéticos
Meio ambiental	Problema
Indivíduo	Solução
Cromossomo	Representação (palavra binária, vetor, etc)
Gene	Característica do problema
Alelo	Valor da característica
Loco	Posição na palavra, vetor
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Estrutura submetida ao problema
Reprodução sexual	Operador de cruzamento
Mutação	Operador de mutação
População	Conjunto de soluções
Gerações	Ciclos

Fonte: Goldschmidt (2010)

Os AGs trabalham da seguinte maneira:

1. Criação da geração inicial – cria-se uma população de indivíduos ou cromossomos (possíveis soluções), através de um processo aleatório.
2. Seleção – são formas de indicar quais os melhores indivíduos (cromossomos) dentre todas as soluções modeladas, serão submetidos aos operadores genéticos. Alguns dos métodos mais utilizados para seleção são:
 - 2.1. Roleta – proposto por Holland (1975), declara que cada indivíduo tem um valor associado à sua aptidão, ou seja, sua capacidade de resolução do problema. Dá-se, a cada indivíduo, uma porcentagem na roleta, como podemos ver na figura 7, desta forma, a roleta é girada e os indivíduos são selecionados. Aqueles que detiverem maior espaço na roleta, terão maiores chances de serem selecionados. A cada giro da roleta, um novo indivíduo é selecionado.

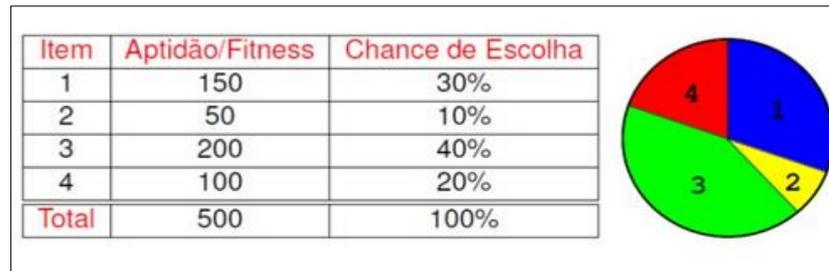


Figura 7: Representação do método roleta
Fonte: Adaptado de Paulo Remoli, 2012.

2.2. Torneio - Este é um método muito usado, tendo em vista sua eficiência e simplicidade de implementação, pois preserva a diversidade da população, onde a escolha é feita através da comparação do valor da função de avaliação entre indivíduos que participem do torneio.

2.3. Elitista – muitos métodos de seleção consideram somente os descendentes obtidos da geração atual para composição da geração futura e descarta o restante dos indivíduos. Assim, esta técnica consiste em reintroduzir o individuo melhor avaliado de uma geração, na seguinte, o que previne contra a perda de informações importantes presentes em indivíduos de alta aptidão.

3. *Crossover* – Esta é a etapa de “cruzamento” de indivíduos. Neste momento, haverá uma combinação de pais, os quais já foram escolhidos no processo de seleção, tendo em vista as suas aptidões para produzirem filhos. Existem vários métodos de cruzamento como: o cruzamento uniforme, o cruzamento de um ponto, cruzamento de dois pontos, *Partially Mapped Crossover* – PMX ou Cruzamento Parcialmente Mapeado. Será dada ênfase a explicação do PMX, pois este é usado na pesquisa em questão.

3.1. *Partially Mapped (Matched) Crossover* – PMX – é um método sugerido por Goldberg e Lingle em 1985 (VASANT, 2012) e pode ser visto como uma extensão do cruzamento de dois pontos. Ele usa um procedimento de reparação especial para resolver ilegitimidade causada pelo cruzamento simples entre dois pontos. Este tipo de cruzamento tem sido amplamente usado no ramo dos problemas de combinação. Abaixo será realizada uma demonstração deste método por passos:

1º passo – duas *strings* são alinhadas e dois pontos de cortes são uniformemente selecionados aleatoriamente ao longo da *string*. Os dois pontos de corte, aqui simbolizados pelo (| - *pipe*), selecionam a seção que será usada na troca de posições entre os pais.

Considerando as duas Strings abaixo:

Pai A 4 8 7 | 3 6 5 | 1 10 9 2

Pai B 3 1 4 | 2 7 9 | 10 8 6 5

2º passo – Após os dois pontos de corte serem selecionados aleatoriamente, procede para uma sensata troca de posições. Haverá um troca entre os pontos internos ao corte, ou seja, $3 \leftrightarrow 2$, $6 \leftrightarrow 7$ e $5 \leftrightarrow 9$, assim há um mapeamento do Pai B no Pai A.

3º passo – Agora deve haver o mapeamento do Pai A no Pai B, isto é, $3 \leftrightarrow 2$, $6 \leftrightarrow 7$ e $5 \leftrightarrow 9$ gerando a seguinte descendência:

Filho A 4 8 6 | 2 7 9 | 1 10 5 3

Filho B 2 1 4 | 3 6 5 | 10 8 7 9

4. Mutação - Esta atividade tem como principal objetivo a introdução da diversidade genética, pois introduz mudanças aleatórias em determinadas características dos indivíduos. Esta etapa pode ser aplicada ao nível de bit e, desta maneira, os indivíduos produzidos por este operador não são muito diferentes dos originais.

3.4. APLICAÇÕES

A fim de mostrar o quanto os algoritmos genéticos têm sido usados ao longo do tempo, a esta parte do texto será dado um cunho cronológico. Alguns exemplos de implementações estão ligadas à robótica, saúde, petróleo e gás, música e até mesmo nos antivírus e firewalls. Blanchard (1994) mostrou algumas possíveis soluções na área de telecomunicações, utilizando algoritmos genéticos. O lugar do acontecido foi em um evento chamado WCCI'94 – *World Congress on Computational Intelligence* localizado em Orlando, Flórida, onde uma das principais soluções mostradas por Blanchard foi um algoritmo

genético que projetava uma rede óptica especializada no prazo de duas horas, com um aumento de 10% na qualidade em relação aos projetos elaborados pelo homem, sendo que um ser humano projetava esta rede em seis meses.

Um outro exemplo, são as aplicações de algoritmos genéticos nas áreas financeiras, que exigem muito sobre determinado profissional na hora de uma importante tomada de decisão. Um estudo realizado em Centrale dei Bilanci – Italia (VARETTO, 1998), sobre falência e previsão, fazendo uma comparação entre análise discriminante linear (*Linear Discriminant Analysis* - LDA) e um algoritmo genético, chegou-se a uma conclusão que: experimentos com os AGs mostraram redução no tempo de obtenção de uma resposta, onde esta tinha uma grande eficiência em relação ao diagnóstico de insolvência. Já os resultados usando método LDA ganhava um nível maior na hora das soluções dos problemas.

De acordo com Linden (2008), o problema da inversão sísmica, que é extremamente importante no campo da geologia, consiste na determinação da estrutura dos dados de subsolo a partir da prospecção geológica, tendo como objetivo primário, obter uma seção geológica ou um modelo 3D. Este problema é extremamente suscetível à aplicação de algoritmos genéticos, pois sua função objetivo é extremamente irregular, sendo altamente não linear, possuindo muitos mínimos e máximos locais e podendo apresentar descontinuidades.

Reconhecimento facial, mesmo com a gama de estudos que se tem até agora, ainda é uma área problemática, onde espera-se identificar os rostos de pessoas utilizando-se outras imagens. Alguns locais onde há o constante uso desta técnica são: os departamentos de polícia, instituições bancárias e universidades. Atualmente, muito utilizada em redes sociais, como no caso do Facebook. Segundo Alves e Gonzaga (2008) O método pré-processa as imagens para reduzir ruídos e detectar bordas, tal que partes características como olhos, nariz, boca, sobancelha e contorno do rosto permaneçam na imagem processada. E onde entram os AGs neste caso? Pois bem, é a partir de um AG intitulado *G-Gold* que se extrai a quantidade de razões áureas existentes em setores da face previamente estabelecidos, o qual gera um cromossomo que através das técnicas de seleção, mutação e recombinação, realiza a evolução de cada indivíduo da base aproximando-o de sua classe por similaridade.

Em relação a linha de pesquisa, estão alguns outros trabalhos com ideias paralelas à apresentada aqui, como: A alocação otimizada de usuários em redes macro-femto co-canal a fim de obter a redução do consumo de bateria dos dispositivos móveis (ALMEIDA, et al.,

2013); a análise de alocação de recursos de rede rádio entre *macrocells* e *femtocells* em cenários não-densos (MARSHOUD, et al., 2015); e a otimização de *clusters* em redes de sensores sem fio visando a redução do consumo de energia por estes minúsculos nós, assim como proporcionar o aumento da quantidade de dados entregues durante a sua vida útil (ADILAKSHMI e RAO, 2016).

Esta pesquisa é dedicada à fase de planejamento de uma rede de próxima geração que disporá *Small Cells* de uma tal forma que haja a melhor oferta de qualidade de serviço ao usuário. Um dos fatores que foram levados em consideração foi a perda de propagação nos cenários estudados, fato este parecido com o que se observa em Pinheiro (2015), onde o autor faz uso de um algoritmo genético que forma a base da construção de uma metodologia que irá ajustar os modelos de propagações descritos na literatura para redes LTE trabalhando em 2.6 GHz, que tinha por objetivo a melhora no desempenho nas predições de atenuação do sinal em ambientes *outdoor*.

Há também um trabalho de extrema importância que contribuiu para solidificar a base desta pesquisa, ele denomina-se *Genetic Algorithms in Wireless Networking: Techniques, Applications, and Issues* e foi escrito por Usama Mehboob, Junaid Qadir, Salman Ali e Athanasios Vasilakos em 2016. Ele apresenta uma série de características que identifica vários motivos para usar AGs em pesquisa relacionadas a redes de comunicações sem fio, como: motivações para o uso de AGs em linhas de pesquisas desta área, sua capacidade de trabalhar em ambientes totalmente inconstantes, habilidade de encontrar uma boa resposta para um problema dentre várias soluções, sua escalabilidade e natureza paralela.

Os exemplos descritos anteriormente, demonstram que um problema de nível complexo, graças aos conceitos e processos dos algoritmos genéticos, podem ter uma solução provável e eficaz encontrada em menor tempo, quando comparados a outros modelos utilizados na resolução deste tipo de problema. E ainda é perceptível que este paradigma tem sua aplicabilidade garantida junto aos pesquisadores ou engenheiros dedicados a construir suas redes de comunicações sem fio, pois ele auxilia no momento do planejamento destas redes, aumentando assim a certeza no oferecimento aos usuários de serviços com a qualidade desejada.

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

No instante em que se pensa em desenvolver qualquer solução, espera-se que esta execute suas tarefas em menor intervalo de tempo, com maior agilidade, menor custo, apresentando facilidade em sua manutenção, entre outras características, porém, a mais importante é a satisfação das necessidades dos seus futuros usuários.

Dentre todas as características intrínsecas a um sistema, o desempenho é uma das mais importantes e que deve ser levada a testes rigorosos, pois está ligada ao rendimento da aplicação ou dos dispositivos quando em execução. Não somente os usuários, mas os desenvolvedores e analistas, esperam que seus sistemas apresentem o melhor desempenho com o menor custo possível.

Entretanto, essas características não serão alcançadas se etapas do processo de planejamento e construção destas ferramentas não forem muito bem definidas e executadas. Segundo Jain (1991), algumas falhas são observadas em muitos projetos, as quais podem comprometer a sua operação. Estes equívocos, descuidos ou falta de conhecimento sobre o desempenho dos sistemas, podem ocorrer desde a concepção do sistema até o momento do início da produção.

Elencando alguns desses equívocos, os quais alguns autores os denominam como “não intencionais”, estão: a falta da descrição dos objetivos do sistema em construção e suas corretas métricas para avaliações; o uso da abordagem assistemática onde parâmetros, métricas e cargas de trabalho são inseridas de forma arbitrária nos modelos ou nos sistemas em operação, sem contudo levar em consideração o domínio de execução; uso incorreto de técnicas de avaliação, pois os analistas têm preferências por uma técnica específica, no entanto, cada uma das três técnicas existentes tem sua maneira de aplicação estritamente ligada ao ambiente real de operação dos sistemas; e etc.

Por isso a atividade de avaliação de desempenho não deve ser encarada como uma exceção à regra, mas sim como uma atividade procedural e iterativa que proporcionará a base da tomada de decisões em projetos de sistemas, sobre a perspectiva de informações adequadas desde a concepção do mesmo até o momento de sua entrada em produção, visando o controle da objetividade das tarefas que o mesmo deva realizar.

4.1. ABORDAGEM SISTEMÁTICA DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Dentre todos os cenários ligados à avaliação de desempenho de um sistema, a sua maioria é composta de ambientes que não se repetem, ou seja, são problemas únicos. Portanto, as cargas de trabalho e as técnicas de avaliação devem ser customizadas, entretanto as ações que devem ser executadas nestas tarefas são comuns a todos os projetos.

Abaixo são apresentadas, de modo sucinto, cada uma destas ações:

- 1 – Definir o sistema e suas metas: A primeira atividade a ser feita num processo de avaliação de desempenho é declarar os objetivos do estudo, definindo qual é a arquitetura do sistema e apresentar seus limites;
- 2 – Listar os serviços e os resultados esperados: Todo sistema é criado para fornecer um ou vários tipos de serviços. Na medida em que os seus usuários os solicitam, respostas são apresentadas em uma quantidade bem definida, onde parte destas poderiam ser esperadas e outras não. Um fato que exemplifica isto é uma consulta a um banco de dados, onde o mesmo pode trazer ao solicitante a informação correta, trazer a informação incorreta ou mesmo não trazer qualquer resposta;
- 3 - Selecionar as métricas - Este passo é o momento em que critérios, ou seja métricas, serão considerados para que haja a comparação do sistema. Na maioria dos casos os critérios estão relacionados com precisão, velocidade e disponibilidade de serviços;
- 4 - Listar parâmetros: A próxima ação é fazer uma lista dos parâmetros que podem afetar o desempenho do sistema. Esta lista pode ser dividida em parâmetros do sistema e os parâmetros de carga de trabalho. Os primeiros estão ligados as descrições das características de hardware e software, nas quais suas variações quase não existem e os últimos são características de solicitações dos usuários, que tendem a variar muito entre os cenários;
- 5 – Selecionar os fatores de estudo: os fatores serão inseridos em duas listas, em uma serão colocadas os que sofrerão alteração no interstício da avaliação e na segunda constarão os valores estáticos. Os parâmetros que passarão por variações

são chamados de fatores e seus valores de níveis. Para que esta seleção seja feita de forma eficiente, se faz necessário iniciar a avaliação com poucos fatores e posteriormente ir aumentando a quantidade, tendo em vista o tempo para realização da avaliação e os recursos disponíveis;

6 – Escolher a técnica de avaliação: Existem três grandes técnicas de avaliação de desempenho que poderão ser escolhidas: modelagem analítica, simulação e aferição. A escolha da técnica correta dependerá do tempo e dos recursos disponíveis para resolver o problema e o nível desejado de precisão;

7 – Escolher a carga de trabalho: A carga de trabalho é a quantidade de solicitações por serviços que chegam ao sistema em avaliação. De acordo com a técnica escolhida, a carga de trabalho pode ser expressa de inúmeras maneiras, pois se for usada a modelagem analítica, esta carga geralmente é expressa por uma função probabilística de onde provém a quantidade de pedidos. Na simulação, pode-se fazer uso de cópias de listas de pedidos que foram obtidos por meio de medições em sistemas reais. Já na medição, a carga de trabalho pode ser *scripts* de usuários que devem ser executados no sistema. Em todas as alternativas, a carga de trabalho deve ser a mais parecida com a usada no ambiente real;

8 – Desenhar os experimentos: Após a obtenção dos fatores e dos respectivos níveis, há de se decidir sobre qual será a sequência de experiências realizadas, pois elas devem chegar a um fim comum oferecendo o máximo de informações com o mínimo esforço;

9 – Analisar e interpretar os dados: Sabendo-se que em medições e simulações os resultados são aleatórios, devido à natureza estocástica, ao realizar-se a comparação entre duas alternativas, se faz necessário considerar esta variabilidade. A interpretação de resultados é uma parte fundamental neste processo, pois a partir dela surgem os resultados e não as conclusões, onde estas respostas servirão como base para decisões sobre o sistema; e

10 – Apresentar os resultados: A etapa final de todos os projetos de avaliação de desempenho é comunicar os resultados para outros membros da equipe de tomada de decisão. É importante que os resultados sejam apresentados de um modo que sejam facilmente compreendidos.

4.2. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Conforme o período do ciclo de vida de um sistema, de acordo com Obaidat e Boudriga (2010), três técnicas podem ser usadas na avaliação de desempenho de computadores ou sistemas de telecomunicações, são elas: Modelagem Analítica, Simulação e Aferição.

A seguir, serão feitas descrições sobre cada uma das técnicas de avaliação de desempenho citando suas vantagens e desvantagens.

4.2.1. Modelagem

Existem várias definições sobre modelagem em áreas como a ciência da computação, assim como para a modelagem de dados que é utilizada na engenharia de software. Porém, quando se refere a modelagem usada na avaliação de desempenho fala-se sobre um processo complexo que auxilia no fornecimento de medidas, através das quais formulam-se ideias sobre o comportamento de um sistema. A modelagem, mais referenciada como paradigma da abstração, está baseada numa associação de representações gráficas as quais denominam-se “modelos” e num método de cunho aleatório, onde este fornece medidas de avaliações.

4.2.2. Modelagem Analítica

A técnica de modelagem analítica trata-se da representação de um sistema real através da modelagem matemática e por isso necessita de um alto grau de abstração, podendo ser subdividida em dois ramos: determinístico ou estocástico. No primeiro, todos os parâmetros do sistema são previamente escolhidos, já o segundo, faz uso de resultados probabilísticos para identificar ou tentar analisar o comportamento do sistema, por meio de variáveis aleatórias com adequadas distribuições de probabilidade.

Geralmente esta técnica é utilizada para avaliar aspectos de uma única parte entre todo o sistema. O ponto mais negativo no uso desta técnica relaciona-se com a sua dificuldade em descrever, com certa exatidão ou um alto grau de fidelidade, os efeitos das interações existentes entre os componentes do sistema avaliado, por exemplo, a comunicação entre

hardware, software e os módulos de um sistema operacional. Ademais, existem ocasiões nas quais o modelo torna-se muito complexo e portanto, se houver a simplificação das hipóteses haverá uma redução na validade do resultados.

4.2.3. Simulação

Nesta abordagem há um certo nível de abstração onde o modelo que simule o funcionamento do sistema a ser avaliado é construído e este deve apresentar as características funcionais do sistema em uma escala adequada de tempo. Ele deve conter os detalhes do sistema onde nenhuma característica importante deve ser excluída, mas não há a necessidade de todas as características estarem descritas no modelo. Com vistas a melhorar o entendimento sobre esta técnica, apresenta-se a descrição abaixo:

“... a simulação é utilizada para o estudo de problemas, geralmente complexos, para os quais não se dispõe de solução analítica. Em termos mais práticos, consiste no desenvolvimento de um modelo ou representação de uma situação real (ou ainda por existir) e por intermédio do uso do computador, possibilita a realização de experimentos com vários cenários. Desse modo, é uma ferramenta de auxílio na avaliação de sistemas fornecendo uma melhor compreensão ao invés de gerar simplesmente uma solução.” (GARCIA, LUSTOSA e BARROS, 2010, p. 152).

Uma de suas vantagens é que esta técnica apresenta um baixo custo de implementação e consome menos tempo para que os dados de avaliação sejam consumidos, porém como se trabalha sobre uma abstração de um sistema real, a fidelidade das medidas tende a ser menor, comparado à monitoração. Um outro ponto, que detém grande importância quando esta técnica é utilizada, está ligado à quantidade de amostras que devem ser consideradas, tendo em vista que ela está estreitamente relacionada com o grau de assertividade dos resultados.

Para que se possa obter resultados satisfatórios a partir da simulação é necessário, primeiramente, escolher qual o tipo de simulação é a que melhor se adéqua na criação de uma representatividade mais real possível do ambiente que se deseja estudar. Existem vários tipos de simulações que podem ser usados para representar sistemas computacionais ou de telecomunicações, porém os mais citados na literatura são: simulação de Monte Carlo,

simulação baseada em *traces* e simulação baseada em eventos discretos. Abaixo, os três tipos serão comentados com maiores detalhes.

4.2.4. Simulação de Monte Carlo

É um método estocástico que é muito usado para modelar fenômenos probabilísticos complexos, o qual destina-se a obter respostas aproximadas sobre problemas que envolvem inúmeras variáveis aleatórias, as quais não poderiam ser encontradas através dos métodos determinísticos. Quando os parâmetros não são conhecidos, este método pode ser aplicado para encontrar estimativas por meio de várias execuções e replicações de um experimento. Várias áreas do conhecimento fazem uso deste método como o controle de tráfego aéreo, simuladores de conflitos militares, jogos de estratégias e etc.

Hammersley e Handscomb (1964, p. 3), declararam que este método é integrante da matemática experimental que se preocupa em realizar experiências com números aleatórios, assim, este se apresenta como uma expressão geral, na qual as investigações se baseiam no uso de números imprevisíveis e estatística de probabilidade.

4.2.5. Simulação baseada em *traces*

Primeiramente, a partir da observação do comportamento de um sistema extremamente análogo, extraem-se os eventos que se realizam em função do tempo, consolidando-os em um arquivo denominado *trace*. Este, por sua vez, será utilizado como entrada na simulação, visando garantir que a carga do experimento seja a mais real possível, comparada à que será usada no futuro sistema.

É uma técnica muito utilizada quando se deseja analisar algoritmos destinados a alocar recursos, desta forma, conhecendo-se a demanda, esta será inserida na simulação com vista a identificar o comportamento do algoritmo diante da carga que lhe é imposta e dele extrair os dados sobre sua possibilidade de uso diante de uma provável situação real.

Uma característica muito importante é a credibilidade, pois dá-se muito mais valor a uma análise feita através de uma carga oriunda de um sistema real em produção, do que por

intermédio de uma construída através de modelos de distribuição matemáticos, onde serão utilizadas várias abstrações do ambiente real.

Um dos maiores problemas desta técnica é o tamanho dos *traces*, pois devido aos mesmos serem longas sequências de ações, necessitam de um alto poder computacional, tanto no instante de extração quanto no momento do processamento da simulação. Outro fator que dificulta o seu uso é a variação da carga de trabalho, pois quando modelam-se ações que estão diretamente relacionadas com o tempo, sabe-se que estas podem ocorrer de maneiras diferentes ao longo do mesmo.

4.2.6. Simulação baseada em eventos discretos

Inúmeros fenômenos ocorrem em nosso dia a dia que evoluem ao longo do tempo como o crescimento da população, os juros simples ou compostos, reprodução das bactérias e etc, onde estes eventos podem se dar de maneira contínua ou discreta. Quando não há pontos determinantes no tempo para se coletar os dados de um referido sistema, estamos nos referindo à maneira contínua de enxergá-lo. Porém, quando existirem pontos precisos e únicos ao longo da faixa de tempo em que os dados são averiguados, estamos nos referindo à forma discreta de colhê-los. Em um modelo contínuo de simulação o mesmo pode assumir vários valores ao longo do tempo já no modelo discreto ele só poderá assumir um único valor.

Independente da aplicação, toda simulação discreta deve conter, juntamente com um programa principal, os seguintes componentes:

“... escalonador de eventos, mecanismo de controle de tempo (*clock*), variáveis globais que descrevem os estados do sistema, rotinas para simular os eventos, rotinas para entrada de parâmetros, rotinas para coletar resultados, rotinas de inicialização, rotinas para gerenciamento dinâmico de memória...” (KAMIENSKI, 2002, pg. 12)

4.2.7. Aferição

É a técnica que proporciona a coleta de dados mais real em comparação com as outras, haja vista que não há qualquer abstração e se extrai os dados a partir do sistema em produção.

Porém, ela tem uma grande desvantagem ligada a sua aplicação, pois a mesma só pode ser executada quando o sistema já existe e isso gera problemas relacionados ao tempo e custo. Uma outra questão é a quantidade de amostras que devem ser recolhidas, tendo em vista que esta técnica será usada junto com o sistema em produção, onde esta atividade pode causar falhas ao mesmo se não for bem dimensionada.

Assim, no instante da decisão sobre quais das três técnicas será utilizada, a pergunta a ser feita é: O sistema já existe ou não? Se a resposta for afirmativa, a aferição poderá ser executada e proporcionará resultados mais convincentes, entretanto, se o sistema ainda não existe, a modelagem analítica e a simulação são as únicas técnicas a escolher (JAIN, 1991).

A seguir será apresentada uma tabela que auxilia na descrição das situações em que melhor se enquadram cada uma dessas técnicas.

Tabela 4: Critérios para a seleção de uma técnica de avaliação

Critério	Modelagem Analítica	Simulação	Aferição
Estágio	Qualquer	Qualquer	Pós-prototipação
Tempo requerido	Pequeno	Médio	Variado
Ferramentas	Analistas	Linguagens de computadores	Instrumentação
Precisão	Pequena	Moderada	Variado
Avaliação da troca	Fácil	Moderada	Difícil
Custo	Baixo	Médio	Alto
Habilidade de venda	Baixa	Média	Alto

Fonte: Adaptada de Jain (1991)

CAPÍTULO 5 – TRABALHOS CORRELATOS

Com o aumento da demanda por maiores taxas de dados e maior velocidade no fluxo das informações, as *Small Cells*, como já mencionado, foram apresentadas como soluções tecnológicas às quais poderiam suprir estas novas necessidades, uma vez que o poder de tráfego das antigas infraestruturas, em conjunto com suas arquiteturas, não conseguiria fazê-las. Assim, pelo fato delas usarem menor potência e alcançarem um menor espaço de cobertura, se comparado ao alcance das macro-células, elas devem estar dispostas, umas próximas às outras, o que pode gerar interferência entre elas. (FINN, et al., 2015)

Várias possibilidades foram apresentadas a fim de que houvesse a redução desta interferência e que este fato proporcionasse maior qualidade aos serviços oferecidos aos usuários. Uma destas abordagens é o uso da técnica de cancelamento ou supressão de interferência usando múltiplas antenas. Letaief et. al. (2014) expuseram que no cenário em que cada estação base estiver equipada com 4 antenas, a probabilidade de interrupção do sinal, com limite da SINR em 0dB, poderia ser reduzida para menos de 10% em relação a taxa máxima de transmissão - *Maximum Ratio Transmission* (MRT). Eles perceberam que a probabilidade de interrupções com um usuário simples usando *beamforming* é algo em torno de 40% para um limite da SINR de 10dB, mesmo que cada estação base fosse equipada com 8 antenas. Além disso, concluíram que aumentando-se a quantidade de APs ou o número de antenas destes equipamentos, não somente havia aumento na vazão total da rede analisada, mas também o consumo de energia diminuía, desde que as partes das *Small Cells* ligadas a este consumo atendessem a certas condições de uso.

Outro fato importante é a realização de inúmeras pesquisas com o intuito de descobrir ou tentar minimizar às interferências em cenários heterogêneos, as chamadas *HetNets*, isto pode ser verificado através da quantidade de artigos publicados na base de dados do IEEE, a qual foi consultada e retornou 69 itens redigidos entre 2013 e 2015. Os termos usados para filtragem do resultado foram: *Small Cells*, *HetNet* e *interference*.

Abdelnasser et. al. (2014), descreveram no artigo alguns dos desafios que existem na gestão da interferência em redes *HetNets* considerando suas visões, requisitos e principais recursos. Nele os autores citam que as possíveis formas de interferência eletromagnética que

existirão em razão da alocação do espectro em ambientes heterogêneos é um problema que deve ser levado à sério quando se pensa na implementação deste tipo de ambiente, pois estas interferências podem degradar o sinal a tal ponto que, em um determinado momento, não exista mais a comunicação entre qualquer emissor e um receptor de dados.

Indo ao encontro das possibilidades observadas pelos autores do artigo supracitado, inúmeros trabalhos foram feitos ligando a implantação densa das *Small Cells* a uma possibilidade de que esta nova tecnologia estivesse alinhada ao baixo consumo de energia, não somente das próprias estações rádio base mas também dos aparelhos celulares, tornando estas redes altamente sustentáveis e que o conceito de Redes Verdes (*Green Networks*) fosse respeitado.

Cai et. al. (2016) traz, ligada a essa perspectiva, a preocupação de que a implantação massiva das *Small Cells* pode ter um consumo agregado de energia maior do que o das macro-células. Para reduzir o consumo total de energia em redes heterogêneas eles propuseram, de maneira dinâmica através de modelagem matemática, alterar o estado de operação das *Small Cells* entre on/off, isto é, para ligado quando estas estivessem longe de uma macro-célula e desligado quando estivessem mais próximas. Os autores concluíram, por meio de simulações, que o modelo proposto por eles, o qual baseava-se na densidade de usuários e na localização das *Small Cells* apresentava somente 1% a menos de desempenho do que algoritmo ótimo.

Mutairi e Roy (2015) desejavam quantificar o fator de atividade do usuário em uma rede densa de *Small Cells* comparando o desempenho de um esquema de alocação de recursos centralizados, assim como é feito nas redes macro celulares. Os estudos mostraram que por motivo do lento ciclo de reconfiguração em cada abordagem baseada e *Self-Organizing Networks* (SON) usada em cada *Small Cell*, o algoritmo de coordenação não poderia lidar com a forte situação de interferência dinâmica por motivo das ações randômicas dos usuários. Os autores concluíram que se a rede de *Small Cells* estiver saturada, uma partição ortogonal fixa da largura de banda do canal seria a melhor estratégia para lidar com a interferência. Eles também destacaram a importância de modelar a aleatoriedade das atividades dos usuários e padrões de tráfego na concepção e análise de soluções de mitigação de interferências em redes densas de *Small Cells*.

Uma outra pesquisa que aponta a importância das investigações sobre às problemáticas que podem haver com a interferência entre às *Small Cells* e as macro-células e

até mesmo entre as próprias *Small Cells*, haja vista que elas compartilham o mesmo espectro de frequência licenciada, foi conduzida por Akinlabi et. al. (2015). Eles propuseram uma análise sobre alguns esquemas técnicos de mitigação de interferência, dadas as possibilidades mais estudadas pelas empresas e academia, como a reutilização de frações de frequência e o sucessivo cancelamento de interferência, no qual este último implantava um *ranking* de potência do sinal para determinar os cancelamentos mais aptos a serem realizados. Os autores concluíram que todas as atividades relacionadas a redução de interferência entre *Small Cells* dispostas em ambientes densos devem ser tratadas no instante do projeto da rede e que todas as possibilidades analisadas tem seus prós e contras, isto depende muito das condições nas quais os esquemas serão utilizados.

Recentemente, a cooperação multicelular tem sido proposta como uma forma eficiente de reduzir a interferência entre células. Uma abordagem relacionada a este fato está descrita em Li et. al. (2014) onde é proposta uma nova estratégia para coordenar a interferência entre às *Small Cells* denominada *user-centric intercell interference nulling* - UCIIN ou Anulação de Interferência entre células baseada no usuário, no qual, cada usuário consiga selecionar algumas estações (*Base Station* – BS) de coordenação com base na distância entre a estação *Home eNodeB* (HeNB) a qual o dispositivo está associado e a estação que causa a interferência, chamada de *Interference Nulling* (IN). Depois de algumas simulações os pesquisadores perceberam um ganho significativo de desempenho de cerca de 40% quando do uso da estratégia de coordenação proposta, além do que o esquema supera alguns outros métodos de anulação de interferência.

Outra linha de pesquisa liga-se à deficiência sobre o controle das quantidades e o gerenciamento das localidades, por parte das operadoras, das instalações da *femtocells*. Wei Li et. al. (2012) explica que pelo fato das *femtocells*, tipicamente serem instaladas no intuito de cobrir uma pequena área geográfica, como apartamentos residenciais ou escritórios e serem dispositivos *plug-and-play*, ou seja, terem a sua implantação feita pelo usuário final, o que é citado como “forma randômica” pelos autores, elas estão suscetíveis de terem suas áreas de coberturas sobrepostas umas pelas outras, o que causaria uma perda significativa de desempenho em todo o sistema.

Assim, com a finalidade de reduzir a interferência entre este tipo de *Small Cell* disposta em um ambiente de implantação denso e utilizar recursos do espectro de forma mais eficiente, Wei Li et. al. (2012) propõem um esquema de atribuição de sub-banda com o

agrupamento destes APs realizado de forma dinâmica denominado “Esquema de Atribuição de Sub-banda com Agrupamento Dinâmico” (*Dynamic clustering Based Sub-Band Allocation - DCSA*). A sequência das atividades para se chegar ao objetivo desejado era:

- 1° - O DCSA constrói um gráfico de interferência ponderada de acordo com o relatório de medição do usuário;
- 2° - Os *clusters* disjuntos de minimização de Interferência entre as *Small Cells* (*Inter Femtocell Interference - IFI*) são formados por um algoritmo de agrupamento (Max K-cut) com base no gráfico de interferência ponderada.
- 3° - Finalmente, um algoritmo heurístico atribui as sub-bandas a cada *cluster*, maximizando a média da relação SINR.

Um outro trabalho com uma linha de pesquisa muito próxima à realizada nesta dissertação é o de Araújo (2015), pois nele também são extraídas as ideias relacionadas à metodologia de *clusterização* de Wei Li et. al. (2012), porém, elas passam por uma nova etapa denominada “validação”, a qual é realizada por um simulador discreto no qual o pesquisador pôde efetuar inúmeros testes, comparações e outros tipos de análises, como as globais, que são as realizadas em todo o sistema e as pontuais, as quais são as análises de um único dispositivo móvel.

Por fim, com vistas a tornar esta dissertação mais completa, buscou-se na literatura um trabalho que apresentasse algum esquema de avaliação de consumo de bateria feito no simulador usado por Araújo (2015), pois isso endossaria esta pesquisa e este fato foi observado em Inoue (2013). O autor implementou um módulo de bateria em um nó móvel LTE presente na biblioteca do simulador OPNET Modeler. Os modelos que foram introduzidos eram o linear e o de Rakhmatov-Vrudhula, porém por algumas limitações do software simulador o modelo de Rakhmatov-Vrudhula não foi validado.

Assim, a tabela 5 mostra um resumo dos principais trabalhos citados como fonte de pesquisa desta dissertação e as lacunas que os mesmos apresentam:

Tabela 5: Comparação entre os trabalhos correlatos.

Referência	Área	Características principais	Principais lacunas encontradas
Letaief et al. (2014)	Teoria da Informação	Análise das taxas de transferência em redes de <i>Small Cells</i> com o uso de múltiplas antenas, comparando o aumento deste número à densidade de usuários conectados. Análise entre o aumento da densidade de <i>Small Cells</i> e o consumo de energia.	Não há abordagem sobre o uso de uma técnica de gerenciamento de interferência entre as <i>Small Cells</i> , incluindo seus efeitos diante da eficiência energética.
Abdelnasser et. al. (2014)	Alocação de recursos em rede celular com duas camadas.	Proposta de algoritmos de baixa complexidade para a construção de <i>clusters</i> que visavam a redução da interferência celular pela alocação de potência.	Não considerou-se diferentes fluxos de dados com diferentes requisitos de QoS. Não houve observação sobre a eficiência energética do modelo.
Cai et. al. (2016)	Estudo sobre eficiência energética em redes contendo <i>Small Cells</i> .	Análise da eficiência energética sobre um cenário denso de implantação de <i>Small Cells</i> e sua relação com as cargas de tráfego.	Não considerou-se diferentes fluxos de dados com diferentes requisitos de QoS.
Mutairi e Roy (2015)	Gerenciamento centralizado do nível de interferência em redes densas de <i>Small Cells</i>	Este resultado ressaltou a importância da modelagem de atividades aleatórias do usuário, padrões de tráfego, e análise de soluções de mitigação de interferências entre <i>Small Cells</i> .	Validação puramente matemática dos dados obtidos. Não houve opção por métodos de simulação com cargas desenvolvidas baseadas em padrões reais.
Akinlabi et. al.(2015).	Gerenciamento e mitigação de interferência em redes de <i>Small Cells</i>	Avaliação de diferentes esquemas técnicos de mitigação de interferência em redes heterogêneas envolvendo <i>Small Cells</i> e <i>macrocells</i> .	Não considerou-se diferentes fluxos de dados com diferentes requisitos de QoS e o crescimento ou redução exponencial no número de <i>Small Cells</i> , isto baseado em um possível cenário real.
Li et. al. (2014)	Cooperação Multicelular	Cooperação multicelular usada como proposta eficiente na redução da interferência entre células.	Ausência do uso de técnicas de gerenciamento dos tipos de interferência.

We Li et. al. (2012)	Gerenciamento e mitigação de interferência em redes de <i>Small Cells</i>	Esquema de atribuição de sub-bandas com agrupamento das <i>Small Cells</i> feito pelo algoritmo DCSA.	Uso exclusivo de métodos puramente matemáticos para validação dos dados.
Araújo (2015)	Validação de modelagem matemática através de simulação	Validação e comparação de modelo matemático através de simulação computacional discreta.	Não houve consideração sobre os modelos de interferência em <i>HetNets</i> ou redes densas.
Inoue (2013)	Análise do consumo de bateria dos dispositivos móveis	Implementação de um modelo de descarga de bateria em um simulador discreto.	Quando a validação foi feita não houve consideração sobre os modelos de interferência em <i>HetNets</i> ou redes densas.

Dentre todos os trabalhos citados, três foram utilizados como base para esta dissertação: a pesquisa de Wei Li et. al. (2012), pelo fato dela apresentar um algoritmo de *clusterização* que tinha como função principal reduzir a interferência entre *Small Cells* em uma rede densa; Araújo (2015) o qual recriou este algoritmo e o implementou em simulações com novos objetivos e cenários de aplicação e Inoue (2013) o qual implementou no simulador utilizado nesta pesquisa o modelo linear de descarga de bateria de um dispositivo móvel.

5.1. INOVAÇÃO DESTE TRABALHO

Em todos os trabalhos supracitados há a identificação da problemática existente entre o oferecimento da qualidade de serviço, que deve ser feito aos usuários das novas redes celulares e o controle/gerenciamento da interferência co-canal ou de canal adjacente, juntamente com a minimização do consumo de energia pelas estações rádio base, sejam elas *macrocells* ou *Small Cells*.

Se faz perceptível, através do levantamento bibliográfico anterior, que a interferência entre as *Small Cells* e as macro-células foi bastante estudada e já se tem uma grande quantidade de dados sobre este fenômeno, porém Mutairi e Roy (2015) afirmam em seu trabalho que por motivos de novas arquiteturas estarem sendo construídas a fim de alcançar

novos requisitos de desempenho sobre as redes de dados móveis, existe a necessidade de se estudar a interferência entre as próprias *Small Cells*.

Observa-se também que os métodos originários da computação evolucionária, como os algoritmos genéticos, vem sendo ao longo da história, bastante utilizados visando a solução de inúmeros problemas os quais possuem um grande conjunto de possíveis resposta e nesta perspectiva que esta dissertação está fundamentada, pois ela vem fazer uso deste método, bem desenvolvido, afim de propor soluções eficientes para o oferecimento de alta qualidade para os usuários da novas redes de celulares densas.

Propondo suprir essa necessidade, nesta dissertação apresenta-se um modelo de mitigação de interferência co-canal entre *Small Cells* dispostas em um ambiente denso, o qual está dividido em duas etapas: na primeira, a partir da localização geográfica de cada *Small Cell* será calculada a quantidade de *clusters* que será utilizada na segunda etapa e isto será viabilizado por meio da distribuição de diferentes canais, a partir do compartilhamento equivalente da Banda 1 da *Frequency Division Duplex* (FDD), a todas as *Small Cells*, o que fará com todas tenham a mesma largura de banda para tráfego das informações, porém, usem frequências diferentes; na segunda, um algoritmo genético fará o estudo de aptidão e oferecerá, dentro do espaço completo de soluções, um arranjo adequado das *Small Cells*, apontando quais delas farão parte de cada *cluster*.

Foi usado um modelo de perda de propagação denominado *Indoor Office Environment* ITU-R M.1225, tendo em vista que as próprias bases de pesquisa informam que a maioria das vezes em que há comutação de dados nas redes de telefonia móvel, elas são feitas em ambientes *indoor*. Também, realizou-se um acompanhamento do nível de descarga de bateria dos dispositivos móveis quando a *clusterização* não era usada e quando a mesma o fora. Este fato não foi encontrado, tanto nas pesquisas base, quanto em todas as outras, pois desta forma tentou-se ter uma visão holística sobre o problema, oferecendo maior qualidade de serviço aos usuários com o uso de menos energia pelos aparelhos.

Este estudo apresenta-se relevante a profissionais que realizam a análise de viabilidade e planejamento de redes de comunicações móveis.

CAPÍTULO 6 – DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

6.1. MODELAGEM DO PROBLEMA.

O objetivo desta pesquisa é auxiliar no processo de planejamento da implantação de redes densas de *Small Cells*, oferecendo através de modelos matemáticos e computacionais, com base nas informações das posições geográficas de cada AP em dois cenários, as faixas de frequências em que estes deverão operar. Isto visa o oferecimento de serviços de qualidade aos usuários por meio da mitigação de interferência co-canal que haveria se estas *Small Cells* estivessem usando as mesmas faixas de frequência para realizar a comutação dos dados.

Os resultados das ações descritas acima originam-se do processo de *clusterização* e culminam com o oferecimento de uma possível solução por meio de um algoritmo genético. A seguir cada uma destas abordagens serão explicadas.

A definição de *clusterização* de dados ou análise de agrupamentos, nesta dissertação, seguirá o padrão descrito abaixo:

A tarefa de *clusterização*, também chamada de agrupamento, é usada para particionar os registros de uma base de dados em subconjuntos ou *clusters* de tal forma que elementos em um *cluster* compartilhem um conjunto de propriedades comuns que os distingam dos elementos de outros *clusters*. O objetivo desta tarefa é maximizar a similaridade *intracluster* e minimizar a similaridade *intercluster*. (GOLDSCHMIDT e PASSOS, 2005, p. 73-74)

Diferentemente do que é apresentado sobre a técnica de classificação, na *clusterização* não há conhecimento prévio de qualquer informação sobre os grupos, não havendo predefinição de classes ou classes rotuladas, realizando assim uma forma de aprendizado não supervisionado. Uma das grandes vantagens apresentadas pela técnica de *clusterização* é que a partir da aglomeração de dados similares, pode-se descrever e gerenciar, de forma coerente, as características típicas de cada um dos grupos identificados.

Nesta dissertação os *clusters* são usados como contenedores das *Small Cells* que trabalham na mesma sub-banda de frequência, desta maneira proporcionando uma melhoria significativa na troca de tráfego entre os APs e o servidor das aplicações que são consumidas

por seus usuários, isto pode ser melhor entendido a partir da figura 8, onde no momento: A) temos um exemplo de um cenário sem *clusterização* no qual a cor vermelha significa que todas as *Small Cells* estão usando somente uma faixa de frequência; enquanto que no momento B) observa-se como essa *clusterização* poderia mudar completamente o cenário, pois as quatro cores (vermelho, marrom, verde e azul) representam 4 sub-faixas ou sub-canalais usados pelos APs.

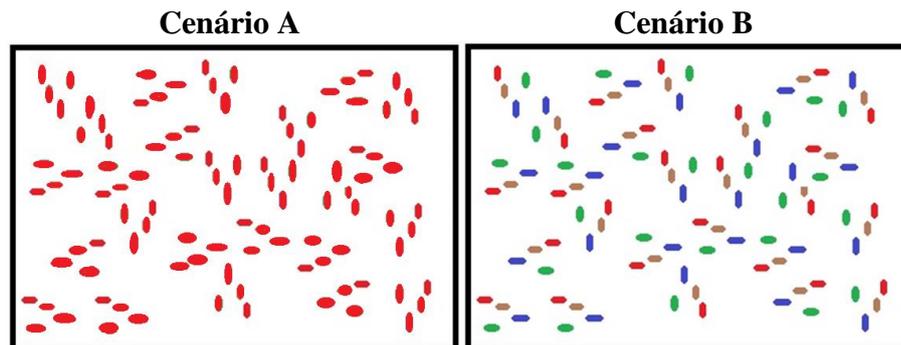


Figura 8: Cenários: A) Sem clusterização e B) Após a clusterização
Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo fato desta dissertação ser o resultado de uma modificação realizada no algoritmo de *clusterização* desenhado por Wei Li et. al. (2012) e implementado por Araújo (2015), se faz necessário a explanação de todos os procedimentos realizados, não somente aqueles que foram mantidos, mas também aqueles que foram incorporados. Para uma melhor visualização dos procedimentos executados, eles foram graficamente descritos na figura 9.

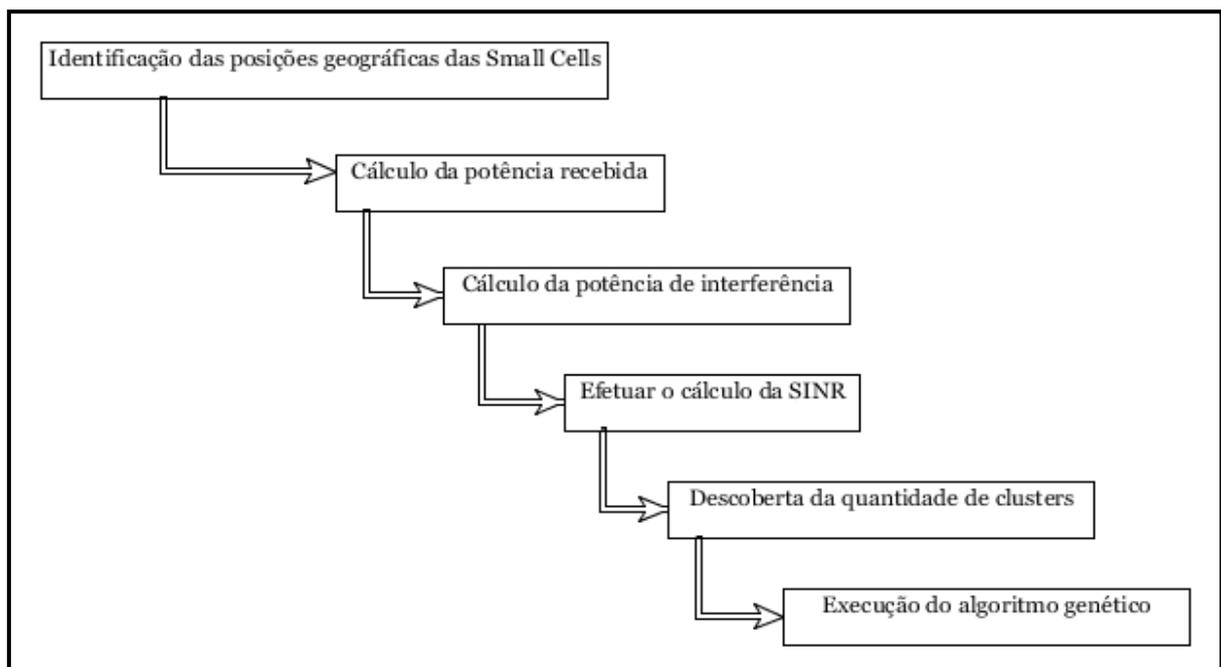


Figura 9: Sequência do modelo proposto
Fonte: Elaborada pelo autor

Para que a quantidade de *clusters* fosse encontrada havia a necessidade de se conhecer as posições geográficas de todas as *Small Cells* e os valores de interferência entre cada uma delas, assim era criado um vetor, denominado de “V”, que continha as coordenadas (x,y) de cada antena e uma matriz “W” que era a responsável por armazenar todos os valores de potências de interesse e de interferência de cada AP.

Para o cálculo dos valores relacionados à potência de interesse e de interferência causadas as *Small Cells*, se fez necessária a inserção, no modelo matemático, de usuários virtuais, que representavam *Smartphones* (Araújo, 2015), caracterizados como pontos no cenário distante 3 (três) metros, cada um de sua *Small Cell*. Foram alocados 60 pontos, um para cada *Small Cell*. Desta forma, foi calculada a potência do nó fonte e a potência de cada nó interferente, onde o valor da potência recebida é dada em (1) e seu valor é usado para calcular o valor de interferência que está em (2):

$$P_r = \frac{EIRP * G_r}{L_s} \quad (1) \quad W_{ij} = \frac{P_i}{P_j} \quad (2)$$

Na equação (1), **EIRP** é a Potência Irradiada Efetiva que diz respeito ao radiador isotrópico e a variável **G_r** é o ganho das antenas dos APs. **L_s** é a perda de caminho. Na equação (2) o **W_{ij}** significa a interferência que a *Small Cell* de índice **j** causa na de índice **i**, valores estes derivados do índice da linha ou coluna da matriz cujos valores são os identificadores de cada *Small Cell* no cenário, ou seja, se tivermos uma matriz **10 X 10**, **W₇₈** significa que será calculada a interferência que a *Small Cell* de índice **8** causa na de índice **7**. **P_i** e **P_j**, onde **P_r=P_i** ou **P_r=P_j**, definem as potências recebidas do sinal da fonte e de interferência, respectivamente.

De posse da matriz “W” o algoritmo passava a fazer o cálculo do número de *clusters* a partir relação denominada SINR. Yang (2010) relata que a SINR é a relação mais compreensiva quando se deseja realizar um estudo sobre a qualidade de entrega de um sinal, tendo em vista que a mesma se diferencia da relação *Signal to Noise Ratio* (SNR), pois inclui em seu denominador, não somente a potência dos ruídos, mas também a potência de interferência que pode ser oriunda de outras fontes como uma frequência de sub portadora adjacente ou de células vizinhas que estão no mesmo espaço de cobertura.

$$SINR = \frac{Pot_{fonte}}{(\sum Pot_{interferência} * \lambda + No)} \quad (3)$$

A equação 3 representa a fórmula da SINR na qual em seu numerador têm-se a potência da fonte e no denominador encontram-se três variáveis: a primeira é o somatório das potências dos nós interferentes, a segunda **No** é o valor do ruído branco do canal e por último λ é a densidade, que indica a porcentagem de *Small Cells* ligadas em um determinado instante, a qual foi quantificada de acordo com os trabalhos base em 0,5. Para valores da SINR abaixo de um limiar **L**, o qual Wei Li (2012) identificou como mínimo e atribuiu 6dB ao seu valor, um *cluster* era adicionado e este valor era atribuído a variável “M”.

Depois de saber o valor de “M”, ou seja, o valor total de *clusters*, as *Small Cells* seriam inseridas nestes contentores a partir de cálculos totalmente determinísticos, todavia, é nesta fase do esquema que há a inserção do algoritmo genético proposto nesta dissertação. Isto ocorreu pela percepção, não somente da incerteza do contexto no qual os cenários reais são construídos, mas também pela alta capacidade de adaptação que os sistemas de redes de telefonia móvel celulares atuais e futuros devem oferecer.

Um outro embasamento para a inserção do algoritmo genético neste momento do esquema é a constatação de que através dos cálculos determinísticos sempre haverá uma única resposta – combinação das *Small Cells* no interior dos *clusters* - para o problema da interferência, mas utilizando-se um algoritmo genético pode-se avaliar um grande número de soluções e posteriormente analisar qual delas apresenta maior probabilidade de alcançar altos índices de oferta de qualidade de serviços aos usuários das *DenseNets*.

Nos AGs, populações de indivíduos são criadas e submetidas a operações genéticas como: seleção, recombinação (*crossover*) e mutação. Eles buscam simular a evolução das espécies e obter o indivíduo (configuração) mais apto dentro de um intervalo de tempo (gerações) específico.

Para os procedimentos realizados nesta pesquisa, denominou-se como cromossomo ou indivíduo, um possível arranjo que combinava os APs dentro de cada *cluster*. Nesta etapa, baseando-se em inúmeros estudos dentre eles (MALHOTRA, SINGH e SINGH, 2011), criam-se 20 indivíduos, ou seja, 20 cromossomos e cada um deles, terá 60 *Small Cells* dispostas de forma aleatória. Esta maneira estocástica de disposição foi obtida através da

função *randperm* do software de modelagem matemática MATLAB em sua versão R2015a. Este aplicativo computacional foi escolhido por alguns motivos, dentre eles: ser uma ferramenta com um alto grau de aceitação na literatura, interface gráfica de fácil manuseio, ter grande quantidade de documentação disponível para consulta na internet, linguagem de programação já conhecida e ter sido usada por Araújo (2015).

Um indivíduo ou cromossomo nesta dissertação é representado por um vetor onde o seu tamanho expressa a quantidade de *Small Cells* da rede e as subdivisões ao longo do vetor representam os *clusters*. A figura 10 exemplifica um indivíduo de uma rede com 12 *Small Cells*, representadas aqui pelos números que estão dentro de cada posição do vetor, variando de 1 à 12 e 3 *clusters*, representados pelas cores amarelo, azul e verde.

Cluster A				Cluster B				Cluster C			
12	2	7	4	1	10	8	3	6	5	9	11

Figura 10: Indivíduo ou possível solução

Fonte: Elaborada pelo autor

Uma limitação percebida no modelo de cromossomo proposto é a de obrigatoriedade da relação do número de *Small Cells* pelo número de *clusters* ser exata. Assim, visando mitigar este problema, em redes onde não havia esta relação, inseriam-se *Small Cells* “desligadas” nos cromossomos, as quais participavam normalmente das operações genéticas, mas não alteravam o resultado final, pois não possuíam potência de operação.

Na fase do cálculo da aptidão dos indivíduos, foram consultados os valores da relação SINR de cada cromossomo já obtidos, pois estes números serviriam de base para a seleção dos pais e trabalhariam como índices para o aumento da qualidade das soluções apresentadas pelo algoritmo genético

O método de seleção por roleta foi utilizado, onde os indivíduos com maior valor da SINR, ou seja, melhores aptidões possuíam maiores chances de serem escolhidos. O tipo de cruzamento usado foi o PMX - *Partially Mapped Crossover* pretendendo evitar redundâncias de *Small Cells* nos cromossomos. Logo após estas ações, os filhos selecionados tinham 5% de chance de sofrerem mutação, onde um gene aleatório era permutado, a fim de inserir uma diversidade na população. Todas as etapas do AG deram-se de forma recursiva até que o mesmo alcançasse o parâmetro de parada, ou seja, 1000 épocas, onde este valor foi estipulado

devido a momentos de grandes convergência locais entre 100 e 600 épocas. Na figura 11 observa-se o pseudocódigo do algoritmo genético usado nesta pesquisa.

```

INÍCIO
  Cria população aleatória de indivíduos
  População inicial se torna a população atual
  época = 0
  critério de parada = 1000
  enquanto época < critério de parada faça
    para cada indivíduo da população atual
      Computar aptidão do indivíduo
    Seleciona pais da população atual através de roleta
    Cruzamento dos pais selecionados gerando filhos
    para cada filho gerado
      teste para possível mutação
    Filhos tornam-se geração atual
  época +1;
  fim
  Armazena o indivíduo com melhor aptidão
FIM

```

Figura 11: Pseudocódigo do algoritmo genético
Fonte: Elaborada pelo autor

Visando o embasamento estatístico, a partir do Teorema do Limite Central o qual afirma que “... a soma de n variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas é aproximadamente normal, desde que n seja suficientemente grande.” (VIEIRA, 2012, p. 119) e o significado da expressão “suficientemente grande” ter sido adotado segundo o que está descrito em Navidi (2012, p. 168) como “Evidências empíricas sugerem que, para a maioria das populações, uma amostra de tamanho 30 ou mais é suficientemente grande para que a aproximação normal seja adequada.”, repetiu-se o algoritmo 31 vezes, gerando 31 cromossomos.

Assim, calculavam-se as médias desses 31 cromossomos e posteriormente as médias destes últimos 31 valores, ou seja, pretendia-se conseguir a “média das médias”. Destes últimos 31 valores, foi extraído um Intervalo de Confiança (IC), que significa o grau de confiabilidade de uma estimativa, com margem de erro de 5%, nos quais dois limiares foram obtidos, ou seja, se o AG fosse mais uma vez executado, haveria uma probabilidade de 95% de encontrarmos uma boa solução com valor entre os limiares do intervalo. Nas tabelas abaixo se encontram os valores dos cálculos do IC.

Tabela 6: IC – Cenário **fixo** - 4 clusters

MÉDIA DAS MÉDIAS	830,87mW
DESVIO PADRÃO	112,15
ALFA	0,05
Nº DE TERMOS	31
INT CONFIANÇA	39,48
LIMITE INFERIOR	791,39 mW
LIMITE SUPERIOR	870,35 mW

Tabela 7: IC – Cenário **fixo** – 6 clusters

MÉDIA DAS MÉDIAS	1763,47mW
DESVIO PADRÃO	357,16
ALFA	0,05
Nº DE TERMOS	31
INT CONFIANÇA	125,73
LIMITE INFERIOR	1637,73mW
LIMITE SUPERIOR	1889,2mW

Tabela 8: IC – Cenário **aleatório** - 4 clusters

MÉDIA DAS MÉDIAS	2529,32mW
DESVIO PADRÃO	400,38
ALFA	0,05
Nº DE TERMOS	31
INT CONFIANÇA	140,942
LIMITE INFERIOR	2388,38mW
LIMITE SUPERIOR	2670,26mW

Tabela 9: IC – Cenário **aleatório** – 6 clusters

MÉDIA DAS MÉDIAS	4731,12mW
DESVIO PADRÃO	515,281
ALFA	0,05
Nº DE TERMOS	31
INT CONFIANÇA	181,389
LIMITE INFERIOR	4549,73mW
LIMITE SUPERIOR	4912,51mW

Desta maneira, o cromossomo que tivesse a sua média, isto é, o valor da SINR mais próximo ao limite superior do intervalo de confiança e também fosse maior ou igual à “média das médias”, era escolhido.

6.2. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

Duas variáveis de suma importância deveriam ser definidas para a construção do modelo: a quantidade de nós que seriam implementados e o local de implantação das *Small Cells*. Sabendo-se que inúmeros cenários, citados na literatura, poderiam ser usados nesta dissertação, deu-se preferência àquele que possuísse unicamente o andar térreo, uma vez que o modelo de mitigação apresentado nesta dissertação não sustenta os cálculos para construções com 1 (um) ou mais andares.

Desta maneira, a primeira variável foi obtida através do embasamento colhido de Giménez *et. al.* (2013), nele os autores consideraram um cenário ultra-denso onde haviam 60 *Small Cells* afastadas umas das outras por uma distância de 10 metros. A segunda variável foi retirada da pesquisa de Alshami *et. al.* (2014) na qual os autores recriaram um ambiente

indoor representativo de um hospital com somente o andar térreo. Esta representação foi importante pelo fato de que nestes tipos de locais há uma série de divisões entre as salas, o que obrigou o uso de um modelo de perda de propagação diferente do que foi usado por Araújo (2015) e que é mais próximo do real, ou seja, nesta dissertação foi empregado o modelo *Indoor Office Environment* - ITU-R M.1225.

Portanto, dois cenários foram construídos, cada um contendo 60 *Small Cells* com uma dimensão de 10.000 m². O primeiro apresentava *Small Cells* equidistantes 10 metros em linhas horizontais/verticais, porém não havia nenhuma no ponto (x, y) igual a (0, 0) do plano cartesiano representativo do modelo; e no segundo, as *Small Cells* estavam dispostas de maneira desordenadas como pode-se observar na figura 12.

Para esta pesquisa foi utilizada a *Release 8* do LTE devido à limitação da versão do simulador usado na validação do modelo, porém a proposição aqui construída também serve para a *Release 10 (LTE-Advanced)*.

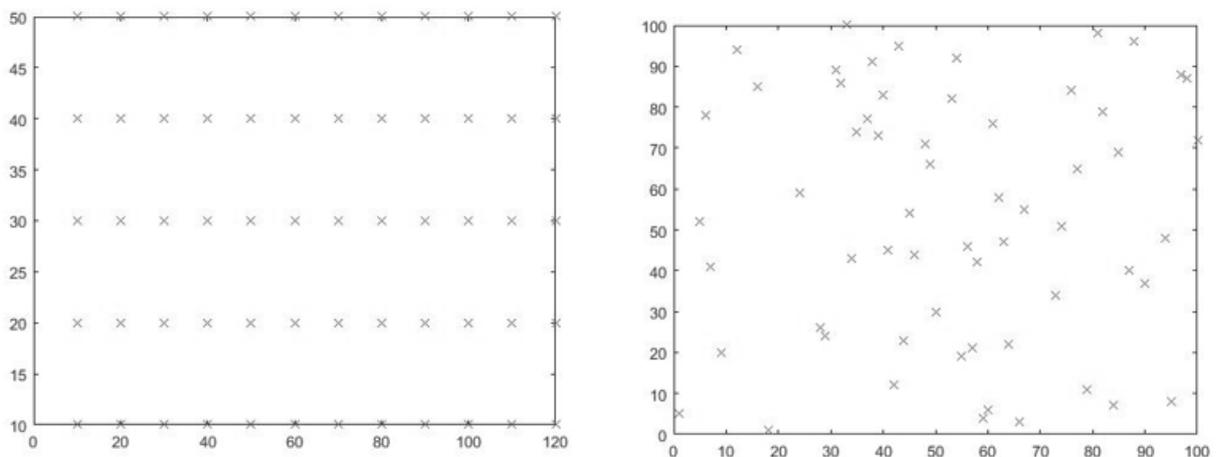


Figura 12: 60 *Small Cells* dispostas a) de 10 x 10 e b) aleatoriamente

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo fato de existir na *Release 8* uma extensão de uso de 60 MHz no espectro da Banda 01 da FDD usada por Araújo (2015) e terem sido obtidas as quantidades de 4 e 6 *clusters* pelos cálculos iniciais advindos do algoritmo recriado pelo mesmo autor, definiu-se que as larguras de bandas usadas seriam de 15 MHz e 10 MHz tanto para *downlink* quanto para *uplink*, respectivamente, o que aglomerava de 10 a 15 *Small Cells* em cada *cluster*. Este fato pode ser observado através de uma representação vetorial de um cromossomo dada na figura 13. Nela há um cromossomo com 60 posições, ou seja, 60 *Small Cells*, dividido em 4 *clusters* o que faz com que cada um deles tenha 15Mhz de toda a largura de Banda da faixa 1 da FDD.

Cluster / Largura de banda		1º cluster / 15 MHz					4º cluster / 15 MHz					
Espaço usado FDD		1920–1935/2110-2025					1965–1980/2155-2070					
Indivíduo	Posições do indivíduo	1	2	3	4	5	n	56	57	58	59	60
	Índice das <i>Small Cells</i>	14	22	31	1	49	...	5	6	38	11	9

Figura 13: Exemplo de indivíduo ou possível solução com 60 *Small Cells*
Fonte: Elaborada pelo autor

6.2.1. Composição dos cenários de simulação

Baseando-se no trabalho desenvolvido por Cardoso (2016), no qual a autora descreve que “... a modelagem e execução dos experimentos deve ser conduzida de maneira justa para todos os cenários, de forma a oferecer resultados consistentes e coerentes.” que esta parte da pesquisa foi executada. A autora também apresenta uma sugestão de metodologia, como uma melhor prática a qual foi utilizada, com algumas alterações, nesta dissertação.

Na fase de estudo do sistema fez-se um levantamento bibliográfico sobre padrões ou melhores práticas, pois algumas tecnologias ainda não detém estes documentos, que serviriam para criar cenários mais reais possíveis, a fim de que houvesse, na simulação computacional, uma extrema relação com um ambiente real.

Dentre as várias documentações que foram utilizadas na criação dos modelos abordados nesta pesquisa estão: as que descrevem as características dos sistemas LTE e LTE-*Advanced*, as referente à análise do impacto da interferência eletromagnética no desempenho das redes celulares densas, além disso foram analisados os aspectos ligados à eficiência energética das atuais redes de telefonia celular.

Com isso dois cenários foram simulados. No primeiro pensou-se que haviam locais que ainda não tinham sido construídos e estes não tinham paredes ou lajes, isto é, uma possibilidade de inserção das *Small Cells* na fase de projeto do prédio ou de uma residência, por isso, neste ambiente elas estão com as mesmas distâncias umas das outras. No segundo cenário, procurou-se simular uma situação na qual o prédio ou residência já havia sido construído e as *Small Cells* foram sendo instaladas pelos usuários de acordo com as necessidades específicas de cada um.

Assim como em Cardoso (2016) “... potência de transmissão e recepção dos dispositivos, canais de frequência, largura de banda, ... área de cobertura, capacidade de vazão, dentre outras...” foram consideradas, as quais estão ligadas à camada física do padrão LTE, pois é ela quem fornece o suporte aos requisitos das aplicações em conjunto com as características das antenas.

Para que esse objetivo fosse alcançado três tipos de tráfegos, cada um com seus próprios atributos, foram simulados em momentos distintos: *Vídeo Application*, *File Sharing Application* e *Web Browsing Application*. Esta carga foi a mesma descrita em (CHECKO, HOLM e CHRISTIANSEN, 2014), pois ela se encontra de acordo com os padrões estipulados pelo 3GPP TR 25.896, como mostra a tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de geração de tráfego para simulação.

Parâmetros de tráfego	Valor	Distribuição
Aplicação de vídeo (<i>Vídeo Application</i>)		
Intervalo de tempo entre chegadas	10 quadros/segundo	Constante
Tamanho do quadro	128 x 120 pixels – 17280 B	Log Normal
Início do tempo de deslocamento (fluxo)	min 50; max 3600 segundos	Uniforme
Duração do perfil de carregamento	Média: 180 segundos	Exponencial
Tempo de repetição	Média: 1800 segundos	Exponencial
Compartilhamento de arquivos (<i>File Sharing</i>)		
Tempo de requisição	180 segundos	Período
Média de tamanho do arquivo	2 MB	Log Normal
Desvio padrão do tamanho do arquivo	0.722 MB	Uniforme
Duração do perfil de carregamento	1200 segundos	Exponencial
Tempo de repetição	300 segundos	Exponencial
Aplicação de Web browsing (<i>Web Browsing Application</i>)		
Tempo entre chegadas de páginas	Média: 10 segundos	Exponencial
Propriedades das páginas	Objeto chave: 1KB	Constante
	Número de imagens: 7	Constante
	Tamanho das imagens: min 2 KB e max 10 KB	Inteiro Uniforme

Fonte: Adaptada de Checko (2014)

Os parâmetros genéricos usados no simulador para as estações rádio base e nos dispositivos móveis foram extraídos de (Mutairi e Roy, 2015) e (Tabany e Guy, 2014) os quais estão descritos na tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros genéricos dos cenários da simulação

Small Cells - Parâmetros de configuração	
Parâmetros	Valores
Ganho das antenas em dBi	5
Esquema de duplexação	FDD
Modelo de perda de propagação	Indoor Office Environment
Desvanecimento em dB	4
Número de antenas TX/RX	2
Potência de transmissão em dBm	20
Número de usuários conectados	1
Padrão de antena	Omnidirecional
Equipamento do usuário (UE) - Parâmetros de configuração	
Parâmetros	Valores
Ganho das antenas em dBi	-1
Modulação e índice de esquema de codificação	9
Modelo de múltiplos canais (dl)	LTE OFDMA ITU Pedestrian B
Modelo de múltiplos canais (ul)	LTE SC-FDMA ITU Pedestrian B
Desvanecimento em dB	4
Número de antenas receptoras	2
Número de antenas transmissoras	1

Fonte: Adaptada de Mutairi e Roy (2015) e Tabany e Guy (2014)

As variáveis que foram usadas para a análise do desempenho foram: vazão, atraso, perda de pacotes e a redução do nível de carga das baterias, o que gerou as 12 possibilidades discriminadas pela tabela 12.

Tabela 12: Variáveis para avaliação do modelo

Atraso, vazão, perda de pacotes e descarga de bateria		
Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	Tipo de aplicação
Fixo	4 <i>Clusters</i>	Vídeo
		<i>File Sharing</i>
		<i>Web Browsing</i>
	6 <i>clusters</i>	Vídeo
		<i>File Sharing</i>
		<i>Web Browsing</i>

Continuação		
Cenário	Quantidade de clusters	Tipo de aplicação
Aleatório	4 clusters	Vídeo
		<i>File Sharing</i>
		<i>Web Browsing</i>
	6 clusters	Vídeo
		<i>File Sharing</i>
		<i>Web Browsing</i>

Fonte: Elaborada pelo autor

Pelo fato das comunicações realizadas nesta dissertação simularem um ambiente *indoor*, houve a necessidade de usar um modelo de perda de propagação, ITU-R M.1225, para este tipo de ambiente, onde esta recomendação se encontra intrinsecamente ligada à dispersão e propagação do sinal através de paredes, pisos e estruturas de madeira ou metálicas tais como divisórias e armários. Estes objetos podem produzir efeitos de sombreamento que são calculados pelo desvio padrão por desvanecimento e sombra onde seu valor pode chegar a 12 dB.

$$L = 37 + 30 \log_{10} R + 18.3 n \left(\frac{n + 2}{n + 1} - 0.46 \right) \quad (4)$$

O modelo *indoor* de perda de propagação é medido em dB e está definido na Equação 4, onde R representa a distância em metros entre o transmissor e o receptor e n a quantidade de andares da construção, neste caso zero (0), considerando que os mesmos derivam da representação de um hospital com 1 piso e dimensões 100 X 100 metros. Este modelo era escolhido como parâmetro no simulador de eventos discretos quando o cenário estava sendo construído.

Além disso, houve a preocupação em monitorar a descarga de bateria dos equipamentos dos usuários, a fim de que o modelo não oferecesse somente alta qualidade nos quesitos relacionados ao serviço ou aplicações, mas também à eficiência energética. Para este acompanhamento implementou-se no simulador o modelo linear de consumo de bateria com os mesmos parâmetros de Inoue (2013).

A programação desse modelo foi feita a partir de algumas atividades, dentre elas, as modificações de estados no modelo de processo *phy* do nó móvel *lte_wkstn_adv* como

INIT_0, INIT_3, IDLE, FROM_LL, FROM_HL e a criação de 27 (vinte e sete) variáveis de 4 (quatro) tipos, isto é, 19 (dezenove) do tipo long, 2 (duas) do tipo int, 5 (cinco) do tipo Statehandle e 1 (uma) do tipo Objid, tudo isto usando a linguagem C++. Uma outra modificação consistiu na inserção de uma função denominada *diminuirEnergiaLinear*, onde a mesma é responsável pelo cálculo da quantidade de energia que é gasta quando são executadas as operações de espera (IDLE), recepção (RX) ou transmissão (TX). O código que foi inserido no OPNET pode ser encontrado no ANEXO A desta dissertação.

Abaixo estão os parâmetros inseridos no ambiente de simulação para estudo da eficiência energética do modelo proposto quando era realizada a *clusterização* e a equação que define o modelo linear de descarga de bateria.

Tabela 13: Parâmetros usados no modelo de bateria

Configuração Bateria do UE (miliwatt - mW)	
Modelo Linear	
PHY.CargaInicial	10.000
Modulo bateria	
PHY.Corrente de Descarga - Espera	2.0
PHY.Corrente de Descarga - Transmissão	20
PHY.Corrente de Descarga - Recepção	30
PHY.Data Rate – Recepção (bits/s)	10.240.000
PHY.Data Rate – Transmissão (bits/s)	1.024.000

Fonte: Adaptada de Inoue (2013)

$$C = C' - I * Td \quad (5)$$

O modelo linear de descarga de bateria, o qual foi inserido no simulador utilizado nesta dissertação é expresso pela Equação 5, a qual calcula a capacidade elétrica remanescente **C** de uma bateria, onde **C'** significa a capacidade da bateria no início da operação, **I** é a corrente constante de descarga no período da operação e **Td** é o tempo de duração da operação. Calcula-se **C** sempre que houver alteração na corrente de descarga.

6.3. SIMULADORES DE REDES

Existem muitos simuladores de rede no mercado, cada um com sua especificidade. Nesta dissertação, dentre vários, o simulador discreto *OPNET Modeler 17.5* a (*Educational Edition*) foi escolhido, pois além de ser reconhecido na literatura, ter sido utilizado por dois estudos base desta dissertação (Araújo, 2015) e (Inoue, 2013), ele apresenta uma característica que agilizou o processo de transferência do modelo matemático para a simulação: a abordagem por modelagem gráfica.

Um exemplo de pesquisa na qual o *OPNET Modeler 17.5* também foi usado para simular redes baseadas na tecnologia LTE e LTE-A, no qual o seu autor também se encontrou satisfeito com a ferramenta, foi La-Roque (2015). Ele validou e avaliou o desempenho do seu trabalho da mesma forma como é feita nesta dissertação.

“A técnica utilizada para validar e avaliar o desempenho da proposta deste trabalho é a da modelagem por simulação discreta, com a adoção do software *OPNET Modeler 17.5.A (Educational Edition)*, já que a intenção é modelar, simular, validar e avaliar o desempenho da proposta em sua complexidade, em um ambiente virtual realístico, através de uma interface mais intuitiva, levando em consideração os fenômenos e o dinamismo de um sistema de redes móveis, com seus múltiplos componentes de hardware e software...” (LA-ROQUE, 2015, p. 75)

O *OPNET Modeler* permite realizar a modelagem de diversos tipos de tecnologia como VoIP, MPLS, IPv6, Wireless e LTE proporcionando a análise de redes realísticas no formato de simulação. Esta suite permite testar e demonstrar projetos desenhados para cenários tecnológicos antes deles serem postos em produção, reduzindo o seu custo e o tempo de chegada ao mercado.

6.4. CENÁRIO CRIADO NO OPNET

Para validar a pesquisa os dois cenários criados na fase de implementação foram totalmente transportados para o ambiente de simulação do *OPNET*, isto é, o cenário representativo do prédio em construção e do hospital foram totalmente modelados no simulador, conforme podemos ver através das ilustrações nas figura 14 e 15. A solução (cromossomo) proposta pelo AG, foi extraída do *MATLAB* da seguinte forma: o software matemático apresentava um cromossomo como a solução para o problema de interferência e de forma manual as *Small Cells* eram configuradas no *OPNET* para usar, cada uma, a sua

respectiva banda de frequência. No OPNET, as características das conexões oriundas de Araújo (2015) foram mantidas, as quais estão descritas abaixo:

PPP_adv: Usa o protocolo Ponto-a-Ponto (PPP), com taxa de dados seletiva e que conecta dois nós através de interfaces seriais.

PPP_DS3: Empregada na conexão cabeada, usa o protocolo PPP e tem capacidade de 44,5 Mbps.

100BaseT: É a conexão Ethernet com taxa nominal de 100 Mbps.

As conexões usadas são as mesmas, entretanto, a distribuição das faixas de frequência foram alteradas de acordo com o número de *clusters* que eram simulados, como podemos observar na tabela 14.

Tabela 14: Faixas de frequência usadas na simulação

4 clusters / 4 sub bandas			
Sub banda	Faixa <i>Downlink</i>	Faixa <i>Uplink</i>	Largura de banda
Faixa_1	1920-1935 MHz	2110-2125 MHz	15 Mhz
Faixa_2	1935-1950 MHz	2125-2140 MHz	
Faixa_3	1950-1965 MHz	2140-2155 MHz	
Faixa_4	1965-1980 MHz	2155-2170 MHz	
6 clusters / 6 sub bandas			
Sub banda	Faixa <i>Downlink</i>	Faixa <i>Uplink</i>	Largura de banda
Faixa_1	1920-1930 MHz	2110-2120 MHz	10 Mhz
Faixa_2	1930-1940 MHz	2120-2130 MHz	
Faixa_3	1940-1950 MHz	2130-2140 MHz	
Faixa_4	1950-1960 MHz	2140-2150 MHz	
Faixa_5	1960-1970 MHz	2150-2160 MHz	
Faixa_6	1970-1980 MHz	2160-2170 MHz	

Fonte: Elaborada pelo autor

O agrupamento dado pelo AG dispôs, dentro dos cenários estudados, as *Small Cells* de acordo com as tabelas 15 e 16.

Tabela 15: Arranjo do ambiente de *Small Cells* no cenário fixo

Divisão em clusters	
4 Clusters	
<i>Cluster</i>	Índice das <i>Small Cells</i> de cada <i>cluster</i>
1	7, 56, 58, 22, 6, 60, 39, 9, 47, 12, 37, 55, 41, 3 e 53
2	45, 48, 46, 43, 35, 49, 18, 1, 30, 16, 21, 34, 44, 26 e 57
3	14, 2, 10, 50, 38, 20, 13, 24, 31, 36, 5, 28, 17, 23 e 19
4	8, 52, 33, 27, 51, 54, 4, 59, 15, 42, 25, 29, 11, 40 e 32
6 Clusters	
1	55, 47, 12, 20, 21, 23, 14, 48, 18 e 6
2	26, 33, 35, 17, 19, 58, 60, 41, 15 e 32
3	52, 44, 38, 16, 36, 45, 50, 27, 59 e 25
4	30, 29, 37, 2, 49, 24, 9, 43, 54 e 11
5	42, 51, 4, 46, 40, 7, 53, 56, 39 e 8
6	22, 31, 1, 5, 34, 28, 3, 10, 13 e 57

Fonte: Elaborada pelo autor

Cada uma das *Small Cells* foi alocada em um respectivo *cluster* e a partir daí foram levantados os dados sobre a comparação destes novos dois cenários com o cenário sem *clusterização*.

Tabela 16: Arranjo do ambiente de *Small Cells* no cenário aleatório

Divisão em clusters	
4 Clusters	
<i>Cluster</i>	Índice das <i>Small Cells</i> de cada <i>cluster</i>
1	1, 3, 6, 7, 9, 20, 29, 34, 39, 46, 49, 50, 51 e 59
2	2, 5, 12, 13, 18, 19, 25, 27, 30, 31, 33, 35, 45, 47 e 57
3	4, 8, 11, 15, 16, 22, 24, 26, 32, 36, 40, 43, 52, 56 e 60
4	10, 14, 17, 21, 23, 28, 37, 38, 41, 42, 44, 48, 53, 54e e 58
6 Clusters	
1	1, 4, 20, 21, 23, 27, 43,45, 55 e 59
2	2, 5, 11, 12, 14, 15, 32, 35, 49 e 51
3	3, 17, 22, 31, 33, 38, 41, 42, 46 e e52
4	6, 16, 18, 24, 25, 34, 36, 54, 56 e e58
5	7, 9, 28, 30, 39, 48, 50, 53, 57 e e60

Continuação	
Cluster	Índice das <i>Small Cells</i> de cada <i>cluster</i>
6	8, 10, 13, 19, 26, 29, 37, 40, 44 e 47

Fonte: Elaborada pelo autor

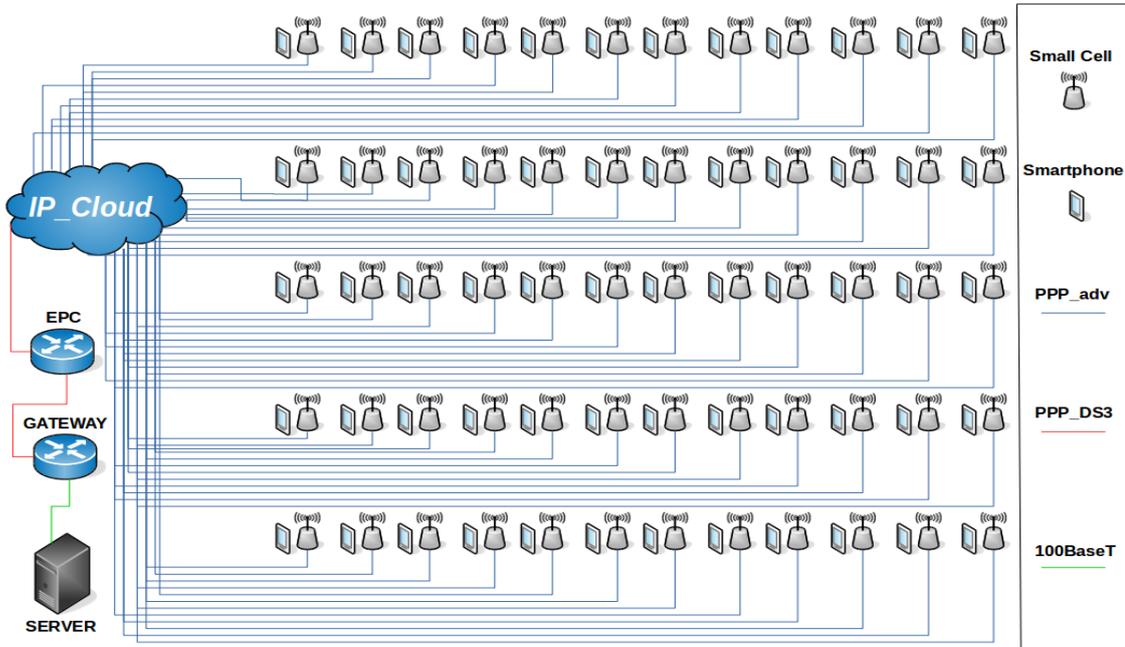


Figura 14: Cenário fixo com as 60 *Small Cells*

Fonte: Elaborada pelo autor

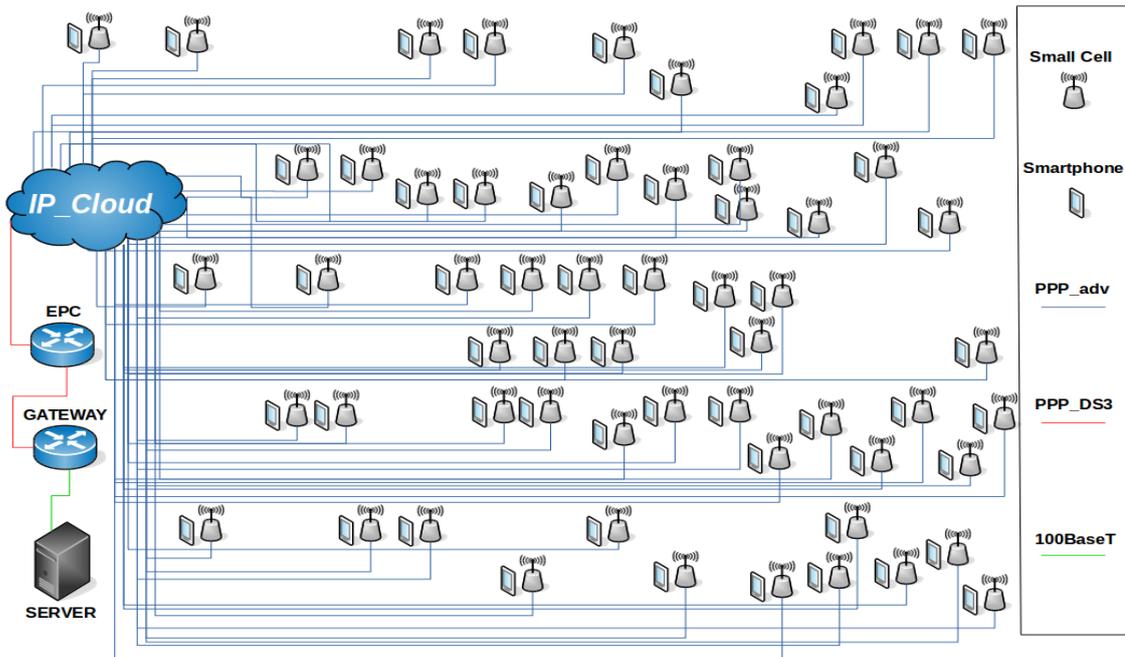


Figura 15: Cenário aleatório com as 60 *Small Cells*

Fonte: Elaborada pelo autor

O cenário 1 pode ser visto através da figura 14 acima, o qual possui 60 *Small Cells* conectadas a uma “IP_Cloud”, por meio de conexões PPP_adv, as quais serão o *backbone* da rede. Um *Evolved Packet Core* - EPCs é conectado ao *backbone* através de uma conexão PPP_DS3 e a um *gateway* pela mesma conexão usada no seu link com a nuvem. Por último é utilizada a conexão 100BaseT conectando *gateway* ao servidor das aplicações.

O cenário 2, também mostrado acima, tem as mesmas conexões que o cenário 1 porém as *Small Cells* estão dispostas de maneira aleatória no ambiente, como pode ser observado através da figura 15.

Para fins de análise dos cenários, foram verificadas as métricas individuais e as globais. Valores de vazão, atraso e pacotes perdidos foram escolhidos tanto no *downlink* quanto no *uplink*. A descarga de bateria foi extraída em todos os momentos de simulação. Os resultados serão mostrados e avaliados na próxima seção.

Uma simulação, com um tipo de aplicação por vez sem tráfego de fundo, ou seja, tráfego concorrente dentro de um mesmo *smartphone*, tinha duração de 300 segundos, com um tempo de *Warm-Up* de 100 segundos, resultando em um tempo efetivo de simulação de 200 segundos. Este período foi escolhido, pois em torno dos 5 minutos de simulação percebeu-se que o sistema chegava a um estado de equilíbrio no qual o mesmo não evoluía.

O hardware usado nas simulações era composto de: 4 processadores com frequência nominal de 2 GHz, 4 MB de memória cache e 8 GB de memória RAM.

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS

Neste momento serão apresentados os resultados que foram obtidos através da execução das simulações realizadas tanto no MATLAB quanto no OPNET. Em cada um dos softwares usados neste trabalho diferentes tipos de informações foram analisadas, a fim de proporcionar a base para as futuras conclusões. No MATLAB, o principal objetivo era a extração do valor da SINR antes e depois da *clusterização*, onde esta foi feita através do uso de um algoritmo genético. No OPNET, dados a respeito de premissas voltadas à análise da qualidade de serviço como as médias de vazão e atraso, juntamente com os valores da perda de pacotes foram coletados. Foram inseridos também neste último, alguns cálculos a fim de acompanhar o comportamento da descarga do módulo de bateria dos equipamentos dos clientes em diversos momentos, lembrando que o modelo implementado foi o de descarga de bateria linear.

Até o limite de 12 horas de execução sobre o hardware já descrito, quando não havia qualquer divisão por *cluster*, nenhum nó usuário realizava qualquer troca de dados com o servidor das aplicações, devido as altas taxas de interferência, porém, nos gráficos apresentados a seguir, poderão ser observados inúmeros valores os quais mostram, que não somente houve troca de tráfego entre os aparelhos dos assinantes e o servidor de aplicações, após a inserção dos *clusters* no cenário, como também pôde-se observar uma melhoria no desempenho do modelo quando passa-se a utilizar 6 *clusters* ao invés de 4.

7.1. UTILIZANDO O MATLAB

Percebeu-se que quando não havia *clusterização*, em qualquer um dos cenários propostos nesta dissertação, não existia tráfego de dados entre qualquer dispositivo móvel e o servidor de aplicação, inviabilizando os serviços e indo de encontro as novas necessidades dos usuários. Este fato comprova que uma proposta de solução para os ambientes densos é de extrema importância.

7.1.1. Cenário fixo

O primeiro cenário, denominado como fixo, caracteriza-se pela disposição de 60 *Small Cells*, afastadas umas das outras por uma distância de 10 metros, tanto na direção horizontal quanto na vertical. A 3 (três) metros de cada uma delas há um dispositivo móvel simulando um aparelho sem fio usado por um usuário comum. Neste ambiente deseja-se comparar os

valores da relação *Signal to Interference Plus Noise Ratio* (SINR) em dois momentos distintos: no primeiro, quando não há nenhum processo de *clusterização*, ou seja, todos os APs estão usando a mesma faixa frequência; no segundo, quando o AG já realizou a *clusterização*. Uma outra informação importante é que se for feita a comparação do cenário a um plano cartesiano, não há *Small Cell* nas coordenadas (0,0).

Quando feita a *clusterização* pelo AG, houve um aumento significativo na SINR em mais de 87% das *Small Cells* dispostas no cenário fixo, algo em torno de 52 APs, o que fica demonstrado através das figuras 16 e 17. O valor da SINR teve seu menor aumento, ou seja, 3dB na *Small Cell* com índice 50 e o maior no AP de índice 27 que foi de 11dB, isto na divisão em 4 *clusters*, já com 6 *clusters* temos um aumento de 4dB na *Small Cell* de índice 32 e de 12dB na *Small Cell* de índice 25.

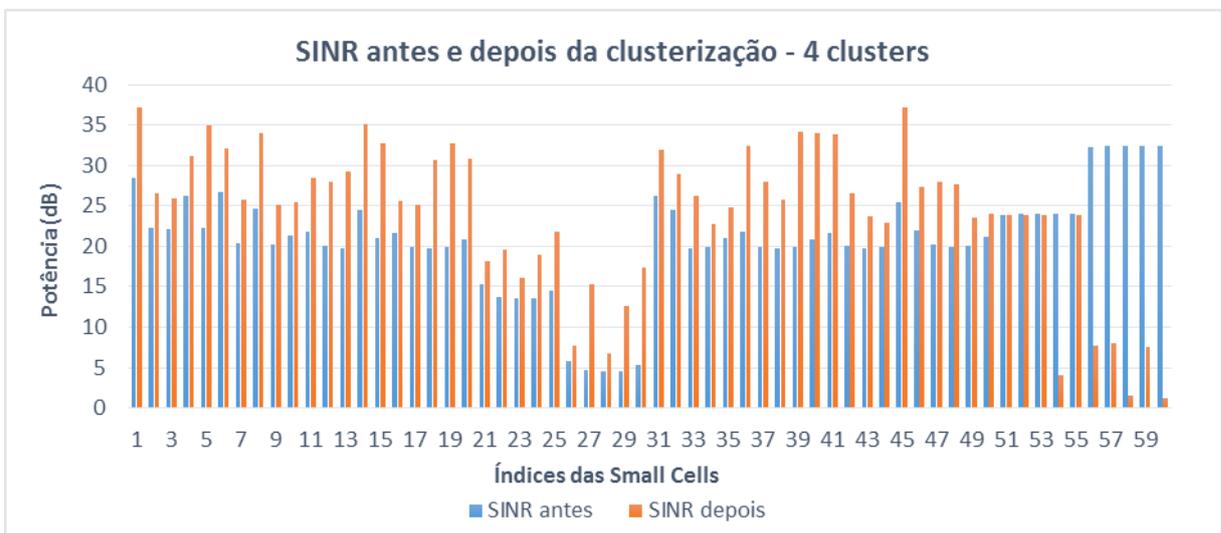


Figura 16: Cenário Fixo – SINR antes e depois da *clusterização* – 4 *clusters*

Fonte: Elaborada pelo autor

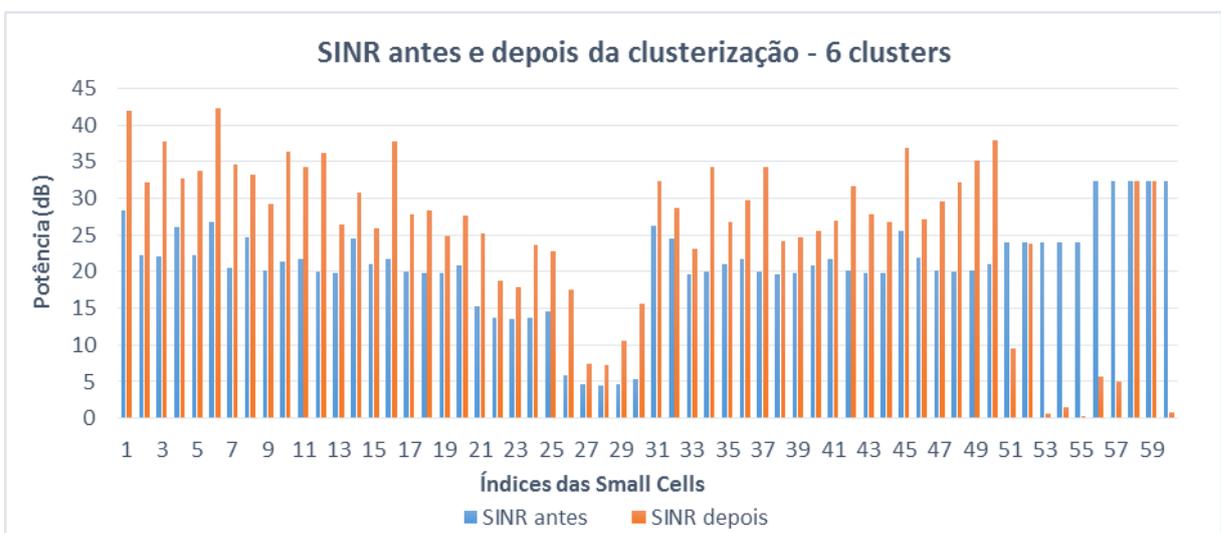


Figura 17: Cenário Fixo – SINR antes e depois da *clusterização* – 6 *clusters*

Fonte: Elaborada pelo autor

No segundo cenário, denominado aleatório, pretendeu-se realizar as mesmas atividades de coleta e análise das grandezas que foram estudadas no cenário anterior, assim como foram usados os mesmos parâmetros, exceto as posições de cada uma *Small Cell*, as quais, neste cenário, estão dispostas em posições geográficas aleatórias.

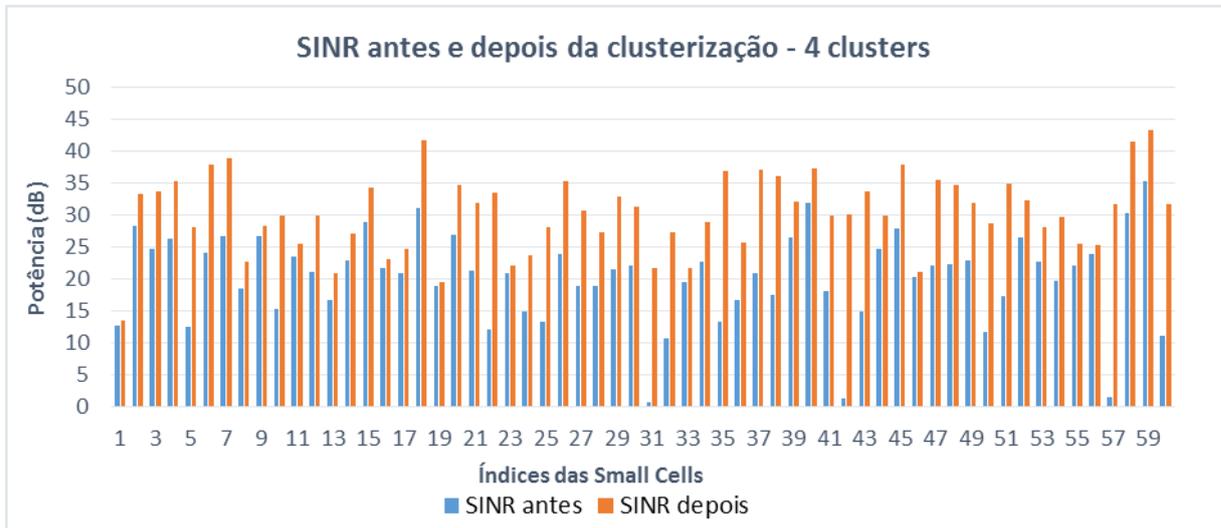


Figura 18: Cenário Aleatório - SINR antes e depois da *clusterização* – 4 *clusters*
Fonte: Elaborada pelo autor

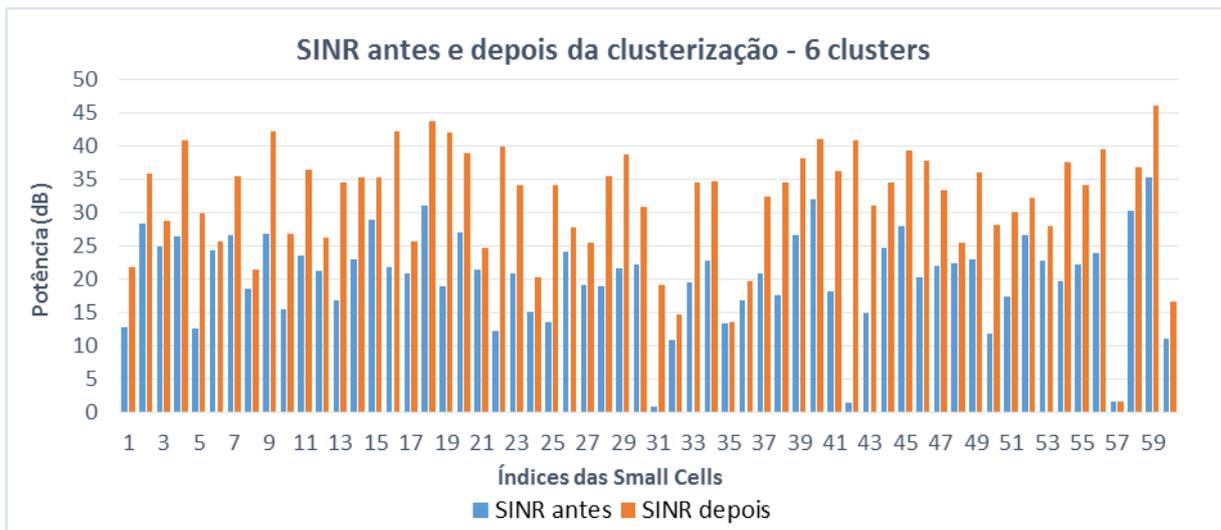


Figura 19: Cenário Aleatório – SINR antes e depois da *clusterização* – 6 *clusters*
Fonte: Elaborada pelo autor

Os números são bons para o cenário fixo, porém foi no cenário aleatório que se obteve o melhor resultado, pois 100% das *Small Cells* dispostas no ambiente com 4 *clusters* tiveram aumento no valor da SINR. O maior aumento, na divisão em 4 *clusters* foi percebido na *Small Cell* de índice 31, que passou de aproximadamente 0,77dB para quase 22dB. Com 6 *clusters* houve um aumento de 1,38dB para 40,82dB na *Small Cell* de índice 42. Esta melhoria só não foi percebida em 2 APs alocados em todo o cenário.

7.2. UTILIZANDO O OPNET

Abaixo serão mostrados os gráficos das médias de atraso e vazão para todas as possibilidades estudadas nesta pesquisa, elas foram obtidas a partir das simulações discretas, a fim de demonstrar a eficiência do modelo proposto.

7.2.1. Resultados globais – Média do atraso

Abaixo estão discriminados os resultados das médias dos atrasos globais de todas as aplicações nos dois cenários e com os dois tipos de *clusterização*. Percebe-se que em todos os momentos ele inicia em aproximadamente 35ms, porém, decai em média para 17ms no cenário fixo e no cenário aleatório ele chega a 11ms quando dividido em 4 *clusters* e 5ms quando implementam-se os 6 *clusters*.

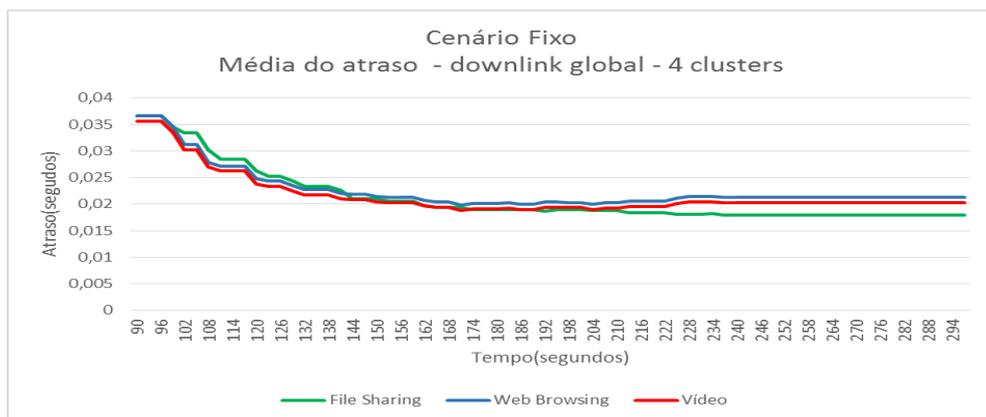


Figura 20: Cenário fixo – Média do atraso global – 4 *clusters*
Fonte: Elaborada pelo autor

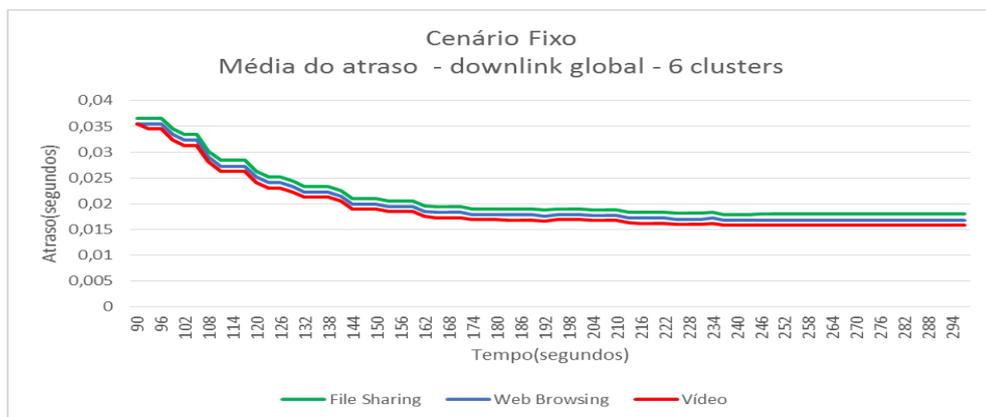


Figura 21: Cenário fixo – Média do atraso global – 6 *clusters*
Fonte: Elaborada pelo autor

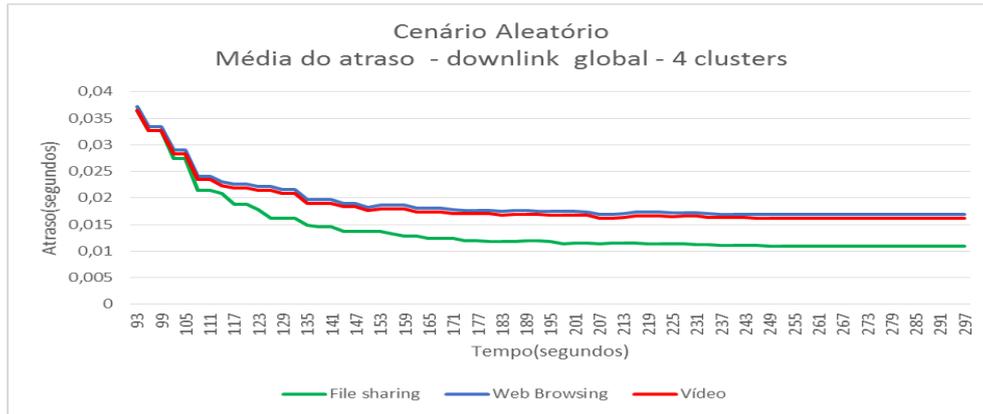


Figura 22: Cenário Aleatório – Média do atraso global – 4 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

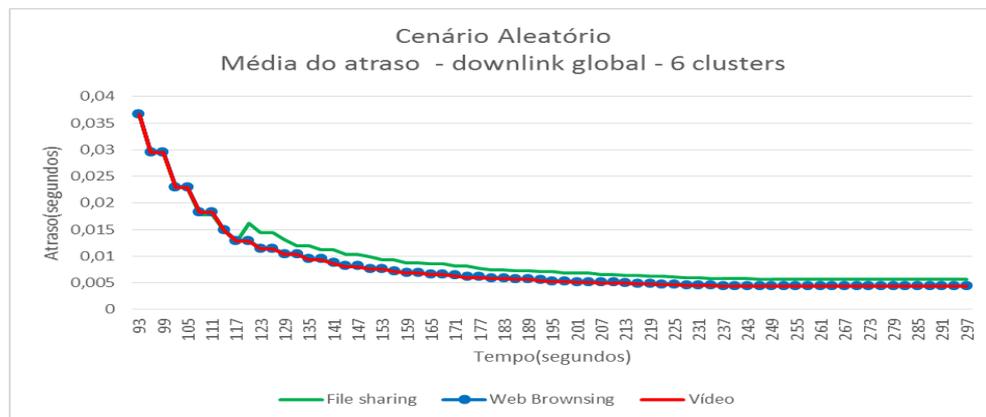


Figura 23: Cenário Aleatório – Média do atraso global – 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

Esses resultados estão dentro dos requisitos exigidos pelo 3GPP em sua recomendação (TS 23.401 V 8.1.0) que é de 300ms para *file sharing* e *Web Browser* e de 150ms para vídeo em tempo real.

7.2.2. Resultados globais – Média da vazão

No tocante à vazão do cenário fixo, percebe-se através das figuras 24 e 25 que após o tempo de *Warm Up* que era de 100 segundos, ela tem seus valores aumentados em 60% para Web, 87% para a aplicação de vídeo e 89% junto à aplicação de *file sharing*.

No cenário aleatório, pela aplicação do modelo proposto, observam-se índices de aumento no desempenho ainda melhores, haja vista que todas as *Small Cells* saem de uma condição de nulidade no tráfego dos dados para alcançar aproximadamente 1600 bits/segundo no cenário com 4 clusters e 3000 bits/segundo no cenário com 6 clusters, ou seja, um crescimento entre as duas formas de clusterização em torno de 88%.

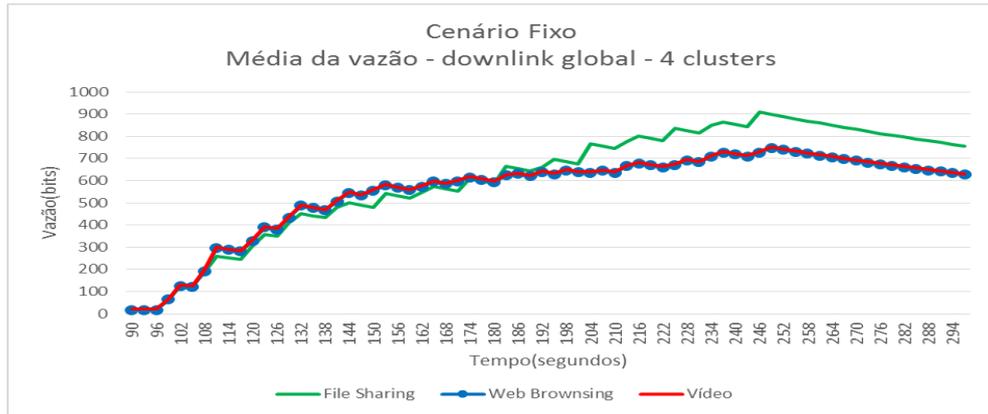


Figura 24: Cenário fixo – Média da vazão global – 4 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

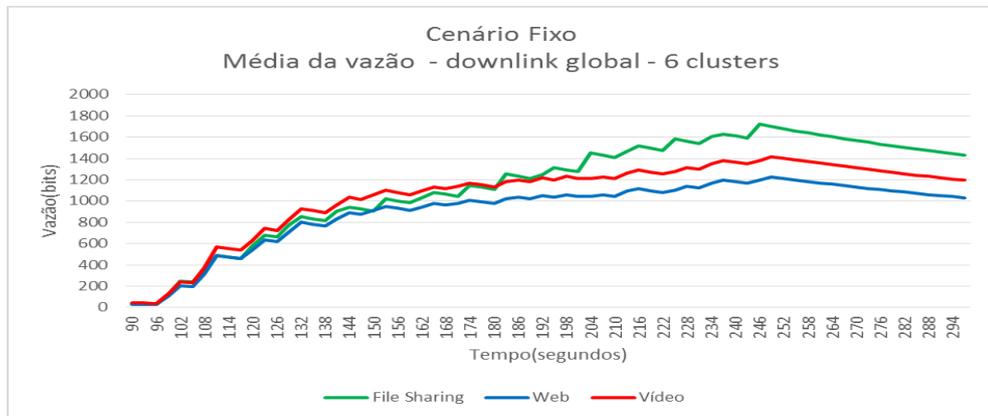


Figura 25: Cenário fixo – Média da vazão global – 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

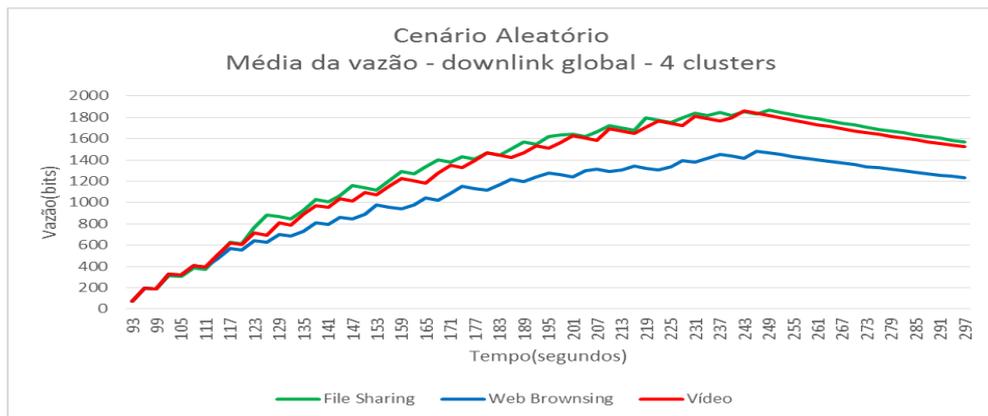


Figura 26: Cenário aleatório – Média da vazão global – 4 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

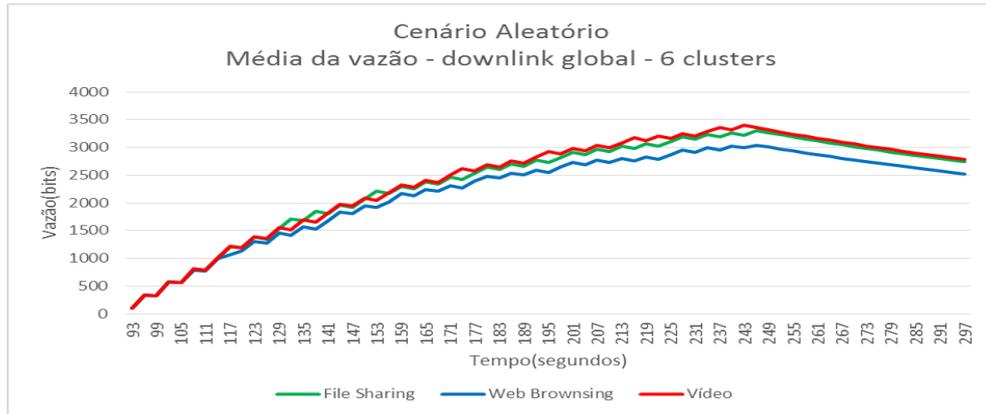


Figura 27: Cenário aleatório – Média da vazão global – 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

7.2.3. Resultados individuais

Por motivo de avaliação e análise do que acontecia em objetos de *clusters* diferentes em todos os momentos das simulações, os dados dos nós que respeitavam estas premissas, os quais simulavam *Smartphones*, podem ser vistos nos gráficos abaixo.

7.2.3.1. File Sharing (compartilhamento de arquivo) – Cenário Fixo

Por meio de gráficos mais específicos, quando da execução das aplicações relacionadas ao compartilhamento de arquivos digitais, observam-se algumas características peculiares, dentre elas, a falta de condições adequadas de tráfego para a *Small Cell* de índice 34, pois mesmo com um aumento de 19dB para 22dB ela não troca pacotes com o dispositivo móvel do usuário, isto por motivos de interferência, quando a mesma participava de uma formação em 4 *clusters*. Porém, houve uma completa alteração deste panorama quando ela passou a fazer parte de um cenário dividido em 6 *clusters*. Estes dois momentos podem ser vistos na figura 28.

Um outro evento que ocorre a partir da inserção do modelo defendido nesta dissertação é a sua eficiência sobre o aumento na vazão dos dados, observado na figura 29, pois se faz este acréscimo não somente para algumas *Small Cells* dispostas no cenário, mas sim para todo o grupo de APs, garantindo uma das características essenciais para o funcionamento adequado dos novos serviços consumidos pelos usuários das redes celulares.

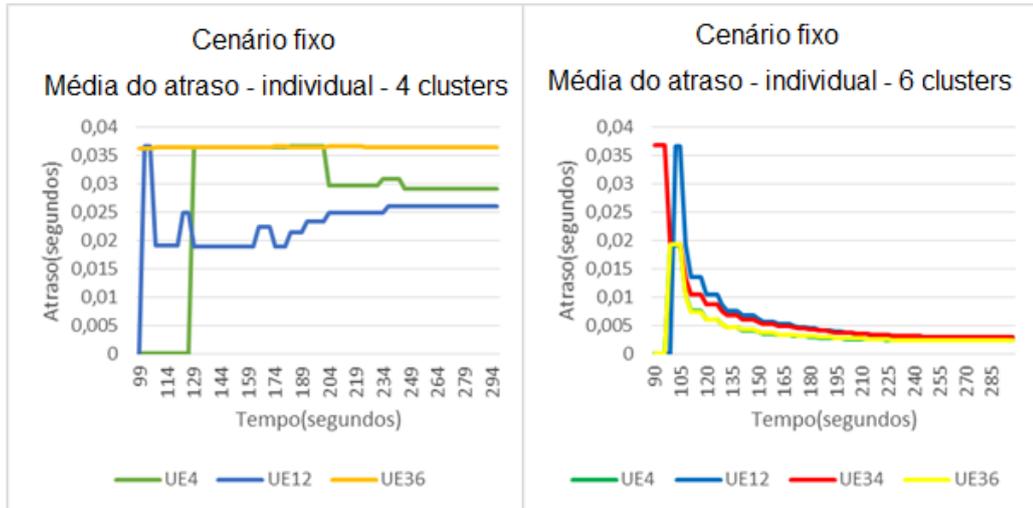


Figura 28: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

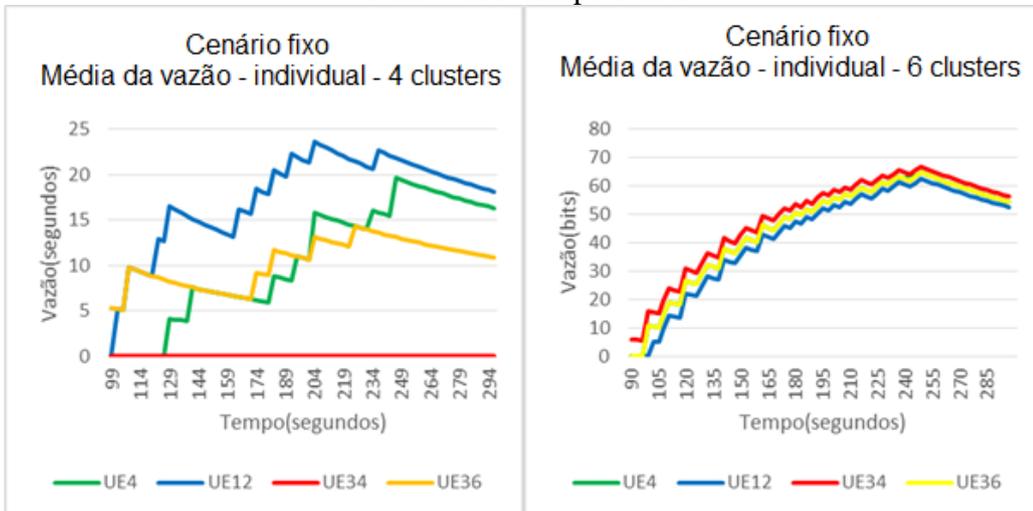


Figura 29: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

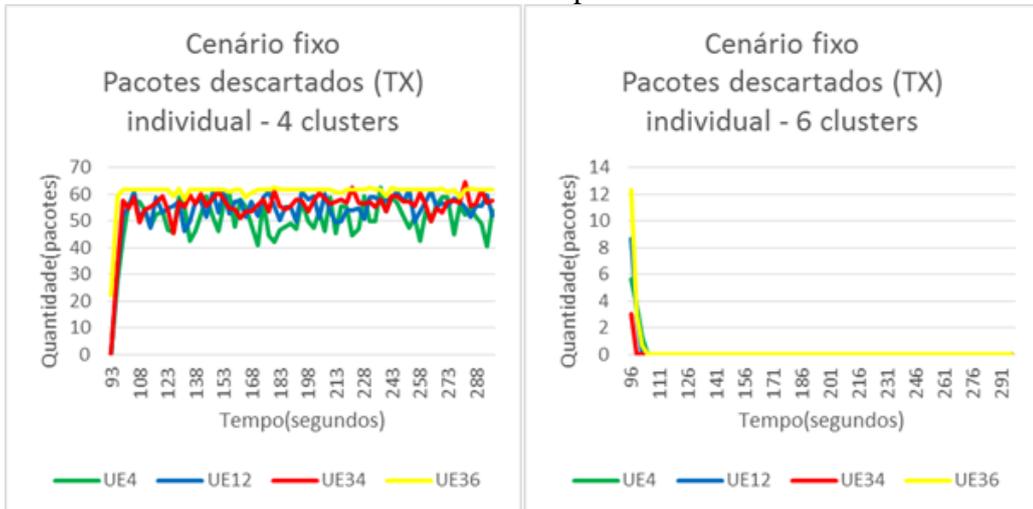


Figura 30: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

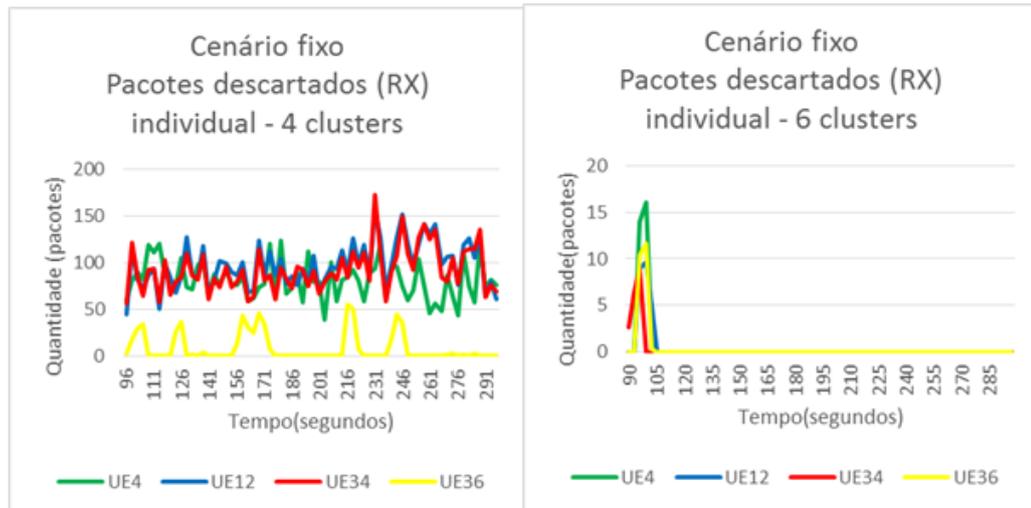


Figura 31: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 *clusters*
Fonte: Elaborada pelo autor

A taxa de pacotes perdidos também é um fator predominante, pois eles podem causar um *overhead* de processamento junto as *Small Cells*, no servidor ou até mesmo sobrecarregar a rede. Estes índices são tratados com excelência pelo modelo aqui proposto, tendo como base para estas afirmações os gráficos constantes nas figuras 30 e 31 onde pôde-se perceber que a taxa de pacotes perdidos após alguns minutos do fim do *Warm Up* chegam a zero, logo após a construção dos *clusters*.

7.2.3.2. File Sharing – Cenário Aleatório

Para fins de validação do modelo junto ao cenário aleatório utilizando a aplicação de compartilhamento de arquivos, também foram realizadas simulações das quais foram obtidos altos índices de melhoria nas variáveis que simbolizam a qualidade de serviço oferecida aos usuários das redes celulares.

No referido cenário, em relação ao atraso individual das *Small Cells*, figura 32, observando-se o pior caso, no qual consiste a célula de índice 42, a mesma teve este valor reduzido de 37ms para 27ms. Na vazão, figura 33, a célula saiu de 10bits/segundo para um pico de 50bits/segundo.

Em relação à perda de pacotes temos que em todas as *Small Cell*, tanto em momentos de *upload* quanto de *download* houve a tendência em reduzir a perda de pacotes e isto pode ser visto através das figuras 34 e 35.

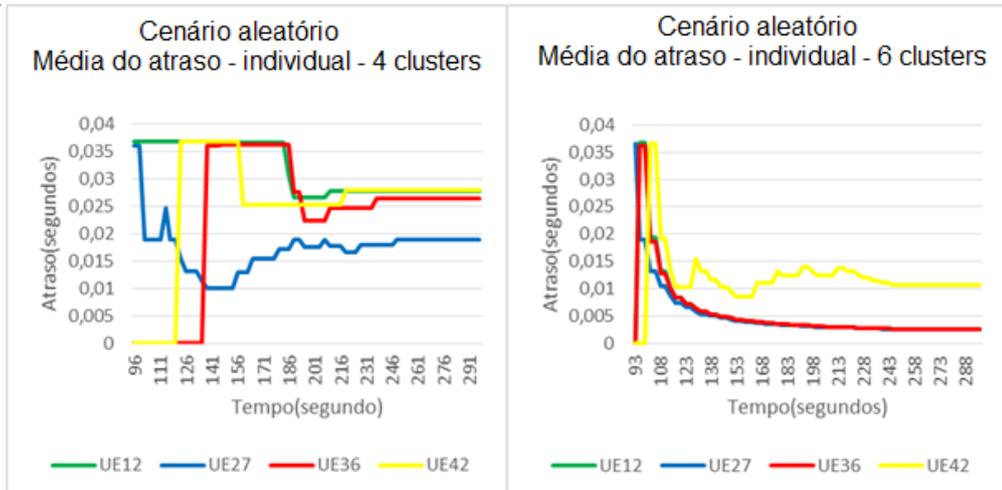


Figura 32: Cenário Aleatório – Média do atraso – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

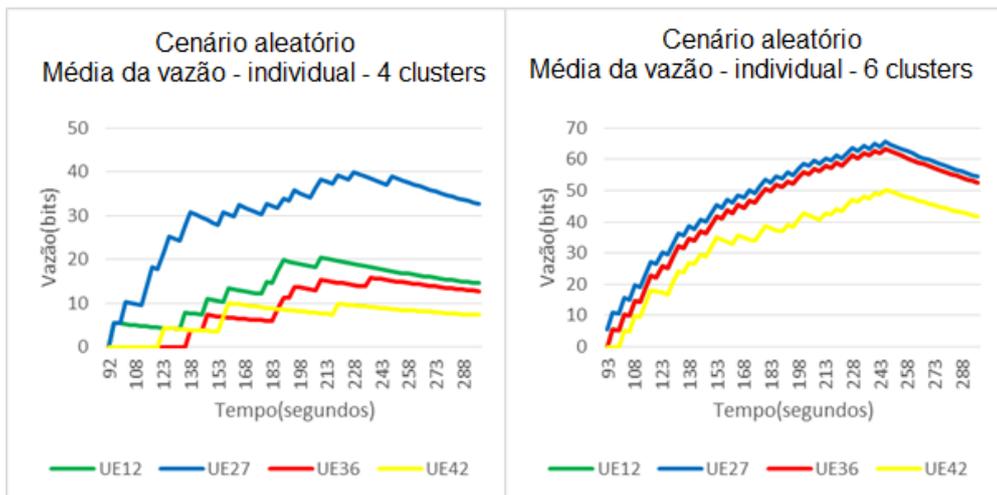


Figura 33: Cenário Aleatório – Média da vazão – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

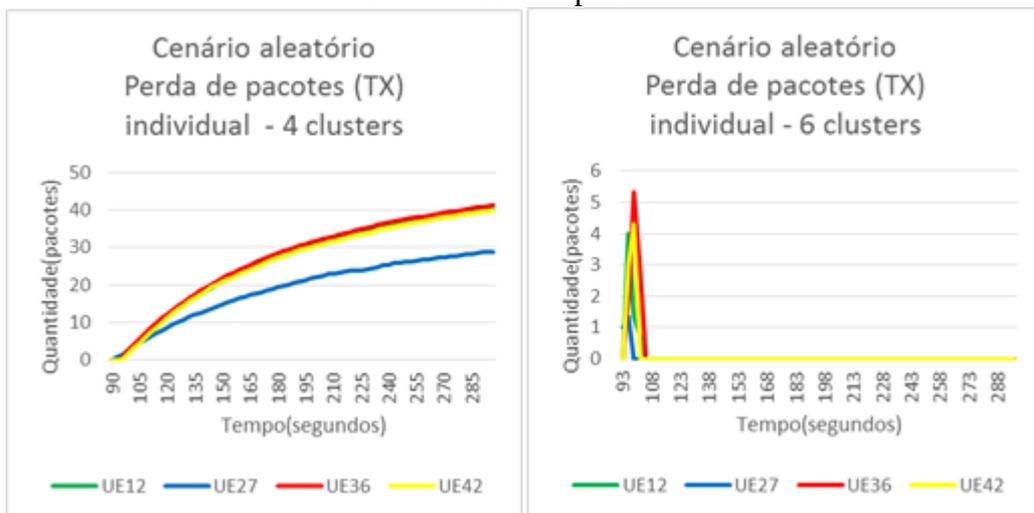


Figura 34: Cenário Aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

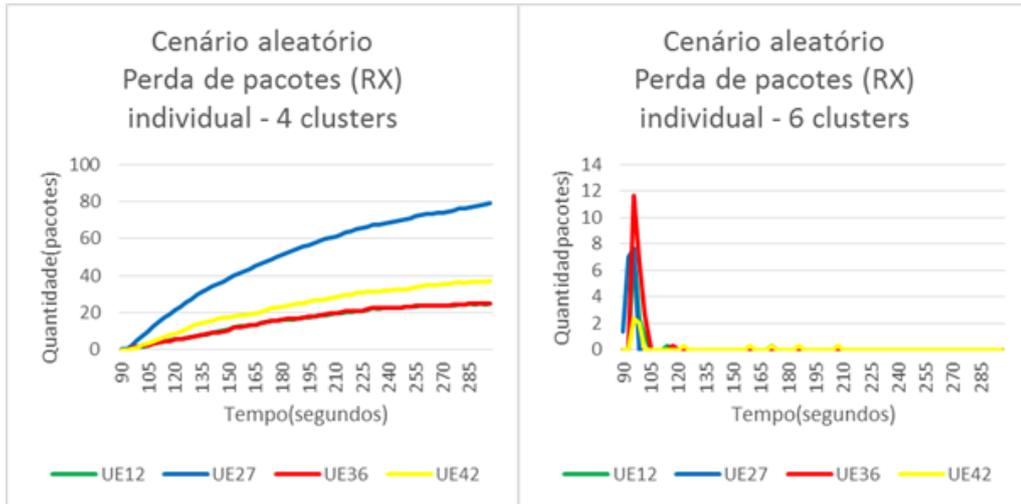


Figura 35: Cenário Aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 *clusters*
 Fonte: Elaborada pelo autor

7.2.3.3. Web Browsing - Cenário fixo

No cenário fixo, o qual se mantinha um fluxo de tráfego da aplicação de *Web Browsing*, a *Small Cell* de índice 4 não apresenta fluxo de informações quando participa de um cenário com 4 clusters, mas esta situação é totalmente diferente quando o cenário divide-se em 6 clusters. É perceptível a redução nos valores de atraso e redução da quantidade de pacotes perdidos por segundo das demais células, a exemplo desta última grandeza aferida, há uma queda de aproximadamente 87%.

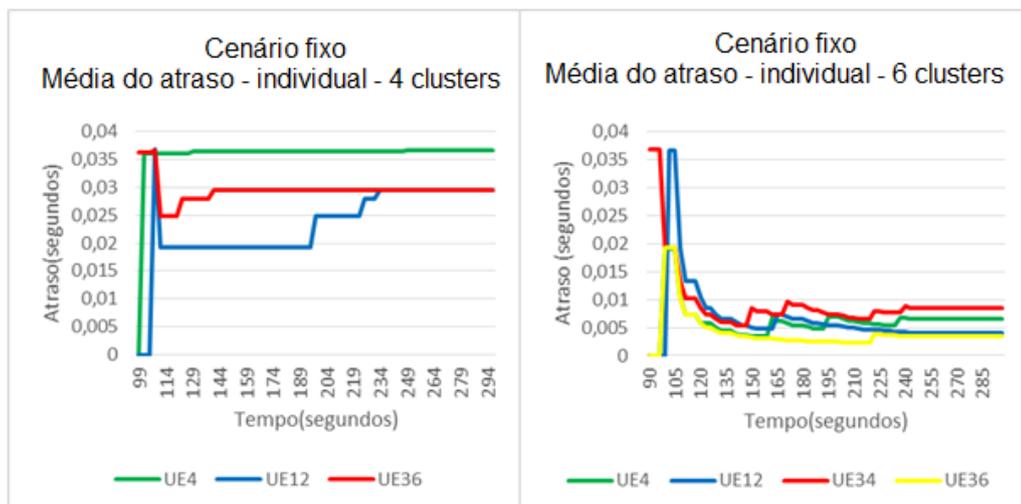


Figura 36: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 *clusters*
 Fonte: Elaborada pelo autor

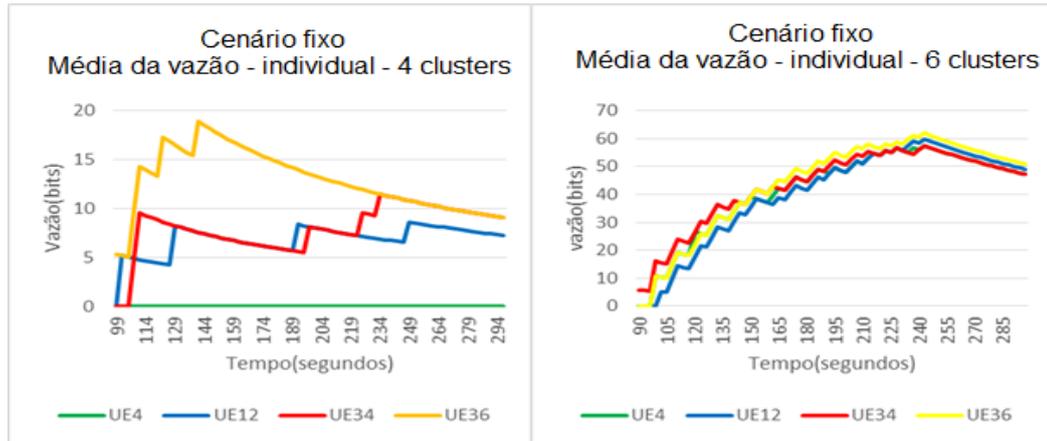


Figura 37: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

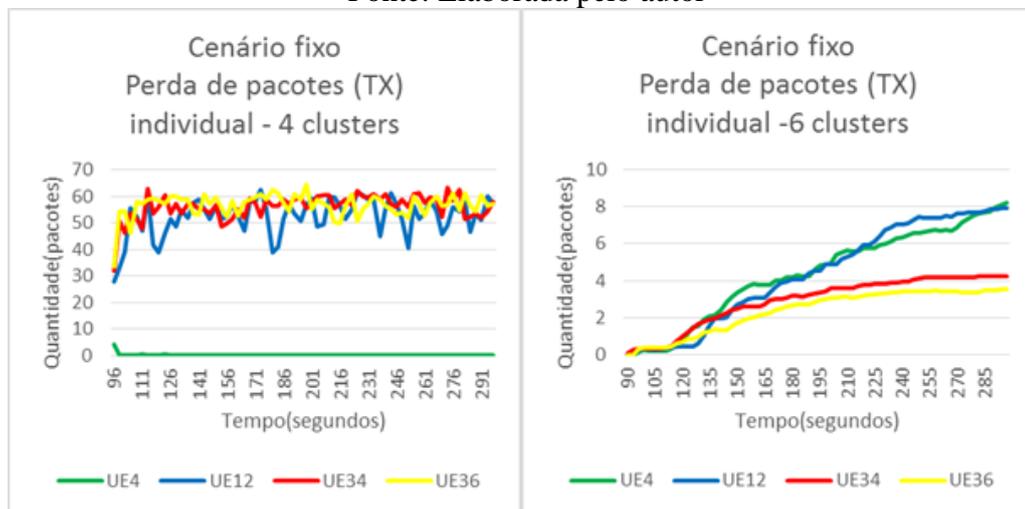


Figura 38: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

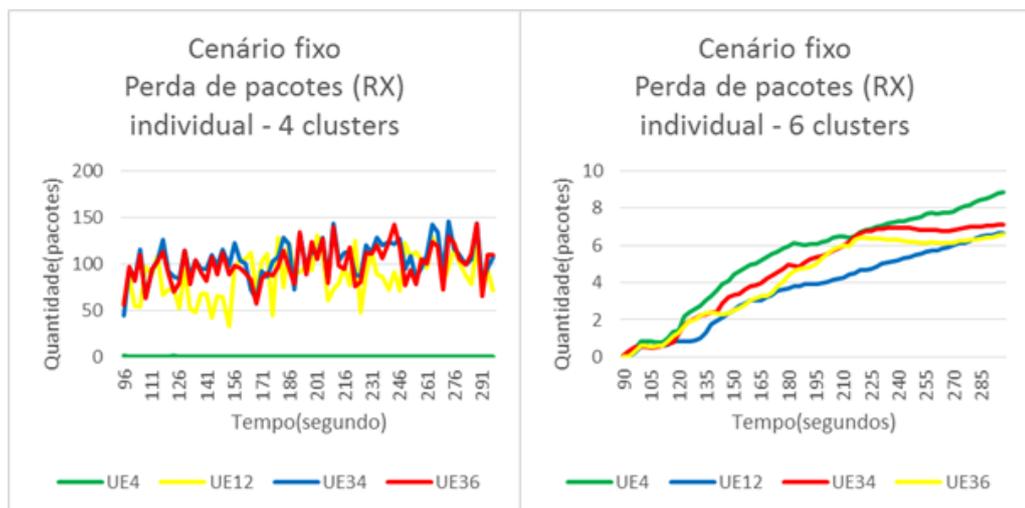


Figura 39: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

7.2.3.4. Web Browsing – Cenário Aleatório

Na figura 40 pode-se perceber que há uma redução do atraso para o cenário aleatório quando usava-se a aplicação de *Web Browser* com 6 *clusters* de 35ms para aproximadamente 10ms para a célula 36 e para 7ms junto as demais.

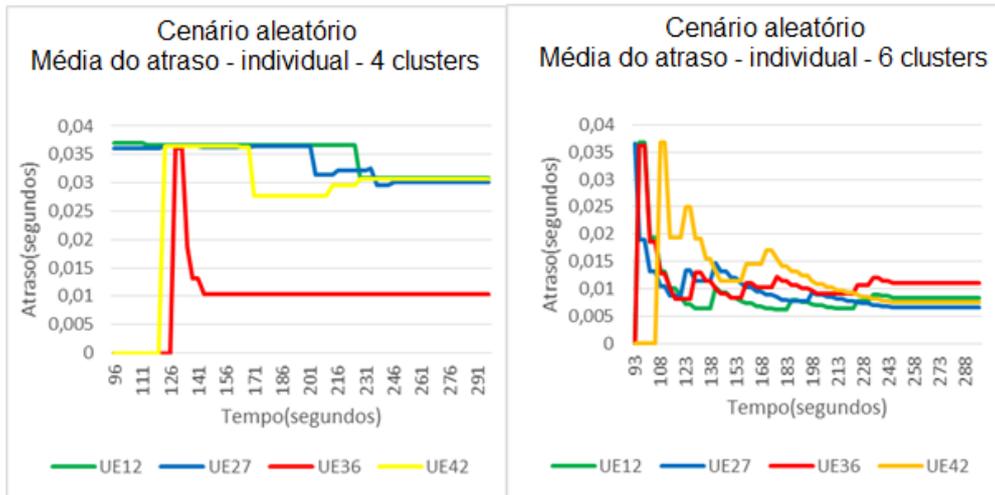


Figura 40: Cenário Aleatório – Média do atraso – 4 e 6 *clusters*
 Fonte: Elaborada pelo autor

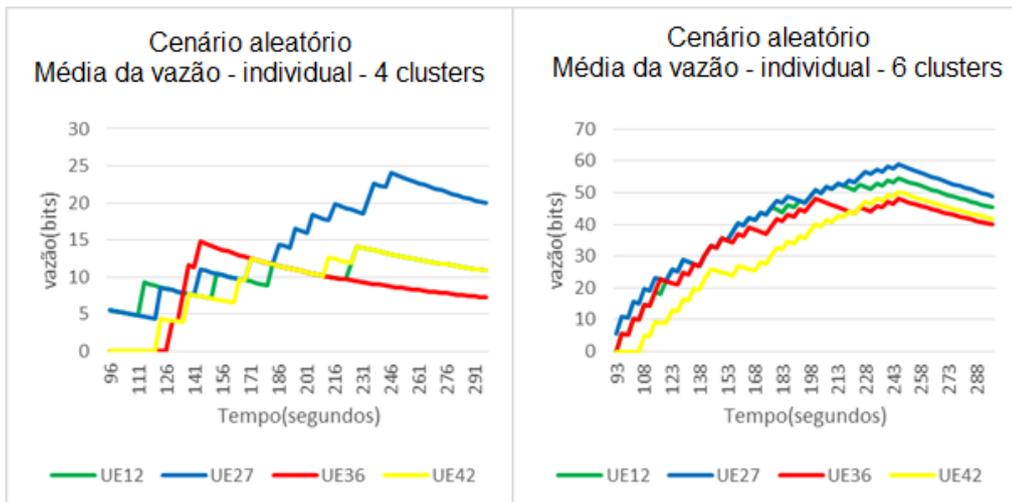


Figura 41: Cenário Aleatório – Média da vazão – 4 e 6 *clusters*
 Fonte: Elaborada pelo autor

A vazão, na figura 41, além de ter um crescimento para cada *Small Cell*, ela se apresenta quase totalmente distribuída de modo equitativo para todos APs do ambiente, quando feita a divisão em 6 *clusters*, demonstrando que não modelou-se nesta pesquisa uma solução somente para tratar de uma aplicação específica, mas sim para suprir as necessidades de uma nova infraestrutura.

Quando se observa as figuras 42 e 43 parece que o modelo não apresenta ganho algum, pois elas são bastante parecidas, porém seus eixos demonstram que houve uma redução em quase 100% nas médias de pacotes perdidos, pois no pior caso, célula 42, passa-se de uma média de 98 pacotes perdidos ao longo de 5 minutos simulação para 6 pacotes perdidos de média.

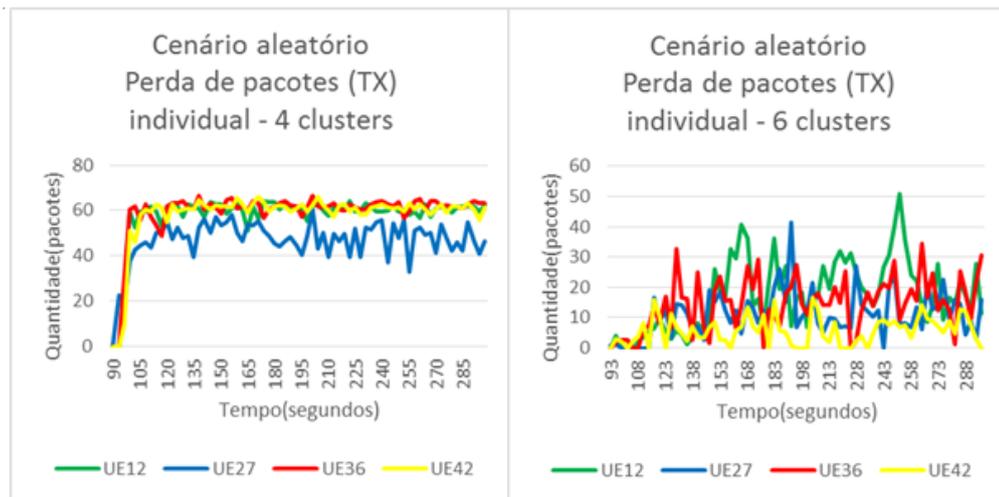


Figura 42: Cenário aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

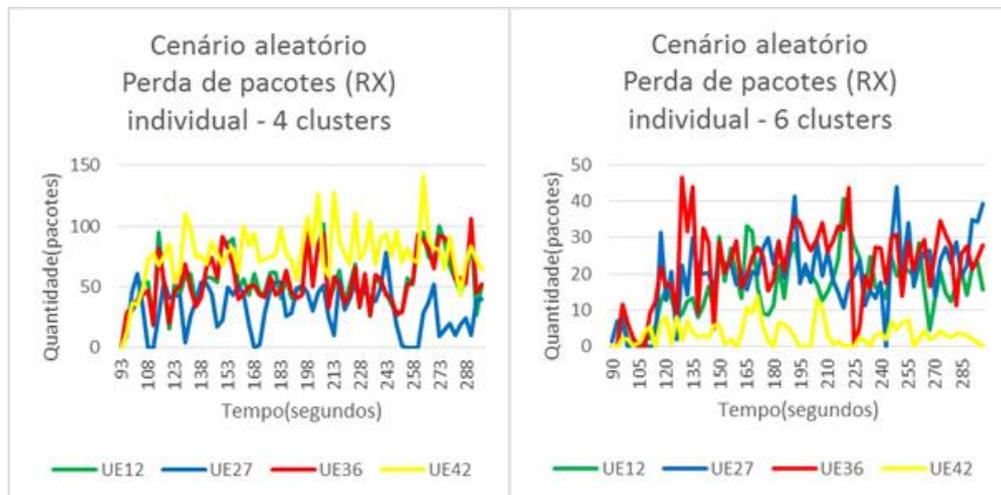


Figura 43: Cenário aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

7.2.3.5. Video – Cenário Fixo

As três figuras abaixo mostram, respectivamente, a redução do atraso, a segunda ratifica o crescimento equilibrado da vazão e a terceira demonstra que há uma redução no número de pacotes perdidos na transmissão, o que maximiza a qualidade da aplicação/serviço.

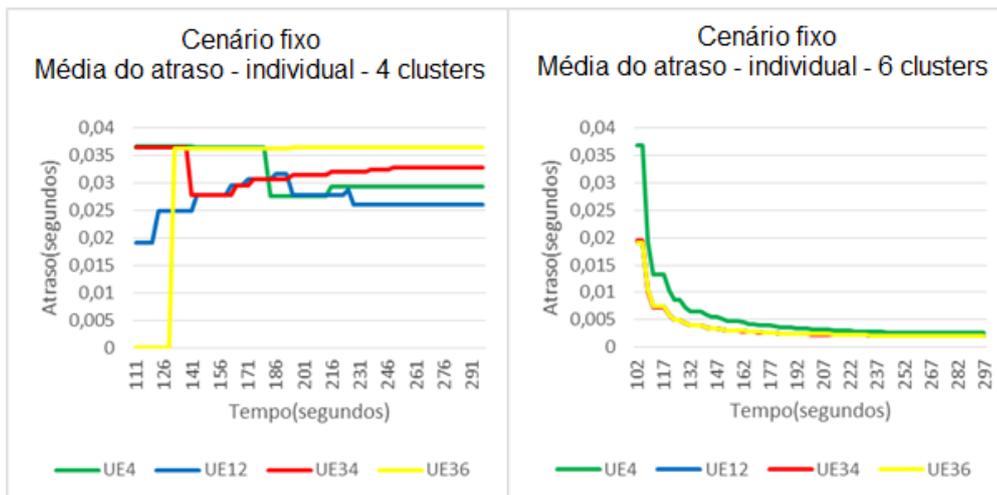


Figura 44: Cenário fixo – Média do atraso – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

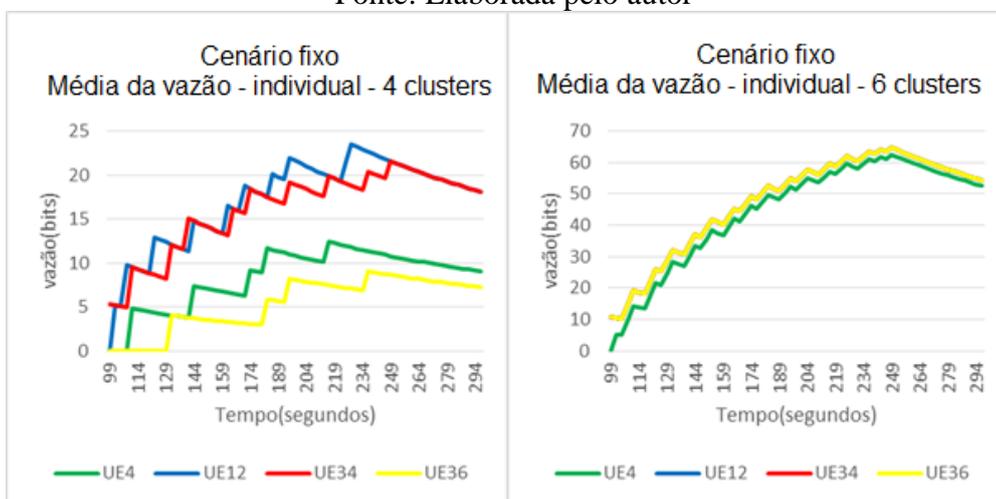


Figura 45: Cenário fixo – Média da vazão – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

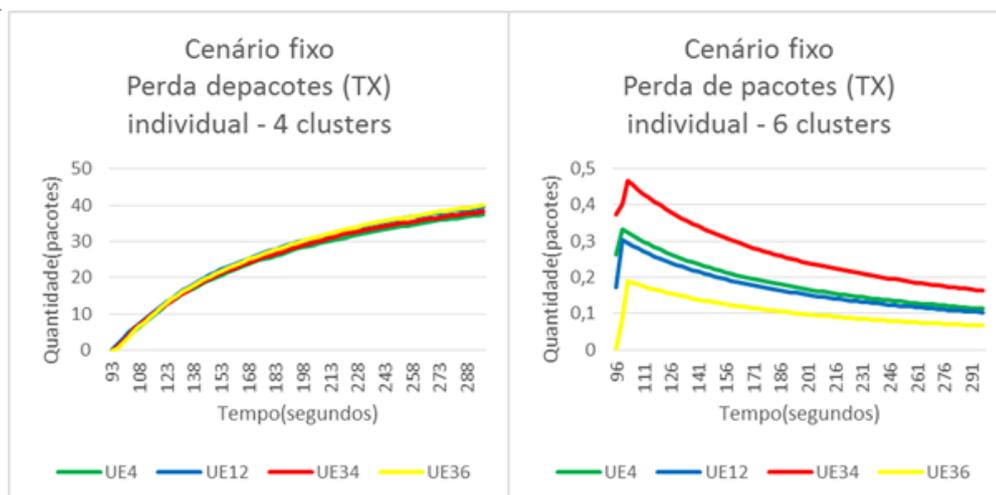


Figura 46: Cenário fixo – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

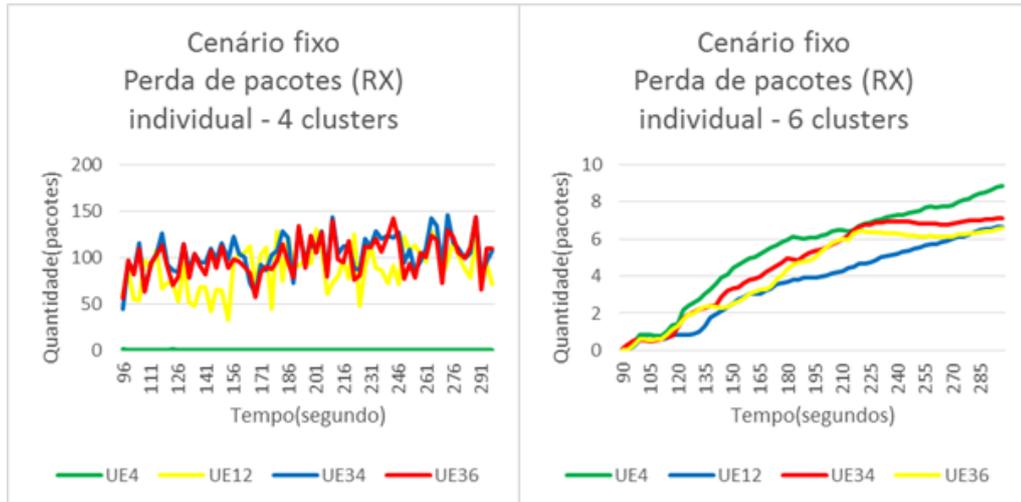


Figura 47: Cenário fixo – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 clusters
 Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 47 ainda pode-se ver uma perda de pacotes, porém o seu valor é tão baixo que tende a não reduzir a qualidade dos vídeos assistidos pelos usuários.

7.2.3.6. Video – Cenário Aleatório

No cenário aleatório com um fluxo de vídeo, que na atualidade é bastante estudado, pois é o mais requerido pelos usuários das novas redes móveis, o modelo proporcionou ao ambiente a totalidade de requisitos para prover uma excelente entrega de serviços aos novos usuários destas redes de alta velocidade com redução no atraso e perda de pacotes, aumentando o fluxo de dados do ambiente.

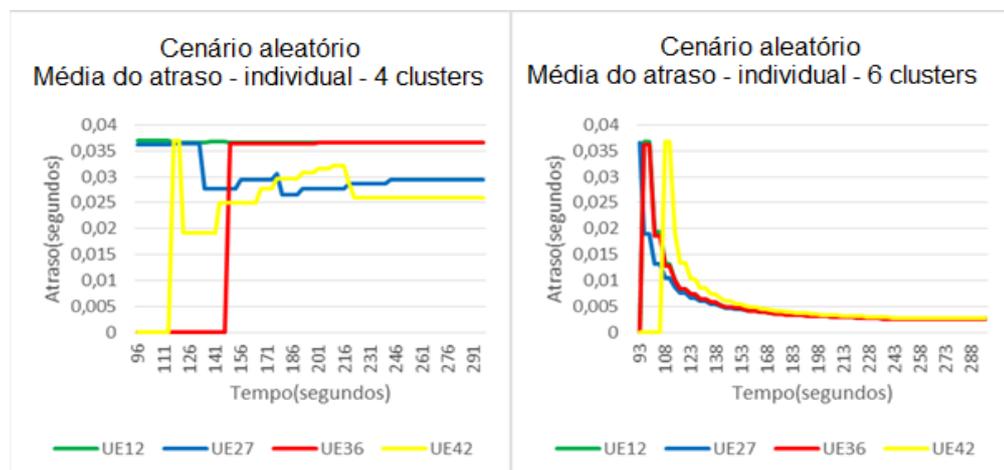


Figura 48: Cenário aleatório – Média do atraso – 4 e 6 clusters
 Fonte: Elaborada pelo autor

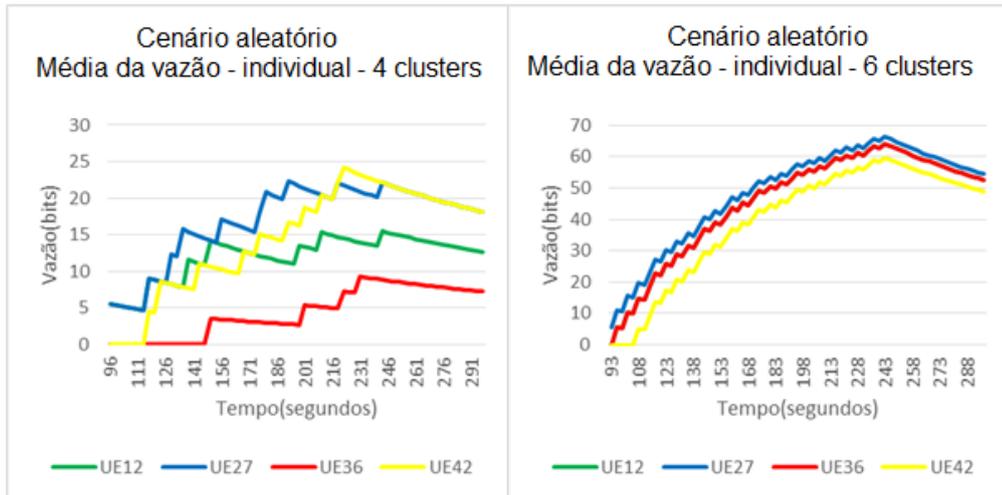


Figura 49: Cenário aleatório – Média da vazão – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

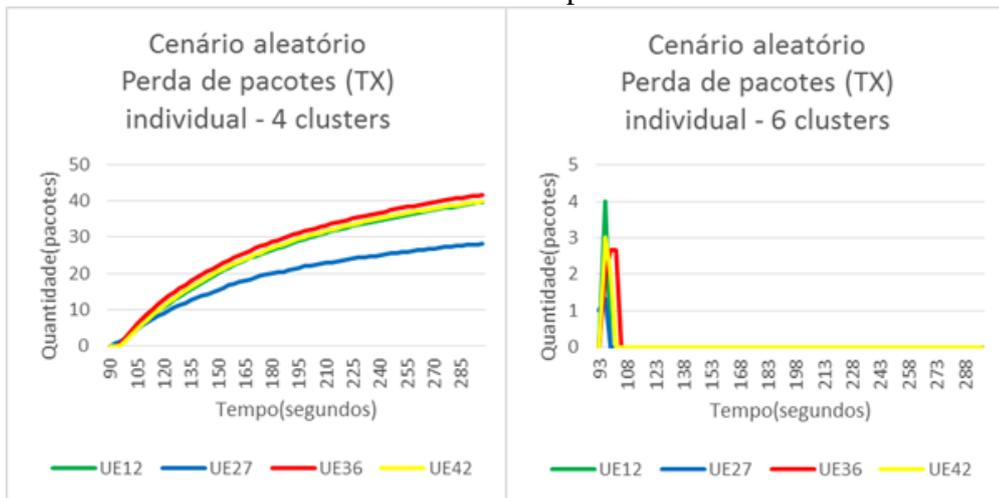


Figura 50: Cenário aleatório – Perda de pacotes (TX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

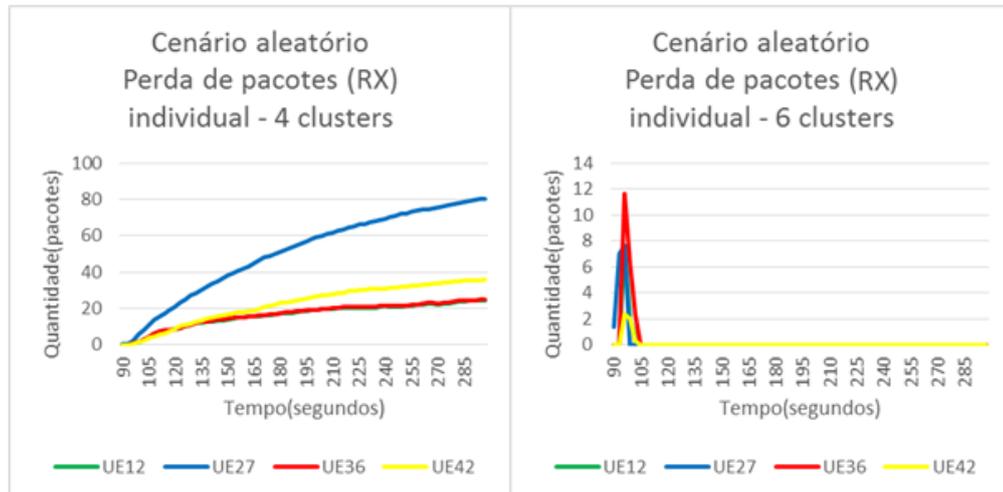


Figura 51: Cenário aleatório – Perda de pacotes (RX) – 4 e 6 clusters
Fonte: Elaborada pelo autor

Abaixo estão algumas tabelas que trazem um resumo sobre os dados considerados mais significativos:

Tabela 17: SINR (dB) – Cenário fixo

4 clusters				
SINR	Menor	Maior	Média	Desvio Padrão
Antes	4,49	32,36	20,74	6,37
Depois	1,22	37,16	24,00	8,98
6 clusters				
SINR	Menor	Maior	Média	Desvio Padrão
Antes	4,49	32,36	20,74	6,37
Depois	0,35	42,27	25,48	10,81

Tabela 18: SINR (dB) – Cenário aleatório

4 clusters				
SINR	Menor	Maior	Média	Desvio Padrão
Antes	0,77	35,22	20,25	6,95
Depois	13,47	43,21	30,39	5,93
6 clusters				
SINR	Menor	Maior	Média	Desvio Padrão
Antes	0,77	35,22	20,25	6,95
Depois	1,50	46,07	31,76	8,42

Tabela 19: Vazão global (b/s) – 4 clusters

Cenário fixo			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	16,48	16,48	20,12
Maior	911,03	746,92	750,56
Média	607,69	552,35	555,99
Desvio Padrão	248,52	192,39	192,39

Tabela 20: Vazão global (b/s) - 6 clusters

Cenário fixo			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	31,10	27,03	38,035
Maior	1719,12	1224,95	1418,56
Média	1146,73	905,86	1050,82
Desvio Padrão	468,96	315,52	363,62

Tabela 21: Vazão global (b/s) – 4 clusters

Cenário aleatório			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	73,67	73,67	73,67
Maior	1869,46	1483,44	1857,56
Média	1349,31	1063,49	1304,43
Desvio Padrão	500,39	369,62	489,94

Tabela 22: Vazão global (b/s) – 6 clusters

Cenário aleatório			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	102,00	102,00	102,00
Maior	3303,33	3041,16	3394,47
Média	2381,54	2208,65	2421,29
Desvio Padrão	857,01	787,32	889,59

Tabela 23: Atraso global (s) – 4 clusters

Cenário fixo			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	0,018	0,020	0,019
Maior	0,037	0,037	0,036
Média	0,021	0,023	0,022
Desvio Padrão	0,005	0,004	0,004

Tabela 24: Atraso global (s) – 6 clusters

Cenário fixo			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	0,018	0,017	0,016
Maior	0,037	0,036	0,035
Média	0,021	0,020	0,019
Desvio Padrão	0,005	0,005	0,005

Tabela 25: Atraso global (s) – 4 clusters

Cenário aleatório			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	0,011	0,017	0,016
Maior	0,037	0,037	0,037
Média	0,014	0,019	0,019
Desvio Padrão	0,006	0,004	0,004

Tabela 26: Atraso global (s) – 6 clusters

Cenário aleatório			
Atraso	<i>File Sharing</i>	<i>Web Browsing</i>	Vídeo
Menor	0,006	0,004	0,004
Maior	0,037	0,037	0,037
Média	0,010	0,008	0,008
Desvio Padrão	0,006	0,007	0,007

7.2.4. Desempenho do módulo de bateria

As médias de todos os valores dos cenários que visavam o acompanhamento da descarga de bateria dos dispositivos móveis estão descritas nas tabelas 13 e 14 onde pode-se notar que a taxa de redução da carga de bateria para os momentos de divisão em 4 e 6 sub-bandas nos dois cenários são praticamente as mesmas. No cenário fixo há um pico de consumo de 0,46mW para o nó 36, enquanto que na divisão em 6 clusters foi de 0,42mW para os nós 4 e 36 no intervalo dos 5 minutos de simulação.

Tabela 27: Comparação da descarga de bateria - Cenário fixo modelo linear

Nº de clusters	4				6			
Índice dos APs	4	12	34	36	4	12	34	36
Valor Máximo (mW)	10.000							
Média	9,78	9,77	9,77	9,77	9,79	9,79	9,79	9,79

Continuação								
Nº de <i>clusters</i>	4				6			
Valor Mínimo (mW)	9,56	9,55	9,55	<u>9,54</u>	<u>9,58</u>	9,59	9,59	<u>9,58</u>
Desvio padrão	126,4	127,8	128,0	130,1	134,1	131,0	132,0	134,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 28: Comparação da descarga de bateria - Cenário aleatório modelo linear

Nº de <i>clusters</i>	4				6			
Índice dos APs	42	36	12	27	42	36	12	27
Valor Máximo (mW)	10.000							
Média	9,78	9,77	9,77	9,77	9,79	9,79	9,79	9,79
Valor Mínimo (mW)	9,56	9,55	9,55	<u>9,54</u>	<u>9,58</u>	9,59	9,59	<u>9,58</u>
Desvio padrão	126,4	127,8	128,0	130,1	134,1	131,0	132,0	134,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cenário aleatório há um pico de consumo de 0,46mW para o nó 27, enquanto que na divisão em 6 *clusters* foi de 0,42mW para os nós 42 e 27 no intervalo dos 5 minutos de simulação.

Analisando somente os momentos nos quais houve a clusterização, visto que sem ela não houve troca de dados, as tabelas 13 e 14 comprovam que a utilização do modelo probabilístico proposto nesta dissertação não onera o consumo de energia das baterias dos *Smartphones*, independentemente da quantidade de *clusters* criados, pois os dispositivos móveis não tem mais que aplicar uma quantidade maior de energia para vencer as barreiras causadas pelo somatório das interferências, dado que a quantidade deste fenômeno sobre cada um dos APs passa a ser menor.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES

Constatado que as necessidades dos usuários estão em um momento de mudança, passando das visualizações cotidianas dos aplicativos de e-mail e de conteúdo estático como os de páginas da Web por exemplo, ao uso de aplicações que necessitam de maior velocidade e altas taxas de transferências como jogos online e vídeo em tempo real, fazem-se necessários estudos para suprir estas novas necessidades, haja vista que as infraestruturas das empresas de telecomunicações atuais não detém condições de suportar tal tráfego.

Para esse fim novas tecnologias tem surgindo, mas ainda precisam de amadurecimento, principalmente no que concerne os seus modelos arquiteturais de aplicabilidade, como é o caso das *Small Cells*, que são pequenas estações rádio base que podem ser implementadas de uma maneira organizada ou não, dependendo de como será construído o ambiente que tem como objetivo principal reduzir a carga de trabalho das macro-células tratando os fluxos de informações através de tráfego *off-load* quando estas tomam para si alguns usuários da rede de telefonia celular. Elas trabalham com baixa potência, com isso consomem menos energia porém cobrem distâncias menores, se comparadas as macro-células e usam as mesmas frequência das torres macro celulares.

Devido a estes fatores elas necessitam ser colocadas muito perto umas das outras, fato este que, se não for tratado no momento do projeto, pode causar o oferecimento de uma baixa qualidade de serviços aos usuários e por esta razão nesta dissertação propôs-se um modelo que baseado no uso da *clusterização* e um algoritmo genético que dividem a largura do espectro da banda 1 do FDD (*Frequency Division Duplex*) usada nas tecnologias LTE e LTE – *Advanced* entre conjuntos diferentes de *Small Cells* a fim de que o trabalho com estas sub-bandas possa reduzir o nível de interferência entre os APs e as aplicações possam ser oferecidas aos usuários de forma eficaz.

O trabalho dividiu-se em dois momentos: o primeiro quando houve a adaptação de um modelo totalmente determinístico, a fim de que o mesmo passasse a trabalhar em função de um algoritmo genético. A segunda parte da dissertação consistiu na criação e execução de simulações discretas com intenção de validar o modelo probabilístico.

Dados foram coletados e apresentados, nos quais pôde-se constatar que o modelo reduziu o nível de interferência entre as *Small Cells*, fato este demonstrado pelo aumento no valor da relação SINR para mais de 80% dos APs. Esta ação gerou um aumento na vazão dos dados, redução na quantidade de pacotes perdidos e no atraso, o que foi comprovado por todos os gráficos extraídos da simulação, os quais estão dentro dos requisitos mínimos apresentados pelo 3GPP em sua recomendação TS 23.401 V 8.1.0.

8.1. CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O modelo proposto nesta dissertação não influencia no aumento acentuado no CAPEX ou OPEX das operadoras de telecomunicações ou mesmo dos próprios assinantes, pois além dos APs já possuírem, desde a sua fabricação, a capacidade para trabalhar em várias bandas de frequência, se a implantação for precedida de uma fase de projeto, a qual espera-se sempre a sua ocorrência, poder-se-ia observar as características de cada local e assim oferecer os sub-canalais adequados às *Small Cells* a fim de que elas atendesem as expectativas de seus usuários.

Uma outra observação que poderia ser feita é a de que mesmo em locais com grande densidade de dispositivos e *Small Cells*, que serão os casos das redes 5G, haveria a necessidade de aumento do número de *clusters*, o que reduziria a largura de banda oferecida aos agrupamentos, o modelo aqui proposto ainda seria viável, pois ainda que os APs trabalhem em faixas de frequências de menor largura, a redução ou eliminação da interferência co-canal propõe um uso adequado aos padrões de consumo das novas aplicações.

Algumas outras contribuições deste trabalho estão elencadas abaixo:

- A realização de um amplo estudo sobre as *Small Cells*, suas origens, características e aspectos técnicos envolvidos nas suas implantações, pois como visto ao longo desta dissertação, esta última ação deve ser precedida de um planejamento acurado, a fim de que as novas necessidades dos usuários sejam supridas de maneira adequada;
- A utilização da *clusterização* na solução do problema de interferência co-canal nas *DenseNets*, demonstra que mesmo com a redução da largura de banda

oferecida a um conjunto das *Small Cells*, pode haver um aumento na qualidade dos serviços ofertados aos usuários;

- O uso de um algoritmo genético no oferecimento de algumas soluções, dentre todas as que poderiam existir em um amplo espaço de busca de um determinado problema, o qual, em alguns momentos, conseguiu eliminar a impossibilidade de comunicação devido à interferência co-canal em 100% das *Small Cells* dispostas nos cenários estudados;
- Por meio das métricas utilizadas foi possível constatar que o modelo proposto nesta dissertação pode ser utilizado para aumentar a qualidade dos serviços oferecidos aos usuários de redes 4G e 5G, onde nesta última, os cenários passam a serem classificados de redes densas à redes ultradensas.
- A apresentação de todo o escopo desenhado nesta dissertação a outros pesquisadores em conferência internacional e em simpósio nacional:
 - TORRES, F. O., SILVA, L.F.C., CARDOSO, D.L. *Interference mitigation in next generation networks using clustering and intelligence techniques*. Artigo completo aceito para apresentação no *11th International Conference on Future Network Communications (FNC-2016)*, Quebec, Montreal, Canadá. Artigo completo publicado na revista digital *Procedia Computer Science*.
 - TORRES, F. O., SANTOS, M.S., SILVA, L.F.C., CARDOSO, D.L. Mitigação de interferência em redes de próxima geração utilizando técnicas de *clusterização* e de inteligência. Artigo completo aceito para publicação nos anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT-2016), Santarém, Pará.

8.2. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Como qualquer trabalho de investigação e pesquisa, muitas dificuldades foram encontradas, a seguir as mesmas estão elencadas:

- A realização do estudo da arte sobre o tema a fim de encontrar as bases para a pesquisa. A área de estudos sobre interferência entre *Small Cells* e *macrocell* detém muitos trabalhos, porém à ligada a interferências entre *Small Cells* dispostas em uma rede densa ainda é um campo promissor, o qual detém poucos trabalhos, comparando-o ao anteriormente citado;
- As leituras dos livros foram feitas totalmente on-line, haja vista que a localidade em que se deram os estudos não detém bibliografias que tratam do projeto de pesquisa aqui realizado. Assim, quando havia a necessidade de leitura, sempre era necessário usar um computador;
- Houve uma demanda de tempo para aprendizagem das características do software que realizaria os cálculos matemáticos e probabilísticos, ou seja, MATLAB, tendo em vista que havia necessidade de realizar os testes com a maior precisão possível, então a resposta que deveria sair do MATLAB deveria ser a mais confiável para a submissão ao software de simulação;
- Houve também uma demanda por tempo para aprendizagem do software de simulação, isto é, o OPNET *Modeler*. O mesmo passou por alterações, como a inserção do modelo linear de descarga de bateria e isso demandou a execução de pesquisas e testes, antes de usar o modelo junto a este trabalho;
- Tendo em vista que deveríamos fazer todas as simulações possíveis para a validação do modelo, havia a necessidade de coletar os dados das 60 *Small Cells* que estavam dispostas nos ambientes, mas não houve possibilidade por motivos de capacidade de processamento, haja vista que se utilizou somente um notebook para processar a carga de dados, das quais suas características já foram citadas. Uma consideração muito importante a fazer é a de que só foram colhidos dados de 8 nós, 4 em cada cenário, pois nestas situações as simulações levaram entre 4 e 6 horas para serem finalizadas, isto demandou tempo para cada uma das 12 simulações, ou seja, todas as simulações levaram cerca de 60 horas para serem realizadas.

8.3. TRABALHOS FUTUROS

Algumas atividades poderão ser feitas para que o trabalho seja ainda mais aprofundado como:

- Realizar as simulações usando outros softwares como o Network Simulator nas suas versões 2 (NS2) ou 3 (NS3), nas quais um fluxo de vídeo real poderia ser codificado e posteriormente inserido nos aplicativos, usando os mesmos cenários apresentados nesta dissertação, a fim de que uma análise e avaliação sobre a qualidade de experiência do usuário pudessem ser realizadas usando técnicas adequadas, dentre elas, o *Mean Opinion Score* - MOS que é um método subjetivo de teste de qualidade;
- Aumentar o número de cromossomos da população inicial, a fim de que haja uma análise comparativa entre as resposta atuais e aquelas que serão obtidas, aumentando ainda mais a probabilidade de encontrar soluções melhores do que as vistas nesta dissertação;
- Refazer as simulações em um dispositivo computacional com maior capacidade de processamento e em menor tempo, a fim de que possam ser colhidas as informações de cunho individual sobre as 60 *Small Cells* de maneira simultânea em uma única simulação;
- Realizar novas simulações com outros modelos de perdas de propagação e com movimentação dos dispositivos representativos dos equipamentos dos usuários; e também
- Realizar estudos em diferentes tipos de cenários heterogêneos, implementando-se as interferência das *macrocells* em modelos representativos de locais reais onde poderiam ser implementadas as densas redes de *Small Cells*.

REFERÊNCIAS

3GPP - TR 25.896. Specification Library of 3GPP WideBand CDMA. **Site da QT Cooperation**, 2004. Disponível em: <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/25896-600.pdf>>. Acesso em: 25 Dezembro 2015.

3GPP - TR 36.872. **Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRA V 12.0.0**. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Valbonne. 2013.

3GPP - TS 23.401. Site da QT Cooperation. **Specification Library of 3GPP WideBand CDMA**, 2007. Disponível em: <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/25401-800.pdf>>. Acesso em: 25 Dezembro 2015.

3GPP - TS 36.414 V 8.3.0. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Sophia Antipolis. 2009.

4G AMERICAS. **Beyond LTE: Enabling the Mobile Broadband Explosion**. Bellevue. 2014.

4G AMERICAS. LTE and 5G Innovation: Igniting Mobile Broadband. **5G Americas**, 2015. Disponível em: <http://www.5gamericas.org/files/9214/3991/2167/4G_Americas_Rysavy_Research_LTE_and_5G_Innovation_white_paper.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2016.

5G AMERICAS. **Rysavy Research - Mobile Broadband Transformation LTE to 5G**. Bellevue. 2016.

ABDELNASSER, et al. Evolution Towards 5G Multi-tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective. **IEEE Wireless Communications**, v. XX1, n. 3, p. 118-127, 2014.

ADILAKSHMI, T.; RAO, M. V. Optimized Cluster with Genetic Swarm Technique for Wireless Sensor Networks. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 17, Maio 2016. ISSN 0974-5645.

AHMADI H, F. D. . R. R. . C. H. D. S. L. Energy and Spectral Efficiency Gains From Multi-User MIMO-based Small Cell Reassignments. **2015 IEEE Global Communication Conference (GLOBECOM)**, San Diego, p. 1-7, Dezembro 2015.

AKINLABI, O. A. et al. Overview of Interference Management Techniques in Femtocell Networks: Challenges and Approach. **International Conference on Communication Technology**, 19 Janeiro 2015.

ALBERTO, C. K. et al. Simulando a Internet: Aplicações na Pesquisa e no Ensino. **21ª JAI (Jornada de Atualização em Informática)**, Florianópolis, 2002. 33-86.

ALENCAR, S. D. **Telefonia Celular Digital**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2004.

ALMEIDA, L. et al. Green-Fuzzy-Implementação de um modelo de alocação de usuários em redes macro-femto co-canal: uma abordagem baseada em simulação. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Natal, Setembro 2013.

ALMEIDA, V.; MENASCÉ, D. A. **Capacity Planning for Web Services: Metrics, Models, and Methods**. 1ª. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2001.

AL-SHAHRANI, A.; AL-OLYANI, H. LTE: Project EE-424. **Lehrstuhl Systeme**, 2008. Disponível em: <http://systems.ihp-microelectronics.com/uploads/downloads/2008_MK2_Z09.pdf>. Acesso em: 10 Outubro 2016.

ALSHAMI, ; ARSLAN, ; THOMPSON,. Femtocell Interference and Probability of Connection in different Areas and Various SINR Threshold Values at Downlink. **International Journal of Computing and Digital Systems**, v. III, n. 1, Janeiro 2014.

ALVES, W. J. B.; GONZAGA, A. **Identificação de pessoas através de algoritmo genético aplicado em medidas da proporções áureas da face humana**. WVC'08: 4º Workshop de Visão Computacional. São paulo: [s.n.]. 2008. p. 220-225.

ANDREWS, G. et al. Femtocells: Past, Present, and Future. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. XXX, n. 3, p. 497-508, 2012.

ANDREWS, J. G.; BACCELLI, F.; GANTI,. A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. LIX, n. 11, p. 3122-3134, 2011.

ANDRONE, C.; PALADE, T. CHARACTERISATION OF SMALL CELLS NETWORKS DEPLOYMENT OPTIONS AND THEIR IMPACT UPON MACRO-CELLULAR NETWORKS. **Acta Technica Napocensis**, v. LIII, n. 1, Fevereiro 2012.

ANPALAGAN, A.; BENNIS, M.; VANNITHAMBY, R. **Time and Frequency Domain e-ICIC with Carrier Aggregation in HetNets**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

ARAÚJO, W. V. **Estudo de interferência entre femtocélulas, visando eficiência energética e qualidade de serviço em redes LTE**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2014.

BLANCHARD, D. **It's a fuzzy world out there**. WCCI'94. Orlando: Expert Systems. 1994. p. 179-181.

CAI, et al. Green 5G Heterogeneous Networks through Dynamic Small-Cell Operation. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. XXXIV, n. 5, p. 1103-1115, 2016.

CARDOSO, E. H. S. **Análise do impacto do algoritmo de escalonamento de recursos no desempenho de redes veiculares utilizando o LTE como tecnologia de acesso**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2016.

CHANDRASEKHAR, V.; ANDREWS, J. G.; GATHERER, A. Femtocell Networks: a survey. **IEEE Communications Magazine**, v. XLVI, n. 9, p. 59-67, Setembro 2008.

CHECKO, A.; HOLM, H.; CHRISTIANSEN, H. Optimizing small cell deployment by the use of C-RANS. **Europe Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of**, Berlin, Maio 2014. 1-6.

CHIAVENATO, I. **Administração nos novos tempo**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

CISCO VNI. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020 - White Paper. **Site da empresa Cisco Systems**, 2015. Disponível em: <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Acesso em: 1 Março 2016.

COHEN, P. R.; FEIGENBAUM, E. A. **The handbook of artificial intelligence**. Stanford: Butterworth-Heinemann, v. III, 1981.

CULLEN, J. Radio frame presentation. **Femtocell Europe 2008**, Londres, Junho 2008.

DA SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas**. São Paulo: Arliber, 2010.

DRUKER, E. Development and application of a celular repeater. **IEEE Vehicular Technology Conference**, p. 321-325, Junho 1988.

ERICSSON. **Ericsson Mobility Report: on the pulse of the networked society**. Ericsson. Estocolmo, p. 32. 2016.

FINN, et al. Energy and Spectral Efficiency Gains From Multi-User MIMO-based Small Cell Reassignments. **2015 IEEE: Global Communications Conference (GLOBECOM)**, San Diego, Dezembro 2015. 1-7.

FIGLIARESE, V. **Wireless - Introdução às Redes de Telecomunicações Móveis Celulares**. Rio de Janeiro: Brasport, 2005.

FOROUZAN, B. A.; MOSHARRAF, F. **Redes de computadores: uma abordagem top-down**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GARCIA, S.; LUSTOSA, P. R. B.; BARROS, N. R. Aplicabilidade do método de simulação de Monte Carlo na previsão dos de produção de companhias industriais: O caso da companhia Vale do Rio Doce. **Revista de Contabilidade e Organizações - FEA-RP/USP**, São Paulo, v. IV, p. 152-173, dezembro 2010. ISSN ISSN 1982-6486.

GE, X. et al. 5G Ultra-dense cellular networks. **IEEE Communications**, 2016. 72-79.

GIMÉNEZ, et al. Realistic Implementation of X2-based Interference Management for LTE Femtocells. **WAVES. Instituto de Telecomunicaciones y aplicaciones multimedia (ITEAM)**, 2013. 89-97.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Uma introdução à inteligência computacional: fundamentos ferramentas e aplicações.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2010.

GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E. **Data Mining: UM GUIA PRÁTICO.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GSM ASSOCIATION. **The Mobile Economy.** Londres: The Walbrook Building, 2015.

HOADLEY, J.; MAVEDDAT, P. Enabling Small Cell Deployment With HetNet. **IEEE Wireless Communication**, v. XIX, n. 2, p. 4-5, Abril 2012.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial System.** 1ª. ed. [S.l.]: University of Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.** Oxford: U Michigam Press, 1975.

HOLMA, H.; TOSKALA, A.; REUNANEM, J. **LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13.** Chichester: Wiley, 2016.

HOYDIS, ; KOBAYASHI, ; DEBBAH,. Green Small Cells Networks. **IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE**, v. VI, n. 1, p. 37-43, Março 2011.

HU, R. Q.; QIAN, Y. **Heterogeneous Celular Networks.** [S.l.]: Wiley, 2013.

HUANG, J. et al. Grouping Based Inter-Cell interference Coordination in LTE-A Dense Small Cell Network. **Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE),2013 IEEE 5th International Symposium on**, Dezembro 2013. 78-83.

INOUE,. **MODIFICAÇÃO DE MÓDULOS DE SIMULAÇÃO PARA SUPORTE À IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS DE BATERIA EM UM EQUIPAMENTO LTE NO OPNET.** Belém: Universidade Federal do Pará, 2013.

INSIDE 3GPP Release 13 - Understanding the standards for LTE Advanced Enhancements. Washington: 5G Americas, 2016.

INTERNATIONAL ENGINEERING CONSORTIUM. **Operations Support Systems 2002: Enabling the Next Generation Network.** Chicago: [s.n.], 2002.

ITU WORLD TELECOMMUNICATION. 2015. Year Book of Statistics. **Site da ITU**, 2015. Disponível em: <<http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/yb2015.aspx>>. Acesso em: 7 Outubro 2016.

ITU-R M.1225. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT - 2000. **International Telecommunication Union**, 1997. Disponível em: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!PDF-E.pdf>. Acesso em: 25 Dezembro 2015.

ITU-R M.2134. "**Requerements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)**". ITU. [S.l.]. 2008.

IYER, R.; PARKER, J.; SOOD, P. Intelligent networking for digital cellular systems and the wireless world. **IEEE Globecom**, v. I, p. 475-479, Dezembro 1990.

J.M., H.; , H. D. C. **Monte Carlo Methods**. 2^a. ed. Londres: Chapman and Hall, 1964.

JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling**. 1^a. ed. New York: Wiley, 1991.

KONAR, A. **Computational Intelligence: principles, techniques and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

KORDON, A. K. **Applying Computational Intelligence: How to create value**. Berlin: Springer, 2010.

LA-ROQUE, E. J. C. D. **Uma nova abordagem de seleção de célula de Handover para redes LTE heterogêneas: critérios adicionais baseados em estimativa de capacidade e velocidade de usuário**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2015.

LETAIEF, K. B.; LI, C.; ZHANG, J. Throughput and Energy Efficiency Analysis of Small Cell Networks with Multi-antenna Base Stations. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. XIII, n. 5, p. 2505-2517, 2014.

LI, C. et al. User-Centric Inter-cell Interference Nulling for Downlink Small Cell Networks. **2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)**, Sydney, Junho 2014. 5747-5752.

LI, W. et al. Clustering Based Resource Allocation for Inter-femtocell Interference Management. **Journal of Computational Information Systems**, p. 1457-1466, 2012.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LUGER, G. F. **Inteligência Artificial: estruturas e estratégias para a solução de problemas complexos**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

MALHOTRA, R.; SINGH, N.; SINGH, Y. Genetic algorithms: Concepts, Design for Optimization os Process Controlers. **Computer and Information Science**, Toronto, Março 2011.

MARGALHO, M.; JOHSON, T. **Avaliação de Desempenho de Sistemas Computacionais**. 1^a. ed. Rio de janeiro: LTC, 2011.

MARSHOUD, et al. **Realistic framework for resource allocation in macro-femtocell networks based on genetic algorithm**. Telecommunication Systems. Nova York: Springer. 2015. p. 1-12.

MEHBOOB, U. et al. Genetic Algorithms in Wireless Networking: techniques, applications, and issues. **Soft Computing**, v. XX, p. 2467-2501, Junho 2016.

MENASCÉ, D. A.; ALMEIDA, V. A. F.; DOWDG, L. W. **Performance by Design: Computer Capacity Planning by Example**. 1ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

METIS. Site do METIS, 2015. Disponível em: <<http://metis-ii.5g-ppp.eu>>. Acesso em: 24 Dezembro 2015.

MUTAIRI, A.; ROY, S. Impact of Traffic Load on OFDMA Femtocells Interference Mitigation. **IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS**, v. XXXIII, p. 2017-2026, Outubro 2015.

NAVIDI, W. **Probabilidade e Estatística para Ciências Exatas**. São Paulo: Bookman, 2012.

OBAIDAT, M. S.; BOUDRIGA, N. A. **Fundamentals of Performance Evaluation of Computer and Telecommunication**. 1ª. ed. New Jersey: Wiley, 2010.

PEDERSEN, K. I. et al. Enhanced Inter-cell Interference Coordination in Co-Channel Multi-Layer LTE-Advanced Networks. **IEEE - Wireless Communication Magazine**, n. 20, p. 120-127, 2013.

PENTINEN, J. T. J. **The LTE Advanced Deployment Handbook: The Planning GuideLines for the Fourth**. Noida: Wiley, 2016.

PINHEIRO, M. R. **Planejamento de rede LTE utilizando aproximação híbrida de modelo empírico outdoor: medição e técnica de algoritmo genético**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2015.

PONTES, R. **Inteligência Artificial nos Investimentos**. Rio de Janeiro: Clube dos autores, 2011.

QUINN, E. The cell enhancer. **IEEE vehicular Technology Conference**, v. XXXVI, p. 77-83, Maio 1986.

REMOLI, P. Um algoritmo genético para o problema de roteamento de veículos. **docslide.com.br**, 2015. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/um-algoritmo-genetico-para-o-problema-de-roteamento-de-veiculo.html>>. Acesso em: 26 Outubro 2016.

RODRIGUEZ, J. **Fundamentals of 5G Mobile Networks**. 1ª. ed. Chichester: Wiley, 2015.

ROHLING, H. **OFDM: Concepts for Future Communication Systems**. Berlin: Springer, 2011.

SANCHES, D. **Interferência Eletromagnética em Sistemas Eletrônicos**. [S.l.]: Clube de Autores, 2010.

SANCHES, D. **Tópicos Especiais em Eletrônica**. [S.l.]: Clube da Autores, 2013.

SBIT, S.; DADI, M. B.; CHIBANI, B. Co and Adjacent Channel Interference Evaluation in GSM and UMTS Cellular Networks. **International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering**, v. IV, 11 Novembro 2015.

SILVA, R. Automatic detection of motorcyclists without helm. **XXXIX Latin American Computing Conference (CLEI)**, 2013. 1-7.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to genetic algorithms**. Berlin: Springer, 2007.

SMALL CELL FORUM. **Small Cells - What's the big idea?** Small Cell Forum Ltd. U.K., p. 17. 2012.

SORET, B.; PEDERSEN, K.; LOPEZ, F. Interference characterization and mitigation benefit analysis for LTE-A and small cell deployment. **EURASIP - Journal on Wireless Communication and Networking**, 18 Abril 2015.

STOCKER, A. C. Small Cell mobile phone system. **IEEE Transactions on vehicular technology**, v. XXXIII, n. 4, p. 269-275, 1984.

TABANY, M. R.; GUY, G. An End-to-End QoS Performance Evaluation of VoLTE in 4G E-UTRAN-based Wireless Networks. **The Tenth International Conference on Wireless and Mobile Communications**, Sevilha, 22 Junho 2014. 90-97.

TADAIESKY, V. W. A. **Avaliação de técnicas de paralelização de algoritmos bioinspirados utilizando computação GPU: Um estudos de casos para otimização de roteamento em redes ópticas**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2015.

TRIVEDI, K. S. **Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Application**. 2^a. ed. Durhan: Wiley, 2001.

TRONG, D.; LE, T. **Architectures of Small-Cell Networks and Interference Management**. Nova York: Springer, 2014.

TURING, A. M. **"Intelligent Machinery, a heretical theory."** **The Turing Test: Verbal Behavior as the Hallmark of Intelligence**. [S.l.]: [s.n.], v. CV, 1948.

VARETTO, F. Genetic algorithms applications in the analysis of insolvency risk. **Jornal of Banking & Finance**, v. XXII, n. 10, p. 1421-1439, 1998.

VASANT, P. M. **Meta_Heuristics Optimization Algorithms in Engeneering, Business and Finance**. Hershey: IGI Global, 2012.

VELLOSO, F. **Informática: Conceitos Básicos**. 9^a. ed. São Paulo: Elsevier, 2014.

VIEIRA, S. **Estatística para a qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WEBB, W. **Wireless Communications: The future**. New York: Wiley, v. XII, 2007.

WEF. **Expanding participation and boosting growth: The infrastructure needs of the digital economy**. Geneva, p. 44. 2015.

ZADEH, L. A. Fuzzy Logic, neural networks, and soft computing. **Communications of the ACM**, v. XXXVI, p. 75-85, 1994.

ANEXO A

Funções

calcularTempoEsRxTx

```

void static calcularTempoEsRxTx(long double pkt_size, int operacao)
{
    FIN(calcularRecepcao(long double pkt_size, int operacao));
    if(operacao == 1)
    {
        tempoRecepcao = pkt_size/rxDrate;
        tempoEspera = (op_sim_time() - tempoEsperaEntrada) -
            tempoRecepcao;
        somatoriaRecepcao = somatoriaRecepcao + tempoRecepcao;
        op_stat_write(gTempoTotalRecepcao,somatoriaRecepcao);
    }
    else if(operacao == 2)
    {
        tempoTransmissao = pkt_size/txDrate;
        tempoEspera = (op_sim_time() - tempoEsperaEntrada) -
            tempoTransmissao;
        somatoriaTransmissao = somatoriaTransmissao +
            tempoTransmissao;
        op_stat_write(gTempoTotalTransmissao,somatoriaTransmissao);
    }
    somatoriaEspera = somatoriaEspera + tempoEspera;
    if(somatoriaEspera >= aux2)
    {
        aux2=somatoriaEspera;
        op_stat_write(gTempoTotalEspera, somatoriaEspera);
    }
    FOUT;
}

```

Alteração realizada no estado INIT_0

```

cargaBateriaStathandle = op_stat_reg ("Carga Bateria Linear",
OPC_STAT_INDEX_NONE,OPC_STAT_LOCAL);
gBatteryRakhmatov = op_stat_reg ("Carga Bateria Rakhmatov",
OPC_STAT_INDEX_NONE,OPC_STAT_LOCAL);
gTempoTotalEspera = op_stat_reg ("Tempo Total Espera",
OPC_STAT_INDEX_NONE,
OPC_STAT_LOCAL);
gTempoTotalTransmissao = op_stat_reg ("Tempo Total Transmissao",
OPC_STAT_INDEX_NONE, OPC_STAT_LOCAL);
gTempoTotalRecepcao = op_stat_reg ("Tempo Total Recepcao",
OPC_STAT_INDEX_NONE, OPC_STAT_LOCAL);
own_id = op_id_self ();
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Carga Linear Inicial",
&cargaBateriaLinear);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Corrente de Descarga - Espera",
&correnteEspera);

```

```

op_ima_obj_attr_get (own_id,"Corrente de Descarga -
Transmissao",&correnteTransmissao);
op_ima_obj_attr_get (own_id,"Corrente de Descarga - Recepcao",
&correnteRecepcao);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Data Rate - Recepcao", &rxDrate);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Data Rate - Transmissao", &txDrate);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Carga Rakhmatov Inicial",
&cargaBateriaRakhmatov);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Tempo Total Simulacao",
&tempoTotalSimulacao);
op_ima_obj_attr_get (own_id, "Beta", &BETA);
espera = 0;

```

Alteração realizada no estado INIT_3

```

tempoTotalSimulacao = tempoTotalSimulacao - op_sim_time();
auxTS = op_sim_time();
aux2 = 0;
tempoEspera = 0;
op_stat_write (cargaBateriaStathandle, cargaBateriaLinear);
op_stat_write (gBatteryRakhmatov,, cargaBateriaRakhmatov);

```

Alteração realizada no estado IDLE

```

If (espera == 0)
{
tempoEsperaEntrada = op_sim_time();
espera = 1;
if (tempoEspera > 0)
{
diminuiEnergiaRakhmatov(tempoTotalSimulacao,correnteEspera,(
op_sim_time() - tempoEspera),op_sim_time(),BETA);
}
}
if (tempoRecepcao > 0)
{
tempoRecepcao = 0;
}
if (tempoTransmissao > 0)
{
tempoTransmissao = 0;
}

```

Alteração realizada no estado FROM_LL

```

long double pktSize;
pktSize = op_pk_total_size_get(arrived_pkptr);
calcularTempoEsRxTx(pktSize,1);
diminuiEnergiaLinear(1);
diminuiEnergiaRakhmatov(tempoTotalSimulacao,correnteRecepcao,(op_sim_t
ime() - tempoRecepcao),op_sim_time(),BETA);
espera = 0;

```

Alteração realizada no estado FROM_HL

```

long double pktSize;

```

```

pktSize = op_pk_total_size_get(arrived_pkptr);
calcularTempoEsRxTx(pktSize,2);
diminuiEnergiaLinear(2);
diminuiEnergiaRakhmatov(tempoTotalSimulacao,correnteTransmissao,(op_sim
_time() - tempoTransmissao),op_sim_time(),BETA);
espera = 0;

```

Código da Função diminuirEnergiaLinear

```

void diminuirEnergiaLinear(double operacao)
{
    FIN(diminuirEnergiaLinear(double operacao));
    if(operacao == 1)
    {
        cargaBateriaLinear = cargaBateriaLinear - (tempoRecepcao *
            correnteRecepcao);
    }
    else if(operacao == 2)
    {
        cargaBateriaLinear = cargaBateriaLinear - (tempoTransmissao
*
        correnteTransmissao);
    }
    cargaBateriaLinear = cargaBateriaLinear - (tempoEspera *
    correnteEspera);
    op_stat_write (cargaBateriaStathandle, cargaBateriaLinear);
    FOUT;
}

```