



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

FABIO PEREIRA FERREIRA DA SILVA

**SISTEMA FUZZY PARA DISPOSITIVO MÓVEL DE DUAL-INTERFACE COM
CONEXÃO SIMULTÂNEA EM REDES HETEROGÊNEAS SEM FIO**

DM 32/2023

**UFPA / ITEC / PPGEE
Belém-Pará-Brasil
2023**



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

FABIO PEREIRA FERREIRA DA SILVA

**SISTEMA FUZZY PARA DISPOSITIVO MÓVEL DE DUAL-INTERFACE COM
CONEXÃO SIMULTÂNEA EM REDES HETEROGÊNEAS SEM FIO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

UFPA / ITEC / PPGEE

Belém-Pará-Brasil

2023

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

F383s Ferreira da Silva, Fábio Pereira.
SISTEMA FUZZY PARA DISPOSITIVO MÓVEL DE DUAL-
INTERFACE COM CONEXÃO SIMULTÂNEA EM REDES
HETEROGÊNEAS SEM FIO / Fábio Pereira Ferreira da Silva. —
2023.
72 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
Coorientador(a): Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior

1. Redes Heterogêneas Sem Fio, QoE, Handover, Wi-Fi,
4G. I. Título.

CDD 384.5

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

**SISTEMA FUZZY PARA DISPOSITIVO MÓVEL DE DUAL-INTERFACE COM
CONEXÃO SIMULTÂNEA EM REDES HETEROGÊNEAS SEM FIO**

AUTOR(A): FÁBIO PEREIRA FERREIRA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE **MESTRE** EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE **COMPUTAÇÃO APLICADA**.

APROVADA EM: **26/09/2023**

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS RENATO LISBOA FRANCÊS**
Data: 28/09/2023 12:21:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **JOSE JAILTON HENRIQUE FERREIRA JUNIOR**
Data: 26/09/2023 12:14:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior
(Coorientador – PPGEE/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **TASSIO COSTA DE CARVALHO**
Data: 26/09/2023 12:54:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tássio Costa de Carvalho
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **JORGE ANTONIO MORAES DE SOUZA**
Data: 27/09/2023 17:50:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Antônio Moraes de Souza
(Avaliador Externo – UFRA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Este trabalho é dedicado à todos que amam ao conhecimento,
porque através dele, conseguimos nos tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Todo Poderoso, criador dos céus e da terra pela força que me deu durante os dois anos de mestrado e por toda sabedoria e conhecimento que me concedeu em toda a minha vida.

Nossos sábios nos ensinam que precisamos honrar aqueles que nos acolhem. Um especial agradecimento a minha mãe pelo apoio nas horas mais difíceis a qual precisei, que foram de fundamental importância no apoio as dificuldades, sem a ajuda dela esse sonho não seria possível.

Agradeço em especial aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês e Prof. Dr. José Jaílton Júnior, pela confiança e oportunidade que me concederam para participar de seu projeto e desenvolver esse trabalho. Agradeço aos meus amigos de classe pela troca de conhecimento, principalmente a minha colega e amiga Adriana e um especial agradecimento a toda a equipe do laboratório LPRAD que contribuiu bastante na troca de conhecimento.

Agradeço com um carinho enorme ao Jorge Amaro e Kalef, pois foram de fundamentais importância não só nas atividades extraclasse, mas pela atuação como irmão e amigo. Agradeço aos meus professores que passaram pelo PPGEE por me ensinarem o caminho do conhecimento. Muito Obrigado Mestres e Doutores!

Que o Todo Poderoso abençoe e retribua todos os seus feitos; eleve e engrandeça seu brilho e seu esplendor. Que Ele dê vida longa e boa a todos os seus familiares, com alegrias e riqueza.

Que seja a vontade do Todo Poderoso, que todos juntos mereçamos ver o florescimento da comunidade científica acadêmica, prosperando na elevação contínua, constante e permanente, da busca pelo conhecimento.

*“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma,
a menos que tenha como fim último,
melhorar a humanidade.”
(Nikola Tesla)*

RESUMO

Com o passar dos anos houve um crescimento exponencial de redes sem fio heterogêneas, isso se deve aos avanços nas tecnologias de comunicação sem fio. Gerenciar a qualidade de serviço é essencial para atender às necessidades de questões relacionadas a problemas de *handover vertical*, onde os dispositivos móveis precisam de uma migração transparente. Surgindo os desafios de se obter uma boa qualidade de experiência aos usuários da rede. Neste trabalho, é apresentada uma avaliação da qualidade e o desempenho de um dispositivo móvel com *dual-interface*, utilizando o sistema *Fuzzy*, para dar as melhores condições de conexões simultâneas. Com o intuito de auxiliar na melhor escolha das redes heterogêneas disponíveis. O *Network Simulator* e *Evalvid*, foram as ferramentas de validação utilizada para análise e obtenção dos resultados. Os resultados obtidos foram satisfatórios, devido o dispositivo móvel de *dual-interface* com a aplicação do sistema *Fuzzy* ter sido capaz de escolher as melhores redes disponíveis e obter o dobro de desempenho no aproveitamento da vazão em relação aos dispositivos móveis tradicionais (por utilizar simultaneamente as duas interfaces de tecnologias diferentes). Garantindo uma migração transparente, principalmente em aplicações multimídia em tempo real, onde a perda de conexão é de suma importância.

Palavras-chave: Redes Sem Fio Heterogêneas; Qualidade de Serviço; *Handover Vertical*; Dispositivos Móveis; Sistema *Fuzzy*; *Network Simulator*; *Evalvid*.

ABSTRACT

Over the years, it is possible to see an exponential growth of heterogeneous wireless networks. This is due to advances in wireless communication technologies. Managing the quality of service is essential to address the needs of issues related to vertical handover issues where mobile devices need a seamless migration. Hence, the challenges of obtaining a good quality of experience for network users. This work presents an evaluation of the quality and performance of a mobile device with dual-interface, using the Fuzzy system, to provide the best conditions for simultaneous connections. In order to help in the best choice of heterogeneous networks available. The Network Simulator and evalvid were the validation tools used to analyze and obtain the results. The results obtained were satisfactory. Due to the dual-interface mobile device with the application of the Fuzzy system, it was able to choose the best available networks and obtain twice the performance in using the flow compared to traditional mobile devices (by simultaneously using the two interfaces of different technologies) . Ensuring a transparent migration, especially in real-time multimedia applications, where connection loss is of paramount importance.

Keywords: Heterogeneous Wireless Networks; Quality of Service; Vertical Handover; Mobile Devices; Fuzzy System; Network Simulator; Evalvid .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos de uma Rede Sem Fio	20
Figura 2 – Componentes de uma rede Wi-Fi	21
Figura 3 – Arquitetura Lógica de uma rede 802.11	22
Figura 4 – Rede IBSS	23
Figura 5 – Rede BSS	23
Figura 6 – Rede ESS	24
Figura 7 – Rede DS	24
Figura 8 – CSMA/CA	25
Gráfico 1 – Características de Enlaces Padrões	26
Gráfico 2 – Utilização da largura de banda do FHSS vs. DSSS.	27
Figura 9 – Rede: Infraestrutura de Rede LTE	30
Figura 10 – Portadoras Agregadas	31
Figura 11 – Portadoras Agregadas: Alternativas intra e inter-bandas	31
Figura 12 – Carrier Aggregation: Servindo Células	32
Figura 13 – MIMO - Spatial Multiplexing (2x2)	33
Figura 14 – MIMO - High S/N	33
Figura 15 – Handover	34
Figura 16 – Handover Vertical	35
Figura 17 – Handover Horizontal Redes 4G	36
Figura 18 – Handover Horizontal Redes Wi-Fi	36
Figura 19 – Handover Vertical Transparente	41
Figura 20 – Dispositivo com Dual-Interface	42
Gráfico 3 – Saída Fuzzy	43
Gráfico 4 – Sistema Fuzzy	44
Figura 21 – Dispositivo Tradicional	47
Gráfico 5 – Vazão Dispositivo Tradicional	47
Gráfico 6 – Atraso Dispositivo Tradicional	47
Gráfico 7 – Perda de Pacotes do Dispositivo Tradicional	48
Figura 22 – Dispositivo com Dual-Interface.....	49
Gráfico 8 – Vazão do Dispositivo Dual-Interface.....	49
Gráfico 9 – Atraso do Dispositivo Dual-Interface.....	49
Gráfico 10 – Perda de Pacotes do Dispositivo Dual-Interface.....	50
Gráfico 11 – Comparação dos Resultados da Vazão.....	50
Gráfico 12 – Comparação dos Resultados do Atraso.....	51
Gráfico 13 – Comparação dos Resultados das Perdas de Pacotes.....	51
Gráfico 14 – Comparação dos Resultados da Vazão.....	53
Gráfico 15 – Média PSNR dos Dispositivos.....	53

Gráfico 16 – Média SSIM dos Dispositivos.....	54
Gráfico 17 – Média VQM dos Dispositivos.....	54
Figura 23 – Frame 1139 do Vídeo Highway.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
2G	<i>Segunda Geração</i>
3G	<i>Terceira Geração</i>
4G	<i>Quarta Geração</i>
5G	<i>Quinta Geração</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
AP	<i>Access Point</i>
ARPANET	<i>Advance Research Projects Agency Network</i>
BS	<i>Base Station</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
DIFS	<i>Distributed Inter Frame Space</i>
DL	<i>Down Link</i>
DS	<i>Distribution Systems</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
Gbps	<i>Gigabit Por Segundo</i>
GHz	<i>Giga Hertz</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>

GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
HHO	<i>Horizontal Handover</i>
HO	<i>Hand-off ou Handover</i>
HomeRF	<i>Home Radio Frequency</i>
HPP	<i>Handover Ping Pong</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IR	<i>Infrared</i>
ISM	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
Kbps	<i>Kilobit Por Segundo</i>
Km/h	<i>Kilômetro Por Hora</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MBPS	<i>Megabit Por Segundo</i>
MBWA	<i>Mobile Broadband Wireless Access</i>
MHz	<i>Mega Hertz</i>
MIH	<i>Media Independent Handover</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
ms	<i>milissegundo</i>
NAM	<i>Network Animator</i>
NS2	<i>Network Simulator 2</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>

PCC	<i>Primary Component Carrier</i>
QoS	<i>Quality Of Service</i>
RAT	<i>Radio Access Technologies</i>
RLC	<i>Radio link control</i>
RN	<i>Relay Nodes</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SCC	<i>Secondary Component Carrier</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UP	<i>Up link</i>
VHO	<i>Vertical Handover</i>
VOIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wide Band Code Division Multiple Access</i>
WECA	<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i>
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WLL	<i>Wireless Local Loop</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Organização da Dissertação	19
2	REDES HETEROGÊNEAS	20
2.1	Redes Sem Fio Abordadas Nesta Dissertação	20
2.1.1	Rede WiFi.....	20
2.1.1.1	Componentes de uma Rede Wi-Fi.....	21
2.1.1.2	Tipos de uma Rede Wi-Fi	22
2.1.1.2.1	Rede IBSS	22
2.1.1.2.2	Rede BSS	22
2.1.1.2.3	Rede ESS	24
2.1.1.2.4	Rede DS	24
2.1.1.3	Camada de Enlace de uma Rede Wi-Fi.....	25
2.1.1.4	Protocolos IEEE 802.11	27
2.1.1.4.1	802.11b	27
2.1.1.4.2	802.11a	27
2.1.1.4.3	802.11g	28
2.1.1.4.4	802.11d	28
2.1.1.4.5	802.11e	28
2.1.1.4.6	802.11h	28
2.1.1.4.7	802.11i	28
2.1.2	Rede 4G/LTE	28
2.1.3	Rede 4G/LTE Advance	30
2.1.3.1	Agregação de Portadoras.....	30
2.1.3.2	Saída Múltipla de Múltiplas Entradas	32
2.2	Handover	33
2.2.1	Classificação do Handover	34
2.2.1.1	Handover Vertical	34
2.2.1.2	Handover Horizontal	35
3	TRABALHOS RELACIONADOS	37
3.1	Visão Geral	37
4	REDES SEM FIO HETEROGÊNEAS COM DISPOSITIVOS MÓVEIS DE MÚLTIPLAS INTERFACES PARA CONEXÕES SIMULTÂNEAS UTILIZANDO SISTEMA FUZZY	40
4.1	Problematização	40
4.2	Proposta Sistema Fuzzy	41

5	RESULTADOS.....	45
5.1	Simulação	45
5.2	Cenário 1	46
5.3	Cenário 2	48
5.4	Comparação entre os Cenários	50
5.5	Resultados com Sistema Fuzzy.....	52
5.5.1	Primeiro Cenário	52
5.5.2	Segundo Cenário	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
	REFERÊNCIAS	57
	 APÊNDICES	 59
	APÊNDICE A – SCRIPT BASE DE SIMULAÇÃO DO DISPOSITIVO	
	TRADICIONAL	60
	APÊNDICE B – SCRIPT BASE DE SIMULAÇÃO DO DISPOSITIVO	
	COM DUAL-INTERFACE.....	67

1 INTRODUÇÃO

O uso de redes heterogêneas (HetNet), vem crescendo exponencialmente, devido o uso de mídias digitais, móveis e sociais se tornarem indispensável na vida cotidiana das pessoas. Isso se confirma pelo último relatório feito pela We Are Social (2021), onde o número de usuários na rede se aproxima de 4,66 bilhões, sendo que mais da metade da população utilizam dispositivos móveis. Outro fator do aumento está diretamente ligada a Covid-19, onde os impactos na economia mundial fez com que as pessoas mudassem seu cotidiano. Isso levou consumidores em todo o mundo a abraçar as compras online e utilizarem as redes sociais como forma de entretenimento (SOCIAL, 2021).

As HetNet's se dividem basicamente entre duas vertentes, as redes cabeadas (Ethernet) e as redes sem fio (Wireless). As cabeadas são utilizadas de uma maneira geral, para servirem de infraestrutura para as redes wireless. Já as redes *wireless* se diferenciam uma das outras pela sua capacidade de propagação de alcance de seu sinal no meio ambiente, onde são conectados os seus usuários, os dispositivos móveis.

A demanda por banda larga móvel passa por um aumento sem precedentes, especialmente com o advento de uma grande quantidade de dispositivos portáteis inteligentes. Esta tendência de comportamento do usuário se manifesta como uma enorme pressão sobre os sistemas de comunicação celular em termos de exigências de capacidade, Qualidade de Serviço (QoS), Qualidade de Experiência (QoE) e eficiência energética, devido ao crescimento de aplicações com altos requisitos de largura de banda, como streaming de vídeo e compartilhamento de arquivos multimídia (ALIU et al., First Quarter 2013).

Com o aumento dos serviços convergentes entre redes de diferentes tecnologias de acesso e a evolução das redes de telecomunicações é de fundamental importância o desenvolvimento de mecanismos de gerência de mobilidade e algoritmos de *handover*. Tais mecanismos são implementados geralmente nos núcleos das redes ou em sua borda, com o intuito de reduzir os impactos causados na migração dos dispositivos móveis entre redes heterogêneas sem fio, estes dispositivos são fabricados com múltiplas interfaces de tecnologias de redes sem fio.

Em visão geral, as redes heterogêneas são compostas de diversos tipos de elementos, com diferentes potências de transmissão, áreas de cobertura e larguras de banda. Também é conhecido que o usuário utiliza somente o nível de sinal recebido para a seleção da célula a qual se conectará, não levando em consideração outros fatores como largura de banda disponível, número de usuários conectados na célula ou o tipo de aplicação que será utilizada pelo usuário móvel. Diante disso, é provável um cenário totalmente desbalanceado, com células que estejam totalmente sobrecarregadas, enquanto outras estejam com pouco ou nenhum usuário conectado.

1.1 Motivação

Os dispositivos móveis como *notebook*, *tablet* e *smartphone* já vêm equipados com mais de uma interface de rede. Só que muitas dessas interfaces ao se comunicarem com mais de uma rede sem fio, priorizam sempre as redes Wi-Fi, mesmo possuindo várias interfaces, são programadas para priorizar sempre a uma única interface.

Outro fator de prioridade, é o de maior potência de sinal, ou seja, os dispositivos já vêm configurados para esta finalidade, que nem sempre será a melhor opção de handover, devido a outros parâmetros de qualidade de rede. Outros problemas causados pela interligação das redes sem fio, são relatados por Tanenbaum e Wetherall (2011), como congestionamento, colisões de pacotes, o alto consumo de energia e os impactos de handover a qual os dispositivos sofrem na mobilidade entre redes.

Como os dispositivos móveis atuais priorizam esses parâmetros para troca de redes heterogêneas, foi a motivação para desenvolvimento deste proposta, com intuito de dar mais inteligência para os dispositivos móveis (borda da rede) aliviando em parte, a gerência no núcleo da rede.

1.2 Objetivo Geral

O principal objetivo desta dissertação propõe um Sistema *Fuzzy* para decisão de *handover*. Neste novo cenário o dispositivo móvel estará conectado a duas redes simultaneamente e poderá realizar múltiplas trocas de conexões simultâneas, dessa forma o Sistema *Fuzzy* auxiliará o processo de decisão e seleção de conexão.

Para obter a análise de desempenho da rede, será analisada também através de simulações, utilizando o NS-2 (*Network Simulator*). Um dispositivo tradicional conectados a duas Hetnet específicas (4G e Wi-Fi). E compararmos com o novo dispositivo de *Dual-Interface*.

Para validação e obtenção da visualização dos gráficos, serão utilizadas as ferramentas XGRAPH e o MATLAB, que são ferramentas que servem para plotagem dos gráficos. Essas ferramentas trabalham paralelamente com os arquivos gerados pelo NS2, são chamados arquivos de *trace*, onde todas as informações do tráfego das simulações estão contidas, dando a possibilidade da análise dos gráficos.

Dentre os demais objetivos específicos deste trabalho serão apresentados a seguir, tais como:

- Levantar um estudo sobre os impactos ocorridos durante o procedimento de *handover*;
- Apontar graficamente os resultados das simulações;
- Apontar os *frames* defeituosos na visualização das imagens de ambos dispositivos;

Com a aplicação do sistema Fuzzy na escolha da melhor rede disponível, os resultados mostraram satisfatórios com um aproveitamento de 92,5% da banda em relação ao cenário com utilização de dispositivo móvel tradicional.

1.3 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado da seguinte forma, no segundo capítulo serão apresentados conceitos relacionados as redes heterogêneas sem fio e os impactos de *handover*. No capítulo terceiro, serão apresentados todos os trabalhos correlatos, comparando as propostas de outros autores com a proposta a qual se propõe essa dissertação. Para o quarto capítulo, serão apresentados a conexão de um dispositivo com Dual-Interface com aplicação do Sistema Fuzzy para escolha da melhor rede com base em parâmetros/métricas de Qualidade de Serviço e/ou de Qualidade de Experiência. No quinto capítulo, serão apresentados os resultados das simulações obtidas, com todos os cenários e gráficos. Já no sexto e último capítulo serão apresentados as considerações finais e os trabalhos futuros, seguida das referências e apêndices com a codificação das simulações.

2 REDES HETEROGÊNEAS

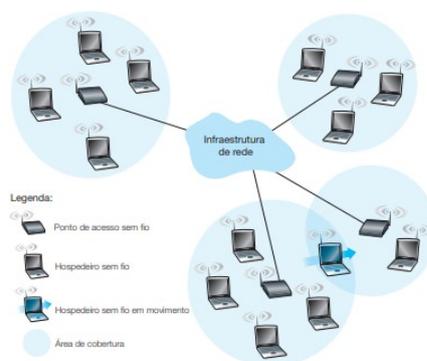
Neste capítulo, será realizada uma abordagem acerca do histórico das redes heterogêneas e uma melhor compreensão dos sistemas de comunicação sem fio atuais. Além disso, serão apresentados os principais componentes e subsistemas, bem como tecnologias auxiliares. Não é tido como objetivo que se mencione todas as invenções, mas sim os destaques que contribuíram fundamentalmente para os sistemas atuais.

2.1 Redes Sem Fio Abordadas

As redes heterogêneas sem fio utilizadas neste trabalho para auxílio de avaliação de desempenho, são as redes Wi-Fi, classificadas de redes de dispositivos de rede local sem fio (WLAN) e 4G, classificadas como redes de longa distância (do inglês, Long Term Evolution - LTE). Cada vez mais utilizados na maioria das grandes organizações, pois todo ambiente de rede precisa armazenar informações para possibilitar o seu gerenciamento.

2.1.1 Rede WiFi

Figura 1 – Elementos de uma Rede Sem Fio



Fonte: Kurose e Ross (2013)

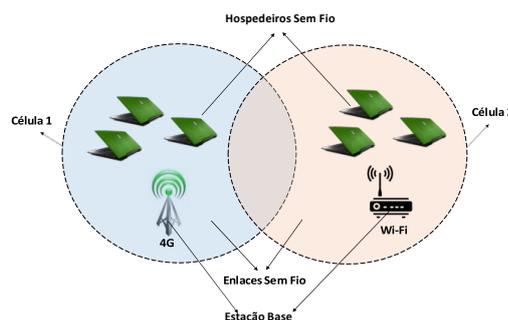
Na Figura 1, é mostrado um cenário de comunicação de dados e mobilidade sem fio. O termo "*Wi-Fi*" foi licenciada primeiramente pela empresa *Wi-Fi Alliance*, uma empresa dos EUA, localizada no Texas, onde foi criada essa tecnologia e trazida para o Brasil. Ela segue a padronização do IEEE 802.11, onde as redes Wi-Fi operam em frequências não licenciadas. Isso quer dizer que não precisam de licença alguma para atuarem, basta que os dispositivos estejam próximos a essas transmissões para poderem operar, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), é quem fiscaliza as frequências de transmissões no Brasil (SANCHES, 2005).

É importante fazermos uma distinção entre mobilidade e rede sem fio, para que possamos compreender seu funcionamento. Redes domésticas e escritórios, são exemplos de redes sem fio com mobilidade limitada, já as redes celulares são exemplos de arquiteturas de rede para mobilidade, principalmente com altas velocidades, quando os usuários utilizam dentro de veículos automotivos (KUROSE; ROSS, 2013).

2.1.1.1 Componentes de uma Rede Wi-Fi

São dois os modos de operação de uma rede Wi-Fi: Infraestrutura e *Ad Hoc*. Os componentes que compõem uma rede sem fio baseada em infraestrutura são três: hospedeiros sem fio (dispositivos que ficam na borda da rede, que podem ser móveis ou não), em enlaces sem fio (onde ocorre a comunicação entre os dispositivos e a estação base) e a estação base propriamente dita (onde ocorre a gerência de envio e recebimento de dados) (KUROSE; ROSS, 2013). Exemplos de estação base são as torres celulares em redes celulares (IEEE 802.20) e pontos de acesso Wi-Fi (IEEE 802.11). Ver Figura 2.

Figura 2 – Componentes de uma rede Wi-Fi



Fonte: Próprio Autor (2018).

Em ambos os modos de operação de uma rede Wi-Fi, tanto no modo *Ad Hoc* ou Infraestrutura, a comunicação entre os dispositivos se dá através de um SSID (do inglês, *Service Set Identifier* - Identificador do Conjunto de Serviços), também conhecido como “Nome da Rede Sem Fio”, identifica a rede sem fio. Basicamente o SSID é periodicamente anunciado na rede como quadro de anúncio (do inglês *beacon frame*), tanto pelo ponto de acesso (do inglês, *Access Point* - AP) que controla toda a rede do tipo Infraestrutura, ou no caso da rede *Ad Hoc*, o próprio dispositivo anuncia seu SSID para que os demais dispositivos possam detectar, para começar o processo de comunicação para uma possível troca de arquivos.

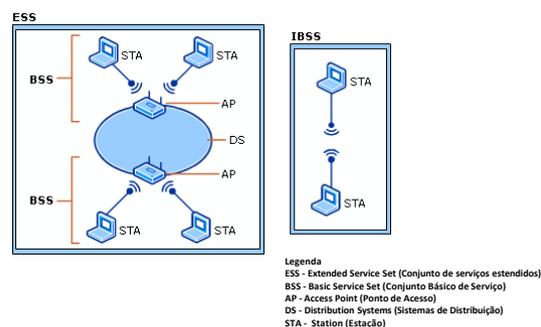
Na rede Infraestrutura a estação primeiramente identifica a rede sem fio e os AP's disponíveis dentro da sua área de cobertura. Isso é feito através da monitoração dos quadros “anúncio” vindos dos AP's, que anunciam cada um deles na rede sem fio, ou também através da sondagem (do inglês, *probe*) de uma rede sem fio particular através do uso de *probe frames* (quadros de sondagem). A estação então escolhe uma rede das disponíveis e inicia o processo de

autenticação com o AP. Uma vez que a estação e o AP se autenticaram o processo de associação é iniciado. O processo de associação permite que o AP e a estação troquem informações e funcionalidades. O AP pode usar essa informação e compartilhar com outros AP's na rede para disseminar conhecimento da localização atual da estação na rede (BULHMAN; CABIANCA, 2016).

2.1.1.2 Tipos de uma Rede Wi-Fi

As redes Wi-Fi são compostas basicamente por quatro tipos de redes: As redes IBSS (do inglês, *Independent Basic Service Set* - Conjunto de Serviços Básicos Independentes), as redes BSS (do inglês, *Basic Service Set* - Conjunto Básico de Serviço), as redes ESS (do inglês, *Extended Service Set* - Conjunto de serviços estendidos) e as redes DS (do inglês, *Distribution Systems* - Sistemas de Distribuição) (BULHMAN; CABIANCA, 2016). Os cenários gerais das arquiteturas são mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Arquitetura Lógica de uma rede 802.11



Fonte: Bulhman e Cabianca (2016)

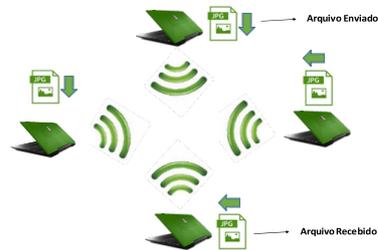
2.1.1.2.1 Rede IBSS

As redes IBSS consistem de pelo menos duas estações, elas são também chamadas de rede sem fio Ad Hoc. Nesse tipo de arquitetura não há um ponto de acesso que conecte a rede a um sistema de distribuição, ou seja, os dispositivos se comunicam diretamente entre si através de suas interfaces de rede wireless e antenas apropriadas. Elas são utilizadas geralmente na troca de algum arquivo entre os dispositivos clientes. A Figura 4, nos é mostrado um exemplo de uma rede IBSS.

2.1.1.2.2 Rede BSS

As redes BSS são chamadas de rede infraestrutura (do inglês, *Infrastructure Wireless Network*). Nesse tipo de rede, há um ponto de acesso (do inglês, *Access Point* - AP) que suporta

Figura 4 – Rede IBSS



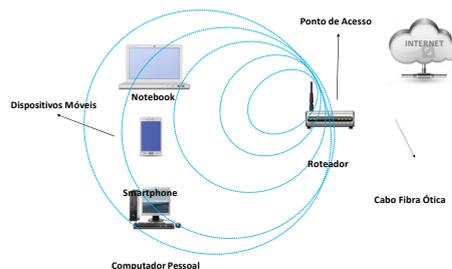
Fonte: Próprio Autor (2018)

um ou mais clientes sem fio. Todas as estações se comunicam entre si através de um AP.

Um dos grandes benefícios, é o armazenamento dos dados. Enquanto as estações estão em modo de economia de energia (do inglês, *Power Save*). São dispositivos clientes (computadores, impressoras, tablets, etc.) interconectados através do uso de um dispositivo central AP, que age como uma espécie de “*Switch Wireless*”, ou seja, assim como um *Switch* tem a função de interconectar máquinas numa rede local através de cabos, o AP tem a mesma função só que interconectando todos os dispositivos de uma rede local através da rede sem fio (não cabeada).

Toda rede BSS possui um nome que a identifica, conhecido pela sigla SSID (do inglês, *Service Set Identifier*). A Figura 5, é mostrada um exemplo de rede BSS.

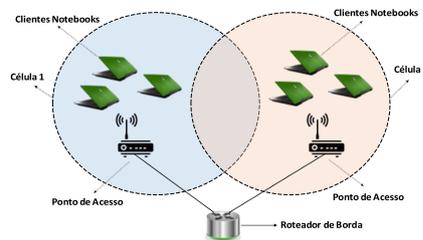
Figura 5 – Rede BSS



Fonte: Próprio Autor (2018)

No exemplo apresentado através da Figura 5, nos é mostrado um dispositivo central denominado de AP, onde há um controle de todos os dispositivos conectados na rede. Nesse exemplo é mostrado três dispositivos sendo controlados seu acesso à rede mundial de computadores, a *Internet*.

Figura 6 – Rede ESS



Fonte: Próprio Autor (2018)

2.1.1.2.3 Rede ESS

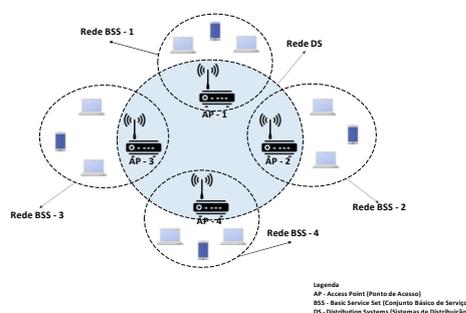
As redes ESSs são um conjunto de BSSs interconectadas, com o intuito de aumentar o alcance e a capacidade da rede Wi-Fi, podendo consistir em até dezenas de AP e conter milhares de *hosts* (endereços) conectados. Os AP em um ESS são conectados por meio de um "Sistema de Distribuição (do inglês, *Distribution System - DS*)", que pode ser cabeado ou não. Na Figura 6, é mostrado um exemplo de ESS.

Na análise da Figura 6, nos é mostrado um roteador de borda, onde sua função é interligar duas redes diferentes através do uso de cabeamento. Controlando o acesso dos APs, que por sua vez tem a função de controlar o acesso dos dispositivos móveis conectados a elas.

2.1.1.2.4 Rede DS

As redes DS (do inglês, *Distribution Systems - Sistemas de Distribuição*) tem a função de interconectar os APs de múltiplos BSSs. Com isso as estações podem se mover de um BSS para outro BSS. O DS é o componente lógico usado para interconexão dos BSSs e provê serviços que permitem o roaming entre as estações e os BSSs. Os APs podem ser interconectados através da rede cabeada ou não. Na Figura 7, é mostrado um exemplo de rede DS.

Figura 7 – Rede DS



Fonte: Próprio Autor (2018)

Na Figura 7, nos é apresentado os APs, que coordena a comunicação entre as estações dentro de uma BSS. O DS, é o sistema usado para interconectar BSSs formando uma ESS. O Portal funciona como uma ponte entre uma rede sem fio e uma rede fixa.

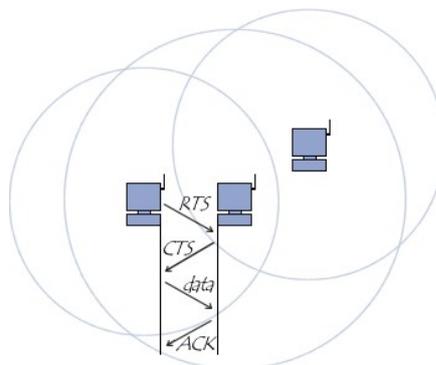
2.1.1.3 Camada de Enlace de uma Rede Wi-Fi

A camada de conexão de dados da norma 802.11 é composta por duas subcamadas. A camada de controle da conexão lógica (do inglês, *Logical Link Control* - LLC) e a camada de controle de acesso ao suporte (do inglês, *Media Access Control* - MAC) (CCM, 2017).

O grupo de engenheiros do IEEE 802.11 em 1997, ratificou o padrão para redes Wi-Fi, foi definido que o mecanismo de controle de acesso ao meio (MAC) seria o CSMA/CA (do inglês, *Carrier Sense Medium Access with Collision Avoidance* - Acesso ao meio com detecção de portadora e prevenção de colisão) (FILHO, 2014). Esse padrão segue um algoritmo chamado de *polling*, onde os dados atravessam o meio sem fio sem riscos de colisões.

Numa rede local *Ethernet* tradicional, o método de acesso utilizado pelas máquinas é o CSMA/CD (do inglês, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect* - Acesso Múltiplo de Detecção de Transportadora com Detecção de Colisão), no qual cada máquina é livre de se comunicar a qualquer momento. Toda máquina que envia uma mensagem verifica se nenhuma outra mensagem foi enviada ao mesmo tempo, por outra máquina. Se for o caso, as duas máquinas aguardam durante um tempo aleatório, antes de recomeçar a emitir. Num ambiente sem fio, este método não é possível na medida em que duas estações que se comunicam com um receptor não se ouvem, necessariamente, mutuamente, devido ao seu raio de alcance. Assim, a norma 802.11 propõe um protocolo similar chamado de CSMA/CA (do inglês, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - Acesso múltiplo com verificação de portadora com anulação ou prevenção de colisão). O protocolo CSMA/CA utiliza um mecanismo de anticisão baseado num princípio de recepção recíproca entre o emissor e o receptor (CCM, 2017). Ver Figura 8.

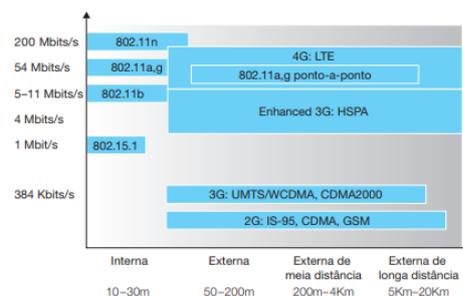
Figura 8 – CSMA/CA



Fonte: CCM (2017)

A estação que quer emitir ouve a rede. Se a rede estiver congestionada, a transmissão será adiada. Caso contrário, se os meios de comunicação estiverem livres durante um determinado tempo (chamado em inglês, *Distributed Inter Frame Space - DIFS*), então, a estação poderá emitir. A estação transmitirá uma mensagem chamada de RTS (do inglês, *Request to send - Pedido a ser emitido*) com informações sobre o volume de dados que ela quer emitir, além de sua velocidade de transmissão. O receptor (geralmente, um ponto de acesso) responderá com um CTS (do inglês, *Clear To Send - ok para emitir*) e, assim, a estação começará a emissão dos dados. Na recepção de todos os dados emitidos pela estação, o receptor enviará um aviso de recepção chamado de ACK (forma abreviada do inglês, *Acknowledgement - Confirmação*). Todas as estações vizinhas esperarão um tempo que consideram ser o necessário para a transmissão do volume da informação a ser emitida na velocidade anunciada (CCM, 2017).

Gráfico 1 – Características de Enlaces Padrões

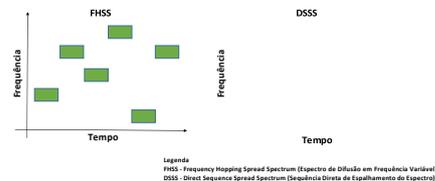


Fonte: Kurose e Ross (2013)

A principal diferença entre uma rede cabeada e uma rede sem fio está na camada de enlace. Por isso, faz-se necessário entendermos as limitações, como: a redução da força de sinal entre os *hosts* sem fio e as estações-base. Isso se dá através da distância entre os dois, quanto maior a distância, menor o sinal. Também há possíveis interferências de outras fontes, como dispositivos que trabalhe nas mesmas frequências que os rádios transmissores, exemplos disso são os micro-ondas e telefones sem fio. No Gráfico 1, é mostrado algumas características dos enlaces nas redes sem fio.

Para que uma rede sem fio funcione é preciso fixar o sinal em determinada frequência, basicamente essa arquitetura é composta pela frequência chamada de FHSS (do inglês, *Frequency Hopping Spread Spectrum - Espectro de Difusão em Frequência Variável*) e a DSSS (do inglês, *Direct Sequence Spread Spectrum - Sequência Direta de Espalhamento do Espectro*). A primeira utiliza uma banda de frequência 80, enviando um sinal de ruptura denominado de "*burst*" sobre o canal e saltando "*hopping*" para outro canal, podemos visualizar no gráfico 2.

Analisando o Gráfico 2, o FHSS divide o espectro disponível em bandas separadas. Tanto o ponto de acesso quanto o cliente "saltam" entre frequências baseadas no mesmo padrão pseudoaleatório, transferindo uma parte dos dados durante cada salto (EDN, 1999). Sempre que

Gráfico 2 – Utilização da largura de banda do FHSS vs. DSSS.

Fonte: Próprio Autor (2018)

a interferência corrompe o sinal, os dispositivos podem retomar a transferência de dados após o próximo salto para uma nova frequência que seja clara. O DSSS, em contraste, espalha o sinal através de uma largura de banda maior do que o FHSS, criando uma densidade de energia mais baixa em todo o espectro. Ele usa um sinal que substitui a mensagem por blocos de código de tamanho fixo, expandindo a largura de banda.

2.1.1.4 Protocolos IEEE 802.11

2.1.1.4.1 802.11b

Também conhecido como Wi-Fi, é especificado para operar em 2.4 GHz, utilizando a banda ISM (do inglês, *Industrial Scientific and Medical* - Indústria Científica e Médica), são bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Possui 3 canais de rádio frequência disponíveis. Utilizam a modulação DSSS (do inglês, *Direct Sequence Spread Spectrum*), permitindo altas taxas de velocidade em distâncias de até 50 metros em escritórios. O padrão permite taxas de transferência de até 11 Mbps, que são até cinco vezes maiores do que a especificação original do IEEE 802.11 e próxima ao padrão *Ethernet*.

2.1.1.4.2 802.11a

É o equivalente *Fast-Ethernet* do padrão IEEE 802.11b. O IEEE 802.11a é desenhado para operar numa banda de frequência de 5 GHz, com 8 canais de rádio disponíveis e com 54 Mbps por canal. Diferente dos padrões IEEE 802.11b/g, o IEEE 802.11a não usa o padrão DSSS. Ao contrário, utiliza o OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais) que opera mais facilmente em ambientes de escritórios. Apesar de as redes Wi-Fi populares funcionarem com o padrão 802.11b, os padrões 802.11a e 802.11g foram desenvolvidos para ser mais seguros ou para se movimentarem em mais canais.

2.1.1.4.3 802.11g

Prevê a especificação do MAC e da camada física (PHY). A camada física será uma extensão do IEEE 802.11b com uma taxa de transmissão de 54 Mbps usando a modulação OFDM. Usando um protocolo estendido, o 802.11g permite o uso misto da rede. Esta característica de uso misto permite que equipamentos que usam o 802.11b operando em 11 Mbps possam compartilhar a mesma rede com os novos equipamentos operando em 54 Mbps. Isso permitirá a migração sem impacto das redes de 11 Mbps para as redes de 54 Mbps.

2.1.1.4.4 802.11d

Foi desenvolvido para as áreas fora dos chamados cinco grandes domínios reguladores (EUA, Canadá, Europa, Japão e Austrália). Essa extensão tem *frame* estendido que inclui campos com informações dos países, dados de frequência e tabelas com parâmetros.

2.1.1.4.5 802.11e

Extensão ao padrão que introduz mecanismos de provisão de QoS (do inglês, *Quality of Service* - Qualidade de Serviço) no MAC 802.11. Essa extensão, por ainda não ter sido dado um ponto final na sua definição, pouco trabalho de caráter concreto tem sido feito, ficando as discussões apenas em um patamar teórico.

2.1.1.4.6 802.11h

Adiciona uma função de seleção dinâmica de frequência (do inglês, *Dynamic Frequency Selection* - DFS) e um controle de potência de transmissão para o padrão 802.11a.

2.1.1.4.7 802.11i

Criado para melhorar as funções de segurança do MAC 802.11, que agora é conhecido como ESN (do inglês, *Enhanced Security Network* - Rede de Segurança Aprimorada). O esforço do ESN é unificar todos os esforços para melhorar a segurança das WLANs.

2.1.2 Rede 4G/LTE

Essa tecnologia surgiu em 2012 no Brasil, através de uma licitação feita pela ANATEL, onde as frequências eram de 2500 MHz, as empresas que adquiriram estas frequências foram a Vivo, Tim, Claro, Oi, Sky e Sunrise. (ANATEL, 2018) O termo LTE (do inglês, *Long Term Evolution* – Evolução a Longo Prazo) é chamada de tecnologia de quarta geração (4G). O LTE é uma tecnologia que inicialmente foi projetada para prover serviços de dados e prover melhorias no *throughput* do usuário, a capacidade do setor em reduzir a latência do plano

do usuário trazendo uma nova experiência com total mobilidade, (ALMEIDA, 2013). Essa tecnologia prioriza o tráfego de dados em vez de voz, como acontecia em gerações anteriores, isso proporciona uma rede de dados mais rápida e mais estável.

A sua padronização foi estabelecida pelo grupo 3GPP (do inglês, *3rd Generation Partnership Project*), (ALMEIDA, 2013). O 4G é sucessora da rede 3G (Terceira Geração), seu principal benefício é a melhoria significativa na velocidade. As características das redes 4G se dá na sua alta taxa de *download* (acima de 200 Mbps) e *upload* (acima de 50 Mbps), (ANATEL, 2018). O LTE permite a distribuição flexível do espectro através de novas frequências ou das faixas já utilizadas, ou seja, ela permite a coexistência desta rede com outras redes já implantadas como o GSM e o WCDMA (do inglês, *Wide Band Code Division Multiple Access* - Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Sequência Direta de banda larga), que são tecnologias anteriores utilizadas pelas empresas de telefonia móvel, (ALMEIDA, 2013).

Ela é baseada no protocolo IP (do inglês, Internet Protocol - Protocolo da Internet), e seu funcionamento se dá através do EPC (do inglês, Evolved Packet Core - Núcleo de Pacote Evoluído) para comutação de circuitos para voz e comutação de pacotes para dados, separando seus módulos para utilização de tecnologias anteriores como o 2G (Segunda Geração) e 3G. A comunicação de voz é dada por VoIP (do inglês, Voice over Internet Protocol - Voz Sobre Protocolo da Internet) e utilizando QoS (do inglês, Quality of service - Qualidade de Serviço) ponta-a-ponta viabilizando conteúdos de multimídias com baixa latência e em tempo real. Possui flexibilidade de espectro de rádio, obtendo largura de banda de 1.4 MHz e 2 MHz trazendo resistência às interferências e suportando um número maior de usuários.

É possível trabalhar com dois módulos de frequências, como o FDD (do inglês, *Frequency Division Duplex* - Dupla Divisão de Frequência) e o TDD (do inglês, *Time Division Duplex* - Dupla Divisão de Tempo). No modo FDD são utilizadas duas faixas de frequências distintas, na qual uma delas são utilizadas apenas para envio de dados e a outra para recebimento. Já no modo TDD apenas uma faixa é utilizada em que a transmissão e envio de dados, ocorrem em tempos diferentes, (ALMEIDA, 2013).

A rede LTE utiliza a arquitetura SAE (do inglês, *System Architecture Evolution* - Evolução da Arquitetura do Sistema), que visa otimizar o desempenho e diminuir os custos de serviços baseados em protocolo IP. Os principais componentes dessa arquitetura são as estações, a MME (do inglês, *Mobility Management Entity* - Entidade Gestora de Mobilidade) e o *Gateway*. As estações, são as estações de rádio base da rede LTE, responsável pela transmissão de rádio frequência. Já o MME é o componente que controla o acesso à rede e o Gateway é o que conecta o sistema com a rede IP. A comunicação com as redes 2G e 3G se dá através de uma interface otimizada para o LTE, que torna a rede LTE extensível, como é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Rede: Infraestrutura de Rede LTE



Fonte: Próprio Autor (2018)

2.1.3 Rede 4G/LTE Advance

O *LTE-Advance* foi desenvolvido com objetivo de cumprir os requisitos estabelecidos pela ITU para a IMT (do inglês, *International Mobile Telecommunications* - Telecomunicações Móveis Internacionais) Avançado, também conhecido como 4G, (3GPP, 2013). O foco dessa tecnologia está na maior capacidade, fornecer taxas de bits mais altas de uma maneira econômica.

As especificações são relatadas por Guedes e Vasconcelos (2009), onde acordos já foram confirmados com requisitos mínimos exigidos para implementação dessa infraestrutura, como largura de banda maior que 70 MHz para *downlink* e 40 MHz para *uplink*, taxa de transferência média para o usuário três vezes maior do que no LTE, taxa de pico com *downlink* de 1 Gbps, *uplink* de 500 Mbps, capacidade de pico com *downlink* de 30 bps/Hz e *uplink* de 15 bps/Hz, capacidade três vezes maior do que no LTE refletida como a eficiência do espectro, mobilidade igual à do padrão LTE, flexibilidade do espectro com suporte à agregação espectral e largura de banda escalável, compatibilidade com redes anteriores e cobertura deve ser otimizada.

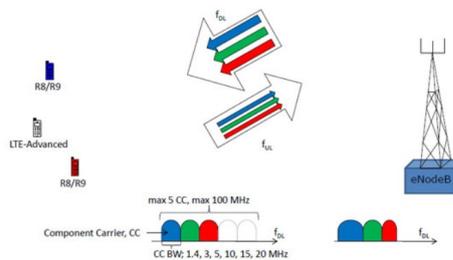
2.1.3.1 Agregação de Portadoras

Novas funcionalidades foram implementadas no *LTE-Advance*, como Agregação de Portadoras (do inglês *Carrier Aggregation* - CA). Isto é, o uso de técnicas de multi-antena e suporte para nós de retransmissão (do inglês, *Relay Nodes* - RN), (3GPP, 2013). Essa tecnologia aumenta a capacidade de transferência entre o dispositivo do usuário e a antena da operadora, ou seja, os celulares se conectam simultaneamente a mais de uma frequência ou faixa de espectro.

A maneira mais direta de aumentar a capacidade é adicionar mais largura de banda. Como é importante manter a compatibilidade retroativa com os celulares R8 e R9, o aumento da largura de banda no *LTE-Advanced* é fornecido por meio das portadoras agregadas R8 / R9. As portadoras agregadas pode ser usada para FDD e TDD. Um exemplo de portadoras agregadas é mostrado na Figura 10.

Conforme é mostrado na Figura 10, cada transportador agregado é referido como um portador de componente. A portadora de componentes pode ter uma largura de banda de 1.4, 3,

Figura 10 – Portadoras Agregadas



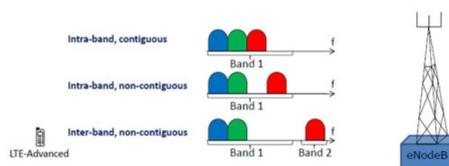
Fonte: 3GPP (2013)

5, 10, 15 ou 20 MHz e um máximo de cinco portadoras de componentes podem ser agregadas. Portanto, a largura de banda máxima é de 100 MHz. O número de portadores agregados pode ser diferente em *download* e *upload*, no entanto, o número de portadores de componentes *upload* nunca é maior do que o número de portadores de componentes *download*. Os portadores de componentes individuais também podem ter larguras de bandas diferentes.

Por razões práticas, diferentes configurações de agregação de portadora, especificadas por exemplo, combinações de banda de operação E-UTRAN (do inglês, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* - Acesso ao Rádio Terrestre Universal Evoluído) e o número de portadoras de componentes, são introduzidas em etapas. Em R10 existem dois portadores de componentes no *download* e apenas um no *upload* (portanto não há agregação de portador no *upload*), em R11 existem duas portadoras de componente *download* e um ou dois portadores de componente no *upload* quando a agregação de portadora é usada.

Segundo 3GPP (2013), a maneira mais fácil de organizar a agregação é usar portadoras de componentes contíguas dentro da mesma faixa de frequência de operação (conforme definido para LTE), chamadas de contíguas dentro da banda. Isso pode nem sempre ser possível, devido a cenários de alocação de frequência. Para alocação não contígua, ela pode ser intra-band, ou seja, as operadoras de componentes pertencem à mesma faixa de frequência de operação, mas são separadas por um intervalo de frequências, ou pode ser inter-band, caso em que as operadoras de componentes pertencem a diferentes bandas de frequência de funcionamento, ver Figura 11.

Figura 11 – Portadoras Agregadas: Alternativas intra e inter-bandas



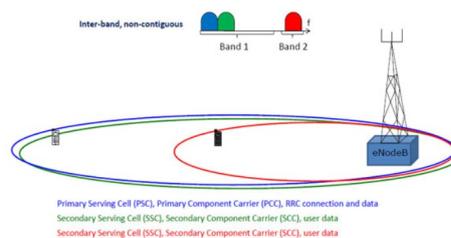
Fonte: 3GPP (2013)

Quando as portadoras agregadas são utilizadas, há um número de células de serviço, uma

para cada portadora de componente. A cobertura das células serventes pode diferir, devido, por exemplo, às frequências portadoras de componente. A conexão RRC (do inglês, *Radio Resource Control* - Controle de Recursos de Rádio) é manipulada por uma célula, a célula de serviço primária, servida pela PCC (do inglês, *Primary Component Carrier* - Portadora de Componente Primário), com DL (do inglês, *Downlink* - Recepção de Pacotes) e UL (do inglês, *Uplink* - Transmissão de Pacotes). Os outros portadores de componentes são todos referidos como SSC (do inglês, *Secondary Component Carrier* - Portadora de Componente Secundário), com DL e possivelmente UL, servindo as células de serviço Secundárias.

No exemplo da CA entre bandas mostrado na Figura 12, a agregação de portadora em todas as três portadoras de componentes só é possível para o UE (do inglês, *User Equipment* - Equipamento do Usuário) preto, o UE branco não está dentro da área de cobertura da portadora de componente vermelho.

Figura 12 – Carrier Aggregation: Servindo Células



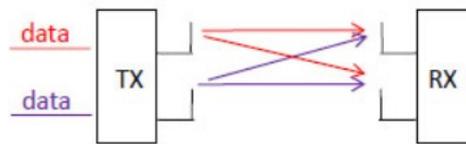
Fonte: 3GPP (2013)

A introdução da agregação de portadores influencia principalmente o MAC e o protocolo da camada física, mas também o *buffer* de RLC (do inglês, *Radio Link Control* - Controle de Link de Rádio) deve ser maior. E o RRC deve ser capaz de tomar decisões sobre a adição ou remoção do CC secundário.

2.1.3.2 Saída Múltipla de Múltiplas Entradas

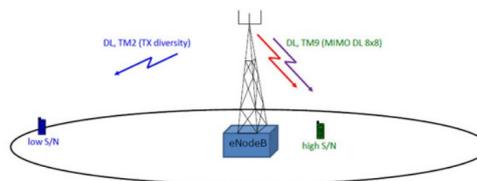
Multiplexação Espacial ou Saída Múltipla de Múltiplas Entradas (do inglês, *Multiple Input Multiple Output - MIMO*), é usado para aumentar a taxa de *bits* global através da transmissão de dois (ou mais) fluxos de dados diferentes em duas (ou mais) antenas diferentes. Usando os mesmos recursos em frequência e tempo, separados apenas pelo uso de sinais de referência diferentes, a serem recebidos por duas ou mais antenas. Ver Figura 13.

Conforme mostrado na Figura 13, a Ilustração simplificada de MIMO 2x2 (Multiplexação Espacial). Dois fluxos de dados diferentes são transmitidos em duas antenas TX e recebidos por duas antenas RX, usando a mesma frequência e tempo, separados apenas pelo uso de diferentes sinais de referência.

Figura 13 – MIMO - Spatial Multiplexing (2x2)

Fonte: 3GPP (2013)

Um ou dois blocos de transporte são transmitidos por TTI. Uma grande mudança no *LTE-Advanced* é a introdução de 8x8 MIMO no DL e 4x4 no UL. O MIMO pode ser usado quando S/N (relação sinal/ruído) é alta, ou seja, canal de rádio de alta qualidade. Para situações com baixo S/N, é melhor usar outros tipos de técnicas de multi-antena para melhorar o S/N, por exemplo, por meio da diversidade de TX. Ver Figura 14.

Figura 14 – MIMO - High S/N

Fonte: 3GPP (2013)

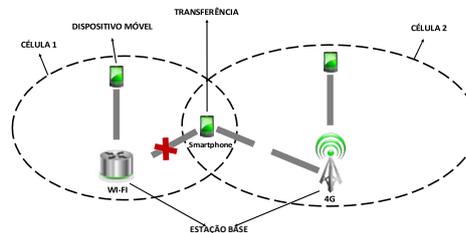
O MIMO é recomendado para alta S/N e a diversidade de TX é preferencialmente usada para cenários com baixo S/N.

2.2 Handover

O Handover ou Handoff (HO), é a técnica de transferência de uma estação móvel (do inglês, *Mobile Station - MS*) de um canal para outro, atribuído a uma estação-base alvo, (QUENTAL; GONÇALVES, 2013). O *Handover* é utilizado nos dispositivos móveis como nos celulares e *tablets*, de uma maneira que seja garantido a mobilidade dos usuários sem que seus serviços percam qualidade. Ver Figura 15.

Conforme é mostrado na Figura 15, o processo de funcionamento do *handover* ocorre primeiramente dentro da célula 1, através da troca de mensagens entre o terminal móvel (celular) e a estação atual (Wi-Fi) responsável pelo gerenciamento dessa célula, ou seja, um relatório de medição é enviado pelo dispositivo móvel para estação atual. Essas informações são trocadas posteriormente entre as estações Wi-Fi e 4G, ou seja, a célula atual repassa todas as informações necessárias de medição do dispositivo móvel para a nova estação (4G). A decisão de *Handover* é tomada pela estação atual (Wi-Fi) baseada no relatório de medição. A nova estação pode

Figura 15 – Handover



Fonte: Próprio Autor (2023)

realizar um processo de controle de admissão dependendo das informações de QoS recebidas. Basicamente, ela avalia se existem recursos disponíveis para atender o dispositivo móvel (celular). Caso existam recursos, os mesmos são configurados e uma mensagem é enviada para estação atual. Caso contrário o *handover* (HO) é rejeitado. Um comando de *handover* é enviado da estação atual para o dispositivo móvel. O dispositivo móvel se desconecta da estação atual (Wi-Fi) e conecta na nova estação (4G), consolidando assim o processo de *handover*. (SILVA,2018).

O *Handover* possui algumas características e classificações. Pode ser classificado em relação a seu tipo, sendo *Soft Handover*, onde a transferência entre redes ocorre de forma suave, não havendo perda da conexão anterior antes que a conexão atual esteja ativa e operacional. E *Hard Handover*, onde a transferência é feita de forma abrupta, com a perda da conexão anterior antes da atual ser estabelecida. (MONTEIRO, 2012).

2.2.1 Classificação do Handover

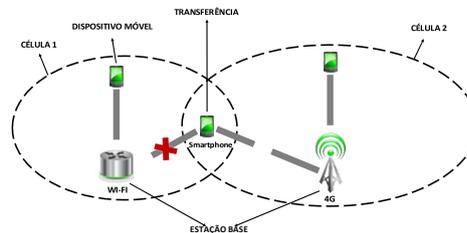
Sobre as classificações do *handover*, podem ser feita baseada nos tipos de RATs (do inglês, *Radio Access Technologies*) das redes envolvidas, ou seja, a mobilidade de um terminal móvel entre redes com a mesma RAT, o *handover* é chamado de *Handover Horizontal* (do inglês, *Horizontal Handover - HHO*). já a mobilidade entre redes de RATs diferentes, é chamada de *Handover Vertical* (do inglês, *Vertical Handover - VHO*), (MONTEIRO, 2012).

2.2.1.1 Handover Vertical

Handover Vertical (do inglês, *Vertical Handover - VHO*), trata da migração dos dispositivos móveis entre redes heterogêneas sem fio, (MONTEIRO, 2012). Ver Figura 16.

Conforme Monteiro (2012), o *handover* vertical utilizados em redes heterogêneas (Wi-Fi e 4G), utilizam-se de dois mecanismos na mobilidade. A utilização do MIH (do inglês, *Media Independent Handover - Transferência Independente de Mídia*) e o padrão IMS (do inglês, *IP Multimedia Subsystem - Subsistema Multimídia IP*). O primeiro tenta, a todo custo, reduzir o

Figura 16 – Handover Vertical



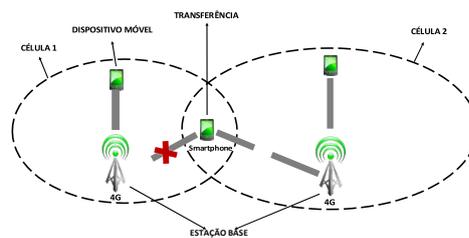
Fonte: Próprio Autor (2018)

tempo gasto com os procedimentos de descoberta de pontos de acesso (redes disponíveis), assim como com a execução física do *handover*. O segundo, vai em direção a uma tendência mundial, que são as redes *All-IP*. Estudos tem mostrado que o caminho mais natural para integrar redes celulares a redes comutadas por pacotes, é fazer as duas “falarem” o mesmo protocolo. Sendo assim, o IMS propõe a inserção da pilha IP, dentro do núcleo de uma rede celular, integrando o que há de melhor nos dois mundos.

Segundo Silva (2018), podemos ter dois modos de mobilidade em redes LTE: mobilidade no modo conectado e no modo ocioso, ou seja, quando o dispositivo móvel se encontra no modo ocioso e altera a célula, o processo é chamado resseleção de célula, e quando o dispositivo móvel estiver no modo conectado e muda de célula, o processo é chamado de *handover*. A rede controla as transições do dispositivo móvel de modo ocioso para conectado e vice-versa.

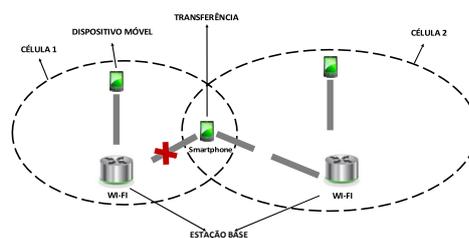
2.2.1.2 Handover Horizontal

O *Handover* Horizontal ocorre na migração do terminal móvel entre redes de mesma tecnologia, como por exemplo, na utilização de um celular em um campus de uma universidade, onde geralmente tem várias redes Wi-Fi disponíveis. Essas redes são de uma mesma tecnologia, trabalhando em uma mesma faixa de frequência, diferentemente das redes 4G, que trabalha em frequências diferentes. Outro exemplo ocorre na migração de uma cidade para outra, ou seja, em viagens longas, onde os dispositivos móveis como celulares transitam entre várias antenas de uma mesma tecnologia como as redes 4G (LTE). Para que ocorra o *Handover* Horizontal, basta que tenha no mínimo duas antenas e um dispositivo móvel migrando de uma área de cobertura de uma célula para outra área de cobertura de outra célula. Ver Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Handover Horizontal Redes 4G

Fonte: Próprio Autor (2019)

Nas Figuras 17 e 18, é mostrado a migração de um dispositivo móvel da célula 1 para célula 2. Note no momento da interseção entre as duas células, que o dispositivo detecta uma nova estação base, no momento em que se distancia da estação base atual, ele começa a trocar informações para a troca para nova estação base, completando assim o *handover* horizontal.

Figura 18 – Handover Horizontal Redes Wi-Fi

Fonte: Próprio Autor (2019)

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, discute sobre os trabalhos relacionados que também abordam sobre as novas arquiteturas heterogêneas sem fio que oferecem suporte aos quesitos de mobilidade vertical transparente e também de que forma proporcionam os benefícios de sua utilização.

3.1 Visão Geral

O artigo Y. et al. (October 2018) propõe um novo esquema de descarregamento de tráfego de *uplink* dos equipamentos móveis através de uma otimização conjunta da alocação de largura de banda da Estação Base (BS), bem como do escalonamento de tráfego e alocação de energia. O esquema proposto leva em conta as interferências co-canal dos dispositivos móveis ao transferir dados para o Ponto de Acesso (AP) e visa minimizar o custo total do sistema, incluindo o uso da largura de banda da BS e o consumo total de energia dos equipamentos móveis. Resultados numéricos mostram que o algoritmo proposto pelos autores, pode alcançar a solução ótima com um tempo computacional significativamente reduzido. Porém o mesmo não propõe um mecanismo de evitar concorrência entre as interfaces do próprio dispositivo.

Em S. et al. (June 2017) propõe uma arquitetura de rede heterogênea, na qual os dispositivos são equipados com duas interfaces sem fio, permitindo a transmissão e recepção simultâneas de pacotes. Porém o artigo não possui nenhum mecanismo de gerenciamento de *handover* vertical, a proposta do artigo considera apenas cenários estáticos e sem mobilidade, além de não realizarem avaliação sob métricas de QoE.

No artigo R. et al. (June 2015) os dispositivos móveis não se conectam em múltiplas interfaces de redes sem fio simultaneamente, os autores propõem coordenar e combinar duplas interfaces de tecnologias móveis celulares (por exemplo, LTE ou 3G) e não-celulares (por exemplo, Wi-Fi ou *TV White Space*) dentro do mesmo dispositivo de modo simultâneo. Porém não há nenhum algoritmo proposto para o gerenciamento de *handover* vertical transparente, assim como não há avaliação utilizando métricas de QoE.

O artigo K., A. e A. (April 2018) utiliza a *Dual Connectivity* (DC) como técnica para resolver o problema do aumento de *handovers* em redes heterogêneas com o objetivo de minimizar o atraso médio do sistema, sujeito a uma restrição na probabilidade de bloqueio dos usuários em segundo plano e em primeiro plano. Embora o artigo tenha um mecanismo de gerenciamento de *handover*, o mesmo não possui um algoritmo de concorrência entre as interfaces do próprio dispositivo tendo que bloquear as chamadas para diminuir a saturação da rede.

Em Monteiro (2012), são apresentadas duas arquiteturas: O SMIP (*Specialized Mobile IP*) e o QoV-NS (*Quality of Video - Network Selection*). O primeiro é apresentado como uma solução alternativa ao protocolo MIP, para gerência de mobilidade, enquanto que a segunda como uma solução para seleção de redes, baseada na NQM (*Network Quality Metric*), uma métrica, que

mede a qualidade de uma rede, visando verificar a sua aptidão para a transmissão de um tráfego de vídeo. Basicamente esse sistema é monitorado pelo próprio dispositivo móvel, chamado de AMAM (Ambiente de Mobilidade Assistido pelo Móvel), ele fornecerá ao usuário QoE e QoS necessárias para manter a continuidade de conexões na utilização de redes heterogêneas. Porém esse trabalho contribui para uma melhora na mobilidade dos dispositivos e dá uma melhor opção de migração de rede para utilização de aplicação de vídeo, mas vale ressaltar que ainda ocorrerá concorrência na interface do dispositivo podendo comprometer a conexão.

Os autores Quental e Gonçalves (2013), apresentam uma estratégia de tentativas de *handover* para o esquema proposto em (LEE; CHO, 2011). O referido esquema foi projetado para lidar com *handovers* verticais em grupo com base em uma probabilidade de bloqueio máxima estabelecida. Conclui que a estratégia proposta reduz a latência total de *handover* do esquema de referência enquanto mantém uma probabilidade equivalente de bloqueio de *handover*. Contudo, apenas bloqueia *handovers* desnecessários, de certa forma o *handover* ocorrerá, ou seja, ainda terá concorrência na interface do dispositivo.

Numa tentativa de assegurar baixa latência de *handover* entre redes WLAN e LTE, o autor (TRINETO, 2016), cria um novo protocolo de autenticação, dotado de diversas propriedades voltadas à segurança. Todavia ele contribui para diminuição do tempo na troca de pacotes na hora de aplicação do *handover* e melhora a segurança, mas não resolve a concorrência da interface na utilização do *handover* vertical.

Nesse sentido, em (JUNIOR et al., 2017) os autores propõem uma implementação e avaliação de desempenho de uma estratégia de *handover* que reduz a latência do processo de re-autenticação. Utilizando técnica de transferência de contexto de informações de segurança, bem como, considera uma arquitetura SDN para programar dinamicamente o tratamento da mobilidade com suporte dos ativos pertencentes ao núcleo da rede. O que viabiliza a continuidade do serviço e requisitos de QoS/QoE (QoE – Qualidade de Experiência do Usuário), (MENEZES, MENDES, et al., 2008) das aplicações, além de evitar o envolvimento do dispositivo móvel na sinalização para troca de ponto de acesso. No entanto não resolve a concorrência da interface na utilização do *handover* vertical.

O trabalho proposto pelos autores (TEIXEIRA, MATOS e AUGUSTO, 2016) utilizando um estudo de avaliação “*Link Going Down*” do MIH, através de simulação do NS2 (*Network Simulator*). Os resultados obtidos foram satisfatórios para prevenir a ocorrência de *handover*, suavizando o *handover*. Entretanto nem todos os dispositivos mostra que tipo de MIH estão utilizando na hora do *handover*, de certa maneira mesmo utilizando o *Link Going Down* ainda continuará ocorrendo a concorrência da interface na utilização do *handover* vertical.

Em (CÓRDOVA e GONDIM, 2016) propõem uma abordagem baseada em redes definidas por software, apresentando uma arquitetura de rede que não somente permite obter os benefícios intrínsecos do SDN, mas também lidar de forma simplificada e eficiente com o gerenciamento de mobilidade de modo distribuído em redes de acesso heterogêneas, garantindo

principalmente a continuidade de sessão IP durante o deslocamento do usuário entre as redes. Não obstante o mesmo apenas propõe uma melhoria na gerência da mobilidade do móvel, continuando assim havendo concorrência na interface do dispositivo.

Neste trabalho realizado pelos autores (SILVA, MONTEIRO e BATISTA, 2014) foi feito um estudo sobre a utilização de ferramentas computacionais para classificação de redes, visando subsidiar o processo de escolha através do emprego de métodos de auxílio à tomada de decisão. Foram sugeridos dois métodos de decisão multicritério, Promethee II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) e TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Para validação dos experimentos, as abordagens apresentadas são comparadas com outras estratégias que utilizam o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), GRA (*Grey Relation Analysis*), e hibridizações com lógica nebulosa. Os resultados foram satisfatórios em sua viabilidade, esse método de classificação apenas dá uma melhor escolha de rede disponíveis, de certa forma não resolverá os impactos da utilização do *handover* vertical, que aumenta consideravelmente a viabilidade a qual esse trabalho se propõe.

Como podemos perceber na citação dos trabalhos selecionados, de certa forma eles contribuem em boa parte na resolução dos problemas de *handover* e nas suas métricas, mas não resolverá a concorrência das interfaces de redes sem fio, devido os dispositivos móveis optar por uma única interface ao requisitar algum serviço, ou seja, dependendo do tipo de pacote a qual essa interface irá transferir ou receber, poderá ocorrer perda de pacotes, sem falar no número de usuários ligadas às subestações. Por isso a importância da validade desta dissertação para o aumento das melhorias das redes sem fio em geral. Isso devido não necessitar de *handover* vertical, pois os usuários poderão acessar simultaneamente as duas redes através das duplas interfaces, não havendo assim, concorrência entre as interfaces.

4 REDES SEM FIO HETEROGÊNEAS COM DISPOSITIVOS MÓVEIS DE MÚLTIPLAS INTERFACES PARA CONEXÕES SIMULTÂNEAS UTILIZANDO SISTEMA FUZZY

Neste capítulo é proposto um Sistema *Fuzzy* para decisão de *handover*. Neste novo cenário o dispositivo móvel estará conectado a duas redes simultaneamente e poderá realizar múltiplas trocas de conexões simultâneas, dessa forma o Sistema *Fuzzy* auxiliará o processo de decisão e seleção de conexão.

4.1 Problematização

Existem vários problemas causados pela migração dos dispositivos móveis entre redes de diferentes tecnologias, como por exemplo, na qualidade de serviço, na perda de pacotes, na queda e oscilação da vazão, no atraso dos envios e recebimentos dos pacotes. Tudo isso ocorre devido os dispositivos atuais possuírem uma única interface para se conectarem a uma rede sem fio, e ao se depararem com mais redes sem fio, são obrigados a utilizar o *handover*, permitindo que sua única interface possa sofrer concorrência entre redes de diferentes tecnologias.

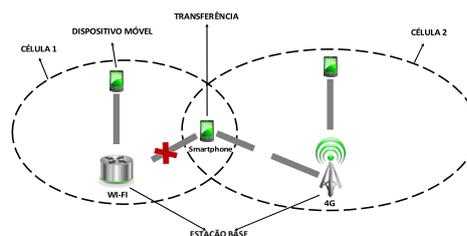
Vários são os transtornos que ocorrem na interface do dispositivo como fornecimento de serviços e degradação de desempenho na utilização das aplicações. Principalmente em serviços que envolvem o uso de *streaming*, onde as falhas são cruciais e comprometem a qualidade, podendo assim trazer maiores prejuízos para usuários que necessitam de uma conexão estável. Outras aplicações podem ser afetadas como o atraso nos envios dos pacotes, principalmente na utilização de serviços voltados a servidores, que mantém serviços na WEB, tanto para usuários finais, como para compartilhamento de processamento em máquinas que não possuem equipamentos com um alto poder de processamento e necessitam de compartilhamento de recursos, temos uma equiparação no entanto, para medir o grau que o atraso pode causar a seus usuários. Para mitigar esses problemas, várias técnicas são utilizadas, desde soluções voltadas ao núcleo de rede, aos terminais das redes sem fio. Considerando que a viabilidade financeira para a utilização de soluções nos terminais de rede é limitada, por configurarem-se maioria em relação ao núcleo, são escassas as propostas voltadas para os dispositivos de borda de rede nesse sentido. Daí a necessidade de criar uma solução para os dispositivos dos terminais das redes sem fio para mitigação da problemática causada na utilização da migração das redes sem fio heterogêneas.

4.2 Proposta Sistema Fuzzy

As Redes Sem Fio Heterogêneas oferecem, independentemente da tecnologia, diversas oportunidades de conectividade aos usuários móveis, cabendo ao mesmo escolher dentre as opções disponíveis a melhor para o momento. É recomendável, que a tomada de decisão sobre a escolha da melhor conexão deve ser feita principalmente com base em parâmetros/métricas de Qualidade de Serviço e/ou de Qualidade de Experiência.

Em determinadas situações, devido à mobilidade do usuário móvel, o mesmo tem que trocar de ponto de acesso, tal processo é denominado de *handover*. Quando a troca de ponto de acesso ocorre entre tecnologias diferentes, o procedimento é denominado de *handover* vertical. O *handover* vertical ocorre quando o usuário móvel se desconecta do atual ponto de acesso e inicia uma conexão com um novo ponto de acesso (Figura 19).

Figura 19 – Handover Vertical Transparente



Fonte: Próprio Autor (2019)

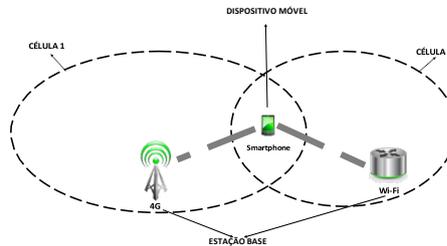
Conforme pode ser observado na Figura 19, o dispositivo móvel está dentro da área de cobertura de dois pontos de acesso tendo que obrigatoriamente ter que escolher apenas uma conexão. Dessa forma, o usuário não consegue utilizar o máximo de recursos disponíveis que as tecnologias podem oferecer, principalmente, caso o usuário esteja utilizando mais de uma aplicação (que são recebidas por uma única interface).

Diante do exposto, observou-se a necessidade da proposta de um dispositivo móvel com múltiplas-interface, que possa se conectar simultaneamente em duas (ou mais) redes sem fio heterogêneas, proporcionando aos usuários um aproveitamento total da vazão da rede, evitando assim de uma possível concorrência em uma única interface, como é comum entre os dispositivos móveis atuais.

Na Figura 20 abaixo, podemos observar um cenário, no qual o dispositivo móvel também está dentro da área de cobertura de duas tecnologias diferentes, mas nesse novo contexto, o usuário se conectará simultaneamente aos dois pontos de acesso heterogêneos. Dessa forma, existirá uma distribuição das aplicações (uma para cada interface) evitando assim concorrência entre as mesmas e consequentemente aumentando a vazão total do dispositivo móvel.

Nesse novo contexto, o usuário estará conectado simultaneamente a duas redes sem

Figura 20 – Dispositivo com Dual-Interface



Fonte: Próprio Autor (2019)

fibro heterogêneas. Porém o dispositivo móvel continuará a identificar novos pontos de acesso que estejam disponíveis para que um possível *handover* seja realizado. Mas, nesta proposta o *handover* não desconectará de uma tecnologia para se conectar em outra tecnologia, já que a segunda interface também estará sendo utilizada em outra conexão. Neste novo cenário, o dispositivo móvel realizará *handover* apenas na primeira interface sem prejudicar a conexão que está ativa na segunda interface.

O dispositivo móvel estará conectado simultaneamente nas redes 4G e Wi-Fi e para que não haja concorrência entre as tecnologias, o dispositivo móvel realizará *handover* de 4G para 4G (sem interferir na conexão Wi-Fi) ou realizará *handover* de Wi-Fi para Wi-Fi (sem interferir na conexão 4G). Dessa forma, três situações podem ocorrer nesse novo cenário:

- 1) Permanecer conectado no 4G e realizar *handover* apenas no Wi-Fi;
- 2) Permanecer conectado no Wi-Fi e realizar *handover* apenas no 4G;
- 3) Realizar duplo *handover* simultâneo de 4G para 4G e de Wi-Fi para Wi-Fi.

Nesses três tipos de situação o dispositivo móvel sempre estará conectado simultaneamente as duas tecnologias para garantir o máximo de vazão possível ao usuário.

A realização de um duplo *handover* (situação 3 do parágrafo anterior) requer um custo de decisão maior do dispositivo móvel, pois será necessário avaliar duas redes de tecnologias diferentes de modo simultâneo para inicializar o processo de *handover* ao mesmo tempo em ambas interfaces.

Para controlar o processo de *handover*, este artigo também propõe a utilização de Sistema *Fuzzy* para a tomada de decisão de seleção de ponto de acesso. O Sistema *Fuzzy* terá três parâmetros de entrada e uma saída, já que tradicionalmente os dispositivos móveis apenas consideram a Intensidade do Sinal Recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) como única métrica de decisão, podendo gerar decisões equivocadas em determinadas situações.

O Sistema *Fuzzy* possui três métricas de entrada:

- 1) Índice de mobilidade;

- 2) Intensidade do Sinal Recebido;
- 3) Percentagem de pacotes recebidos.

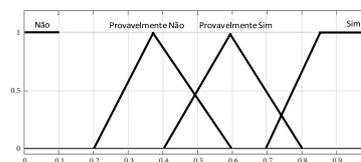
O índice de mobilidade tende a indicar o tempo de permanência de um dispositivo móvel dentro da área de cobertura de uma célula, quando mais rápido o dispositivo, menos tempo o mesmo permanecerá na célula, quanto mais lento, mais tempo o mesmo permanecerá. O RSSI indica quando o dispositivo móvel está próximo ou não de se desconectar de um ponto de acesso e a percentagem de pacotes é um indicativo da qualidade de serviço que está sendo oferecido.

O índice de mobilidade foi dividido em três conjuntos: baixo (0 – 6m/s), médio (4 – 11m/s) e alto (acima de 10m/s).

A intensidade do sinal também foi dividida em três conjuntos: baixo (-120 – -100dB_i), médio (-115 – -66 dB_i) e alto (acima de -72dB_i).

A percentagem de pacotes foi classificada em três conjuntos: baixo (0 – 40%), médio (30 – 70%) e alto (acima de 60%).

Gráfico 3 – Saída Fuzzy



Fonte: Próprio Autor (2019)

A saída do Sistema *Fuzzy* indicará ao dispositivo móvel se o mesmo deverá ou não realizar o processo de *handover*, dessa maneira, a saída do Sistema *Fuzzy* está dividida em quatro conjuntos: NÃO, PROVAVELMENTE NÃO, PROVAVELMENTE SIM e SIM. (Ver gráfico 3).

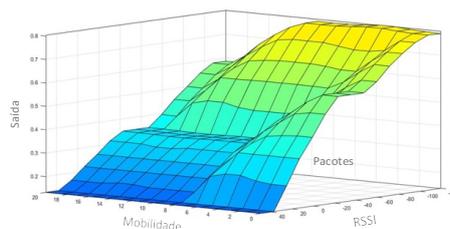
A decisão do Sistema *Fuzzy* será feita de acordo com o conjunto de regras que foi definida por meio de análises empíricas através de uma série de repetições de simulações. A Tabela 1 a seguir mostra o conjunto de regras do Sistema *Fuzzy* para realizar o *handover* (as demais situações não exibidas na Tabela 1 indicam forte tendência do dispositivo móvel não realizar o *handover*). De maneira geral, usuários com baixa mobilidade, ou baixa intensidade de sinal ou baixa quantidade de pacotes possuem maior tendência de realizar o *handover*.

O Sistema *Fuzzy* manterá as duas conexões ativas simultaneamente, mas também monitorará as redes detectadas pelo dispositivo móvel. A cada nova conexão detectada o Sistema *Fuzzy* avaliará se o dispositivo móvel deverá ou não realizar o procedimento do *handover*. O Sistema *Fuzzy* tem como um dos objetivos evitar *handover* desnecessários e até mesmo o *handover* “ping-pong” (desconectar da rede e seguidamente ter que se reconectar na mesma rede), por isso

Mobilidade	RSSI	Pacotes	Saída
BAIXA	BAIXA	BAIXA	SIM
BAIXA	BAIXA	MÉDIA	SIM
BAIXA	BAIXA	ALTA	SIM
BAIXA	MÉDIA	BAIXA	PROVAVELMENTE SIM
BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	PROVAVELMENTE SIM
MÉDIA	BAIXA	BAIXA	SIM
MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	SIM
MÉDIA	BAIXA	ALTA	PROVAVELMENTE SIM
MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	PROVAVELMENTE SIM
ALTA	BAIXA	MÉDIA	PROVAVELMENTE SIM
ALTA	BAIXA	ALTA	PROVAVELMENTE SIM

Tabela 1 – Regras do Sistema Fuzzy

Gráfico 4 – Sistema Fuzzy



Fonte: Próprio Autor (2019)

que usuários de alta mobilidade só realizam *handover* em casos críticos (já que os mesmos tem tendência de permanecer pouco tempo dentro da área de cobertura da célula).

O gráfico 4 mostra a tendência de iniciar ou não o processo de *handover*, a região azul do gráfico corresponde a um dispositivo móvel com alta mobilidade, alto RSSI e alta quantidade de pacotes recebidos, nessas condições, o dispositivo móvel não realizará o *handover* para a nova rede. A região amarela do gráfico corresponde a um usuário móvel com baixa mobilidade, baixo RSSI e baixa quantidade de pacotes recebidos, nessas condições o dispositivo móvel realizará o *handover* para a nova rede.

5 RESULTADOS

Esta seção descreve a metodologia e métricas para avaliar os benefícios da proposta. Para obter o estudo da pesquisa, foi utilizada a técnica de uso de simulações de eventos discretos. A avaliação de desempenho foi realizada através de simulações utilizando o *Network Simulator 2* (NS2). Nos cenários de simulações os dispositivos móveis tinham mobilidades e deslocamentos aleatórios, a proposta desta dissertação foi comparada aos protocolos originais tradicionais. A comparação foi feita através de métrica de QoS (vazão) e também através de métricas de QoE (*Peak Signal to Noise Ratio - PSNR*, *Structural Similarity Index - SSIM* e *Video Quality Metric - VQM*).

5.1 Simulação

Para obter o estudo da pesquisa, foi desenvolvido a técnica de uso de simulações de eventos discretos. Essa técnica de avaliação é utilizada para obtenção de desempenho de um sistema baseada em sua arquitetura, abstraindo e equiparando a um sistema real, que armazenam aspectos essenciais do objeto em estudo.

A ferramenta utilizada nesta dissertação é o *Network Simulator 2* (NS2), uma ferramenta de simulação de redes de computadores. Primeiramente o NS2 teve seu início como uma variante do Simulador de rede Real em meados de 1989 e evoluiu substancialmente até os dias atuais. Diversos trabalhos são produzidos tanto a nível acadêmicos, quanto empresariais, na produção de projetos de simulações de redes para implementações, com objetivo principalmente de redução de custos.

Para representar uma rede 4G real, foi utilizado a biblioteca LTE do NS2. Os parâmetros que serão analisados são comuns a todo tipo de rede sem fio, como a análise da vazão, que é definida como o número de bits que podem ser transmitidos sobre a rede num dado tempo, sendo expressa em bits por segundo (bps). Da mesma forma que a vazão, são utilizados outros parâmetros como o atraso e perda de pacotes, que são parâmetros gerais entre diversos tipos de redes.

Para obtenção dos cenários em estudo, será coletado todos os tráfegos da rede, através do arquivo gerado pela ferramenta, denominado de arquivo de trace da rede "*trace-all*", que serve para gravar arquivos de trace com informações em formato geral. Para monitorar todo o tráfego da rede é utilizado a biblioteca "*LossMonitor*", que é conectado no nó receptor, para rastrear os pacotes perdidos e os detalhes dos pacotes recebidos. O objetivo desse monitoramento é avaliar os impactos de *handover* vertical, principalmente no tráfego da vazão, atraso e perda de pacotes.

Na Tabela 2 é mostrado os parâmetros gerais das simulações desenvolvidos através do NS2.

Para abstração e plotagem dos gráficos foram utilizadas o XGRAPH e o MATLAB, que são ferramentas voltadas para criação de gráficos, abstraindo dos arquivos ".tr"coletados pelo NS2.

PARÂMETRO	VALOR
ÁREA DE SIMULAÇÃO	2000m x 2000m
QTDE ROTEADORES	2
QTDE ESTAÇÕES	2
QTDE DISPOSITIVOS MÓVEIS	1
DUPLEX LINK	1500 Mb 40 ms
TIPO DE FILA	DropTail
TEMPO DE SIMULAÇÃO	129 s
CHANNEL WIRELESS	802.11
RATE	54 MB
POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO	50 m
FREQUÊNCIA	120 s
CHANNEL WIRELESS	LTE
RATE	124 MB
POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO	500 m
FREQUÊNCIA	3.5 GHz
APLICAÇÃO	CBR
TAMANHO DO PACOTE	1024 KB

Tabela 2 – Parâmetros Gerais

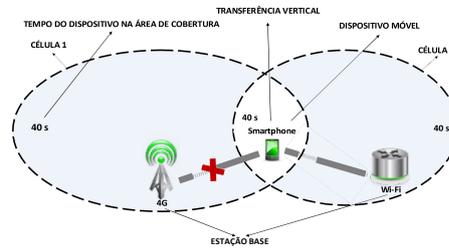
5.2 Cenário 1

Para este cenário é utilizado um dispositivo móvel tradicional, utilizando uma única interface de rede sem fio por vez, que se conectará com duas estações base (4g e Wi-Fi). A duração dotempo de simulação total será de 120 segundos (s), sendo que tanto dentro da área de coberturada estação base 4G, como na área de handover e Wi-Fi, o dispositivo permanecerá com um tempo aproximadamente de 40 segundos em cada área específica, para que possa ter os parâmetros necessários para compararmos com o cenário do novo dispositivo de dual-interface. Na Figura21, nos é mostrado uma ilustração do primeiro cenário.

Os resultados obtidos na primeira simulação mostram o comportamento da coleta da vazão, e mostram claramente uma oscilação na troca da rede 4G para a rede Wi-Fi, justamente na utilização do *handover* vertical, onde ocorre a concorrência na interface do dispositivo. No gráfico 5, nos é mostrado o gráfico da vazão do dispositivo tradicional.

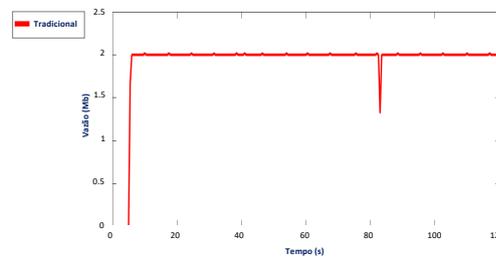
Existem vários tipos de atraso, como por exemplo, atraso de transmissão, atraso de propagação, atraso de fila e de Processamento, (KUROSE; ROSS, 2013). Basicamente o atraso tem as mesmas especificações, medir o tempo entre a origem até os destinatários. O NS2, analisa

Figura 21 – Dispositivo Tradicional



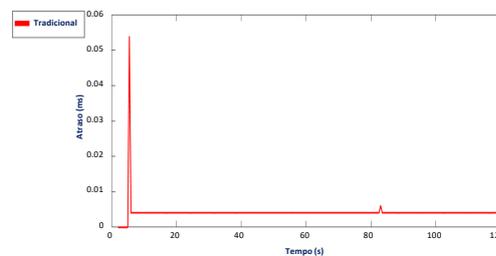
Fonte: Próprio Autor (2019)

Gráfico 5 – Vazão Dispositivo Tradicional



Fonte: Próprio Autor (2019)

Gráfico 6 – Atraso Dispositivo Tradicional



Fonte: Próprio Autor (2019)

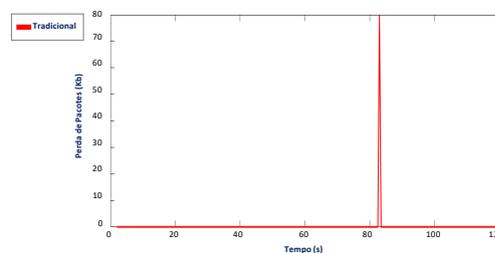
o tempo total em que o emissor envia ao receptor, dando um resultado de fácil compreensão aos usuários.

No gráfico 6, nos é mostrado os resultados da coleta do atraso em que o dispositivo tradicional obteve uma perda na hora de estabelecer uma conexão para recebimento de pacotes na rede 4G (isso ocorreu no instante de tempo de 5 segundos) e também isso ocorreu no instante de tempo 85 segundos, onde ocorre o *handover*, na hora de se conectar com a rede Wi-Fi. O atraso foi menor em relação o atraso do instante 5 segundos, devido a simulação ser projetada para utilização do protocolo de rede chamado de MIH (*Media Independent Handover*), que

basicamente não interrompe a conexão, garantindo que na utilização do protocolo IP, a conexão não seja interrompida até que haja um estabelecimento de conexão com a outra rede sem fio, no caso a Wi-Fi. Ver gráfico 6.

No gráfico 7, nos é mostrado os resultados da coleta da perda de pacotes do dispositivo tradicional. Onde ocorreu uma perda no instante de tempo de 85 segundos, devido a troca de rede entre a rede 4G e a Wi-Fi, ou seja, na utilização do handover. Note mesmo com a utilização do protocolo de rede MIH, para que o dispositivo não perdesse sua conexão, houve as perdas de pacotes, isso devido a concorrência que ocorre na interface de rede do dispositivo tradicional. (Ver gráfico 7).

Gráfico 7 – Perda de Pacotes do Dispositivo Tradicional



Fonte: Próprio Autor (2019)

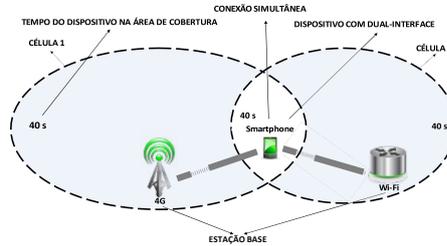
5.3 Cenário 2

Para este cenário é utilizado um dispositivo móvel com dual-interface, utilizando as duas interfaces de rede sem fio, que se conectará simultaneamente a duas estações base (4G e Wi-Fi). A duração do tempo de simulação total será de 120 segundos (s), sendo que o dispositivo permanecerá conectado simultaneamente as duas redes, até o término da simulação, para que possa ter os parâmetros necessários para compararmos com o cenário do dispositivo tradicional, que é comum nos dispositivos dos dias atuais. Na Figura 22, nos é mostrado uma ilustração do segundo cenário.

Os resultados obtidos pela coleta da vazão na segunda simulação, obtidos com o dispositivo de dual-interface. Mostram-nos o valor total da vazão coletada pelo dispositivo móvel, onde o dispositivo recebeu em cada interface de rede, uma taxa de 2 Mbps, totalizando assim, uma taxa de 4 Mbps, dando ao usuário um total uso da banda. No gráfico 8, nos é mostrado o gráfico da vazão da atuação do dispositivo de dual-interface no cenário proposto.

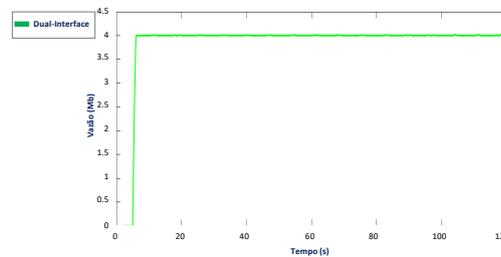
Os resultados obtidos pelo atraso na segunda simulação, obtidos com o dispositivo de dual-interface, como é mostrado no gráfico 9. Mostram-nos um pequeno atraso entre 0.07 a 0.08 milissegundo, no instante 5 segundos, momento em que o dispositivo móvel se conecta as estações base. Depois o gráfico nos mostra que no decorrer da simulação, o dispositivo móvel

Figura 22 – Dispositivo com Dual-Interface



Fonte: Próprio Autor (2019)

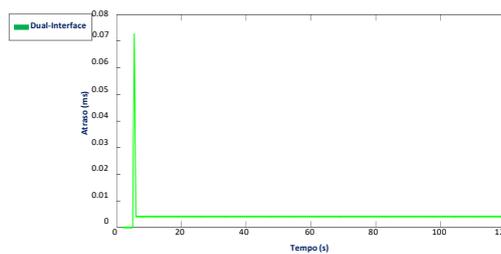
Gráfico 8 – Vazão do Dispositivo Dual-Interface



Fonte: Próprio Autor (2019)

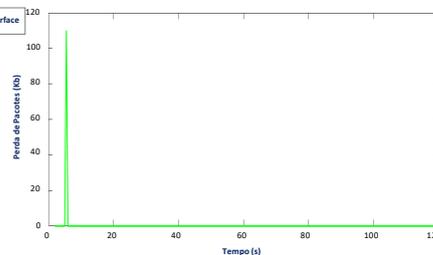
permanece estável e constante. Concluindo assim, que o dispositivo por possuir duas interfaces, garante a estabilidade dos serviços utilizados, não necessitando do uso do *handover* vertical.

Gráfico 9 – Atraso do Dispositivo Dual-Interface



Fonte: Próprio Autor (2019)

Os resultados obtidos pela perda de pacotes na segunda simulação, obtidos com o dispositivo de dual-interface. Mostram-nos uma pequena perda de pacotes entre 100 a 120 Kb, no instante 5 segundos, momento em que o dispositivo móvel se conecta as estaçõesbase. Depois o gráfico nos mostra que no decorrer da simulação, o dispositivo móvel permaneceestável e constante, sem nenhuma perda. Concluindo assim, que o dispositivo por possuir duasinterfaces, garante a estabilidade dos serviços utilizados. Ver gráfico 10.

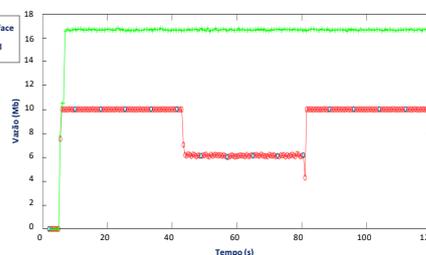
Gráfico 10 – Perda de Pacotes do Dispositivo Dual-Interface

Fonte: Próprio Autor (2019)

5.4 Comparação entre os dispositivos

Para a comparação entre os dois cenários, será apresentado os resultados em um único gráfico para cada coleta respectivamente. Assim sendo, um único gráfico contendo as duas coletas das vazões, outro segundo gráfico contendo as coletas dos atrasos e um último gráfico contendo os resultados das coletas das perdas de pacotes. Para o usuário tradicional foi adicionado um tráfego CBR de 10Mbps e para o usuário com dual-interface foi adicional um tráfego CBR de 10Mbps na interface 4G e um tráfego CBR de 6Mbps para a interface Wi-Fi.

No Gráfico 11, é mostrado os resultados das vazões dos dois dispositivos móveis. Analisando as taxas das vazões, o dispositivo correspondente aos dispositivos tradicionais, recebeu pacotes das duas redes heterogêneas (4G e Wi-Fi), com uma taxa média de 10Mbps, com o tempo de simulação de 120 segundos. Porém, como o dispositivo possui apenas uma única interface, houve uma oscilação no instante 40 segundos, justamente no início do *handover* vertical para a rede Wi-Fi, reduzindo a vazão para 6Mbps. Já o dispositivo de Dual-Interface proposto nesta dissertação, houve uma estabilidade em toda simulação, obtendo assim uma vazão de 16Mbps (somatório das duas interfaces), por possuir duas interfaces de redes ativas e está conectado simultaneamente as duas redes heterogêneas.

Gráfico 11 – Comparação dos Resultados da Vazão

Fonte: Próprio Autor (2019)

5.5 Resultados com Sistema Fuzzy

Esta seção descreve a metodologia e métricas para avaliar os benefícios da proposta. Para obter o estudo da pesquisa, foi utilizada a técnica de uso de simulações de eventos discretos. A avaliação de desempenho foi realizada através de simulações utilizando o *Network Simulator 2* (NS2). Nos cenários de simulações os dispositivos móveis tinham mobilidades e deslocamentos aleatórios, a proposta do artigo foi comparada aos protocolos originais tradicionais. A comparação foi feita através de métrica de QoS (vazão) e também através de métricas de QoE (*Peak Signal to Noise Ratio - PSNR*, *Structural Similarity Index - SSIM* e *Video Quality Metric - VQM*). A Tabela 3 mostra os parâmetros de simulação utilizados.

PARÂMETRO	VALOR
ÁREA DE SIMULAÇÃO	2000m x 2000m
QTDE ESTAÇÕES	2
QTDE DISPOSITIVOS MÓVEIS	2
CHANNEL WIRELESS	Wi-Fi / LTE
RATE	54 / 124 MB
POTÊNCIA TRANSMISSÃO	50 / 500 m
FREQUÊNCIAS	2.4 / 3.5 GHz
APLICAÇÕES	CBR / VÍDEO
TAMANHO PACOTE	1024 KB
TEMPO DE SIMULAÇÃO	120 s

Tabela 3 – Parâmetros Gerais

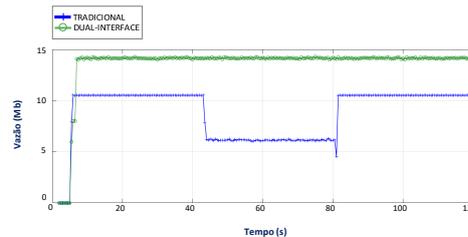
5.5.1 Primeiro Cenário

Para as simulações do primeiro cenário, foram utilizadas duas aplicações do tipo Taxa Constante de Transmissão (CBR- *Constant Bit Rate*) (cada uma de 8 Mbps) nos dispositivos móveis. No cenário tradicional, o dispositivo móvel inicialmente recebeu as duas aplicações na interface 4G e ao detectar a rede Wi-Fi, realizou *handover* para a nova interface (se desconectando da rede 4G e se conectando na rede Wi-Fi), recebendo assim, as duas aplicações pela interface Wi-Fi. No cenário com a proposta implementada, o dispositivo móvel recebeu uma aplicação na interface 4G e a outra aplicação na interface Wi-Fi, evitando assim a concorrência das aplicações pelo mesmo canal físico, sendo que no dispositivo dual-interface ocorreu *handover* duplo, ou seja, *handover* na interface 4G para outra rede 4G e *handover* na interface Wi-Fi para outra rede Wi-Fi.

Conforme mostra o gráfico 14, o tráfego da vazão recebido pelo dispositivo com dual-interface teve um melhor aproveitamento da banda em relação ao dispositivo tradicional, com um aproveitamento de 92,5% da banda e uma estabilidade constante em todo tempo de simulação. Sendo que o dispositivo tradicional obteve um aproveitamento de 63,75% da banda, isso em

relação ao seu maior índice de alcance no gráfico, sendo que houve oscilações durante a troca da estação base, que reduziu seu aproveitamento da banda.

Gráfico 14 – Comparação dos Resultados da Vazão



Fonte: Próprio Autor (2019)

5.5.2 Segundo Cenário

Para as simulações no segundo cenário, foram utilizadas duas aplicações sobre os dispositivos móveis. A primeira do tipo CBR, com tráfego de vazão equivalente a 8 Mbps e uma segunda aplicação, do tipo vídeo (*streaming*), composto por 1999 frames. No cenário tradicional, o dispositivo móvel recebeu duas aplicações, uma do tipo CBR e outra de vídeo pela mesma interface (4G) e mesmo após a realização do *handover*, o dispositivo móvel, continuou recebendo as duas aplicações na nova interface (Wi-Fi). Enquanto no cenário com a proposta implementada, o dispositivo móvel recebeu a aplicação de vídeo pela interface 4G e a aplicação CBR na interface Wi-Fi, novamente assim, evitando concorrência entre as tecnologias. Neste segundo cenário, a avaliação foi realizada através das métricas de QoE: PSNR, SSIM e VQM.

Gráfico 15 – Média PSNR dos Dispositivos



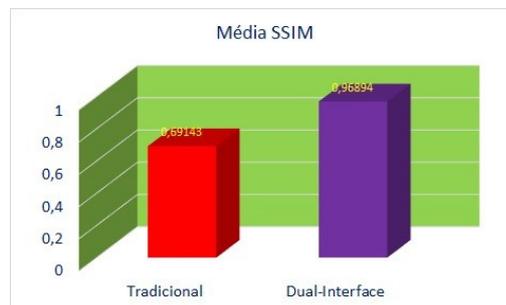
Fonte: Próprio Autor (2019)

O PSNR mostra o nível de qualidade de um vídeo, quanto maior for a média, melhor será sua visualização. O gráfico 15, ressalta um nível de 42,81dB do PSNR atingido pelo dispositivo com dual-Interface, sendo classificado com um vídeo de excelente qualidade. Já o

dispositivo tradicional, obteve apenas 21,13dB do PSNR, demonstrando assim, não suportar as duas aplicações em sua única interface, sendo classificado com um vídeo de qualidade regular.

Já o SSIM é equiparado também ao PSNR, ou seja, quanto maior for seu índice de percentagem, melhor será a qualidade de transmissão do vídeo. O dispositivo com dual-interface atingiu 0,97 de SSIM, mostrando uma alta qualidade de transmissão. Já o dispositivo tradicional alcançou apenas 0,69 de SSIM, não adquirindo um percentual aceitável (Gráfico 16).

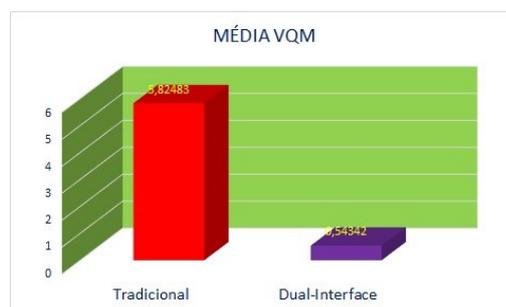
Gráfico 16 – Média SSIM dos Dispositivos



Fonte: Próprio Autor (2019)

A métrica VQM fornece uma medida objetiva para a qualidade de vídeo percebida e também prova que a transmissão realizada pelo dispositivo com dupla-interface proposto foi superior em relação ao dispositivo tradicional, pois obteve um índice de 0,54 de VQM. Isto é, inversamente proporcional ao PSNR e SSIM, quanto mais próximo do valor do zero, maior será a qualidade do vídeo transmitido. Já o dispositivo tradicional ficou bastante afastado do valor zero, com 5,82 de VQM, demonstrando o quanto ruim foi a qualidade de transmissão do vídeo ao usuário do dispositivo (Gráfico 17).

Gráfico 17 – Média VQM dos Dispositivos

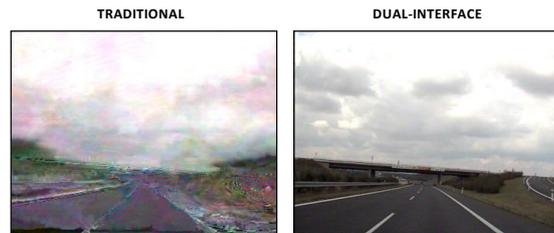


Fonte: Próprio Autor (2019)

Na Figura 23, foram comparados os *frames* (quadro) do vídeo recebido nos cenários tradicional e da proposta de dual- interface. Devido à interface do dispositivo móvel tradicional não fornecer garantida de qualidade as duas aplicações concorrentes na sua interface, a qualidade do *frame* 1139 ficou distorcido. Já o contrário ocorreu no dispositivo móvel com dual-interface

proposto por essa dissertação, onde não ocorreu nenhuma distorção do frame 1139, e a qualidade do vídeo transmitido, trouxe uma maior comodidade ao usuário.

Figura 23 – Frame 1139 do Vídeo Highway



Fonte: Próprio Autor (2019)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescimento exponencial dos dispositivos móveis na atualidade, é de suma importância observar a escalabilidade das redes sem fio heterogêneas. E propôr sempre estudos voltados para os impactos causados pelo *handover*, para mitigar soluções cada vez mais eficazes para contribuição da manutenção das redes de diferentes tecnologias.

A dissertação em questão buscou apresentar um estudo, com objetivo de mostrar que a utilização de duas aplicações ao mesmo tempo em tecnologias diferentes, trouxe uma melhora no desempenho de métricas de qualidade de serviço (vazão, atraso e perda de pacotes). Dessa forma, uma aplicação não “concorre” com a outra, dando aos usuários, um melhor aproveitamento da banda.

A principal melhora do dispositivo com dual-interface, está relacionado a coleta da vazão. Que teve uma melhora de 92,5 por cento em relação o dispositivo tradicional, por utilizar as duas interfaces ao mesmo tempo. E para obter os resultados nas simulações, foi feito uma adaptação nos módulos do NS2, pois o mesmo, foi configurado, para fazer simulações de dispositivos comuns, com uma única interface, tendo concorrência em sua interface na migração entre redes heterogêneas. Isso devido não existir um dispositivo com dual-interface, com tal funcionalidade exposta neste trabalho. E os resultados foram satisfatórios, pois o dispositivo conseguiu receber o dobro da vazão em relação o dispositivo tradicional.

Para trabalhos futuros, devemos avaliar a arquitetura com outras técnicas de inteligência computacional para a tomada de decisão do “*handover* duplo” para escolha da melhor rede, caso o dispositivo tenha a cima de duas redes disponíveis. Outro trabalho seria um estudo aprofundado de consumo de bateria de energia, pois o dispositivo por utilizar duas aplicações ao mesmo tempo, requer um alto consumo de energia. Outro estudo seria criar uma aplicação que priorize os serviços utilizados pelos usuários, como priorizar a interface 4G, para aplicações de uso de *streaming* e outra interface que priorize serviços HTTP (páginas de internet) na utilização do Wi-Fi.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. *LTE-Advanced*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- ALIU, O. G. et al. A survey of self organization in future cellular networks. **Communications Surveys Tutorials IEEE**, v. 15, n. 1, p. 336–361, First Quarter 2013. Disponível em: <https://openresearch.surrey.ac.uk/esploro/fulltext/journalArticle/A-Survey-of-Self-Organisation-in-99516517002346?repId=12140056280002346&mId=13140366320002346&institution=44SUR_INST>.
- ALMEIDA, M. A. F. R. de. **Introdução ao LTE – Long Term Evolution**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/default.asp>>. Acesso em: 16 out. 2018.
- ANATEL. **Linhas pós-pagas atingem 40 por cento de mercado na telefonia móvel em julho**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/dados/acessos-telefonia-movel>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- BULHMAN, H. J.; CABIANCA, L. A. **Redes LAN/MAN Wireless II: Funcionamento do Padrão 802.11**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrwlanman2/default.asp>>. Acesso em: 11 out. 2018.
- CCM. **Redes sem fio - WLAN**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://br.ccm.net/contents/819-redes-sem-fio-wlan>>. Acesso em: 23 out. 2018.
- EDN. **FHSS versus DSSS**. [S.l.], 1999. Disponível em: <<https://www.edn.com/electronics-news/4361355/FHSS-versus-DSSS-item-2>>. Acesso em: 08 out. 2018.
- FILHO, F. X. M. B. **Redes Wi-fi II: Estudo de Caso – Instalação em Campus da IFAM (Manaus, AM)**. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifimanas2/default.asp>>. Acesso em: 08 out. 2018.
- GUEDES, L. C. dos S.; VASCONCELOS, R. R. de. **UMTS, HSPA e LTE**. [S.l.], 2009. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/index.html>. Acesso em: 21 out. 2018.
- JUNIOR, E. C. de A. et al. **Mobility-Flow: Solução para Handover Transparente e com Suporte à Autenticação 802.1x em Redes OpenFlow**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://sbrc2017.ufpa.br/downloads/trilha-principal/ST02_02.pdf>. Acesso em: 27 set. 2018.
- K., T. P.; A., R.; A., K. Optimal traffic splitting policy in lte-based heterogeneous network. **IEEE Wireless Communications And Networking Conference (WCNC)**, v. 33, n. 6, April 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1710.11453>>.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. In: VIEIRA, D. (Ed.). **Redes de Computadores e a Internet: Uma abordagem top-down**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. p. 634.
- LEE, W.; CHO, D.-H. Enhanced group handover scheme in multiaccess networks. **IEEE transactions on vehicular technology**, v. 60, n. 5, p. 2389–2395, 2011.

- MONTEIRO, C. de C. **Um Ambiente para Apoio à Integração de Redes Sem Fio Heterogêneas**. 211 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/10766>>. Acesso em: 28 jul. 2018.
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. da S. **Uma Estratégia de Tentativas de Handover Vertical em Grupo**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://ce-resd.facom.ufms.br/sbr/2013/artigo-29.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2018.
- R., E. A. et al. Resource allocation and inter-cell interference management for dual-access small cells. **IEEE Journal On Selected Areas In Communications**, v. 33, n. 6, p. 1082 – 1096, June 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7070658>>.
- S., K. M. et al. On using dual interfaces with network coding for delivery delay reduction. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 6, p. 3981–3995, June 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7891567>>.
- SANCHES, C. A. In: **Projetando Redes WLAN – Conceitos e Práticas**. 1. ed. [S.l.]: Érica, 2005. p. 344.
- SILVA, K. da C. **Estratégia de Planejamento e Otimização do Handover em Redes Móveis Densificadas**. 100 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Pará, 2018. Disponível em: <https://sigaa.ufpa.br/sigaa/public/programa/noticias_desc.jsf?lc=pt_BR&id=454¬icia=4350218>. Acesso em: 30 out. 2018.
- SOCIAL, W. A. **Digital 2021 - Your ultimate guide to the evolving digital world**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://wearesocial.com/digital-2021>>. Acesso em: 01 jan. 2023.
- TRINETO, J. B. M. **Avaliação de desempenho de protocolos de autenticação para redes sem fio heterogêneas**. 174 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/20601>>. Acesso em: 25 set. 2018.
- Y., W. et al. Optimal resource allocations for mobile data offloading via dual-connectivity. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 17, n. 10, p. 2349, October 2018. Disponível em: <<https://ncel.cuhk.edu.cn/sites/default/files/08303713.pdf>>.

Apêndices

APÊNDICE A – SCRIPT BASE DE SIMULAÇÃO DO DISPOSITIVO TRADICIONAL

```

set max_fragmented_size 1024
set packetSize 1052
global ns
Agent/ND set debug_ 1
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6 set debug_ 1
Mac/802_16 set debug_ 1
Mac/802_11 set debug_ 1
Mac/802_16 set dcd_interval_ 5 ;
Mac/802_16 set ucd_interval_ 5 ;
set default_modulation OFDM_16QAM_3_4 ;
set contention_size 5 ;
Mac/802_16 set t21_timeout_ 0.02 ;
Mac/802_16 set client_timeout_ 50
set seed 6
set move [new RandomVariable/Uniform]
$move set min_ 2
$move set max_ 12
for {set j 0} {$j < $seed} {incr j} {
    set departure [$move value]
}
proc finish {} {
    global ns f v0 p0 a0 j0 namtrace
    $ns flush-trace
    close $f
    close $v0
    close $p0
    close $a0
    close $j0
    close $namtrace
    puts " Simulation ended."
    exec nam mpls.nam &
    exit 0
}
set v0 [open multi-interface_vazao.tr w]
set p0 [open multi-interface_perda.tr w]
set a0 [open multi-interface_atraso.tr w]
set j0 [open multi-interface_jitter.tr w]
set holdtime 0
set holdseq 0
set atraso 0
set jitter 0
proc record {} {

```

```

global null0 v0 p0 a0 j0 holdtime holdseq atraso jitter handover

set ns [Simulator instance]

set time 0.5

set bw0 [null0 set bytes_]

set gw0 [null0 set nlost_]
set aw0 [null0 set lastPktTime_]

set cw0 [null0 set npkts_]
set now [ns now]

puts $v0 "$now [expr $bw0/$time*8/1000000]"

puts $p0 "$now [expr $gw0/$time]"
if { $cw0 > $holdseq } {
    puts $a0 "$now [expr ($aw0 - $holdtime)/($cw0 - $holdseq)]"
    set atraso [expr ($aw0 - $holdtime)/($cw0 - $holdseq)]
    puts $j0 "$now [expr $atraso - $jitter]"
} else {
    puts $a0 "$now [expr ($cw0 - $holdseq)]"
    set $atraso [expr ($cw0 - $holdseq)]
    puts $j0 "$now [expr $atraso - $jitter]"
}

$handover set vazao [expr $bw0/$time*8/1000000]
null0 set bytes_ 0
null0 set nlost_ 0
set holdtime $aw0
set holdseq $cw0
set jitter $atraso
ns at [expr $now+$time] "record"
}

Mac/802_11 set pr_limit_ 1.1 ;#1.0 for link down only
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set shutdown_on_ack_ 0
set ns [new Simulator]
set f [open trace_all.tr w]
ns trace-all $f
ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 18 ;
AddrParams set cluster_num_ {1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1} ;
AddrParams set nodes_num_ {1 1 1 1 1 1 1 1 1 5 1 1 1 1 1 1 1 1} ;
set router0 [ns node 0.0.0]; $router0 set X_ 550.0; $router0 set Y_ 450.0; $router0 set Z_ 0.0 ;
ns at 0.0 " $router0 label INTERNET "
ns at 0.0 " $router0 add-mark n1 blue hexagon "
puts "router0: tcl=$router0; id=[$router0 id]; addr=[$router0 node-addr]"

```

```

set router1 [$ns node 1.0.0]; $router1 set X_ 500.0; $router1 set Y_ 400.0; $router1 set Z_ 0.0 ;
$ns at 0.0 " $router1 label Roteador_Borda "
$ns at 0.0 " $router1 add-mark nl red circle "
puts "router1: tcl=$router1; id=[$router1 id]; addr=[$router1 node-addr]"

$ns duplex-link $router0 $router1 1500Mb 40ms DropTail
$ns node-config -multiIf ON ;
set multiFaceNode [$ns node 14.0.0] ;
puts "multiFaceNode: tcl=$multiFaceNode; id=[$multiFaceNode id];
addr=[$multiFaceNode node-addr]"
$ns node-config -multiIf OFF
set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ;
set opt(netif) Phy/WirelessPhy ;
set opt(mac) Mac/802_11 ;
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;
set opt(ll) LL ;
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;
set opt(ifqlen) 50 ;
set opt(adhocRouting) DSDV ;
set opt(umtsRouting) "" ;
set opt(energymodel) EnergyModel ;
set opt(initialenergy) 1000 ;
set opt(x) 2000 ;
set opt(y) 2000 ;
set namtrace [open mpls.nam w]
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)
Mac/802_11 set basicRate_ 54.0Mb
Mac/802_11 set dataRate_ 54.0Mb
Mac/802_11 set bandwidth_ 54.0Mb
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
set chan [new $opt(chan)]
create-god 20 ;
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.0134
Phy/WirelessPhy set freq_ 2412e+6
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 5.25089e-10
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
                -llType $opt(ll) \
                -macType $opt(mac) \
                -channel $chan \
                -ifqType $opt(ifq) \
                -ifqLen $opt(ifqlen) \
                -antType $opt(ant) \
                -propType $opt(prop) \
                -phyType $opt(netif) \

```

```

        -topoInstance $topo \
        -wiredRouting ON \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace OFF \
        -macTrace ON \
        -movementTrace OFF \
        -energyModel $opt(energymodel) \
        -idlePower 1.0 \
        -rxPower 1.0 \
        -txPower 2.0 \
            -sleepPower 0.001 \
            -transitionPower 0.2 \
            -transitionTime 0.005 \
        -initialEnergy $opt(initialenergy)
set bstation802 [$ns node 3.0.0] ;
$bstation802 set X_ 550.0
$bstation802 set Y_ 350.0
$bstation802 set Z_ 0.0
puts "bstation802: tcl=$bstation802; id=[$bstation802 id]; addr=[$bstation802 node-addr]"
$ns at 0.0 " $bstation802 label WIFI "
$ns at 0.0 " $bstation802 add-mark n1 purple circle "
set bstationMac [$bstation802 getMac 0]
set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]
puts "bss_id for bstation 1=$AP_ADDR_0"
$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0
$bstationMac enable-beacon
$ns node-config -wiredRouting OFF \
    -macTrace ON

set ifacel [$ns node 3.0.1] ;
$ifacel random-motion 0 ;
$ifacel base-station [AddrParams addr2id [$bstation802 node-addr]] ;
$ifacel set X_ 400.0
$ifacel set Y_ 335.0
$ifacel set Z_ 0.0
$ns at 5.0 " $ifacel label Motorola "
$ns at 5.0 " $ifacel add-mark n1 yellow square "
$ns at 5.0 "$ifacel setdest 500.0 335.0 10.0"
$ns at 40.0 "$ifacel setdest 570.0 335.0 10.0"
$ns at 80.0 "$ifacel setdest 620.0 335.0 10.0"
#$ns at 50.0 "$ifacel setdest 470.0 330.0 30.0"
puts "ifacel: tcl=$ifacel; id=[$ifacel id]; addr=[$ifacel node-addr]"
$ns duplex-link $bstation802 $router1 1500Mb 40ms DropTail
set opt(netif) Phy/WirelessPhy/OFDM ;
set opt(mac) Mac/802_16 ;

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.025e-12;#7.91016e-15 ;#500m:2.025e-12

```

```

Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -channel $chan \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -energyModel $opt(energymodel) \
    -idlePower 1.0 \
    -rxPower 1.0 \
    -txPower 1.0 \
    -sleepPower 0.001 \
    -transitionPower 0.2 \
    -transitionTime 0.005 \
    -initialEnergy $opt(initialenergy)
set bstation802_16 [$ns node 2.0.0] ;
$bstation802_16 set X_ 450
$bstation802_16 set Y_ 350
$bstation802_16 set Z_ 0.0
puts "bstation802_16: tcl=$bstation802_16; id=[$bstation802_16 id]; addr=[$bstation802_16 node-addr]
$ns at 0.0 " $bstation802_16 label 4G "
$ns at 0.0 " $bstation802_16 add-mark n1 green circle "
set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$bstation802_16 set mac_(0)] add-classifier $clas
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]
$bs_sched set-default-modulation $default_modulation
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-channel 1
$ns node-config -wiredRouting OFF \
    -macTrace ON
set iface2 [$ns node 2.0.1] ;
$iface2 random-motion 0 ;
$iface2 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_16 node-addr]] ;
$iface2 set X_ 400.0
$iface2 set Y_ 335.0
$iface2 set Z_ 0.0
set clas2 [new SDUClassifier/Dest]
[$iface2 set mac_(0)] add-classifier $clas2

```

```

set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]
[$iface2 set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched
[$iface2 set mac_(0)] set-channel 1
$ns at 5.0 "$iface2 setdest 500.0 335.0 10.0"
$ns at 40.0 "$iface2 setdest 570.0 335.0 10.0"
$ns at 80.0 "$iface2 setdest 620.0 335.0 10.0"
puts "iface2: tcl=$iface2; id=[$iface2 id]; addr=[$iface2 node-addr]"
$ns duplex-link $bstation802_16 $router1 1500Mb 40ms DropTail
$ns duplex-link-op $router0 $router1 orient down
$ns duplex-link-op $router1 $bstation802_16 orient left-down
$ns duplex-link-op $router1 $bstation802 orient right-down
$multiFaceNode add-interface-node $iface1
$multiFaceNode add-interface-node $iface2
set nd_bs [$bstation802 install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 1800
set nd_mn [$iface1 install-nd]
set nd_bs2 [$bstation802_16 install-nd]
$nd_bs2 set-router TRUE
$nd_bs2 router-lifetime 20 ;
set nd_mn2 [$iface2 install-nd]
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set debug_1
set handover [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2]
$multiFaceNode install-ifmanager $handover
$nd_mn set-ifmanager $handover
$handover nd_mac $nd_mn [$iface1 set mac_(0)] ;
$nd_mn2 set-ifmanager $handover
$handover nd_mac $nd_mn2 [$iface2 set mac_(0)] ;
$handover set classe 3
set ifmgmt_cn [$router0 install-default-ifmanager]
set mih [$multiFaceNode install-mih]
$handover connect-mih $mih ;
set mih_bs [$bstation802 install-mih]
set tmp_bs [$bstation802 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs
set mih_bs [$bstation802_16 install-mih]
set tmp_bs [$bstation802_16 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs
set tmp20 [$iface1 set mac_(0)] ;
$tmp20 mih $mih
$mih add-mac $tmp20 ;
set tmp20 [$iface2 set mac_(0)] ;
$tmp20 mih $mih
$mih add-mac $tmp20 ;
$ns at 5 "$nd_bs start-ra"

```

```
$ns at 5 "$nd_bs2 start-ra"  
set nb_UGS 1  
for {set j 1} {$j < [expr $nb_UGS + 1]} {incr j} {  
set udp_ugs($j) [new Agent/UDP]  
$udp_ugs($j) set packetSize_ 1024  
$ns attach-agent $router0 $udp_ugs($j)  
set cbr_ugs($j) [new Application/Traffic/CBR]  
    $cbr_ugs($j) set packetSize_ 1024 ;  
    $cbr_ugs($j) set rate_ 2.0Mb  
    $cbr_ugs($j) attach-agent $udp_ugs($j)  
set null0 [new Agent/LossMonitor]  
$ns attach-agent $multiFaceNode $null0  
$ns connect $udp_ugs($j) $null0  
$udp_ugs($j) set fid_ 1  
$handover add-flow $null0 $udp_ugs($j) $iface2 1  
$ns at 5.0 "$cbr_ugs($j) start"  
}  
$ns at 2.0 "record"  
$ns at 120.0 "finish"  
$ns run
```

APÊNDICE B – SCRIPT BASE DE SIMULAÇÃO DO DISPOSITIVO COM DUAL-INTERFACE

```

set max_fragmented_size 1024

set packetSize 1052

global ns

Agent/ND set debug_ 1
Agent/MIH set debug_ 1
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6 set debug_ 1
Mac/802_16 set debug_ 1
Mac/802_11 set debug_ 1
Mac/802_16 set dcd_interval_ 5 ;
Mac/802_16 set ucd_interval_ 5 ;
set default_modulation OFDM_16QAM_3_4 ;
set contention_size 5 ;
Mac/802_16 set t2l_timeout_ 0.02 ;
Mac/802_16 set client_timeout_ 50

proc finish {} {
    global ns f v0 p0 a0 j0 namtrace
    $ns flush-trace
    close $f
    close $v0
    close $p0
    close $a0
    close $j0
    close $namtrace
    puts " Simulation ended. "
    exec nam mpls.nam &
    exit 0
}

set v0 [open dual-interface_vazao.tr w]

set p0 [open dual-interface_perda.tr w]

set a0 [open dual-interface_atraso.tr w]

set j0 [open dual-interface_jitter.tr w]

set holdtime 0

set holdseq 0

```

```
set atraso 0

set jitter 0

proc record {} {
    global sink0 sink1 v0 p0 a0 j0 holdtime holdseq atraso jitter

    set ns [Simulator instance]

    set time 0.5

    set fg1 [$sink0 set bytes_]
    set fg2 [$sink1 set bytes_]
    set bw0 [expr $fg1 + $fg2]

    set fg3 [$sink0 set nlost_]
    set fg4 [$sink1 set nlost_]
    set gw0 [expr $fg3 + $fg4]

    set fg5 [$sink0 set lastPktTime_]
    set fg6 [$sink1 set lastPktTime_]
    set aw0 [expr $fg5 + $fg6]

    set fg7 [$sink0 set npkts_]
    set fg8 [$sink1 set npkts_]
    set cw0 [expr $fg7 + $fg8]

    set now [$ns now]

    puts $v0 "$now [expr $bw0/$time*8/1000000]"

    puts $p0 "$now [expr $gw0/$time]"

    if { $cw0 > $holdseq } {
        puts $a0 "$now [expr ($aw0 - $holdtime)/($cw0 - $holdseq)]"
        set atraso [expr ($aw0 - $holdtime)/($cw0 - $holdseq)]
        puts $j0 "$now [expr $atraso - $jitter]"
    } else {
        puts $a0 "$now [expr ($cw0 - $holdseq)]"
        set $atraso [expr ($cw0 - $holdseq)]
        puts $j0 "$now [expr $atraso - $jitter]"
    }

    $sink0 set bytes_ 0
    $sink1 set bytes_ 0
}
```

```

    $sink0 set nlost_ 0
    $sink1 set nlost_ 0

    set holdtime $aw0
    set holdseq $cw0
    set jitter $atraso

    $ns at [expr $now+$time] "record"
}

Mac/802_11 set pr_limit_ 1.1 ;#1.0 for link down only
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set shutdown_on_ack_ 0

set ns [new Simulator]

set f [open trace_all.tr w]
$ns trace-all $f

$ns node-config -addressType hierarchical

AddrParams set domain_num_ 18 ;
AddrParams set cluster_num_ {1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1} ;
AddrParams set nodes_num_ {1 1 1 1 1 1 1 1 5 5 1 1 1 1 1 1} ;

set router0 [$ns node 0.0.0]; $router0 set X_ 550.0; $router0 set Y_ 450.0; $router0 set Z_ 0.0 ;
$ns at 0.0 " $router0 label INTERNET "
$ns at 0.0 " $router0 add-mark nl blue hexagon "
puts "router0: tcl=$router0; id=[$router0 id]; addr=[$router0 node-addr]"

set router1 [$ns node 1.0.0]; $router1 set X_ 500.0; $router1 set Y_ 400.0; $router1 set Z_ 0.0 ;

$ns at 0.0 " $router1 label Roteador_Borda "
$ns at 0.0 " $router1 add-mark nl red circle "
puts "router1: tcl=$router1; id=[$router1 id]; addr=[$router1 node-addr]"

$ns duplex-link $router0 $router1 1500Mb 40ms DropTail

set opt(chan) Channel/WirelessChannel ;
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround ;
set opt(netif) Phy/WirelessPhy ;
set opt(mac) Mac/802_11 ;
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;
set opt(ll) LL ;
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna ;
set opt(ifqlen) 50 ;
set opt(adhocRouting) DSDV ;
set opt(umtsRouting) "" ;

```

```
set opt(energymodel) EnergyModel ;
set opt(initialenergy) 1000 ;

set opt(x) 2000 ;
set opt(y) 2000 ;

set namtrace [open mpls.nam w]
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)

Mac/802_11 set basicRate_ 54.0Mb
Mac/802_11 set dataRate_ 54.0Mb
Mac/802_11 set bandwidth_ 54.0Mb

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)

set chan [new $opt(chan)]

create-god 20 ;

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.0134
Phy/WirelessPhy set freq_ 2412e+6
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 5.25089e-10
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -channel $chan \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -energyModel $opt(energymodel) \
    -idlePower 1.0 \
    -rxPower 1.0 \
    -txPower 2.0 \
    -sleepPower 0.001 \
    -transitionPower 0.2 \
    -transitionTime 0.005 \
```

```

        -initialEnergy $opt(initialenergy)

set bstation802 [$ns node 3.0.0] ;
$bstation802 set X_ 550.0
$bstation802 set Y_ 350.0
$bstation802 set Z_ 0.0
puts "bstation802: tcl=$bstation802; id=[$bstation802 id]; addr=[$bstation802 node-addr]"
$ns at 0.0 " $bstation802 label WIFI "
$ns at 0.0 " $bstation802 add-mark n1 purple circle "
set bstationMac [$bstation802 getMac 0]
set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]
puts "bss_id for bstation 1=$AP_ADDR_0"
$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0
$bstationMac enable-beacon

$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON

set ifacel [$ns node 3.0.1] ;
$ifacel random-motion 0 ;
$ifacel base-station [AddrParams addr2id [$bstation802 node-addr]] ;
$ifacel set X_ 500.0
$ifacel set Y_ 335.0
$ifacel set Z_ 0.0

$ns at 5.0 " $ifacel label Motorola "
$ns at 5.0 " $ifacel add-mark n1 yellow square "
$ns at 5.0 "$ifacel setdest 570.0 335.0 10.0"
puts "ifacel: tcl=$ifacel; id=[$ifacel id]; addr=[$ifacel node-addr]"

$ns duplex-link $bstation802 $router1 1500Mb 40ms DropTail

set opt(netif)      Phy/WirelessPhy/OFDM      ;
set opt(mac)       Mac/802_16                ;

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.025e-12;#7.91016e-15 ;
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
                -llType $opt(ll) \
                -macType $opt(mac) \
                -channel $chan \
                -ifqType $opt(ifq) \
                -ifqLen $opt(ifqlen) \
                -antType $opt(ant) \
                -propType $opt(prop) \

```

```

        -phyType $opt(netif) \
        -topoInstance $topo \
        -wiredRouting ON \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace ON \
        -movementTrace OFF \
        -energyModel $opt(energymodel) \
        -idlePower 1.0 \
        -rxPower 1.0 \
        -txPower 1.0 \
        -sleepPower 0.001 \
        -transitionPower 0.2 \
        -transitionTime 0.005 \
        -initialEnergy $opt(initialenergy)

set bstation802_16 [$ns node 2.0.0] ;
$bstation802_16 set X_ 450
$bstation802_16 set Y_ 350
$bstation802_16 set Z_ 0.0
puts "bstation802_16: tcl=$bstation802_16; id=[$bstation802_16 id]; addr=[$bstation802_16 node-addr]
$ns at 0.0 " $bstation802_16 label 4G "
$ns at 0.0 " $bstation802_16 add-mark n1 green circle "
set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$bstation802_16 set mac_(0)] add-classifier $clas
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]
$bs_sched set-default-modulation $default_modulation
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-channel 1

$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON

set iface2 [$ns node 2.0.1] ;
$iface2 random-motion 0 ;
$iface2 base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_16 node-addr]] ;
$iface2 set X_ 500.0
$iface2 set Y_ 335.0
$iface2 set Z_ 0.0
set clas2 [new SDUClassifier/Dest]
[$iface2 set mac_(0)] add-classifier $clas2
set ss_sched [new WimaxScheduler/SS]
[$iface2 set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched
[$iface2 set mac_(0)] set-channel 1
$ns at 5.0 "$iface2 setdest 570.0 335.0 10.0"
puts "iface2: tcl=$iface2; id=[$iface2 id]; addr=[$iface2 node-addr]"

```

```
$ns duplex-link $bstation802_16 $router1 1500Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link-op $router0 $router1 orient down

$ns duplex-link-op $router1 $bstation802_16 orient left-down
$ns duplex-link-op $router1 $bstation802 orient right-down

set nd_bs [$bstation802 install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 20

set nd_mn [$iface1 install-nd]

set nd_bs2 [$bstation802_16 install-nd]
$nd_bs2 set-router TRUE
$nd_bs2 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

set nd_mn2 [$iface2 install-nd]

set ifmgmt_cn [$router0 install-default-ifmanager]

$ns at 5 "$nd_bs start-ra"
$ns at 5 "$nd_bs2 start-ra"

set udp_ugs(1) [new Agent/UDP]
$udp_ugs(1) set packetSize_ 1024
$ns attach-agent $router0 $udp_ugs(1)

set cbr_ugs(1) [new Application/Traffic/CBR]
    $cbr_ugs(1) set packetSize_ 1024 ;#600x8/0.005=960k
    $cbr_ugs(1) set rate_ 2.0Mb
    $cbr_ugs(1) attach-agent $udp_ugs(1)

set sink0 [new Agent/LossMonitor]
$ns attach-agent $iface1 $sink0

$ns connect $udp_ugs(1) $sink0
$udp_ugs(1) set fid_ 1

$ns at 5.0 "$cbr_ugs(1) start"

set udp(2) [new Agent/UDP]
$udp(2) set packetSize_ 1024
$ns attach-agent $router0 $udp(2)

set cbr(2) [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr(2) set packetSize_ 1024 ;
$cbr(2) set rate_ 2.0Mb
$cbr(2) attach-agent $udp(2)

set sink1 [new Agent/LossMonitor]
$ns attach-agent $iface2 $sink1

$ns connect $udp(2) $sink1
$udp(2) set fid_ 2

$ns at 5.0 "$cbr(2) start"

$ns at 2.0 "record"

$ns at 120.0 "finish"

$ns run
```