

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

SISTEMA FUZZY PARA DECISÃO DE HANDOVER VERTICAL E MAXIMIZAÇÃO  
DA VIDA ÚTIL DA BATERIA EM REDES MULTIMÍDIA SEM FIO HETEROGÊNEAS

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

TD: 03/2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019



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

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

SISTEMA FUZZY PARA DECISÃO DE HANDOVER VERTICAL E MAXIMIZAÇÃO  
DA VIDA ÚTIL DA BATERIA EM REDES MULTIMÍDIA SEM FIO HETEROGÊNEAS

TD: 03/2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019

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

THIAGO ANTÔNIO SIDÔNIO COQUEIRO

SISTEMA FUZZY PARA DECISÃO DE HANDOVER VERTICAL E MAXIMIZAÇÃO  
DA VIDA ÚTIL DA BATERIA EM REDES MULTIMÍDIA SEM FIO HETEROGÊNEAS

Tese submetida à Banca Examinadora do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica para a obtenção do  
Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na  
área de concentração de Computação  
Aplicada

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019

**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)**

---

C786s Coqueiro, Thiago Antônio Sidônio.  
Sistema Fuzzy para Decisão de Handover Vertical e Maximização da Vida Útil da Bateria em Redes  
Multimídia Sem Fio Heterogêneas / Thiago Antônio Sidônio Coqueiro, . — 2019.  
xvi, 82 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês  
Coorientador(a): Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia,  
Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Qualidade de Experiência. 2. Tradeoff. 3. Eficiência Energética. 4. Arquitetura Inteligente. 5. Lógica Fuzzy. I. Título.

CDD 004.65

---

**“SISTEMA FUZZY PARA DECISÃO DE HANDOVER VERTICAL E  
MAXIMIZAÇÃO DA VIDA ÚTIL DA BATERIA EM REDES  
MULTIMÍDIA SEM FIO HETEROGÊNEAS”**

**AUTOR: THIAGO ANTONIO SIDÔNIO COQUEIRO**

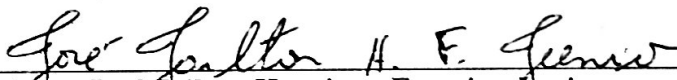
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 15/03/2019

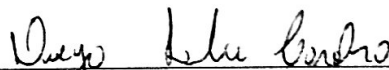
**BANCA EXAMINADORA:**



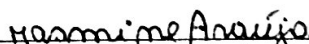
**Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)



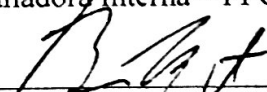
**Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior**  
(Co-Orientador – CCAST/UFPA)



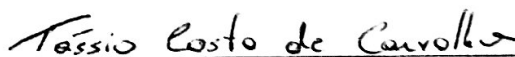
**Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



**Prof.ª Dr.ª Jasmine Priscyla Leite de Araújo**  
(Avaliadora Interna – PPGEE/UFPA)



**Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro**  
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)



**Prof. Dr. Tássio Costa de Carvalho**  
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)

**VISTO:**



**Prof.ª Dr.ª Maria Emilia de Lima Tostes**  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

## AGRADECIMENTOS

As conquistas que almejamos e alcançamos no decorrer da nossa existência não são realizações compostas unicamente pelos nossos próprios esforços. Pois, nos caminhos ligeiramente desconhecidos, encontramos pessoas dispostas a nos estender a mão e nos ajudar através do fornecimento de instrumentos necessários para a concretização desses objetivos. O que neste caso, foi a realização deste trabalho de tese.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a sabedoria e a força suficientes para a superação das dificuldades que surgiram, e por ter colocado em meu caminho as pessoas, que de alguma forma, contribuíram para o meu sucesso. Aos professores e colegas do laboratório do LPRAD (Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho) da Universidade Federal do Pará, em especial ao Professor e orientador Dr. Carlos Renato Lisboa Francês, pela oportunidade em permitir fazer parte de seu grupo de pesquisa, bem como de suas orientações acadêmicas.

Aos Professores, Coorientador Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior e Dr. Tássio Costa de Carvalho, os agradeço pelo carinho e atenção dados ao meu trabalho, além do incentivo e apoio.

Ao esforço e dedicação dos meus pais Sandra Sidônio e Geraldo Coqueiro, da irmã Cecília Sidônio, da minha namorada Paula Costa, dos meus amigos e familiares, que compreenderam a importância de cada etapa. Assim como as minhas ausências durante este percurso, estando sempre de prontidão para me ajudar no que eu precisasse.

Meus agradecimentos pelo apoio financeiro promovido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). À Universidade Federal do Pará (UFPA) por ter me proporcionado a oportunidade da realização deste trabalho de tese.

Agradeço a todos que contribuíram de maneira direta e indireta para a conclusão deste estudo.

O passado terminou. Devemos aprender com ele e deixa-lo ir. O futuro ainda não chegou. Devemos fazer planos, mas não perder tempo nos preocupando com eles. De nada vale nos preocupar. Quando pararmos de ruminar a respeito do que já aconteceu, quando pararmos de nos preocupar com o que talvez nunca aconteça, então estaremos vivendo o presente e começaremos a sentir a alegria de viver.

(Brian Weiss)



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Contextualização</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 Problema</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Definição das Hipóteses</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Objetivos</b> .....	<b>4</b>
<i>1.5.1 Objetivos Gerais</i> .....	4
<i>1.5.2 Objetivos Específicos</i> .....	4
<b>1.6 Estrutura da Tese</b> .....	<b>4</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Considerações Iniciais</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 IEEE 802.11</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 IEEE 802.11b .....	7
2.2.2 IEEE 802.11a .....	7
2.2.3 IEEE 802.11g .....	7
2.2.4 IEEE 802.11n .....	7
<b>2.3 LTE</b> .....	<b>8</b>
<b>2.4 Handover</b> .....	<b>9</b>
2.4.1 Fases do Processo de Gerenciamento do Handover.....	10
2.4.2 <i>Classificação quanto Número de Conexões</i> .....	11
2.4.3 <i>Classificação quanto a Mobilidade</i> .....	12
2.4.4 <i>Classificação quanto ao Domínio Administrativo</i> .....	12
2.4.5 <i>Classificação quanto a Decisão do Usuário</i> .....	12
2.4.6 <i>Requisitos para o Handover Vertical em Redes Heterogêneas</i> .....	13
2.4.7 <i>Indicadores de Desempenho</i> .....	14
<b>2.5 Qualidade de Experiência</b> .....	<b>15</b>
<b>2.6 Modelos de Bateria</b> .....	<b>17</b>
2.6.1 <i>Modelo Eletroquímico</i> .....	19
2.6.2 <i>Modelo de Circuito Elétrico</i> .....	19
2.6.3 <i>Modelo Estocástico</i> .....	20
2.6.4 <i>Modelo Analítico</i> .....	20
2.6.4.1 <i>Modelo Linear</i> .....	21

2.6.4.2 Modelo Não Linear .....	21
<b>2.7 Lógica Fuzzy.....</b>	<b>24</b>
2.7.1 Conjunto Fuzzy .....	24
2.7.2 Regras Fuzzy .....	26
2.7.3 Sistema Fuzzy.....	26
<b>2.8 Considerações Finais .....</b>	<b>27</b>
<b>3. TRABALHOS CORRELATOS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Considerações Iniciais .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Estratégias de Decisão - Métricas Simples .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 Baseadas no RSSI.....	28
3.2.2 Baseadas na Largura de Banda.....	28
3.2.3 Baseadas na Função de Custo .....	29
<b>3.3 Estratégias de Decisão – Múltiplos Atributos .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Estratégias de Decisão – MIH.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5 Estratégias de Decisão - Inteligência Computacional.....</b>	<b>31</b>
3.5.1 Baseada em Redes Neurais .....	31
3.5.2 Baseadas na Lógica Fuzzy.....	32
<b>3.6 Considerações Finais .....</b>	<b>33</b>
<b>4. ARQUITETURA PROPOSTA .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Considerações Iniciais .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Declaração do Problema e Principais Contribuições .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Arquitetura Fuzzy.....</b>	<b>39</b>
<b>4.4 Modelo Rakhmatov – Vrudhula.....</b>	<b>43</b>
<b>4.5 Esquema de Gerenciamento de Mobilidade Distribuída .....</b>	<b>44</b>
<b>4.6 Considerações Finais .....</b>	<b>45</b>
<b>5. METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Considerações Finais .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2 Resultados do consumo de energia.....</b>	<b>47</b>
<b>5.3 Resultados quanto à QoS .....</b>	<b>49</b>
5.3.1 Cenário quanto em Interseção da Área de Cobertura.....	49
5.3.2 Cenário com Elevada Mobilidade .....	50
<b>5.4 Resultados quanto à QoE .....</b>	<b>52</b>
<b>5.5 Considerações Finais .....</b>	<b>59</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>

<b>6.1 Principais Contribuições .....</b>	<b>62</b>
<b>6.2 Trabalhos Futuros .....</b>	<b>63</b>
<b>6.3 Dificuldades Encontradas .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases do Gerenciamento do Handover, adaptado de (KASSAR et al, 2008).....	11
Figura 2 - Ilustração sobre o feito de recuperação na bateria (MA & YANG, 2011) .....	18
Figura 3 - Tipos de Representações de Funções de Pertinência.....	25
Figura 4 - Sistema Fuzzy .....	26
Figura 5 - Sistema de Redes Sem Fio Heterogênea.....	37
Figura 6 - Saída no Sistema Fuzzy .....	41
Figura 7 - Sinalização no Procedimento de Handover .....	44
Figura 8 - Energy-Saving ou Economia de Energia Sobre o Tempo .....	48
Figura 9 - Throughput Sobre o Tempo.....	50
Figura 10 - Resultado do <i>Throughput</i> em Situação de Ping-Pong no Processo de Handover .	51
Figura 11 - PSNR Sobre Frames (Quadros) .....	53
Figura 12 - SSIM Sobre Frames .....	54
Figura 13 - VQM Sobre Frames .....	55
Figura 14 - Delay Sobre Frames.....	56
Figura 15 - Sem o Sistema Fuzzy.....	56
Figura 16 - Proposta de Kammoun e Tabbane (2016).....	57
Figura 17 - Aldhaibani et al. (2018) .....	57
Figura 18 - Piamrat et al. (2011) .....	58
Figura 19 - Zineb et al. (2016).....	58
Figura 20 - Com o Sistema Fuzzy .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões do IEEE 802.11.....	8
Tabela 2 - Qualidade de Acordo com o PSNR.....	16
Tabela 3 - Comparação dos modelos para o contexto de redes heterogêneas.....	23
Tabela 4 - Síntese dos Principais Trabalhos Relacionados – Parte A.....	33
Tabela 5 - Síntese dos Principais Trabalhos Relacionados – Parte B.....	34
Tabela 6 - Regras Fuzzy para Wi-Fi.....	41
Tabela 7 - Regras Fuzzy para LTE.....	42
Tabela 8 - Numeração correspondente para cada proposta.....	46
Tabela 9 - Parâmetros de Simulação.....	47
Tabela 10 - Parâmetros de Simulação para Energia.....	47

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABC** - Always Best Connected
- AP** - Access Point
- AGW** - Access Gateway
- AHP** - Analytic Hierarchy Process
- ANP** - Analytical Network Process
- ANN** - Artificial Neural Networks
- BS** - Base Station
- DSSS** - Direct Sequence Spread Spectrum
- FHSS** - Frequency Hopping Spread Spectrum
- FDD** Frequency Division Duplex
- GPRS** - General Packet Radio Service
- GPSR** - Greedy Perimeter Stateless Routing
- HR-DSSS** - High Rate Direct Sequence Spread Spectrum
- IR** - Infrared light – Luz Infravermelho
- IP** - Internet Protocol
- ISM** - Industrial, Scientific and Medical
- LTE** - Long Term Equivalent
- MADM** - Multiple Attribute Decision-Making
- MIMO** - Multiple Input Multiple Output
- MPEG** - Moving Picture Experts Group
- MME** - Mobility Management Entity
- MOS** - Mean Opinion Score
- MSE** - Mean Squared Error
- OFDM** - Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- PSQA** - Pseudo-Subjective Quality Assessment

**PSNR** - Peak Signal to Noise Ratio

**QoE** - Quality of Experience

**QoS** - Quality of Service

**RNN** - Random Neural Network

**RSS** - Received Signal Strength

**SDN** - Software-Defined Networking

**SSIM** - Structural Similarity

**SVH** - Sistema Visual Humano

**TOPSIS** - Technique for Preference Order by Similarity to Ideal Solution

**TTT** - Time-to-Trigger

**VQEG**- Video Quality Experts Group

**VQM** - Video Quality Metric

**UMTS**- Universal Mobile Telecommunication System

**WI-FI** - Wireless Fidelity

**WIMAX** - Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WLAN** - Wireless Local Area Network

## RESUMO

Aplicativos que consomem elevada largura de banda e energia vem aumentando consideravelmente em ritmo acelerado em redes móveis. No entanto, os dispositivos móveis sofrem com a falta de capacidade de bateria suficiente para o uso intensivo/contínuo de tais aplicativos. Em adição, as redes móveis atualmente possuem alto grau de heterogeneidade e compreendem uma grande variedade de redes com diferentes tecnologias, como LTE, Wi-Fi e WiMAX. Portanto, deve haver o necessário *tradeoff* de garantir que a qualidade da experiência (QoE – *Quality of Experience*) seja fornecida para os usuários neste cenário, assim como uma estratégia de eficiência energética projetada para estender a vida útil da bateria de dispositivos móveis. Esta tese propõe uma arquitetura inteligente baseado na lógica Fuzzy, capaz de fornecer subsídios para apoio à tomada de decisões visando a economizar a energia de dispositivos móveis dentro de uma rede LTE e Wi-Fi integrada. Considerando a satisfação do usuário, os ganhos obtidos através das métricas de PSNR, SSIM e VQM foram respectivamente 32%, 31% e 91% superior a arquitetura sem a lógica Fuzzy. Assim, os experimentos simulados mostram os benefícios e a viabilidade da solução proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Qualidade de Experiência, Tradeoff, Eficiência Energética, Arquitetura Inteligente, Lógica Fuzzy.



## **ABSTRACT**

The applications that consume high bandwidth and energy consumption have been increasing considerably fast in mobile networks. However, the mobile devices do not offer support to battery capacity for the intensive / continuous use of such applications. In addition, mobile networks currently have a high degree of heterogeneity and comprise a wide variety of networks with different technologies, such as LTE, Wi-Fi and WiMAX. Therefore, it is necessary the tradeoff to ensure that QoE is provided to users in this scenario, as well as an energy efficiency strategy designed to extend the battery life of mobile devices. This thesis proposes an intelligent architecture based on Fuzzy logic, capable of providing support to decision making to save the energy of mobile devices within an integrated LTE and Wi-Fi network. Considering user satisfaction, the gains obtained through the PSNR, SSIM and VQM metrics were respectively 32%, 31% and 91% higher than the architecture without Fuzzy logic. Thus, the simulated experiments show the benefits and feasibility of the proposed solution.

**KEYWORD:** Quality of Experience, Tradeoff, Energy Efficiency, Fuzzy, Intelligent Architecture, Fuzzy logic.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve a contextualização dos assuntos relacionados à pesquisa, explicando os problemas atuais e a motivação envolvida para a execução da mesma, bem como as hipóteses e os objetivos principais.

### 1.2 Contextualização

A crescente demanda por novos serviços, tecnologias e conteúdo está mudando a forma de acesso dos usuários à Internet. De acordo com a Cisco (2017), em 2021, 74% dos dispositivos móveis irão gerar 98% do tráfego de dados e 78% deles serão originados por tráfego de vídeo. A popularização do uso de aplicativos multimídias, aliada ao aumento do número de usuários móveis, torna essencial o fornecimento de serviços com alta taxa de transmissão e melhor qualidade.

Tanto no momento atual, quanto no futuro, o ambiente de rede sem fio será baseado na coexistência de várias redes com acesso a uma ampla variedade de tecnologias, como Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX e LTE. Esse será um cenário onde os usuários móveis, equipados com dispositivos com suporte a múltiplas interfaces de rede, poderão obter acesso a serviços multimídia por meio de diferentes redes de acesso sem fio. Em outras palavras, a heterogeneidade de um ambiente sem fio oferece a oportunidade de avaliar e selecionar a melhor rede de uma série de outras redes, com base nas condições exigidas de um determinado serviço de dados multimídia.

Diante deste cenário, o *handover* passa a ser um procedimento necessário. O *handover* é um procedimento que permite que um dispositivo móvel seja desconectado de uma rede para que possa ser conectado a outra rede. Tal situação permite que os usuários móveis estejam sempre conectados (*ABC - Always Best Connected*) a uma rede, de modo que um determinado aplicativo possa continuar operando enquanto o seu usuário está se deslocando entre locais diferentes. Cabe destacar que quando o desacoplamento e a conexão envolvem as mesmas tecnologias de rede, o fenômeno é denominado de *handover* horizontal, enquanto o *handover* vertical envolve o uso de diferentes tecnologias. (GUSTAFSSON; EVA; JONSSON, 2003).

Como os usuários, via de regra, desejam uma melhor experiência multimídia em seus dispositivos móveis, a exibição de vídeos em alta qualidade, em redes sem fio, passa a ser uma tarefa mais desafiadora do que em redes com fio ou cabeadas. Tal fato também é potencializado devido a restrições e ao comportamento de mobilidade, além do ambiente de redes sem fio heterogêneas em si; no entanto, tal situação reside principalmente no desafio de atender às condições exigidas para os aplicativos multimídias com relação a garantir baixa latência e uma perda insignificante de pacotes transmitidos.

A decisão de quando e onde realizar o *handover* dependerá de vários fatores ou atributos, tais como: QoS (qualidade de serviço), intensidade do sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*), largura de banda, taxa de consumo da bateria e velocidade do usuário móvel. Dessa forma, o conceito de Qualidade da Experiência (QoE) está se tornando um fator chave, pois é capaz de medir o grau de qualidade de um serviço multimídia através da percepção do usuário. Em outras palavras, a satisfação do usuário pode ser medida através de condições exigidas, com base na psicologia social, ciência cognitiva e ciência da engenharia (LONGHAO; TRESTIAN; MUNTEA, 2018).

Ressalta-se que as expectativas sobre a satisfação de diferentes serviços e aplicativos variam entre os diferentes usuários. Em função disso, o conceito tradicional de QoS não leva em conta o fato de que as satisfações do usuário devem ser utilizadas como um indicador. Isto é, somente se preocupam com as propriedades da rede por meio de métricas projetadas para a entrega de conteúdo (XU et al, 2014; BRITO; FIGUEIREDO, 2017; YALA; FRANGOUDIS; KSENTINI, 2016). Isso significa que a QoE é um importante atributo a ser considerado no processo de tomada de decisão do *handover*.

Adicionalmente, outro fator importante que precisa ser considerado é o nível de consumo de energia do dispositivo móvel, visto que os aplicativos de vídeo consomem uma grande quantidade de energia. Atualmente, a economia de energia é uma preocupação que deve ser abordada, particularmente em redes sem fio heterogêneas. Isto é, que oferecem uma ampla gama de oportunidades para a escolha de redes que permitam menor consumo de energia através do *handover* vertical. No entanto, é um desafio real selecionar uma rede ideal que leve em conta as preferências dos usuários e, ao mesmo tempo, seja eficiente em termos energéticos.

### 1.3 Problema

Como os diversos tipos de tecnologias sem fio possuem diferentes largura de banda e desiguais consumos de energia, é necessário buscar um equilíbrio entre a largura de banda e consumo de energia. Tal situação é necessária, pois haverá momentos em que um usuário escolherá uma rede com maior largura de banda, reduzindo, assim, a vida útil da bateria. Pode ocorrer, também, do usuário optar por migrar para uma rede com menos largura de banda, mas com maior duração da bateria (TUYSUZ, 2017; TUYZUZ; TRESTIAN, 2017). Em vista disso, é primordial equacionar o *tradeoff* entre o consumo de bateria e a qualidade de experiência do usuário para manter o equilíbrio favorável.

### 1.4 Definição das Hipóteses

Nesse sentido, o balanceamento entre a eficiência energética e a qualidade de experiência, no processo de seleção de redes pelo dispositivo móvel, são necessários para manter o usuário satisfeito. Nesse contexto, critérios para a identificação de necessidades do usuário, devem ser considerados para a escolha da melhor rede em uma determinada situação. Isto é, critérios para escolha de redes para priorizar QoE ou privilegiar redes que oferecem menor consumo de energia. Para o suporte na identificação desses critérios, a escolha de parâmetros no suporte à mobilidade, consumo de energia e QoE, possibilitam que tais fatores auxiliem na questão do *tradeoff*, principalmente na identificação do cenário no qual o dispositivo móvel pertencerá. Desse modo, duas hipóteses deverão ser testadas neste trabalho:

- O melhor critério (para priorizar redes com melhor eficiência energética ou QoE) para decisão do *handover*, em função de uma determinada situação ou cenário, irá permitir a seleção de redes com maior satisfação do usuário.
- A escolha dos atributos RSS, taxa de consumo da bateria, velocidade do usuário móvel e QoE, permitem identificar o critério ideal para o suporte a decisão de *handover* na escolha de redes com melhor equilíbrio entre qualidade de experiência e eficiência energética.

Em vista disso, o sistema Fuzzy terá como principais entradas o consumo de bateria e a qualidade de experiência do usuário para manter o equilíbrio entre QoE versus consumo de energia. A escolha de uma solução baseada em lógica Fuzzy, permitirá promover a decisão de

*handover* verificando a consistência dos dados coletados nas entradas. Isto é, permitindo modelar conhecimento não exato, com a finalidade de expressar informações que não são totalmente verdadeiras, nem totalmente falsas, mas que possuem um grau de verdade associado (GOMIDE, 1998).

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal do presente trabalho é propor uma arquitetura de redes heterogêneas sem fio com tomada de decisão de *handover* vertical baseado na lógica Fuzzy, visando à seleção da melhor rede. A proposta leva em consideração os seguintes parâmetros ao selecionar a melhor rede: critérios de QoE, consumo de energia, RSS e a mobilidade do usuário.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Propor e implementar uma arquitetura de Redes Sem Fio Heterogêneas utilizando as tecnologias LTE e IEEE 802.11n.
- Desenvolver um algoritmo de inteligência computacional baseado em lógica Fuzzy para a decisão de *handover* em redes sem fio heterogêneas.
- Utilizar um modelo de bateria não-linear.
- Avaliar o impacto da Qualidade de Experiência no *handover*.

## 1.6 Estrutura da Tese

O capítulo atual iniciou uma contextualização geral sobre os assuntos desta tese, explanando a respeito das motivações e dos principais objetivos do trabalho. Nos capítulos seguintes, serão descritos sobre a arquitetura proposta, bem como a metodologia de avaliação e dos resultados obtidos.

O capítulo dois, a seguir, dissertará sobre o estado da arte dos principais assuntos que envolvem esta tese, como: as tecnologias de comunicações 802.11n e LTE; as fases, classificações do processo de *handover*, assim como seus principais requisitos e indicadores de desempenho; a descrição das métricas de qualidade de experiência; os principais modelos de bateria; e sobre a lógica Fuzzy. revendo, também, alguns conceitos básicos pertinentes.

Por outro lado, o capítulo três revisará os principais trabalhos correlatos encontrados na literatura que auxiliaram nesta tese. Isto é, na avaliação sobre as principais abordagens quanto ao equilíbrio entre consumo de energia e qualidade de experiência do usuário.

Enquanto o capítulo quatro descreverá a arquitetura do sistema Fuzzy para redes sem fio heterogêneas. Ou seja, sobre a descrição do sistema Fuzzy, o modelo de bateria não linear adotado e o esquema de gerenciamento de mobilidade.

O capítulo cinco descreve a metodologia empregada para a avaliação da proposta e sobre os resultados coletados. Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões desta tese, e as contribuições, além de trabalhos futuros. A seguir encontram-se as referências utilizadas por este trabalho e os anexos com trechos de código do simulador utilizado.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, serão apresentados os padrões das áreas envolvidas nesta tese. Inicialmente, serão abordados os padrões que foram adotados na arquitetura proposta. Tal arquitetura, disponibiliza como tecnologias de acesso, o IEEE 802.11n e também o LTE, amplamente conhecido como rede 4G.

Em seguida, serão descritos os preceitos sobre o *handover*, abordando sobre suas fases do procedimento de decisão, as principais classificações, bem como os requisitos e indicadores de desempenho.

Nesse capítulo, o conceito de Qualidade de Experiência será abordado, descrevendo sobre as principais métricas subjetivas. Os principais modelos de energia, quanto aos principais tipos, considerando uma avaliação comparativa entre as abordagens como justificativa para a adoção do modelo analítico proposto nesta tese. Ao final, será apresentada, de forma sintética, a técnica de inteligência computacional baseada em lógica Fuzzy.

### 2.2 IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 ou Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) é uma tecnologia de comunicação projetada para redes sem fio WLAN (*Wireless Local Area Networks*) (IEEE 802.11, 1999). O padrão opera na faixa não licenciada do espectro eletromagnético, onde são faixas de frequências utilizadas em situações industriais, científicas e médicas, conhecidas como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Nas redes Wi-Fi, as bandas de 2,4 GHz e 5,0 GHz são as frequências utilizadas do espectro eletromagnético. Geralmente, os dispositivos de comunicação que funcionam nas bandas ISM, possuem transmissores de baixa potência, não permitindo que as WLANs sejam capazes de cobrir mais do que alguns metros.

No padrão 802.11, foram definidas três técnicas de transmissão na camada física: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum* – Espectro de Dispersão com Saltos em Frequência); o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum* – Espectro de Dispersão de Sequência Direta); e IR (*Infrared light* – Luz Infravermelho).

Posteriormente, para alcançar maior largura de banda, surgiram duas novas técnicas de transmissão: OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência), utilizada primeiramente no padrão 802.11a e, em seguida, no 802.11g e, o HR-DSSS (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum* - Espectro de Dispersão com Sequência Direta de Alta Velocidade), utilizado no padrão 802.11b.

Neste sentido, uma rede Wi-Fi é definida como uma rede em conformidade com a família de protocolos 802.11, sendo que, desta família, os padrões 802.11a, 802.11b, 802.11g, e 802.11n são um dos principais.

### 2.2.1 IEEE 802.11b

O padrão IEEE 802.11b foi projetado para disponibilizar uma maior velocidade em relação às redes cabeadas que operavam nas taxas de 10 *Mbps*, dado que o padrão 802.11 oferecia, apenas, 1 e 2 *Mbps*. O IEEE especificou que a velocidade do padrão 802.11b seria de até 11 *Mbps*, podendo operar também em velocidades menores, como 1 *Mbps* e 2 *Mbps*. Cabe destacar, que o padrão 802.11b utiliza a banda de frequência de 2,4 *GHz*.

### 2.2.2 IEEE 802.11a

No padrão 802.11, a principal novidade foi o aumento da taxa de transmissão máxima para 54 *Mbps*, mas, com a possibilidade de funcionar em velocidades inferiores (RUFINO, 2015). Nesse padrão, a frequência passou a ser de 5 *GHz*, que é uma faixa na qual não se tem tantos dispositivos operando, como existem na faixa de 2.4 *GHz*. Logo, ela é sujeita a menos interferências.

### 2.2.3 IEEE 802.11g

O padrão denominado 802.11g passou a alcançar taxa de transmissão de 54 *Mbps* por meio da faixa de 2.4 *GHz*. Considerado como uma evolução do padrão 802.11b, o mesmo é capaz de operar com duas técnicas de modulação, utilizando-se do DSSS para velocidades mais reduzidas e do OFDM para velocidades acima de 11 *Mbps*.

### 2.3.4 IEEE 802.11n

O padrão 802.11n foi lançado pela IEEE em 2009, com a proposta de aperfeiçoar a taxa de velocidade de 54 *Mbps* para 600 *Mbps*, utilizando quatro canais para dados, com largura de 40 MHz. Além disso, tal padrão utilizada a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para fazer a integração dos quadros que são enviados em vários canais na camada MAC. Destaca-se que a tecnologia MIMO utiliza vários transmissores e receptores para realizar o envio de dados simultaneamente, aproveitando-se do evento de *multipath*, que ocorre quando as informações se propagam por diversos caminhos durante o percurso. Além disso, é importante salientar que o MIMO amplia a potência de captura de sinal através da



utilização de mais de uma antena, permitindo assim, que as informações cheguem por diferentes direções. A Tabela 1 a seguir descreve as principais características do padrão 802.11.

Tabela 1 - Padrões do IEEE 802.11

Padrões	Frequência	Técnica de Modulação	Taxa de Transmissão
802.11	2.4 Ghz	FHSS / DSSS	2 Mbps
802,11a	5 Ghz	OFDM	54 Mbps
802.11b	2.4 Ghz	DSSS	11 Mbps
802.11g	2.4 Ghz	FHSS	54 Mbps
802.11n	2.4 / 5Ghz	OFDM – MIMO	600 Mbps

### 2.3 LTE

A tecnologia que vem sendo utilizada nas redes 4G é a *Long Term Evolution* (LTE), que opera em banda de frequência de até 20Mhz e possui taxa de transmissão para download de 100 Mb/s e taxa de *uplink* de 50 Mb/s. Para poder transmitir dados de modo Full-Duplex, ou seja, transmitir e receber dados ao mesmo tempo, o LTE utiliza a técnica FDD (*Frequency Division Duplex*) (DAHLMAN et al, 2011).

Um dos principais desafios para redes móveis é a troca de estação base (*handover*). Por essa razão, o LTE fornece suporte à mobilidade, para os usuários que tenham velocidade de até 15 km/h, o melhor desempenho possível deve ser fornecido, já para os usuários móveis com velocidade até 120 km/h, a qualidade a ser fornecida deverá ser considerada boa. A tecnologia LTE conseguirá oferecer suporte a usuários móveis com velocidade máxima de 315 km/h, porém depende da frequência a ser utilizada.

A tecnologia LTE utiliza a técnica OFDM (*Orthogonal Frquency Division Multiplexing*) para enviar múltiplos sinais em diferentes frequências, de modo que a transmissão com múltiplos sinais ocupe menos espectro. Para transmissões *uplink*, utiliza a técnica DFT-spread OFDM (DFTSOOFDM) que permite pequenas variações na potência do sinal transmitido e atribuição de largura de banda flexível. Desta forma, a transmissão permite uma amplificação de potência que pode significar no aumento da área de cobertura, a comunicação *uplink* tem menos restrições em relação a recursos da rede e processamento de sinal.

O LTE também utiliza a multiplexação espacial que é denominada de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), o que permite melhores condições dos canais e

consequentemente, melhores taxas de transmissão. A multiplexação espacial cria canais paralelos para as transmissões. As estações bases são denominadas de eNodeB (*Evolved Node B*) selecionam a melhor rota, realizam o agendamento dos pacotes, alocam recursos para *downlink* e *uplink* e principalmente realizam o controle de admissão dos usuários.

Os escalonadores em uma rede LTE determinam o tempo e os recursos que são compartilhados, assim os escalonadores são fundamentais para um bom desempenho das transmissões. Os escalonadores do LTE escolhem os canais com melhores condições tanto no domínio do tempo, quanto da frequência, já que a alocação de recursos é flexível.

Os usuários LTE possuem duas antenas receptoras, o que melhora a taxa de transmissão para *downlink*. As estações base também utilizam múltiplas antenas para melhorar a relação sinal-ruído e também para ampliar a área de cobertura (SESIA et al, 2011).

Uma arquitetura LTE é composta por uma entidade denominada de Access Gateway (AGW) que é constituída por mais três entidades: 1) PDN Gateway (P-GW) responsável pela alocação do IP aos usuários móveis; 2) *Mobility Management Entity* (MME) que é responsável pela comunicação do núcleo da rede com os usuários móveis; 3) Serving Gateway (S-GW) que é responsável pelo redirecionamento dos pacotes IP quando os usuários móveis realizam handover.

## 2.4 Handover

O *handover* ou *handoff* é uma abordagem utilizada por redes de comunicações móveis que permite a transição de um dispositivo móvel de uma célula para outra de forma transparente, e admitir a continuidade das aplicações e serviços em execução. Ou seja, o *handover* geralmente ocorre quando um dispositivo móvel ultrapassa os limites de uma célula controlada por uma ERB (Estação Rádio Base) e entra em outra célula controlada por outra ERB.

### 2.4.1 Fases do Processo de Gerenciamento do Handover

O processo de *handover* se divide em três fases: descoberta, decisão e execução:

#### 2.4.1.1 Fase 1 - Descoberta

Para o momento de descoberta de serviços, a fase da descoberta tem a finalidade de coletar informações para identificar a necessidade para o *handover*. No caso, considerando critérios específicos como taxa de transmissão, nível de bateria, além de parâmetros de qualidade de serviço com exemplo.

#### 2.4.1.2 Fase 1 – Decisão

É a fase que determina se o dispositivo móvel poderá continuar na rede atual ou realizar a mudança para outra rede, de acordo com o critério de seleção adotado. A decisão de *handover* depende de vários parâmetros para o suporte a decisão, como o tipo da aplicação, largura de banda mínima, preferência do usuário.

Essa fase apresenta consequências diretas no desempenho de toda a operação de *handover*. Pois as redes disponíveis serão analisadas através dos dados coletados da etapa anterior, a fim de definir a estratégia a ser adotada para a seleção da melhor rede.

#### 2.4.1.3 Fase 1 - Execução

Tem a finalidade de selecionar a rede de acordo com a fase de decisão de *handover*. As mensagens de controle são trocadas entre o dispositivo móvel, a rede alvo e a rede conectada atual para a mudança de canal de comunicação. A fase de execução deve apresentar como requisito ser transparente para o usuário em termos de interrupção na comunicação. Essa fase também inclui os procedimentos de autenticação, autorização e transferência quanto informações de contexto do usuário (CHANDAVARKAR & REDDY, 2011). A Figura 1 demonstra a estrutura do processo de gerenciamento do *handover*.

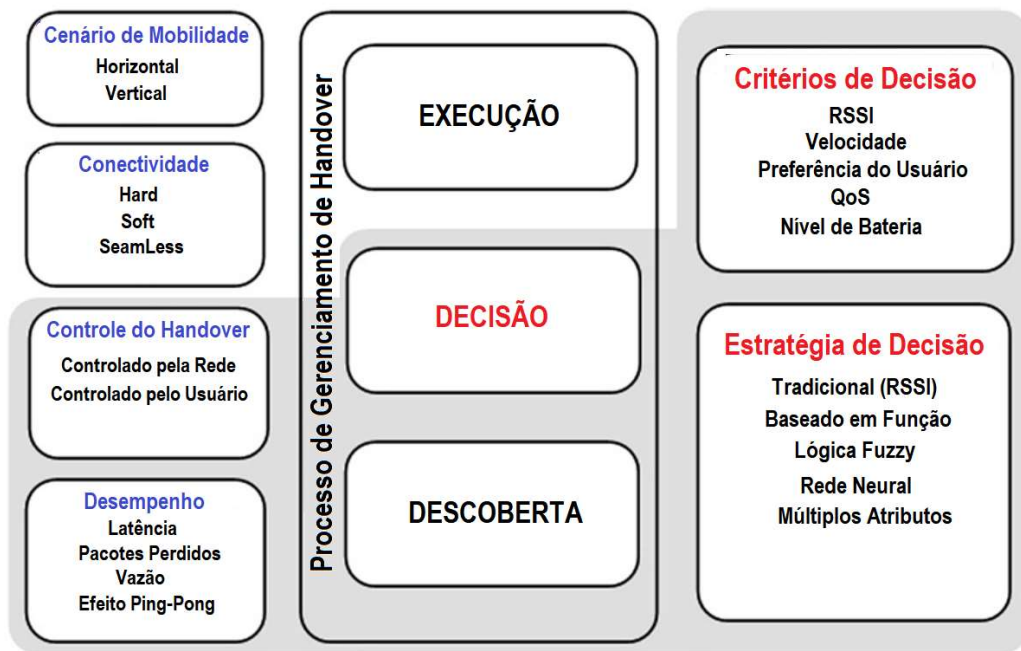


Figura 1 - Fases do Gerenciamento do *Handover*, adaptado de (KASSAR et al, 2008)

O *handover* pode ser classificado quanto aos fatores relacionados ao número de conexões, mobilidade de rede, domínios administrativos, e decisão do usuário.

#### 2.4.2 Classificação quanto Número de Conexões

Quanto ao número de conexões o processo de *handover* pode ser classificado em *Soft handover*, *hard handover* e *seamless vertical handover*.

O *soft handoff* ocorre quando um dispositivo móvel se desloca de uma célula para outra sem perder a conexão com a primeira. O dispositivo móvel fica interligado as duas redes simultaneamente durante o *handoff* por um curto período de tempo, de forma que não provoque perda de continuidade e percepção por parte do usuário da estação móvel. O canal de comunicação entre a estação base antiga e dispositivo móvel é mantido paralelamente em relação ao canal que é alocado entre a estação base de destino e o móvel. Assim, a conexão com a estação base de destino é estabelecida antes da desativação da conexão antiga.

O *hard handoff* ocorre quando um dispositivo móvel ao se deslocar de uma célula para outra, perde a conexão com a célula de origem antes de estabelecer conexão com a célula de destino. Ou seja, a perda da conexão com a rede de origem é feita de forma imediata para que a interrupção não seja percebida. A liberação do canal de comunicação entre a estação base

antiga e o móvel é realizada antes da conexão entre a estação base de destino e a estação móvel.

O *seamless vertical handover* ocorre quando a conectividade das aplicações, que estão sendo utilizadas por um dispositivo móvel, é mantida durante um *handover* realizado entre pontos de acesso de rede que utilizam tecnologias de conexão diferentes.

#### 2.4.3 Classificação quanto a Mobilidade

O *handover* horizontal e vertical são caracterizados como principal classificação. Nesse sentido, o horizontal *handover* ocorre quando o *handover* é realizado entre ERBs ou pontos de acesso que utilizam a mesma interface de rede sem fio. Por exemplo, quando o terminal móvel se desloca de uma estação base IEEE 802.11b para uma estação base IEEE 802.11b geograficamente vizinha.

Já o *handover* vertical ocorre quando o *handover* é realizado entre pontos de acesso de rede que utilizam tecnologias de conexão diferentes. Por exemplo, quando um dispositivo móvel se desloca de uma rede celular de telefonia 3G para uma rede wireless Wi-Fi.

#### 2.4.4 Classificação quanto ao Domínio Administrativo

Um domínio administrativo é um grupo de sistemas e redes operados por uma única autoridade administrativa. Os domínios administrativos desempenham um papel significativo nas redes sem fio 4G, à medida que diferentes redes, controladas por diferentes autoridades administrativas, se tornam disponíveis. Nesse sentido, o domínio administrativo pode ser classificado em intra e inter domínio.

No intra-domínio o terminal móvel realiza o procedimento de transferência entre redes diferentes (suportando os mesmos ou diferentes tipos de interfaces de rede) gerenciadas pelo mesmo domínio administrativo.

Em contrapartida no inter-domínio, o processo de *handover* pelo terminal móvel ocorre entre diferentes redes (suportando o mesmo ou diferentes tipos de interfaces de rede) gerenciadas por diferentes domínios administrativos.

#### 2.4.5 Classificação quanto a Decisão do Usuário

Dependendo do controle de usuários na entrega, ele pode ser classificado como proativo ou passivo. Em um *handover* proativo, o usuário dispositivo móvel tem permissão para decidir quando realizar o *handover*. A decisão pode ser baseada em um conjunto de

preferências especificadas pelo usuário. A proatividade é considerada como uma das principais características dos sistemas 4G.

No handover passivo, o usuário não tem controle sobre o processo de handover. Esse tipo de handover é o mais comum em sistemas sem fio de primeira, segunda e terceira geração.

#### 2.4.6 Requisitos para o Handover Vertical em Redes Heterogêneas

Quando um dispositivo móvel troca de uma rede para outra, o *handover* vertical é considerado como principal requerimento para as redes heterogêneas. Pois consiste em preservar a conectividade à medida que os dispositivos se movem. Desse modo, os requisitos deverão ser levados em consideração para o adequado funcionamento do mecanismo, como:

##### 2.4.6.1 Transparência

A transparência de um *handover* vertical com baixo atraso e perda mínima de pacotes, tornou-se um fator crucial para usuários móveis que desejam receber serviços contínuos e confiáveis. Desse modo, o algoritmo de *handoff* deverá ser rápido para que o dispositivo móvel não sofra degradação ou interrupção do serviço.

##### 2.4.6.2 Confiabilidade

Um algoritmo de *handoff* deve ser confiável, ou seja, com redução de falhas nos *handovers* ou probabilidade de bloqueio. No qual, consiste na probabilidade com que um dispositivo móvel tem sua requisição de *handover* rejeitada pela estação base alvo. Nesse sentido, a redução nas tentativas de *handover* permite maior confiabilidade no processo.

##### 2.4.6.3 Balanceamento

O algoritmo deverá equilibrar o tráfego em todas as células, seja do mesmo tipo de rede ou diferente. Isso ajuda a eliminar a necessidade de empréstimo de frequências das células vizinhas que possuem canais livres. O que simplifica o planejamento e a operação das células, além de reduzir a probabilidade de bloqueio.

##### 2.4.6.4 Número de Handovers

O número de *handoffs* deve ser minimizado. Excessivo *handovers* levam a pesadas cargas de processamento e má qualidade de comunicação. Ou seja, quanto mais tentativas de

*handoff*, maiores as chances de uma chamada ter acesso negado a um canal, resultando em uma maior probabilidade de queda. Além disso, um grande número de tentativas de *handoff* pode resultar em maior atraso no processamento das solicitações para troca de rede.

#### 2.4.6.5 Probabilidade de Decisão Errada

Uma decisão errada é quando em um tempo imediatamente posterior a um *handover* efetuado, a rede escolhida passa a ser considerada menos adequada. Neste caso, um outro *handover* para a rede original pode ser derivado, resultando no efeito *ping-pong*. Isto pode afetar por exemplo, significativamente o nível de QoS das aplicações em execução, bem como o tempo de vida útil da bateria do terminal móvel. Ademais, a realização de vários *handovers* de forma desnecessária, através do efeito *ping-pong*, pode causar sobrecarga nas mesmas (CHIEN, ET AL, 2008).

#### 2.4.7 Indicadores de Desempenho

Segundo Chandavarkar (2011), o desempenho do gerenciamento de *handover* pode ser medido pelos parâmetros como atraso de entrega (latência), número de *handovers*, probabilidade de falha de *handover* e taxa de transferência.

O atraso de entrega refere-se à duração entre o início e a conclusão do processo de *handover*. O atraso de *handover* está relacionado à complexidade do processo de gerenciamento de *handover*. Nesse sentido, a redução do atraso nesse processo deve ser levada em consideração, pois as aplicações multimídia são sensíveis ao atraso.

Outro indicador de desempenho importante é a avaliação do número de *handovers*. Geralmente, é preferível reduzir o seu número, uma vez que frequentes *handoffs* causariam o desperdício de recursos da rede. A transferência de uma rede para outra é considerada supérflua ou desnecessária quando o *handover* volta ao original ponto de ligação em curto período de tempo. Então a avaliação dos efeitos *ping-pong* devem ser considerados como indicador de desempenho, no sentido de avaliar seu impacto quanto ao nível de recursos desperdiçados nos processos de *handovers*.

A falha de *handover* é um indicador importante para avaliação de desempenho. O parâmetro avalia o nível de ocorrências quando o *handover* é iniciado, mas a rede de destino não possui recursos suficientes para concluí-la ou quando o terminal móvel sai da área de cobertura da rede alvo antes que o processo seja finalizado. No primeiro caso, a probabilidade de falha de *handover* está relacionada com a disponibilidade do canal da rede alvo, enquanto no último caso está relacionada com a mobilidade do usuário.

A vazão ou taxa de transferência compreende a taxa média de dados recebidos ou a entrega de mensagens bem-sucedidas em um link de comunicação específico. A vazão da rede é medida em bits por segundo (*bps*). É um dos principais indicadores de desempenho, pois refere-se à taxa de dados fornecida aos terminais móveis na rede. Nesse sentido, avaliação de um *handover* para uma rede candidata com maior rendimento em termos de taxa de transferência é desejado.

## 2.5 Qualidade de Experiência

O aumento das aplicações multimídias na internet exigiu uma nova maneira de avaliar as arquiteturas. Uma mesma aplicação multimídia pode ser classificada de diversas maneiras em relação a sua qualidade quando avaliada por diferentes usuários. Isso ocorre pelo fato de diferentes usuários terem diferentes experiências em relação à aplicação multimídia. (WANG et al., 2001)

Desta forma, o conceito de Qualidade de Experiência está relacionado à avaliação das aplicações multimídias através da percepção do usuário em relação a mesma. As métricas de QoS não expressam a satisfação do usuário diante de uma determinada aplicação multimídia, a fim de avaliar se a qualidade de um vídeo recebido pode ser classificada como boa (ENGELKE et. al., 2011).

A avaliação da Qualidade de Experiência de uma aplicação multimídia ocorre através de métricas matemáticas objetivas, que analisando características específicas como cor, brilho, ruído, estimam a qualidade do vídeo sob a perspectiva do ponto de vista do usuário. As estimativas tentam aproximar o resultado obtido por meio de fórmulas matemáticas em relação a uma avaliação subjetiva realizada com usuários.

As métricas objetivas comparam o vídeo original com o vídeo transmitido e recebido na rede, avaliando e verificando as diferenças entre ambos os vídeos. As principais métricas objetivas relacionadas com o QoE são: PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), SSIM (*Structural Similarity Index*) e VQM (*Video Quality Metric*) (SONG & TJONDRONEGORO, 2014).

O PSNR realiza uma análise quadro-a-quadro do vídeo recebido pelo usuário com o vídeo original enviado, sendo calculado em dB (decibel) e obtido por meio do quadro original e o quadro recebido. O PSNR é associado ao MOS (*Mean Opinion Score*), apresentada na Equação (1), no qual é a definição do PSNR entre o componente de luminância Y da imagem fonte  $s$  e da imagem de destino  $d$ , conforme KLAUE (2003).



$$PSNR(n)dB = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{peak}}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \cdot ||Ys(i,j) - Yd(i,j)||^2}} \right) \quad (1)$$

Onde,  $V_{peak} = 2^k - 1$ , sendo k representando o número de bits por pixel (componente de luminância).

Onde cada quadro tem  $M \times N$  pixels; as funções  $Ys(i,j)$  e  $Yd(i,j)$  correspondem às posições (linha –  $i$ , coluna –  $j$ ) dos pixels dos quadros originais e dos quadros recebidos respectivamente. O PSNR é a taxa logarítmica entre o ruído ambiente (MSE) e o valor do sinal da luminosidade máxima (grau de luminosidade/escurecimento) e é calculado da seguinte maneira (Vide Equação (3)).

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} \cdot ||Ys(i,j) - Yd(i,j)||^2 \quad (2)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{255}{MSE} \right) \quad (3)$$

A Tabela 2 apresenta a classificação do vídeo de acordo com a faixa de valores obtida pela correlação da métrica PSNR com a MOS.

Tabela 2 - Qualidade de Acordo com o PSNR

PSNR (Decibéis)	Qualidade
> 37	Excelente
31 – 37	Bom
25 – 31	Regular
20 – 25	Ruim
< 20	Péssimo

A métrica SSIM realiza a avaliação quadro a quadro, considerando três características do vídeo: a cor, a luminosidade e a estrutura. O resultado do SSIM varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo o valor resultante for de 1, maior será a qualidade do vídeo e quanto mais próximo for de 0, pior será a qualidade.

A métrica VQM considera um conjunto de modelos computacionais para avaliar o vídeo por intermédio dos seguintes parâmetros: distorção de cores, distorção de pixels, ruído.

Os resultados do VQM variam entre os valores de 0 a 5, onde 0 é o melhor valor possível para um vídeo (CHHAGAN et. al., 2013) (KADAM & WAGH, 2013) (ENGELKE & ZEPERNICK, 2007).

## 2.6 Modelos de Bateria

O crescente avanço em tecnologia móvel tem facilitado e intensificado o acesso a informação. Nas últimas décadas, o número médio de dispositivos móveis tem aumentado significativamente devido, principalmente, à proliferação no acesso à tecnologia sem fio Cisco (2017).

As diversas aplicações nesses dispositivos móveis implicam no aumento do consumo de energia. Tais dispositivos são alimentados por algum tipo de bateria recarregável. A capacidade de uma bateria é finita, limitando o tempo operacional destes dispositivos. Sendo que, a utilização destes dispositivos está condicionada ao tempo de vida das baterias que os alimentam.

O tempo de vida é o intervalo de tempo que a bateria, durante o processo de descarga, demora para atingir um determinado nível de capacidade de carga ou *cutoff*. O *cutoff* é o tempo que a bateria leva para atingir a quantidade mínima de energia necessária para manter o dispositivo operacional, ou seja, ao alcançar este nível as reações eletroquímicas, responsáveis pelo fornecimento de energia, cessam e conseqüentemente a bateria deixa de fornecer energia ao sistema, sendo considerada descarregada (RAKHMATOV E VRUDHULA, 2001).

Desta forma, tem-se a necessidade de realizar estudos relacionados à vida útil das baterias, investigando métodos eficazes para a predição dos seus tempos de vida e, por conseguinte, o comportamento dinâmico do sistema como um todo.

Segundo Jorgerden e Haverkort (2009), as taxas de descarga são não-lineares no tempo e dependem da capacidade residual da bateria e do efeito da taxa de capacidade. O efeito da taxa de descarga é caracterizado pela menor quantidade de carga que a bateria pode fornecer quando a corrente de descarga é aumentada. Principalmente quando uma corrente de descarga alta é aplicada na bateria, impossibilitando a reorganização dos elétrons no eletrólito, assim a capacidade efetiva torna-se mais baixa (KIM & QIAO, 2011). Assim, a vida útil de uma bateria e sua capacidade de entrega dependem principalmente do perfil atual de descarga.

Entende-se por perfil de descarga o conjunto de operações que um certo dispositivo pode realizar em um determinado intervalo de tempo. ou seja, para diferentes perfis de descarga têm-se diferentes tempos de vida, assim, a capacidade efetiva da bateria não é a mesma para diferentes perfis de descarga. Por exemplo, um dispositivo móvel poderá receber

e transmitir informações, sendo que na situação de recebimento tem-se uma taxa de consumo diferente da taxa de transmissão.

Outro ponto importante sobre o comportamento das baterias está no efeito de recuperação. Pois durante períodos de descarga reduzida de energia ou de períodos ociosos (tempo de relaxamento), a bateria poderá recuperar parcialmente a capacidade “perdida” durante os períodos de alta corrente de descarga (MA & YANG, 2011). A Figura 2, representa o efeito de recuperação da bateria.

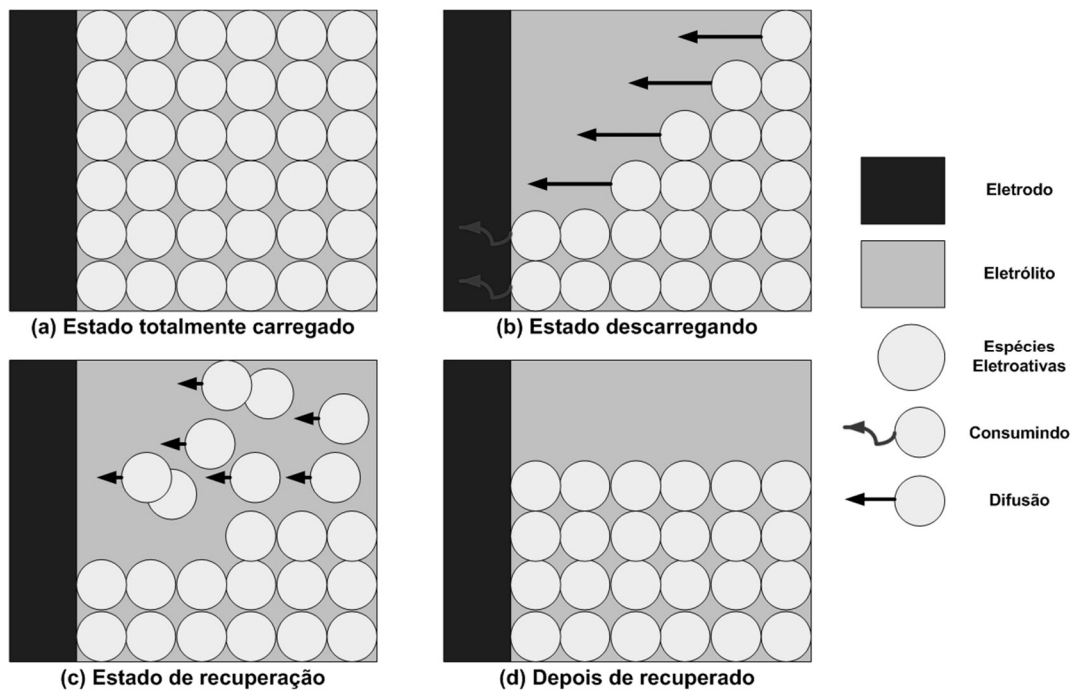


Figura 2 - Ilustração sobre o feito de recuperação na bateria (MA & YANG, 2011)

Ressalta-se nesse contexto, a importância de um modelo matemático que descreva de forma confiável o comportamento dos efeitos não lineares de descarga de uma bateria. Além de prever principalmente o tempo de vida da mesma. Desse modo, diferentes modelos matemáticos foram desenvolvidos com esta finalidade. Estes modelos podem ser divididos em categorias, de acordo com as características abordadas, como: os modelos eletroquímicos; os modelos elétricos; os modelos estocásticos; e os modelos analíticos.

### 2.6.1 Modelo Eletroquímico

Os modelos eletroquímicos baseiam-se nos processos químicos que ocorrem no interior da bateria. Esta classe de modelos de bateria considera diretamente processos eletroquímicos, processos termodinâmicos e a construção física, ao modelar a descarga da bateria.

Por exemplo, proposta de Fuller (1994) descreve um modelo baseado em um conjunto de equações diferenciais para uma bateria específica. O modelo possui um grande número de parâmetros, incluindo geometrias de eletrodos, concentração do eletrólito, coeficientes de difusão, coeficientes de transferência, constantes de velocidade de reação, e entre outros parâmetros. Onde diferentes técnicas numéricas são utilizadas para resolver as equações para prever a capacidade da bateria sob diferentes condições de carga.

Os modelos eletroquímicos são capazes de oferecer suporte quanto aos efeitos de descarga com perfis de cargas variáveis, efeitos de taxa de capacidade de carga, efeitos térmicos e efeitos de recuperação. A necessidade da descrição, detalhada das características da bateria, torna-os mais preciso do que os modelos a serem descritos nessa tese. Porém, o elevado nível de precisão torna os modelos eletroquímicos ao mesmo tempo complexos, de difícil implementação e intensivos computacionalmente (LI & EVANS, 2000).

### 2.6.2 Modelo de Circuito Elétrico

Descrevem a bateria na forma de circuito utilizando a combinação de componentes elétricos tais como, fontes, resistores, capacitores e indutores. Esses modelos são compostos basicamente: de um capacitor, para representar a capacidade da bateria; uma taxa de descarga normalizadora, que determina a perda de capacidade em elevadas correntes de descargas; um circuito para o consumo (descarga) da capacidade da bateria; e um resistor representando a resistência da bateria.

Os modelos elétricos são modelos de carga variável capazes de modelar a taxa de capacidade e os efeitos térmicos. Por exemplo, os modelos elétricos baseados na categoria *Runtime* utilizam uma rede de circuito para prever o tempo de vida com resposta para descargas contínuas. Porém, embora os modelos elétricos ofereçam suporte a perfis de descarga variável, segundo Chen e Mora (2006), no caso do modelo *Runtime*, o mesmo não simula com precisão o tempo de vida com resposta para descargas variáveis. Segundo Lahiri et al (2002), os modelos elétricos não oferecem suporte quanto aos efeitos de recuperação da bateria.

### 2.6.3 Modelo Estocástico

No modelo estocástico, a descarga da bateria, o efeito de recuperação e taxa de capacidade são descritos de forma estocástica, geralmente baseados em cadeias Markovianas. A representação da capacidade da bateria é por meio de unidades finitas de cargas (PANIGRAHI & CHIASSERINI, 2001).

As unidades de carga da bateria são monitoradas conforme o processo estocástico evolui ao longo do tempo, ou seja, as unidades podem ser acrescentadas ou eliminadas em função da taxa média de corrente de descarga e indicado em uma tabela ou gráfico. Se a taxa média da corrente de descarga for baixa, então o modelo adiciona unidades de carga para a bateria (efeito de recuperação), levando em consideração uma função de densidade probabilística de forma exponencial decrescente que, por sua vez, considera o estado da carga e coeficientes referentes ao tipo de bateria modelada (LAHIRI, 2002).

Chiasserini e Rao (1999) desenvolveram uma modelagem estocástica para baterias de íon lítio. O modelo consistiu em descrever o comportamento da bateria no tempo discreto, por meio de uma cadeia de Markov com  $N+1$  estados numerados de 0 a  $N$ . A bateria é considerada descarregada quando a difusão chega a zero, ou quando um número máximo  $T$  de unidades de carga for consumido. O número  $T$  de unidades de carga representa a capacidade nominal da bateria.

Chiasserini e Rao (2001) estenderam a proposta anterior, onde foram desenvolvidos suporte o efeito da taxa de capacidade e o efeito de recuperação. O efeito de recuperação foi representado por uma função exponencial decrescente em relação ao estado da bateria. Desse modo, o coeficiente de decaimento exponencial pode oferecer diferentes valores em função da capacidade de descarga.

O modelo estocástico apresenta suporte para efeitos de taxa de capacidade e recuperação. No entanto, não apresenta suporte para cargas variáveis (ZHANG et al, 2018). Além disso, seus requisitos de computação são modestos, porém inferiores ao modelo analítico, embora permitindo que o modelo estocástico seja empregado em simulações em nível de sistema (LAHIRI, 2002).

### 2.6.4 Modelo Analítico

Os modelos analíticos são constituídos por um pequeno conjunto de equações que modelam as principais características de uma bateria. Os modelos analíticos descrevem descargas de correntes contínuas e/ou variáveis, no domínio do tempo. Principalmente os

efeitos não lineares tais como, o efeito da taxa de capacidade e o efeito de recuperação. Os modelos analíticos são considerados computacionalmente eficientes e flexíveis, podendo ser facilmente estendidos para diferentes tipos de baterias (JONGERDEN & HAVERKORT, 2008). De forma geral, existem dois modelos de representação de consumo de bateria/energia: o modelo linear e modelo não linear.

#### 2.6.4.1 Modelo Linear

O modelo linear é a forma mais simples e mais amplamente utilizada pelos trabalhos relacionados a esta temática, mas que não considera os efeitos e as flutuações de energia, gerando assim uma estimativa linear puramente especulativa (é utilizado pela maioria dos simuladores de rede, como o Network Simulator (NS-2), e pela maioria dos trabalhos publicados nos últimos anos) (CHEGETANAI; O'REILLY, 2015; KUMAR et. al., 2012). A equação (4) demonstra o modelo linear.

$$(4) \quad C = C' - I \cdot td$$

C = Capacidade de bateria remanescente  
 C' = Capacidade no início da operação  
 I = Constante de descarga de corrente elétrica  
 td = Duração do tempo de operação

Através desta equação, a capacidade remanescente da bateria será calculada sempre que a taxa de descarga for alterada.

No entanto, este modelo de bateria pode levar a interpretações errôneas na análise dos protocolos, uma vez que um cálculo incorreto pode conduzir a uma falsa estimativa do consumo de energia por influenciar diretamente no tempo de vida da (KUMAR et. al., 2012).

#### 2.6.4.2 Modelo Não Linear

O modelo não linear (modelo realístico) é menos utilizado do que o modelo linear. No entanto, leva em consideração os efeitos realísticos da bateria, com as taxas de flutuação, relaxamento e os efeitos de descarga que ocorrem em diferentes tipos de bateria de lítio e que são encontrados na maioria dos equipamentos elétricos e eletrônicos atuais.

Em um modelo de bateria não linear (modelo de bateria realístico), são consideradas as diferentes oscilações que uma bateria (tipo – alcalina, lítio, etc.) pode possuir, com as

oscilações de taxa de capacidade, taxa de descarga, taxa de relaxamento e outros fatores que variam de acordo com o tipo de bateria.

O modelo não linear denominado Lei de Peukert consegue capturar a relação funcional entre a taxa de descarga e a vida útil da bateria. A equação do tempo de vida  $L$  é definida pela corrente de carga ( $I$ ), seguido dos parâmetros estimados e empíricos  $a$  e  $b$  que representam a capacidade da bateria e o coeficiente de Peukert. Em situação quanto ao suporte de descarga variável, as correntes de descarga variáveis são aproximadas por pulsos e a variável  $I$  é substituída na equação pela média ponderada desses pulsos. Então obtendo a equação abaixo (Equação 5):

$$(5) \quad L = \frac{a}{I^b}$$

Os resultados obtidos pela Lei de Peukert para predição do tempo de vida em descargas constantes são satisfatórios. A proposta de Zhang (2018) que também foi um melhoramento no modelo de Peukert, oferece suporte para a bateria de lítio e inclusão do efeito de temperatura. No qual, apresentou elevada acurácia na predição do tempo de vida. No entanto, a proposta ainda não leva em consideração o suporte quanto cargas variáveis.

O modelo Rakhmatov-Vrudhula (2001) utiliza equações matemáticas para suporte a carga de bateria constante e variável para calcular a vida útil de uma bateria de íons de lítio. O modelo baseia-se em simplificações de fenômenos complexos considerando as reações eletroquímicas na superfície do eletrodo, e a difusão dos íons no eletrólito.

Para a estimativa da duração da bateria, o Modelo RV (Rakhmatov-Vrudhula) consiste de um sistema de EDPs (Equações Diferenciais Parciais) que possui dois parâmetros empíricos,  $\alpha$  e  $\beta$ . O parâmetro  $\alpha$  representa a capacidade da bateria, e o  $\beta$  descreve o comportamento não linear da bateria durante os períodos de carga e descarga. Como esses parâmetros necessitam ser estimados, uma técnica de estimação de parâmetros é dada em Rakhmatov e Vrudhula (2001).

No modelo RV, dentre suas diversas características, destaca-se a capacidade de capturar o efeito da taxa de capacidade e o efeito de recuperação (SILVA, 2014). Esse modelo é considerado flexíveis e podem ser facilmente configurados para baterias específicas. Eles são computacionalmente eficientes, exigindo avaliação de expressões analíticas simples (LAHIRI, 2002). Na Tabela 3 consta uma avaliação comparativa dos modelos de bateria quanto os principais requisitos para o contexto de redes em redes heterogêneas.

Tabela 3 - Comparação dos modelos para o contexto de redes heterogêneas

<b>Requisitos</b>	<b>Eletroquímico</b>  (Fuller & Doyle, 1994)	<b>Circuito Elétrico</b>  (Chen & Mora, 2006)	<b>Estocástico</b>  (Chiasserini & Rao, 2001)	<b>Analítico</b>  (Zhang, 2018)	<b>Analítico</b>  (Rakhmatov & Vrudhula, 2001)
<b>Taxa de Capacidade</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Efeito de Recuperação</b>	Sim	Não	Sim	Não	Sim
<b>Descarga Constante</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Descarga Variável</b>	Sim	Sim	Não	Não	Sim
<b>Pós</b>	# Maior acurácia quanto a predição do tempo de vida da bateria.	# Oferecem suporte para efeitos térmicos.	# Pode ser implementado em simulações em nível de sistemas	# Suporte ao efeito de temperatura  # Suporte para baterias de lítio	# Flexibilidade para diferentes tipos de baterias  # Pode ser implementado em simulações  # Simples implementação  # Reduzida atividade computacional
<b>Contras</b>	# Implementação com elevada complexidade.  # Intensiva atividade computacional.	# Não produz elevada acurácia em cargas variáveis.	# Intensiva atividade computacional modesta comparado ao modelo analítico de Rakhmatov-Vrudhula	# Não oferece desempenho satisfatório quando submetido em cargas variáveis	# nível de acurácia inferior ao modelo eletroquímico

Neste sentido, a proposta deste trabalho de tese adota o modelo não linear, implementando o modelo de bateria proposto por Rakhmatov e Vrudhula (2001). Com base na relação entre as abordagens descritas na tabela comparativa, o Rakhmatov-Vrudhula



ofereceu melhor suporte para o comportamento heterogêneo das redes sem fio, principalmente quanto consumo variável de carga de energia. Além da flexibilidade quanto implementação de diferentes tipos de baterias devido facilidade de implementação. Outra importante vantagem da escolha deste modelo, foi a implementação por simulação, pois apresenta reduzida atividade computacional com relação ao modelo estocástico. A descrição da equação deste modelo para a implementação em simulação, será apresentada na seção 4.4 deste trabalho de tese.

## 2.7 Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy (Nebulosa) é a lógica que suporta os modos de raciocínio aproximados, ao invés de exatos. Por essas características, ela é comumente empregada em modelagens matemáticas que apresentam entradas imprecisas ou subjetivas. Por outro lado, a Lógica Fuzzy reflete a maneira como as pessoas pensam, tentando modelar o seu senso de palavras, tomada de decisão ou mesmo o senso comum.

A saída gerada por uma modelagem Fuzzy pode ser ajustada por meio da manipulação de três componentes em sua implementação: conjuntos, regras e sistema.

### 2.7.1 Conjunto Fuzzy

O conceito de Conjunto Fuzzy foi introduzido em 1965, na comunidade científica, por Zadeh (1965). Ao contrário da Lógica convencional, a Lógica Fuzzy utiliza o conceito de que tudo (como por exemplo: peso, altura, temperatura e velocidade) possui graus de pertinências. Com isso, a Lógica Fuzzy tenta modelar o senso comum do ser humano. Considerando, como exemplo, a temperatura de um forno de cozinha, onde a temperatura de 179°C poderá pertencer tanto ao conjunto das temperaturas quentes (mesmo superiores a 180°C) quanto, embora em menor grau, ao conjunto das temperaturas frias.

O conjunto Fuzzy é utilizado para classificar a pertinência de um elemento (entrada) a um dado conjunto. Isto é, cada elemento apresenta um grau de pertinência referente a um conjunto, associando um valor da função de pertinência  $\mu(x)$  a uma preposição  $x$ . Através do grau de pertinência de cada valor é possível verificar o quanto cada elemento pertence ao conjunto. Dessa forma:

$$A = \{(x, \mu(x)), x \in X\}$$

Sendo:

- $x$  : elemento (valor de entrada)
- $\mu(x)$  : função de pertinência
- $X$  : domínio

A função de pertinência demonstra o grau de pertinência, podendo assumir qualquer valor dentro do intervalo  $[0, 1]$ . A referida função pode possuir diferentes representações com a finalidade de melhorar o desempenho da saída gerada pela modelagem. Tais representações podem ser, principalmente, no formato gaussiana, triangular ou trapezoidal, conforme a Figura 3.

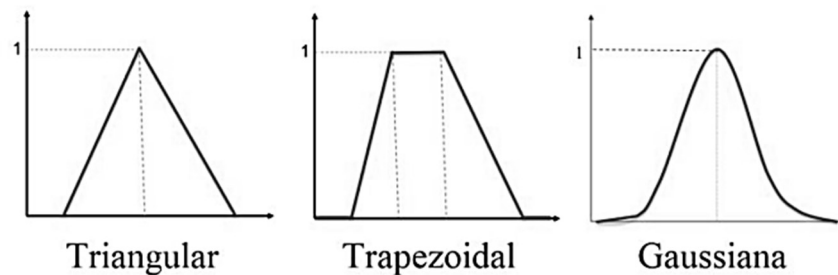


Figura 3 - Tipos de Representações de Funções de Pertinência

No conjunto Fuzzy, utilizam-se elementos qualitativos denominados variáveis linguísticas com a finalidade de assumir valores dentro dos conjuntos Fuzzy. Por exemplo, ao invés de valores quantitativos, uma variável linguística pode assumir valores como “alto”, “baixo”, “médio” e etc. A principal funcionalidade dessa variável é a de fornecer uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995).

Também se empregam os conectivos lógicos “NÃO”, “E” e “OU” sobre as variáveis linguísticas, conforme a expressão abaixo:

- NÃO:  $NOT A = \neg A = \{(x, 1 - \mu_A(x)), x \in X\}$
- E:  $A \wedge B = A \cap B = \{(x, \min(\mu_A(x), \mu_B(x))), x \in X\}$
- OU:  $A \vee B = A \cup B = \{(x, \max(\mu_A(x), \mu_B(x))), x \in X\}$

### 2.7.2 Regras Fuzzy

A lógica Fuzzy possui um conjunto de regras composta basicamente por sentenças condicionais do tipo “SE” e “ENTÃO”, cujo formato definido como:

$$SE (x \text{ é } A) \text{ ENTÃO } (y \text{ é } B)$$

Nesse contexto, “A” é uma variável linguística definida como variável de entrada, por fazer parte da operação “SE”, ao passo que a variável linguística “B” é classificada como variável de saída, pois pertence ao “ENTÃO”. Já “x” e “y” são os elementos ou valores de entrada e saída respectivamente.

Dependendo do controle a ser feito, as regras podem associar uma ou mais variáveis de entrada a uma saída dos conjuntos Fuzzy, podendo fazer o uso de conectivos lógicos na composição de uma regra, conforme o exemplo abaixo:

$$SE (x \text{ é } A) \text{ E } SE (y \text{ é } B) \text{ ENTÃO } (y \text{ NÃO é } B)$$

### 2.7.3 Sistema Fuzzy

O sistema Fuzzy é um modelo geral que permite a identificação dos módulos que compõem o sistema, de modo a fornecer a idéia do fluxo de informações dentro do mesmo. Um sistema Fuzzy é formado por quatro blocos: o fuzzificador; a base de regras; a máquina de inferência; e o defuzzificador.

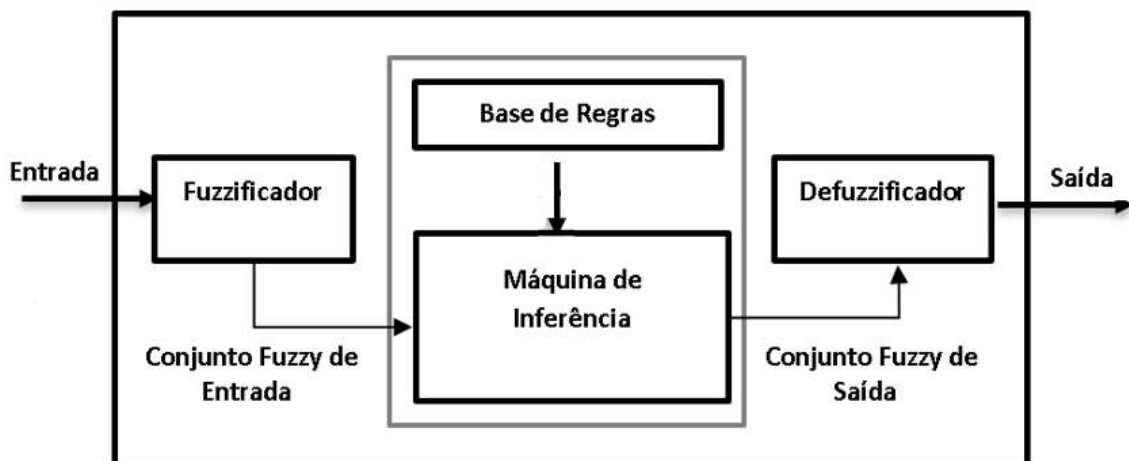


Figura 4 - Sistema Fuzzy

O fuzzificador, que tem a função de mapear os dados precisos dos conjuntos de entrada Fuzzy. A base de regras, fornecidas por especialistas ou pela extração de dados

numéricos no formato de sentenças linguísticas do tipo “*se... então*”. A máquina de inferência, onde são aplicadas as regras para a tomada de decisão, dependendo da situação; por fim, o defuzzificador, onde a partir da variável linguística de saída obtida, um valor numérico é adquirido. (EBERHART; YUHUI, 2007). A Figura 4 esquematiza o sistema.

## **2.8 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou sobre os principais conceitos de redes de quarta geração, bem como a tecnologias de acesso IEEE 802.11n. Ambas tecnologias foram utilizadas para permitir o *handover* vertical para avaliação de desempenho da proposta em relação aos trabalhos relacionados. Também foi apresentado os principais modelos de bateria, onde o modelo não-linear foi utilizado pela proposta.

Por fim, descrito sobre o conceito da lógica Fuzzy, contemplando fundamentos de conjuntos Fuzzy, variáveis linguísticas, regras e sistema Fuzzy. Dessa forma, essa fundamentação é importante para compreensão da arquitetura proposta neste trabalho de tese. No próximo capítulo serão abordados sobre os trabalhos relacionados implementados para redes sem fio heterogêneas.

### 3. TRABALHOS CORRELATOS

#### 3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve sobre os trabalhos relacionados que oferecem suporte no processo de decisão de *handover* vertical em redes heterogêneas. O estudo foi baseado quanto ao apoio à mobilidade e balanceamento entre QoE e eficiência energética.

Para avaliar e identificar sobre os mecanismos pesquisados, os trabalhos foram classificados quanto ao tipo de estratégia de decisão de *handover*. Além disso, avaliações comparativas, entre os trabalhos da literatura, foram tratadas neste trabalho de tese. Principalmente com relação ao suporte à mobilidade, energia e QoE.

#### 3.2 Estratégias de Decisão - Métricas Simples

##### 3.2.1 Baseadas no RSSI

Os mecanismos baseados no RSSI (*Received Signal Strength Indication*) consideram a potência do sinal recebido, como uma métrica de avaliação para a decisão do *handover*. De forma geral, este tipo de abordagem compara o valor do RSSI da rede atual com a rede alvo. Isto é, o processo de *handover* é iniciado quando o valor limite do RSSI do dispositivo móvel diminui, quando conectado com a estação base.

A proposta de Ali e Saquib (2013) considera a média das amostragens do RSSI, permitindo o processo de *handover* vertical entre redes WLAN e de telefonia celular. No entanto, o esquema de decisão não considera as condições da rede alvo.

Além disso, a estratégia baseada no RSSI, como avaliação única de escolha da melhor rede, apresenta ser insuficiente no suporte ao efeito *ping-pong*, devido situações de mobilidade, quando o dispositivo móvel se afasta do limite da rede, provocando *handovers* desnecessários e aumento no atraso. Dessa forma, a métrica como estratégia simples de decisão é considerada ineficiente no processo de *handover* vertical (YAN ET AL., 2010).

##### 3.2.2 Baseadas na Largura de Banda

A avaliação da largura de banda é considerada o principal critério para o processo do *handover*. Principalmente na escolha da rede com maior capacidade de transmissão dos dados.

A proposta de Ma (2012) apresenta um esquema proativo para redes WLAN e WiMAX no qual utiliza a métrica da largura de banda na decisão de *handover*. Como

resultados obtidos, a proposta obteve ganhos elevados quanto a taxa de transmissão (vazão). Porém, obteve elevados níveis de atrasos, principalmente em situações quando a rede a ser escolhida apresenta alta quantidade de dispositivos móveis. Pois o atraso é ocasionado pelas probabilidades de bloqueio.

A proposta de Becvar e Mach (2016) consideram o parâmetro da taxa de transmissão como principal parâmetro para a decisão do *handover*. Os valores da vazão são calculados através da predição dos níveis de sinal das células envolvidas e tempo gasto pelos dispositivos móveis nas *femtocells*. Ou seja, quando o ganho estimado da vazão de um dispositivo móvel exceder um valor limite, então o processo de *handover* será iniciado. Porém a proposta apresenta limitações quanto ao raio de cobertura, isto é, a predição da vazão é precisa quando o raio de cobertura de uma célula for pequeno, mas a precisão não pode ser garantida em *small cell* de tamanho elevado.

### 3.2.3 Baseadas na Função de Custo

Este tipo de algoritmo de decisão utiliza uma função de custo para determinar a melhor rede candidata. Essa função é produzida através da combinação de múltiplos parâmetros, como por exemplo, a largura de banda, o custo monetário da rede, o nível de consumo de energia.

Dessa forma, a função custo de uma rede é computada através da soma dos pesos de todos os parâmetros utilizados para a avaliação. Nesse sentido, dependendo das condições da rede ou das preferências do usuário, diferentes pesos são atribuídos para diferentes métricas/parâmetros de entrada.

O trabalho de Zhang et al. (2018) propõem um algoritmo que utiliza os parâmetros *Time-to-Trigger* (TTT) e *Hysteresis Margin* para composição da função de custo. Destaca-se que tais parâmetros ofereceram melhorias na eficiência energética e na redução do efeito “*ping-pong*” no processo de *handover*. Todavia, a proposta em si não leva em consideração a qualidade da experiência do usuário em seu mecanismo.

## 3.3 Estratégias de Decisão – Múltiplos Atributos

Como o ambiente heterogêneo possui diferentes tecnologias de acesso por rádio, então houve a necessidade da utilização de mecanismos para tomada de decisão com suporte à múltiplos critérios.

A estratégia de decisão MADM (*Multiple Attributes Decision Making*) objetiva selecionar a rede mais satisfatória, sobre um conjunto de redes alternativas, por meio de

múltiplos atributos que representam a descrição dos critérios de avaliação. Os critérios envolvem tanto aspectos positivos (metas) quanto negativos (restrições), que necessitam ser de tal maneira descritos para representar a qualidade das alternativas.

Em outras palavras, o método MADM classifica as redes disponíveis, através de critérios previamente definidos, no qual permite pontuar as redes. Com a finalidade de gerar uma lista ordenada e crescente das melhores redes disponíveis para o dispositivo móvel.

Nessa direção, existem diferentes modelos multicritérios e fundamentais como o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), SAW (*Simple Additive Weighting*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), entre outras abordagens.

Quantos aos trabalhos correlatos, as propostas de Rani et al. (2017) e de Mansouri e Cherkaoui (2017) utilizam estratégias de decisão de handover baseadas na tomada de decisão de múltiplos atributos (MADM). Ou seja, Rani et al. (2017) desenvolveu um algoritmo de decisão de handover com suporte de eficiência energética baseado no TOPSIS, que tem a função de oferecer um *rank* de alternativas sobre as melhores redes para a seleção. Este algoritmo utiliza como parâmetros, o consumo de energia, classe de tráfego, e o nível de bateria de cada interface de rede do dispositivo móvel.

Por outro lado, o trabalho de Mansouri e Cherkaoui (2017) apresentou uma comparação de diferentes métodos MADM, considerando o padrão de nível de bateria. Os principais métodos avaliados foram baseados: no AHP, ANP (*Analytical Network Process*), Fuzzy AHP e Fuzzy ANP, onde tais métodos foram combinados em 120 combinações para avaliação. Sendo assim, os resultados da pesquisa concluem que os melhores métodos de combinação foram a normalização euclidiana - TOPSIS-FANP e normalização de soma- GRA-FANP. Contudo, as propostas Rani et al. (2017) e de Mansouri e Cherkaoui (2017), mesmo considerando o consumo de energia, não permitiram uma relação com o QoE.

Os respectivos esquemas, também não consideram informações sobre a mobilidade dos dispositivos móveis. Tendo a possibilidade de ocorrer frequentes *handovers* desnecessários como consequência. Pois a mobilidade poderá permitir frequentes atribuições incorretas nos pesos, ocasionando a perda de desempenho quanto a eficiência do *handover* MALATHY (2018).

### **3.4 Estratégias de Decisão – MIH**

O MIH (*Media Independent Handover*) ou IEEE 802.21 é um protocolo de *handover* independente do meio, que tem a finalidade de permitir a interconectividade entre as redes heterogêneas (IEEE 802.21, 2008).

O padrão 802.21 oferece um *framework* com diferentes funções, sinalizações e gatilhos. Principalmente para o acesso as informações das camadas inferiores (MAC e PHY) para as camadas superiores (camadas de redes à aplicação). Isto é, o MIH descobre e adquire as informações de redes necessárias para a seleção da melhor rede.

Nesse sentido, Ait Mansour et al. (2018) propõe um mecanismo de handover baseado na coordenação entre MIH (*Media-Independent Handover*) e PMIPv6 (*Proxy Mobile IPV6*) para apoiar a mobilidade do usuário. Essa pesquisa teve como foco principal, a redução de falhas de handover, perda de pacotes. No entanto, a proposta não considera o suporte à economia de energia e QoE. Segundo Malathy (2018), a eficiência dessa estratégia depende da precisão das informações quanto ao estado da rede coletada.

### 3.5 Estratégias de Decisão - Inteligência Computacional

As estratégias, baseadas na lógica Fuzzy e redes neurais, podem utilizar vários atributos e critérios para o suporte a decisão de handover vertical. Tanto para aplicações de tempo real como para aplicações sensíveis a perda. Desse modo, serão apresentados os trabalhos relacionados de ambas estratégias.

#### 3.5.1 Baseada em Redes Neurais

Em Zineb et al. (2017) foi proposto um algoritmo de decisão de transferência vertical, Redes Neurais Artificiais (ANN - *Artificial Neural Networks*), que utiliza um método de aprendizagem baseado em redes neurais. O algoritmo considera os parâmetros de QoE e QoS em seu mecanismo de decisão, mas não possui suporte em relação à eficiência energética. Apesar dos resultados coletados, a RNA obteve um número reduzido de *handoffs* realizados, bem como a redução dos atrasos.

Além disso, a proposta de Piamrat et al. (2011) utilizou o QoE para selecionar a melhor conexão. A QoE foi avaliada através do *Mean Opinion Score* (MOS) em tempo real, através da técnica PSQA (*Pseudo-Subjective Quality Assessment*) baseada em aprendizado estatístico através da RNN (*Random Neural Network*). Porém não apresentou suporte quanto a eficiência energética.

A proposta de Chen et al. (2018) utiliza um mecanismo de avaliação de QoE baseado no RNN para buscar a relação de mapeamento entre valores de QoS e valores de MOS (*Mean Opinion Score*). Além disso, um QoE-Q foi proposto como um algoritmo de handover vertical, considerando a teoria de *Q-learning* para maximizar a qualidade da experiência do usuário. Neste sentido, os resultados da simulação apontam para um aumento no desempenho



da QoE, bem como de melhorias no consumo de energia do dispositivo móvel.

No entanto, a proposta tem como foco principal um mecanismo de handover vertical baseado na correlação entre QoE e QoS em redes heterogêneas. Portanto, nenhum deles fornece uma abordagem conjunta que envolva uma solução para economia de energia e handover vertical com suporte à QoE.

### 3.5.2 Baseadas na Lógica Fuzzy

Zineb et al. (2016) propuseram o uso do sistema Fuzzy para a decisão de handover, a estratégia foi a combinação de parâmetros de QoS e indicadores de QoE (*Mean Opinion Score*). Já Aldhaibani et al. (2018) apoiaram uma arquitetura SDN (*Software-Defined Networking*), onde implementaram uma estratégia de decisão de handover baseada no sistema Fuzzy. No qual, considera os requisitos de QoS e QoE, aonde o sistema Fuzzy foi capaz de monitorar um conjunto de APs (*Access Point*) para a seleção de o melhor AP para o usuário.

A proposta de Silva et al. (2018) estabeleceu um mecanismo para redução de *handovers* redundantes através da lógica Fuzzy para tecnologia 4G. O sistema Fuzzy permite a realização do processo de decisão de *handover* em função do valor da margem de histerese dinâmica. Em termos de funcionamento, a proposta compara a potência do sinal recebido da rede atual com a rede vizinha, como gatilho para iniciar a decisão do *handover*. Caso o valor da rede alvo for superior, então o sistema determina a margem de histerese dinâmica, através dos parâmetros de entrada da velocidade, potência e qualidade de sinal. Com base da nova margem calculada, a métrica será utilizada como indicador na possibilidade de um dispositivo móvel aceitar ou não a nova rede.

Em Kammoun e Tabbane (2016), a proposta foi um algoritmo multicritério que combina o sistema Fuzzy e a função custo como estratégia de decisão. Tal proposta usa o sistema Fuzzy para suportar as informações de imprecisão de entrada, enquanto a função de custo foi responsável por reduzir o número de *handovers*.

Os trabalhos de Zineb et al. (2016) e Aldhaibani et al. (2018) embora proponham melhorias na QoE. não fornecem suporte para o consumo de energia. A proposta de Kammoun e Tabbane (2016), embora considere vários critérios, como atraso, largura de banda disponível, intensidade do sinal recebido, no entanto, a QoE e o consumo de energia não foram considerados. Ao passo que a proposta de Silva et al. (2018) apesar de oferecer suporte quanto a mobilidade para a redução de *handovers* redundantes. No entanto, não apresenta como foco de sua proposta, métricas ou parâmetros para melhorias no balanceamento entre QoE e eficiência energética.

### 3.6 Considerações Finais

A proposta deste trabalho foi propor um mecanismo de decisão de handover, que proporcione a escolha da rede levando em consideração o *trade-off* entre consumo de energia e QoE. A tabela a seguir compara os trabalhos relacionados em relação à proposta desta tese.

As Tabelas 4 e 5 comparam os trabalhos relacionados em relação à proposta atual. Na avaliação comparativa da Tabela 4 e 5, nenhum dos trabalhos relacionados direcionaram suas pesquisas quanto ao equilíbrio entre QoE e eficiência energética.

Tabela 4 - Síntese dos Principais Trabalhos Relacionados – Parte A

Referências	Estratégia de Decisão	Suporte à QoE	Suporte à Eficiência Energética
Ait Mansour et al (2018)	MIH	Não	Não
Zhang et al. (2018)	Função de Custo	Não	Sim
Rani et al (2017)	MADM	Não	Sim
Mansouri e Cherkaoui (2017)	MADM	Não	Sim
Zineb et al. (2016)	Inteligência Computacional - Fuzzy	Sim	Não
Piamrat et al. (2011)	Inteligência Computacional – Rede Neural	Sim	Não
Aldhaibani et al. (2018)	Inteligência Computacional - Fuzzy	Sim	Não
Kammoun e Tabbane (2016)	Inteligência Computacional - Fuzzy	Não	Não
Zineb et al. (2017)	Inteligência Computacional – Rede Neural	Sim	Não
Chen et al. (2018)	Inteligência Computacional – Rede Neural	Sim	Sim
Ali & Saquib (2013)	Simplex – RSSI	Não	Não
Ma (2012)	Simplex – Largura de Banda	Não	Não
Becvar & Mach (2013)	Simplex - Vazão	Não	Não
Silva (2018)	Inteligência Computacional - Fuzzy	Não	Não
Proposta da Tese	Inteligência Computacional - Fuzzy	Sim	Sim

Tabela 5 - Síntese dos Principais Trabalhos Relacionados – Parte B

Referência	Suporte à Mobilidade	Principais Parâmetros	Foco da Proposta
Ait Mansour et al (2018)	Sim	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PMIPv6</li> </ul>	Reduzir número de eventos ping pong no <i>handover</i>
Zhang et al. (2018)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Time-to-Trigger (TTT);</li> <li>• Hysteresis Margin</li> </ul>	Melhorar eficiência energética e reduzir eventos ping pong no <i>handover</i>
Rani et al (2017)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Múltiplos parâmetros de QoS</li> <li>• Custo monetário</li> <li>• Múltiplos parâmetros de tempo de vida</li> </ul>	Reduzir consumo de energia
Mansouri e Cherkaoui (2017)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazão</li> <li>• Atraso</li> <li>• Perda</li> <li>• Consumo de energia</li> <li>• Custo monetário</li> <li>• Jitter</li> <li>• Nível de Bateria</li> </ul>	Reduzir consumo de energia
Zineb et al. (2016)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parâmetros de QoS</li> <li>• MOS</li> </ul>	Seleção da melhor rede para melhoria do QoE
Piamrat et al. (2011)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MOS</li> <li>• PSQA</li> </ul>	Seleção da melhor rede para melhoria do QoE
Aldhaibani et al. (2018)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parâmetros de QoS</li> <li>• MOS</li> </ul>	Seleção da melhor rede para suporte ao QoE e QoS
Kammoun e Tabbane (2016)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RSSI</li> <li>• Qualidade do Sinal</li> <li>• Carga da rede</li> <li>• Largura de Banda</li> </ul>	Reduzir o número de <i>handovers</i>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atraso</li> </ul>	
Zineb et al. (2017)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parâmetros de QoS</li> <li>• Parâmetros de QoE</li> </ul>	Reduzir o número de <i>handover</i> e atraso
Chen et al. (2018)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QoS</li> <li>• MOS</li> <li>• <i>Q-Learning</i></li> </ul>	Fazer a Correlação entre QoE e QoS para a melhoria da rede e qualidade de experiência do usuário
Ali & Saquib (2013)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RSSI</li> </ul>	Seleção da melhor rede com base na média de valores de RSSI
Becvar & Mach (2013)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazão</li> </ul>	Seleção da melhor rede com elevada vazão
Ma (2012)	Não	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largura de Banda</li> </ul>	Seleção da melhor rede com elevada vazão
Silva (2018)	Sim	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade</li> <li>• Potência do Sinal</li> <li>• Qualidade do Sinal</li> <li>• Histerese Dinâmica</li> </ul>	Reduzir <i>handovers</i> desnecessários e efeito ping pongo
Proposta da Tese	sim	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RSSI</li> <li>• Velocidade</li> <li>• Nível de Bateria</li> <li>• QoE</li> </ul>	Selecionar a melhor rede considerando o equilíbrio entre QoE e eficiência energética

A proposta de Chen et al. (2018), embora afirmar melhorias no QoE e consumo de energia, porém teve como objetivos obter desempenho entre QoE e QoS.

Com relação ao estudo das estratégias de decisão, abordagens com suporte a múltiplas métricas ou atributos demonstram melhor desempenho perante estratégias que apoiam a decisão de *handover* através de simples métrica. Dessa forma, abordagens baseadas em MADM, redes neurais e sistemas Fuzzy apresentaram maior tendência no volume de trabalhos pesquisados.

A MADM apresenta como vantagem a precisão quanto a seleção das melhores redes devido ao suporte aos múltiplos critérios ou atributos. As redes neurais por sua vez, apresenta como vantagem a precisão no processo de *handover* e reduzidos atrasos. Os sistemas Fuzzy

apresentam como vantagens principais os reduzidos atrasos e flexibilidade quanto as preferências do usuário.

Pelo fato de as redes heterogêneas terem como características um comportamento dinâmico em virtude das diferentes tecnologias disponíveis no processo de *handover*. A mobilidade é um fator que potencializa o dinamismo desse ambiente, logo há a necessidade que o *handover* tome decisões com reduzido atraso e menor intensidade computacional. Nesse contexto, tanto os modelos MADM quanto mecanismos baseados em redes neurais apresentaram como desafio o problema da adaptação dos pesos ao rápido comportamento da mobilidade. Visto que, caso os pesos desses mecanismos sejam atribuídos incorretamente com relação ao contexto da situação do ambiente de rede, então tais estratégias de decisão terão dificuldades no suporte aos efeitos *ping-pong* por exemplo, ou seja, reduzindo a eficiência nos critérios como na qualidade percebida do usuário quanto na qualidade de serviço da rede MALATHY (2018).

Já o Fuzzy, embora apresente a desvantagem de não oferecer suporte eficiente a múltiplos critérios, devido ao aumento da complexidade em sua implementação. O sistema por não depender de capacidade de aprendizagem ou ajuste dos pesos em função de um contexto de rede ou preferência do usuário, então o mesmo poderá apresentar maior flexibilidade sobre a influência de diferentes situações de mobilidade.

Assim, a proposta desta tese optou na utilização de uma inteligência computacional baseada na lógica Fuzzy justamente na preocupação quanto ao suporte a mobilidade. No sentido de manter o nível de acurácia na escolha da melhor rede. Além do mesmo apresentar menor complexidade de implementação quanto implementação dos atributos e base de regras, pois nesse trabalho de tese somente serão considerados os critérios da eficiência energética e QoE. Assim não comprometendo a intensidade computacional ou complexidade de implementação, visto que, segundo MALATHY (2018) a elevada quantidade de parâmetros tende ao Fuzzy sofrer com pesada carga de processamento e complexidade de implementação da base de regras.

No capítulo 5 foi feita uma avaliação de desempenho da proposta, comparando com os trabalhos relacionados de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016). Onde foram avaliados os resultados quanto ao consumo de energia, QoS e QoE.

## 4. ARQUITETURA PROPOSTA

### 4.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo descreve a arquitetura proposta por esta tese, dissertando sobre os elementos que o envolvem como: Sistema Fuzzy para decisão de handover com suporte a eficiência energética para dispositivos móveis utilizando aplicações multimídia; a utilização do modelo realístico de bateria e avaliação do impacto da qualidade de experiência no handover. O objetivo da arquitetura proposta foi manter o equilíbrio entre consumo de bateria com qualidade de experiência em redes de ambiente heterogêneo com múltiplos dispositivos, conforme demonstra a Figura 5.

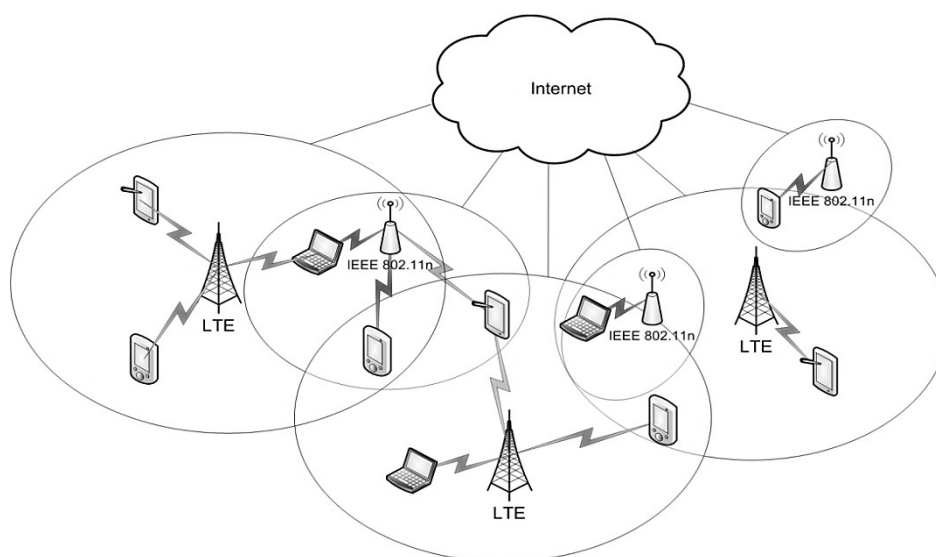


Figura 5 - Sistema de Redes Sem Fio Heterogênea

### 4.2 Declaração do Problema e Principais Contribuições

Uma das principais contribuições desta tese foi examinar uma arquitetura heterogênea dinâmica (devido à mobilidade dos usuários) composta por uma tecnologia LTE (que atualmente está sendo adotada como padrão para redes 4G) e também formada pela tecnologia IEEE 802.11n. Essa arquitetura heterogênea dinâmica é orientada para dispositivos móveis em ambientes de Internet do Futuro, pois oferecerá múltiplas opções de conectividade e permitirá que o usuário escolha a melhor rede por um determinado período de tempo. Logo, mesmo se o usuário se afastar de seu ponto de partida para um novo ponto de destino, a arquitetura continuará a oferecer múltiplas opções de conectividade.

Sendo assim, quando o dispositivo móvel está dentro da área de cobertura de duas ou mais redes, o mesmo deverá selecionar a rede à qual se conectará, apesar de os dispositivos

não terem nenhum tipo de suporte ou de inteligência que possa ajudar em sua tomada de decisão. Nem mesmo as tecnologias e seus padrões fornecem qualquer tipo de suporte para a tomada de decisões, em relação à seleção e conexão da rede.

Inicialmente, o único critério para seleção da rede adotado é o RSSI, ou seja, o dispositivo móvel somente será conectado ao ponto de acesso ou estação base mais próxima. Como resultado disso, a falta de suporte para a tomada de decisões ao selecionar a rede pode causar problemas ao usuário, já que um dispositivo móvel, com bateria fraca, poderá ser conectado a uma rede que aumente seu consumo de energia e reduza sua vida útil. Da mesma forma, um usuário com uma bateria que tenha uma vida útil prolongada, poderá ser conectado a uma rede saturada e oferecer uma largura de banda baixa, o que pode prejudicar a qualidade de experiência do usuário.

Além disso, a mobilidade do usuário também pode prejudicar a qualidade da experiência, uma vez que usuários com alta mobilidade podem realizar transferências excessivas e desnecessárias, como no caso do handover de “*ping-pong*”. Isso significa que, um dispositivo móvel será conectado a uma nova rede, permanecendo dentro da área de cobertura dessa nova rede por um curto período de tempo e devido à sua alta mobilidade, o dispositivo terá que restabelecer a conexão com o ponto de contato ou com a estação base anterior.

Devido à falta de suporte móvel e/ou inteligência nos dispositivos, outra contribuição feita por esta tese foi o sistema de lógica Fuzzy, orientado para ambientes sem fio heterogêneos, para auxiliar na tomada de decisão em relação à seleção e conexão da rede. No entanto, as tecnologias têm características diferentes e, por esse motivo, esta tese apresenta um sistema Fuzzy com dois conjuntos de regras. Logo, se a rede recém-detectada for uma rede 802.11n, o sistema Fuzzy será regido por um conjunto de regras projetadas para essa tecnologia, enquanto se a rede recém-detectada for uma rede LTE, o sistema Fuzzy também será governado por um conjunto de regras projetadas para essa tecnologia.

Destaca-se, que o sistema de lógica Fuzzy, que possui dois conjuntos de regras aplicáveis a cada tecnologia, permitirá o uso racional do dispositivo móvel. O sistema Fuzzy também realizará o balanceamento de carga distribuindo os dispositivos móveis entre as redes. Por essa razão, o Fuzzy é diferente dos sistemas tradicionais, já que foi implementado com características tecnológicas específicas e incorpora três variáveis de entrada: velocidade, nível de bateria e qualidade da experiência.

Nesse sentido, é importante destacar que as tecnologias têm um consumo de bateria diferente, e isso precisa ser levado em conta. Por esse motivo, esta tese faz outra contribuição,

que é o uso de um modelo de bateria realista que possui parâmetros específicos de descarga de bateria para cada tecnologia. As tecnologias 802.11n e LTE têm diferentes níveis de carga de consumo de bateria e, além disso, cada status do dispositivo móvel também tem um nível diferente de consumo de bateria. Isso ocorre, porque a taxa de descarga da bateria de um dispositivo móvel que está transmitindo mensagens é diferente de quando está sendo recebida e, além disso, é diferente quando o dispositivo móvel está ocioso.

Tal situação explica por que o modelo de bateria utilizando no simulador foi o de Rakhmatov e Vrudhula (2001), já que o modelo tradicionalmente utilizado nos simuladores era o modelo linear que tinha uma taxa de descarga de bateria não variável, independentemente de sua tecnologia ou status.

Outra contribuição, feita por este trabalho, foi o uso da qualidade da experiência como uma métrica de entrada no sistema Fuzzy. Nesse sentido, um algoritmo de medição da qualidade da experiência foi implementado nas estações de base e nos pontos de acesso. Isto é, o dispositivo móvel fornece informações (por meio de mensagens de sinalização de rede) à estação base e ao ponto de acesso ao qual está conectada, juntamente com o nível de QoE oferecido. Essa medida é derivada do número de pacotes de vídeo recebidos pelo dispositivo móvel e esse número permite que o nível de QoE oferecido seja classificado.

### **4.3 Arquitetura Fuzzy**

A lógica Fuzzy é uma extensão da lógica convencional (binária). Ao contrário da lógica tradicional que trabalha com valores exatos, a lógica difusa permite um maior grau de incerteza, procurando manipular termos imprecisos que são normais na linguagem humana. Isso permite que um sistema digital, que só funciona com lógica binária, seja projetado para imitar o pensamento humano. Ou seja, sendo capaz de processar informações de maneira subjetiva.

Em um sistema Fuzzy, o resultado aparece em um intervalo de 0 a 1. O valor 0 significa exclusão completa e o valor 1 significa associação completa, enquanto os outros valores representam graus intermediários de relevância. Ressalta-se, que um determinado elemento também pode pertencer a dois ou mais conjuntos difusos definidos no mesmo universo, onde os valores das funções de associação para cada conjunto difuso podem ser diferentes. Assim, um elemento pode pertencer mais a um conjunto difuso e, menos a outros.

Os conjuntos Fuzzy são geralmente definidos em termos linguísticos. Além disso, onde os valores representam a altura de um indivíduo, pode haver três conjuntos difusos



definidos da seguinte forma: baixo, médio e alto. Se, por exemplo, existem cinco conjuntos difusos no universo, uma possibilidade seria: muito baixa, baixa, média, alta, muito alta.

Neste trabalho, foram escolhidos três métricas como entrada: velocidade do móvel, nível de bateria e QoE. Destaca-se, que tais métricas foram implementadas para representar operações dinâmicas durante as simulações. Ademais, a velocidade do dispositivo móvel também é uma métrica dinâmica muito importante, pois um usuário com alta velocidade pode ser prejudicado por uma quantidade excessiva de *handovers*.

O valor de entrada QoE indica a qualidade de vídeo de uma rede de *link* com uma estação base/ponto de acesso atual e é uma métrica importante para acionar o *handover*. A carga do consumo da bateria varia, dependendo de qual rede foi selecionada, e haverá situações em que a rede selecionada não levará em conta apenas os requisitos de QoS/QoE, mas também o grau restante de energia do dispositivo.

Decidiu-se dividir a velocidade (*m/s*) em três conjuntos: Baixa velocidade (intervalo  $[0 \text{ a } 6 \text{ m/s}]$ ), velocidade média (intervalo  $[4 \text{ a } 14 \text{ m/s}]$  e alta velocidade (quando a velocidade é superior a  $12 \text{ m/s}$ ). Três conjuntos também foram definidos para o QoE (em *dB*): Baixo (intervalo  $[0 \text{ } 25]$ ), médio (intervalo  $[22 \text{ } 31]$  e alto (quando o QoE é maior que  $31 \text{ dB}$ ). A energia da bateria (em termos percentuais) é definidos em três conjuntos: Baixo  $[0\% - 25\%]$ , médio  $[20\% - 80\%]$ , alto  $[mais \text{ de } 70\%]$ . Estes três conjuntos geram uma saída com as seguintes possibilidades: “*NÃO*” fazer o *handover*, “*PROVAMENTE NÃO*” fazer o *handover*, “*PROVAVELMENTE SIM*” para fazer o *handover* e “*SIM*” para o *handover* (veja a Figura 6).

Logo, adotou-se uma função de pertinência do tipo triangular para todas as entradas e saídas. Optou-se no uso desta função, pois a mesma tem sido utilizada extensivamente em aplicações de tempo real, de acordo com os estudos de Sadiq e Bakar (2011). Essa função de pertinência apresenta como características principais, a sua simplicidade na modelagem e eficiência computacional. Características essas que podem influenciar nos níveis de atraso no processo de *handover*, isto é, podendo influenciar na qualidade das aplicações multimídias que são sensíveis ao atraso.

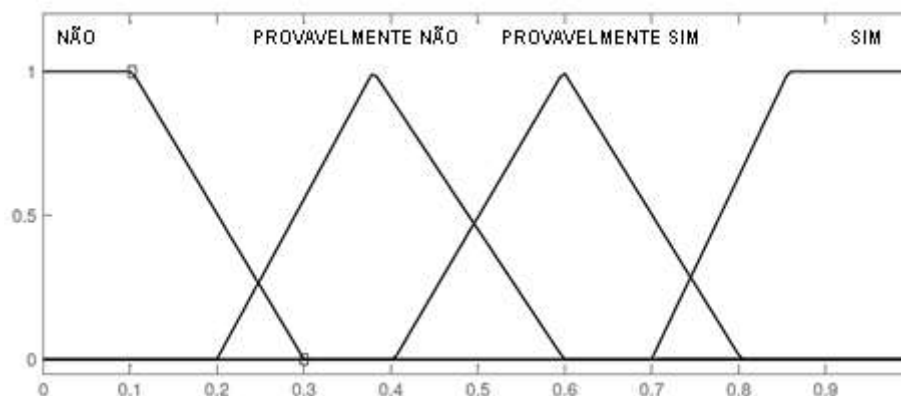


Figura 6 - Saída no Sistema Fuzzy

A arquitetura consiste em duas tecnologias: Wi-Fi (IEEE 802.11n) e 4G (LTE); o sistema Fuzzy receberá as informações necessárias para decidir qual será a melhor conexão de rede para aquele momento. Precisamente, porque a arquitetura é comportada por duas tecnologias, o sistema Fuzzy possui dois conjuntos de regras específicas, onde cada um será descrito abaixo (Tabelas 6 e 7).

As regras Fuzzy determinam quando o usuário móvel irá mudar de rede (handover). Quando o usuário móvel está conectado a uma rede Wi-Fi e detecta uma nova rede LTE, o sistema Fuzzy acionará o *handover* nas seguintes conforme a Tabela 6, no caso de situações que não satisfaçam as condições da Tabela 6, o Fuzzy não acionará o *handover* para a outra rede:

Tabela 6 - Regras Fuzzy para Wi-Fi

Velocidade	QoE	Energia	Handover
Baixa	Média	Média	Provavelmente Sim
Baixa	Média	Alta	Provavelmente Sim
Média	Média	Média	Provavelmente Sim
Média	Média	Alta	Provavelmente Sim
Baixa	Baixa	Alta	Sim
Baixa	Alta	Baixa	Sim
Média	Baixa	Baixa	Sim
Média	Baixa	Média	Sim
Média	Baixa	Alta	Sim
Média	Média	Baixa	Sim
Média	Alta	Baixa	Sim
Alta	Baixa	Baixa	Sim
Alta	Baixa	Média	Sim
Alta	Baixa	Alta	Sim
Alta	Média	Baixa	Sim

Por exemplo, um dispositivo móvel, conectado à rede Wi-Fi, mudará para uma rede LTE quando, na rede Wi-Fi, a QoE for baixa ou o nível de energia for médio/alto e em alta velocidade. Pois nessa situação, a base de regras permite ao Fuzzy priorizar o critério referente à qualidade da experiência do usuário móvel. Quando o dispositivo móvel está conectado a uma rede LTE e detecta uma nova rede Wi-Fi, o sistema Fuzzy acionará o *handover* nas seguintes conforme a Tabela 7, no caso de situações que não satisfaçam as condições da Tabela 7, o Fuzzy não acionará o *handover* para a outra rede:

Tabela 7 - Regras Fuzzy para LTE

<b>Velocidade</b>	<b>QoE</b>	<b>Energia</b>	<b>Handover</b>
Baixa	Média	Média	Provavelmente Sim
Baixa	Média	Alta	Provavelmente Sim
Média	Média	Média	Provavelmente Sim
Média	Média	Alta	Provavelmente Sim
Baixa	Baixa	Baixa	Sim
Baixa	Baixa	Média	Sim
Baixa	Baixa	Alta	Sim
Baixa	Média	Baixa	Sim
Baixa	Alta	Baixa	Sim
Média	Baixa	Baixa	Sim
Média	Baixa	Média	Sim
Média	Baixa	Alta	Sim
Média	Média	Baixa	Sim
Média	Alta	Baixa	Sim
Alta	Baixa	Baixa	Sim
Alta	Baixa	Média	Sim
Alta	Baixa	Alta	Sim
Alta	Média	Baixa	Sim

Em geral, um usuário móvel conectado à rede LTE mudará para uma rede Wi-Fi, quando na rede LTE, a QoE for alto, o nível de energia for baixo, e tiver uma média velocidade. Sendo assim, essa situação permite ao Fuzzy priorizar o critério do nível de energia para os usuários móveis.

Diante das situações exemplos, o segundo cenário embora apresente um valor medido de QoE em alto. No entanto, como o nível de bateria estava bastante reduzido, o sistema de *handover*, através de sua base de regras, permite indentificar de forma indireta que o critério da eficiência energética deverá ser priorizado. Pois um dos principais requerimentos de um *handover* é baseado no princípio de manter o dispositivo móvel sempre conectado, ou seja, manter o princípio ABC (*Always Best Connected*)

#### 4.4 Modelo Rakhmatov – Vrudhula

O propósito de um modelo matemático para baterias foi de estudar/prever seu desempenho ou comportamento em ambientes dinâmicos, como o *handover vertical em redes heterogêneas*. Uma bateria é um conjunto de células eletroquímicas, cada uma das quais consiste em dois eletrodos: um nodo ânodo polaridade negativa e outro nodo cátodo que tem polaridade positiva. As reações eletroquímicas geram elétrons que são liberados para fornecer energia elétrica aos dispositivos que causam o consumo da bateria. O modelo de bateria utilizado neste trabalho foi a implementação do modelo de Rakhmatov e Vrudhula (2001).

O modelo Rakhmatov e Vrudhula (2001) é considerado mais realista que o modelo linear porque leva em conta os estados de transmissão. Onde para cada estado, há um tipo diferente de descarga elétrica (Equação 6). Este modelo inclui diferentes capacidades de bateria e taxas de recuperação (no modo inativo é possível aumentar a vida útil da bateria) para diferentes tipos de baterias (alcalina, íons de lítio).

$$(6) \quad \alpha = \sum_{k=1}^n 2 I_{k-1} A(L, t_k, t_{k-1}, \beta)$$

Onde,

$I_{k-1}$  = a descarga de corrente durante o período  $k - 1$

A = calcula a taxa de descarga do modelo de bateria não linear

L = vida útil da bateria (ou tempo de vida)

$t_k$  = tempo de duração de período k

$t_{k-1}$  = tempo de duração de período  $k - 1$

Considerando sua simples complexidade para implementação, reduzida atividade computacional e principalmente capacidade de ser implementado em simulações. Este modelo não linear foi implementado no simulador de redes Network Simulator para predição do tempo de vida da bateria com suporte a cargas não lineares, efeito de recuperação e taxa de capacidade. Onde tais efeitos não lineares são fatores dinâmicos que acompanham o comportamento dinâmico das redes heterogêneas.

#### 4.5 Esquema de Gerenciamento de Mobilidade Distribuída

No cenário de aplicação, a tomada de decisão de *handover* é compartilhada entre a estação móvel e o ponto de acesso. A Figura 7 ilustra o processo de transferência vertical entre a rede atual e a rede alvo na arquitetura de rede proposta.

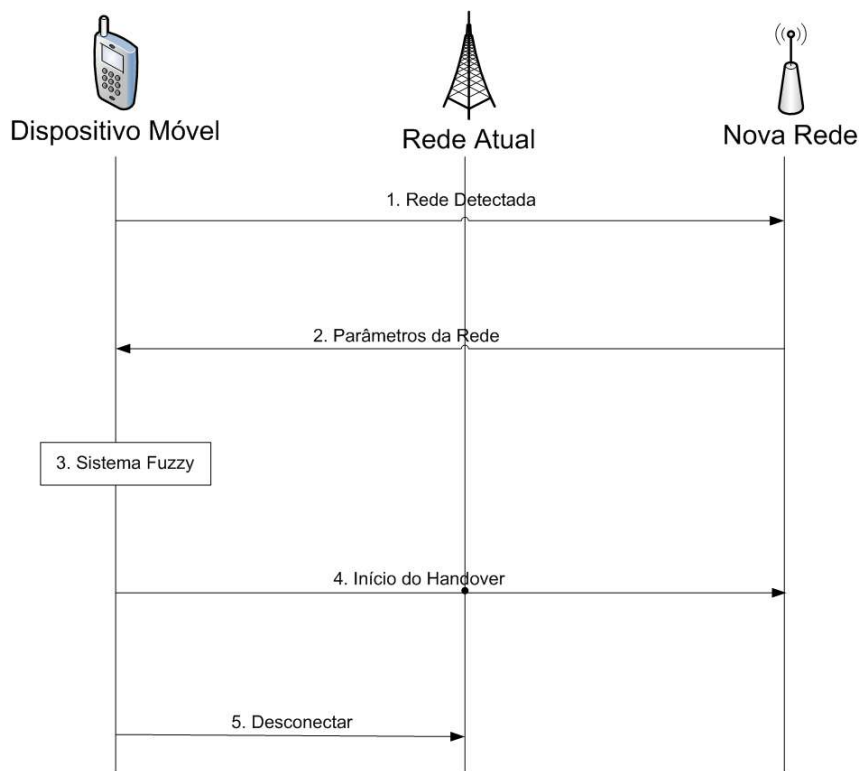


Figura 7 - Sinalização no Procedimento de Handover

(1) Quando o dispositivo móvel detecta uma rede vizinha alvo, ele envia uma mensagem “*Rede Detectada*” para a rede de destino, e esta mensagem permite que a rede visada reconheça a estação móvel.

(2) A rede de destino responde com uma mensagem “*Parâmetros de Rede*”, que contém informações de rede, como RSSI e o nível de qualidade de experiência oferecido pela nova rede.

(3) O dispositivo móvel encaminha a energia, a QoE e as informações de mobilidade para o sistema Fuzzy (regras Wi-Fi ou LTE na rede detectadas). Ressalta-se, que a saída Fuzzy indica se o *handover* é necessário ou não, e a decisão é feita com base no valor da inferência de saída. Logo, a rede que apresentar o maior valor de inferência será aquela escolhida pelo dispositivo móvel.

(4) Após a decisão Fuzzy, o dispositivo envia uma mensagem “*Início do Handover*” para a rede alvo acionar o *handover* vertical.

(5) O dispositivo móvel envia à rede atual uma mensagem “*Desconectar*” sobre a necessidade de mudar para uma nova rede.

#### **4.6 Considerações Finais**

Este capítulo finaliza sobre estrutura da arquitetura defendida neste trabalho de tese. Abordando sobre o problema e as principais contribuições da arquitetura proposta. Contribuições como: o sistema Fuzzy para o suporte a decisão de *handover* vertical para as tecnologias LTE e 802.11n; a implementação de um modelo de bateria não linear, baseado no consumo de energia proposto por Rakhmatov e Vrudhula (2011), que considera diferentes capacidades/tipos de baterias, considerado um modelo mais realista que o linear; finalizando sobre as etapas de funcionamento do esquema de gerenciamento de mobilidade distribuída, no processo de decisão de *handover*.

## 5. METODOLOGIA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

### 5.1 Considerações Finais

Neste capítulo, será avaliada a arquitetura projetada para fornecer QoE com energia de bateria otimizada. A avaliação de desempenho foi realizada através do *Network Simulator 2* (NS2) e Evalvid Tool (para transmitir o vídeo na simulação) (EVAVILD, 2018).

O objetivo foi demonstrar os benefícios da arquitetura proposta em relação à arquitetura original, bem como comparar o desempenho da proposta com outros trabalhos pesquisados na literatura. Tal proposta, foi comparada em relação aos artigos de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016).

As propostas de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016) foram adaptadas para o simulador NS-2 para a comparação de desempenho. Para facilitar a identificação das propostas nos gráficos de avaliação de desempenho, quanto ao consumo de energia, QoS e QoE. Tais trabalhos foram numerados conforme a Tabela 8

Tabela 8 - Numeração correspondente para cada proposta

Proposta	Numeração Correspondente
Zineb et al. (2016)	[1]
Piamrat et al. (2011)	[2]
Aldhaibani et al. (2018)	[3]
Kammoun e Tabbane (2016)	[4]

O modelo de mobilidade utilizado foi o *Random Way Point*, portanto, os movimentos e a velocidade dos usuários móveis foram aleatórios na simulação.

O vídeo utilizado nesta simulação foi o “*Sintel*”, que consiste de 1253 quadros com o formato *YUV*, amostragem *4:2:0* e dimensões de *1080x720*, que foram compactados através de um CODEC MPEG-4 e enviados a uma taxa de 30 *frames/s* (quadros por segundo) (MARIE; NILSSON, 2001). O vídeo “*Sintel*” foi escolhido devido a sua alta definição.

Destaca-se, que os parâmetros simulados que foram configurados para todos os experimentos, estão descritos na Tabela 9 e representam os valores normais das redes IEEE 802.11n e LTE.

Tabela 9 - Parâmetros de Simulação

	IEEE 802.11n	LTE
Taxa de transmissão	108 Mbps	150 Mbps
Área de cobertura	100 m	1000 m
Vídeos	Resolução: 176 x 144 CIF Resolução: 352 x 288 CIF Resolução: 1080 x 720 CIF Taxa de Frames: 30 frames/s Modo de Cor: Y, U, V	
Política de Fila	Drop Tail (40 ms <i>delay</i> ou atraso)	
Tamanho do Pacote	1052 <i>bytes</i>	
Fragmentação do Pacote Máxima	1024 <i>bytes</i>	
Número de Simulações	50	
Intervalo de Confiança	95 %	
Número de Vídeos	3	
Modelo de Rádio Propagação	Two Ray Ground	
Modelo de Mobilidade	Random Way Point	

Além disso, os parâmetros de simulação para a avaliação do consumo de energia, estão descritos na Tabela 10. A tensão inicial da bateria foi de 1.000 *joules* e diferentes taxas de transmissão e recepção foram adotadas para cada sistema tecnológico. No caso da tecnologia Wi-Fi, os mesmos valores foram adotados como demonstrado em Marie e Nilsson (2001). Ressalta-se, que os valores utilizados para o LTE foram baseados no estudo de Deruyck et al. (2010).

Tabela 10 - Parâmetros de Simulação para Energia

	Transmissão (W)	Recepção (W)
WiFi	1.3	0.9
LTE	2.5	1.7

## 5.2 Resultados do consumo de energia

Inicialmente, os resultados foram utilizados para comparar a vida útil da bateria quando o usuário móvel está conectado na arquitetura sem sistema Fuzzy (a arquitetura com



protocolos originais), com o usuário móvel conectado na arquitetura com sistema Fuzzy. Principalmente durante as simulações quando o usuário móvel realiza *handovers*.

Desse modo, foi possível mensurar os resultados. O usuário móvel na arquitetura sem sistema Fuzzy (Arquitetura Original) foi conectado por, aproximadamente, 47 minutos. Nos estudos de Kammoun e Tabbane (2016), Aldhaibani et al. (2018), Piamrat et al. (2011) e Zineb et al. (2016), os resultados foram, respectivamente, de 48,5 minutos, 50,3 minutos, 51,2 minutos e 52 minutos. Por outro lado, o usuário móvel, com a política de economia de energia proposta, ficou conectado por 58 minutos (Figura 8).

O ganho de energia da proposta ocorre devido o sistema Fuzzy, através de sua base de regras, identifica que o critério a ser priorizado seria para estender o tempo de vida da bateria. Então na ocorrência de situações quando o nível da bateria do dispositivo estiver baixo, o sistema Fuzzy permitirá o *handover*, mesmo que ocorra a perda na qualidade do vídeo.

Outro ponto a ser considerado está na adoção do modelo de bateria proposto por Rakhmatov e Vrudhula. Devido ao seu modelo oferecer suporte quanto a cargas variáveis, efeito de recuperação de energia e taxa de capacidade. Esses fatores contribuíram na acurácia da previsão do tempo de vida da bateria no ambiente heterogêneo. Essa acurácia permitiu também ser um diferencial no rendimento do consumo de energia perante os trabalhos correlatos.

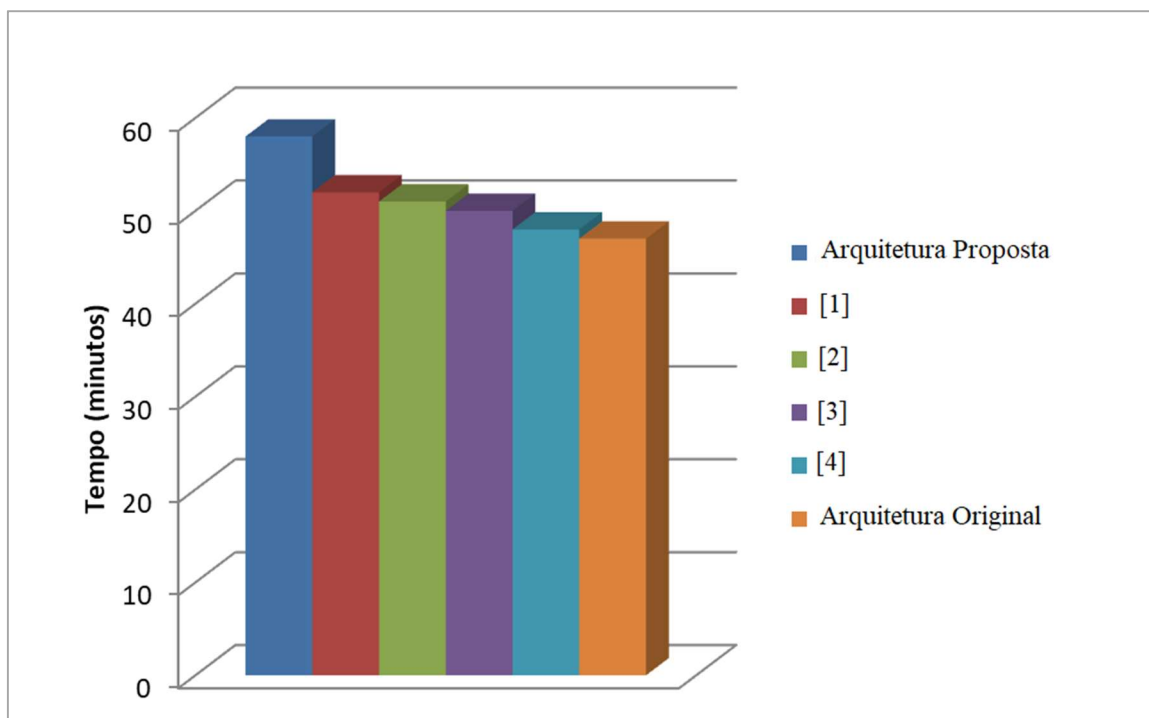


Figura 8 - Energy-Saving ou Economia de Energia Sobre o Tempo

### 5.3 Resultados quanto à QoS

Os benefícios do esquema foram avaliados por meio da métrica de desempenho da taxa de vazão ou *throughput* na rede. Como metodologia de avaliação, foram utilizados dois cenários para verificar o comportamento da proposta. No caso, quando o dispositivo estiver localizado na interseção da área de cobertura e em situação de elevada mobilidade do dispositivo.

#### 5.3.1 Cenário quanto em Interseção da Área de Cobertura

Neste cenário, o dispositivo móvel irá se encontrar na interseção das áreas de cobertura. Foram observados o comportamento da proposta, bem como da arquitetura original e dos trabalhos relacionados quanto aos critérios adotados pelos mesmos para a seleção das redes.

Na simulação da arquitetura original, sem o sistema lógico Fuzzy, e nos trabalhos de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016), o dispositivo móvel escolheu a rede que estava mais próxima, embora estivesse saturada e oferecesse um serviço de baixa qualidade. Porém, na simulação de arquitetura com o sistema Fuzzy, o dispositivo móvel escolheu a rede que oferecia a melhor qualidade de serviço. No gráfico (Figura 9) abaixo, pode-se observar que a taxa de transferência da rede na arquitetura com o sistema Fuzzy foi superior. Pois a proposta somente troca de rede quando houver a necessidade em priorizar pela qualidade de percepção do usuário.

Mensurou-se, que a taxa de transferência média na arquitetura original foi de 0,51 *Mbps*, enquanto no estudo de Kammoun e Tabbane (2016), a velocidade foi de 0,65 *Mbps*. No estudo de Aldhaibani et al. (2018), a velocidade alcançada foi de 0,76 *Mbps*, enquanto no estudo de Piamrat et al. (2011) ficou em 1,6 *Mbps*. Em Zineb et al. (2016), a velocidade foi de 1,8 *Mbps*, enquanto na arquitetura com o sistema Fuzzy, a taxa de transferência média foi de 2,23 *Mbps*, a maior registrada.

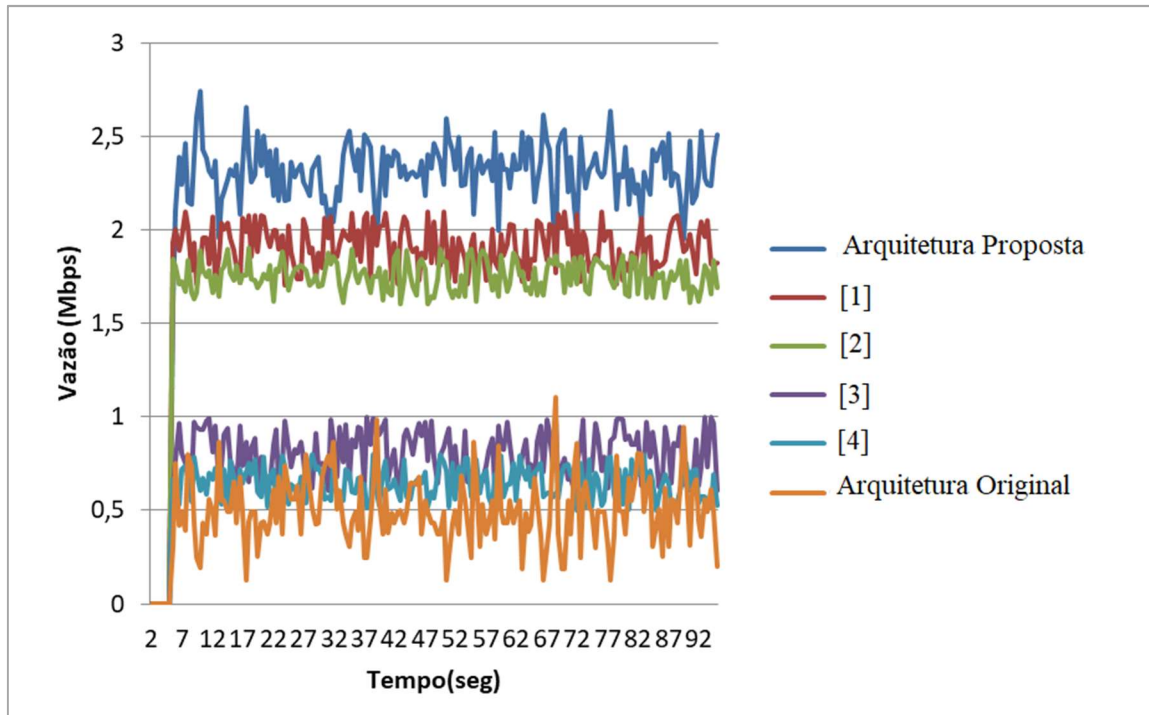


Figura 9 - Vazão Sobre o Tempo

### 5.3.2 Cenário com Elevada Mobilidade

Na segunda situação, as simulações contavam com dispositivos móveis de alta mobilidade dentro da área de cobertura das redes. Em um cenário onde a arquitetura original, e as propostas de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabane (2016) não ofereciam o suporte à mobilidade para a seleção de uma rede. Então na situação em que dispositivos se encontram em alta mobilidade, os mesmos ficaram sujeitos sobre os efeitos do *handover ping-pong*.

Em outras palavras, os dispositivos móveis foram conectados a uma nova rede (que estava oferecendo menor largura de banda) e foram conectados novamente à sua rede anterior. Essa troca desnecessária de rede prejudicou a taxa de fluxo do cliente e, por esse motivo, em uma situação em que a arquitetura possui um sistema de lógica Fuzzy, os dispositivos móveis de alta mobilidade não realizaram o *handover ping-pong* com frequência, mantendo assim, a sua qualidade no serviço. No gráfico (Figura 10) abaixo, pode-se notar que há uma perda de fluxo nos dispositivos móveis em alta mobilidade que realizaram o *handover*, no cenário para a provocação de eventos *ping-pong*.

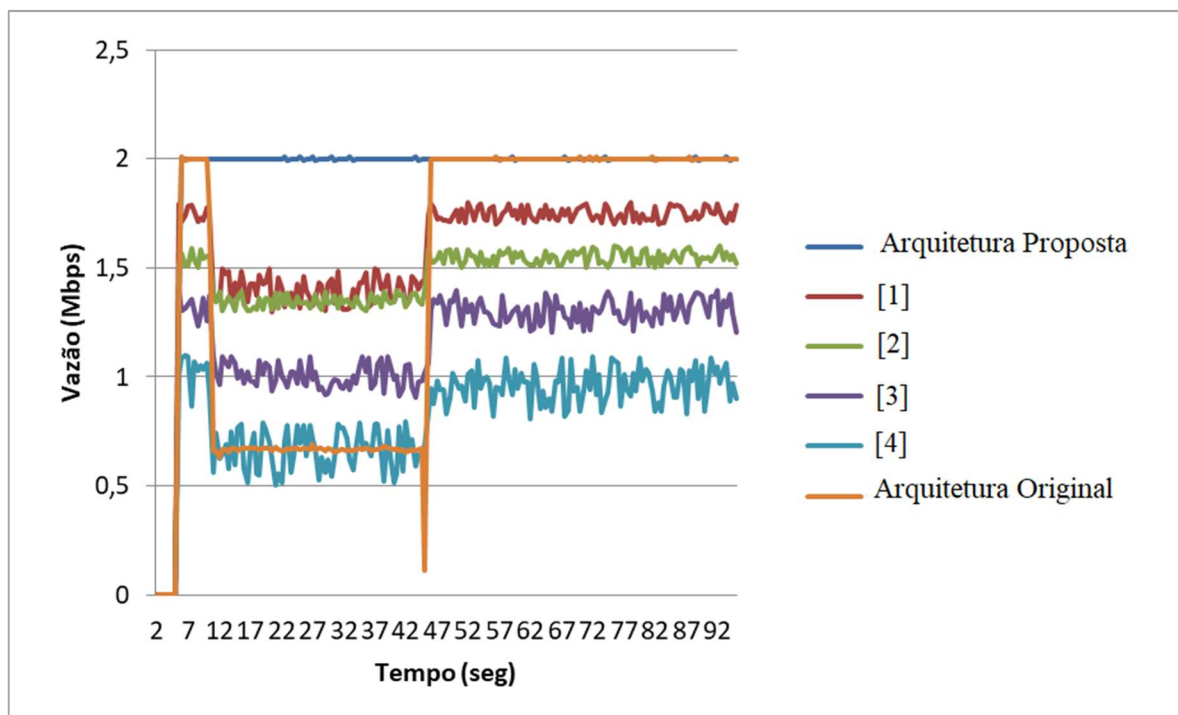


Figura 10 - Resultado da vazão em Situação de Ping-Pong no Processo de Handover

A arquitetura original, por apresentar apenas o RSSI como gatilho para a decisão do *handover*, ficou fortemente sujeita ao comportamento da mobilidade, logo o seu baixo rendimento devido às frequentes situações do efeito ping-pong no qual ficou submetida.

A proposta de Kammoun e Tabbane (2016) embora apresentar como foco principal de seu arcabouço o suporte a *handovers* desnecessários, porém apresentou o pior desempenho perante outras abordagens. Isso se explica pelo fato da proposta de Kammoun e Tabbane não oferecer suporte à mobilidade, ou seja, os pesos de sua função custo não acompanham o comportamento da mobilidade no cenário. Fazendo com que a função custo não seja calculada corretamente para a melhor acurácia no poder de decisão. O cálculo errôneo dos pesos pode ser observado pela maior amplitude de oscilação dos resultados deste trabalho relacionado no gráfico (Figura 10).

Outro ponto a ser observado foi quanto ao comportamento da proposta de Piamrat et al. (2011). Devido estratégia da rede neural apresentar a perda de desempenho em situação de mobilidade, por causa da atualização incorreta dos pesos e maior probabilidade de a capacidade de aprendizado não acompanhar o comportamento dinâmico da mobilidade.

No entanto, a proposta apresentou rendimento superior ao de Kammoun e Tabbane devido ao mecanismo da rede neural ser baseada no aprendizado de forma estatística, isto é, suavizando a amplitude das oscilações em seus resultados.

Outro ponto de melhoria em seus resultados foi pelo suporte ao QoE cuja métrica possibilitou na elevação da acurácia na escolha da rede alvo. Porém, a proposta de Piamrat et al. (2011), não conseguiu oferecer melhor desempenho comparado a proposta da tese, conforme o gráfico da Figura 10, visto que tanto a adoção do QoE como parâmetro, quanto o seu mecanismo para identificação dos critérios, permitiram ao sistema fuzzy oferecer melhor rendimento.

#### 5.4 Resultados quanto à QoE

O presente trabalho também analisa as simulações com uma aplicação de vídeo. Os resultados da aplicação de vídeo foram avaliados por meio de métricas objetivas de QoE: i) Relação Sinal-Ruído (PSNR – *Peak Signal-to-Noise Ratio*), ii) *Structural Similarity Metric* (SSIM) e iii) Métrica de Qualidade de Vídeo (VQM - *Video Quality Metric*). Os dados são coletados usando a Ferramenta MSU (VQMT - *Video Quality Measurement Tool*).

Ressalta-se, que o PSNR é um método tradicional objetivo para estimar os padrões de serviços multimídia com base nas opiniões do usuário. O índice SSIM é um valor decimal entre 0 e 1, em que 0 significa que há uma correlação zero com a imagem original e 1 significa exatamente a mesma imagem. O VQM determina o nível de qualidade de multimídia baseado na percepção do olho humano e fatores subjetivos, incluindo desfoque, ruído global, distorção de bloco e distorção de cor. Logo, os resultados das estimativas VQM variam de 0 a 5, onde 0 é a melhor pontuação possível. De acordo com os parâmetros da rede, o sistema Fuzzy manterá o usuário mais tempo na rede e oferece a melhor qualidade.

Os vídeos transmitidos com o Sistema Fuzzy foram superiores aos transmitidos sem o sistema difuso, nos trabalhos de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016). O valor PSNR para um vídeo sem o Fuzzy System foi 28dB, o que pode ser classificado como um vídeo justo, o valor PSNR para vídeo em papel Kammoun e Tabbane (2016) foi 29dB e classificado como vídeo justo, ao mesmo tempo em que o valor PSNR para o vídeo em Aldhaibani et al. (2018) foi 30dB que pode ser classificado como um vídeo justo.. Em Piamrat et al. (2011), o valor PSNR para vídeo em papel foi de 32dB, sendo classificado como um bom vídeo, enquanto que em Zineb et al. (2016) o resultado foi 34dB, o que pode ser classificado como um bom vídeo. No entanto, valor PSNR para o vídeo com o Fuzzy System foi de 37dB, sendo classificado como um excelente vídeo. Logo, o vídeo transmitido com o Sistema Fuzzy teve um melhor desempenho durante a transmissão, mantendo um equilíbrio entre energia e QoE (Figura 11).

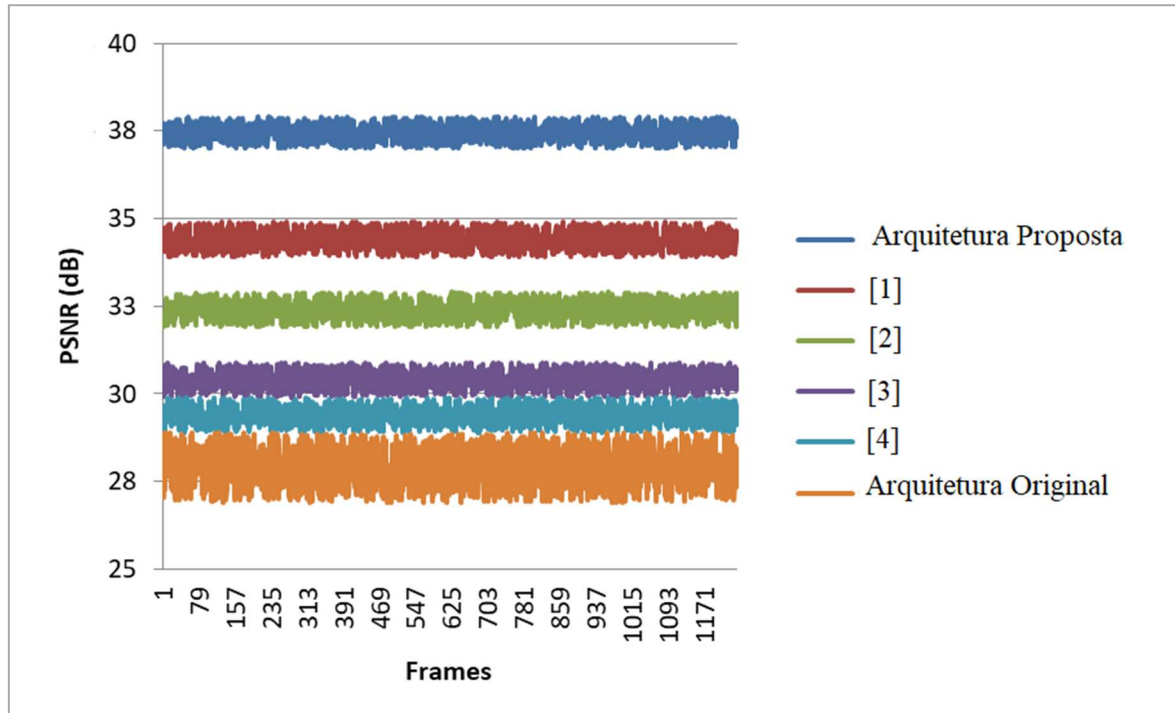


Figura 11 - PSNR Sobre Frames (Quadros)

O valor SSIM para um vídeo sem o Fuzzy System foi de 0,71, enquanto o valor SSIM para vídeo em Kammoun e Tabbane (2016), foi de 0,73. Em Aldhaibani et al. (2018), Piamrat et al. (2011) e, Zineb et al. (2016) os resultados foram, respectivamente, 0,79, 0,81 e 0,85. Apesar de superiores aos dois primeiros, os resultados foram inferiores ao encontrados no Sistema Fuzzy, que ficou em 0,93. (ver Figura 12).

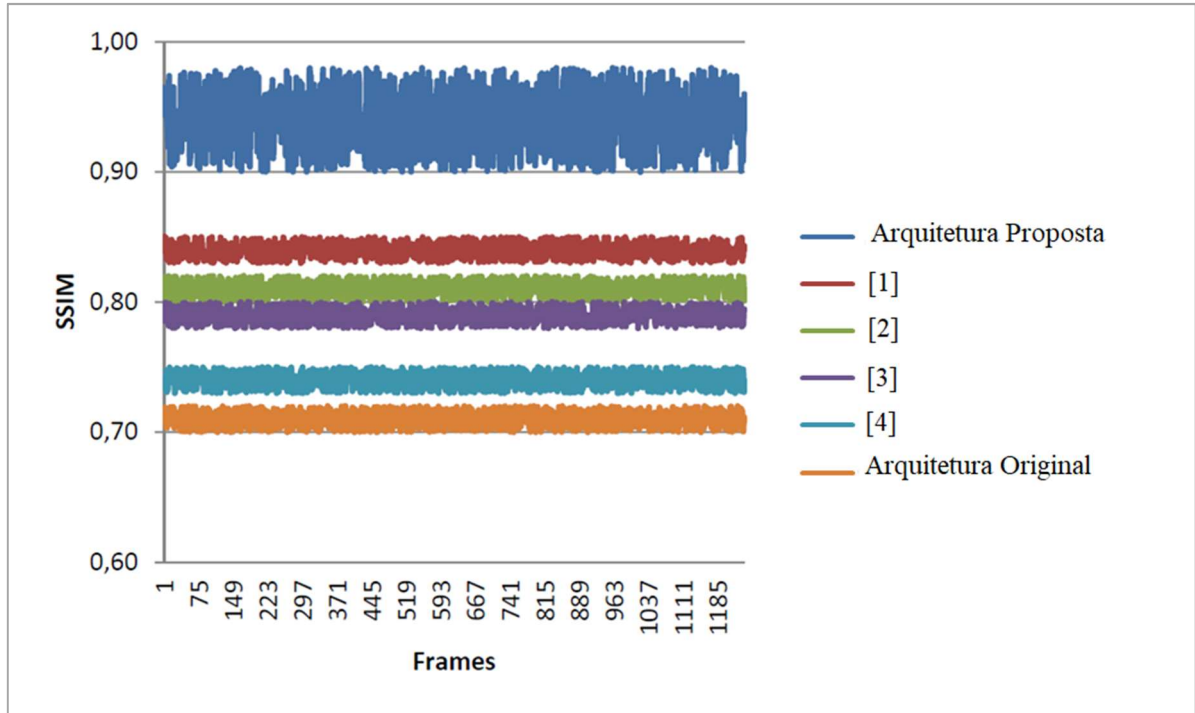


Figura 12 - SSIM Sobre Frames

Foi mensurado, também, o valor de VQM. Para um vídeo sem o Fuzzy System, o valor era de 3,95, ao passo que o valor de VQM para vídeo em Kammoun e Tabbane (2016) foi de 3,02. Em Aldhaibani et al. (2018), o valor encontrado foi 2,8, enquanto que em Piamrat et al. (2011), esse valor ficou em 2,41. Os menores valores foram encontrados em Zineb et al. (2016), com 2,1 e, no Sistema Fuzzy, com resultado de 1,44. (veja a Figura 13).

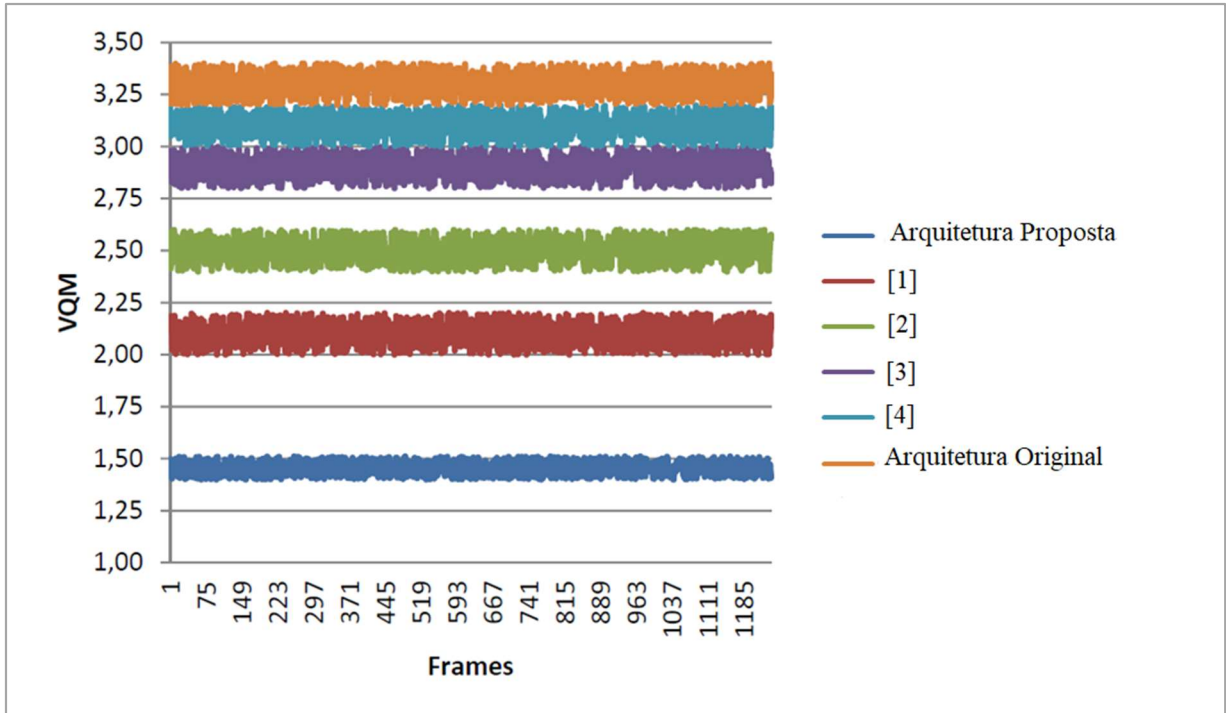


Figura 13 - VQM Sobre Frames

O gráfico a seguir mostra que o vídeo transmitido com o Sistema Fuzzy teve um melhor desempenho, já que o atraso foi menor que o vídeo transmitido sem o Sistema Fuzzy, nos trabalhos de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016). Quanto menor o atraso ou delay, mais rápida e eficiente será a entrega dos frames, o que confirma a superioridade do vídeo transmitido com o esquema Fuzzy por meio das métricas de QoE (Figura 14).



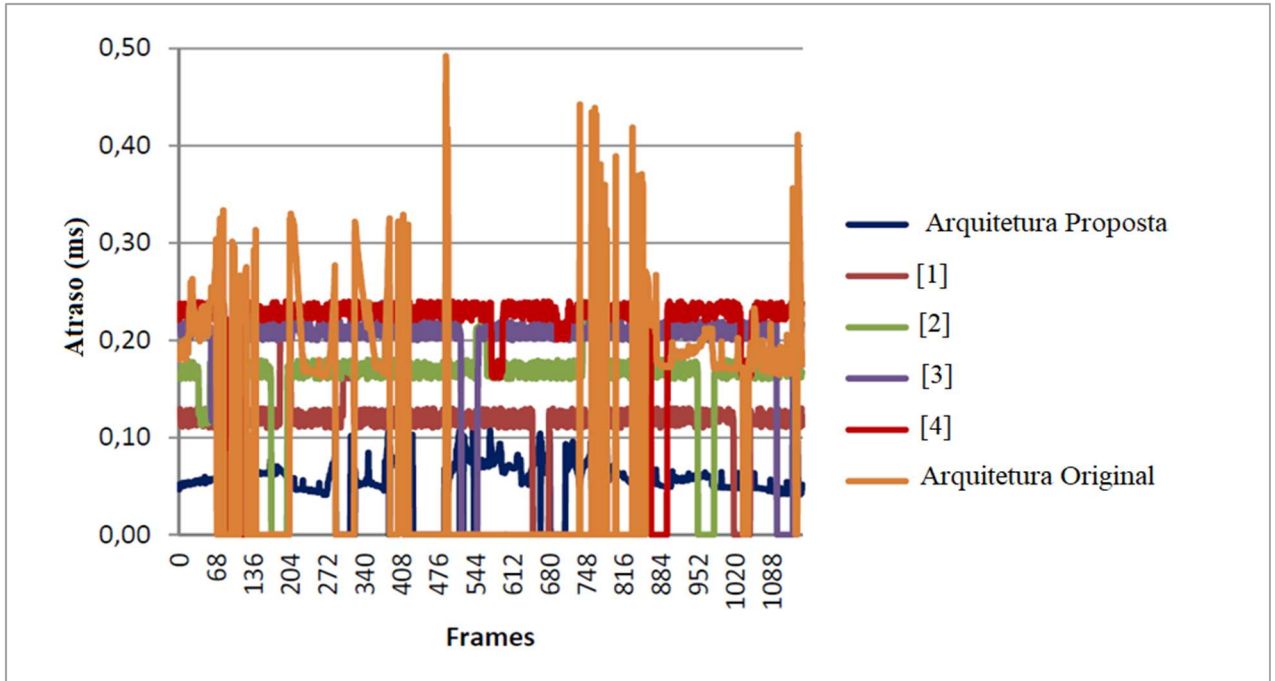


Figura 14 - Delay Sobre Frames

A superioridade do vídeo transmitido com o Sistema Fuzzy também pode ser determinada fazendo uma comparação visual do quadro transmitido com o mecanismo (Figura 20) e, com um quadro do vídeo transmitido sem o mecanismo (Figura 15). Além disso, é possível comparar, o resultado do mecanismo, com os observados em Kammoun e Tabbane (2016) (Figura 16), Aldhaibani et al. (2018) (Figura 17), no trabalho de Piamrat et al. (2011) (Figura 18), e no trabalho de Zineb et al. (2016) (Figura 19).

A Figura 15 a seguir exibe o frame do vídeo transmitido com o padrão original das tecnologias sem nenhuma inteligência computacional. É possível observar visualmente que a qualidade do frame é ruim e possui vários *pixels* distorcidos.



Figura 15 - Sem o Sistema Fuzzy

A Figura 16 exibe o frame do vídeo transmitido com a proposta de Kammoun e Tabbane (2016) sendo possível observar uma melhor qualidade em relação ao frame anterior. Porém, a qualidade do frame ainda não é adequada já que a maioria dos pixels apresenta uma tonalidade escura.



Figura 16 - Proposta de Kammoun e Tabbane (2016)

A Figura 17 exibe o frame do vídeo transmitido com a proposta Aldhaibani et al. (2018), nesse frame ainda é possível perceber que boa parte dos pixels continua apresentando uma tonalidade escura prejudicando a qualidade do vídeo.



Figura 17 - Aldhaibani et al. (2018)

A Figura 18 exibe o frame do vídeo transmitido com a proposta de Piamrat et al. (2011), no qual já é possível observar uma melhor qualidade em relação aos frames anteriores. Embora o frame seja melhor que os anteriores, o frame transmitido com a proposta de Piamrat et al. (2011) ainda apresenta pixels com tonalidades escuras e pequenas distorções.

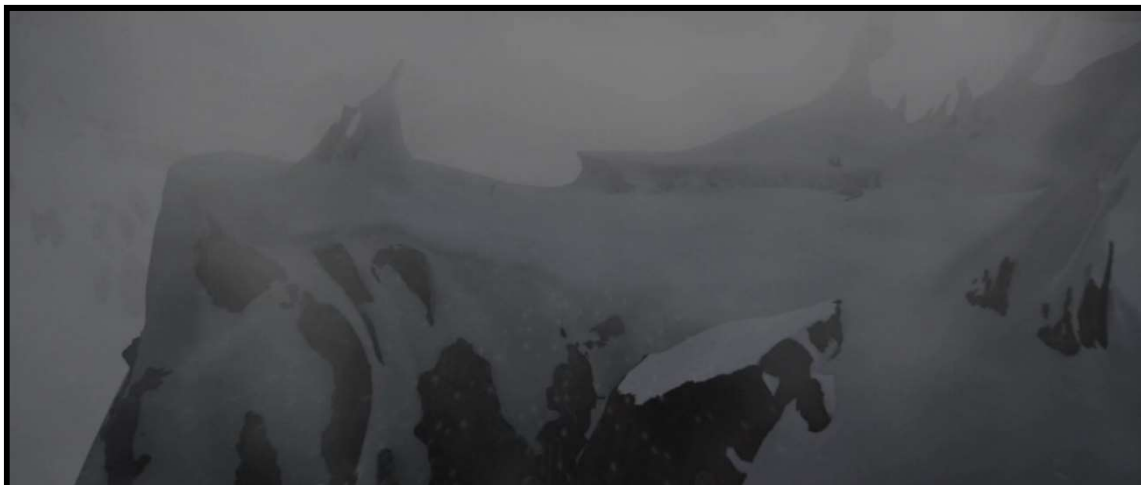


Figura 18 - Piamrat et al. (2011)

A Figura 19 exibe o frame do vídeo transmitido com a proposta de Zineb et al. (2016), este frame de acordo com as métricas de QoE já pode ser classificado como bom, apresentando pequenas manchas e distorções em alguns pixels.



Figura 19 - Zineb et al. (2016)

A Figura 20 exibe o frame do vídeo transmitido com a proposta da tese e de acordo com as métricas de QoE, o frame é classificado como excelente. Não possuindo alteração de tonalidade nos pixels e também não apresentando nenhuma distorção.



Figura 20 - Com o Sistema Fuzzy

## 5.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi feita uma avaliação de desempenho comparando a arquitetura da proposta em relação aos trabalhos relacionados. As análises de desempenho do consumo de energia, qualidade de serviço, mobilidade e qualidade de experiência, foram os critérios utilizados.

Quanto ao consumo de energia, por meio da métrica para avaliar o tempo de vida útil da bateria, o ganho da proposta, perante a abordagem original sem o Fuzzy, foi de 24%. Enquanto os trabalhos de Kammoun e Tabbane (2016), Aldhaibani et al. (2018), Piamrat et al. (2011) e Zineb et al. (2016), os ganhos respectivos foram de 3%, 7%, 9% e 11% em relação a arquitetura original.

Quanto ao QoS, através da métrica de *throughput*, foi possível observar que a arquitetura Fuzzy obteve um desempenho de 4,4 vezes superior à arquitetura original (500 Mbps). Na comparação entre desempenhos em relação ao segundo melhor resultado dentre os trabalhos relacionados (no caso, de Zineb et al. (2016)). A proposta alcançou um rendimento de 18% superior a abordagem de Zineb et al. (2016).

Na avaliação pela QoE a análise comparativa foi pelas métricas de PSNR, SSIM e VQM. Pela métrica de PSNR, o ganho da arquitetura Fuzzy foi de 32% em relação a abordagem original, e enquanto que, os arcabouços de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016) obtiveram rendimento respectivos de 21%, 14%, 7% e 4% perante a arquitetura original. Na métrica SSIM, através da comparação de diferença de desempenhos perante a abordagem original, a arquitetura

proposta, bem como os trabalhos de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016), alcançaram respectivamente os ganhos de 31%, 20%, 14%, 11%, e 3%. Em relação a métrica VQM, no qual determina o nível de qualidade de multimídia baseado na percepção do olho humano. A arquitetura Fuzzy obteve um nível de percepção de 91% da imagem original, ao passo que as propostas de Zineb et al. (2016), Piamrat et al. (2011), Aldhaibani et al. (2018) e, Kammoun e Tabbane (2016) alcançaram níveis de percepção do usuário, respectivamente de 78%, 72%, 64% e 60% em relação a imagem original.

Por meio da metodologia e avaliação descritos nesse capítulo, foi possível perceber ganhos consideráveis da arquitetura Fuzzy para decisão de *handover* em relação aos trabalhos relacionados. Tais ganhos permitiram comprovar as hipóteses definidas na seção 1.3 desta tese. Ou seja, que a identificação dinâmica dos critérios de eficiência energética e QoE, permitem equacionar o *tradeoff* entre o consumo de energia e a qualidade percebida pelo usuário. Além de que a adoção dos parâmetros como o nível da QoE, velocidade do dispositivo móvel e tempo restante de vida da bateria, possibilitou de forma eficiente manter o equilíbrio entre eficiência energética versus melhor qualidade da QoE na decisão do *handover*.

## 6. CONCLUSÕES

Os dispositivos móveis para a nova arquitetura de comunicação sem fio heterogênea precisam estar conectados a redes capazes de fornecer a melhor qualidade de experiência. No entanto, há ocasiões em que o importante é economizar energia e prolongar a vida útil da bateria, mesmo que isso reduza a qualidade, a fim de garantir a continuidade e evitar uma interrupção abrupta dos serviços.

Este trabalho de tese propõe uma arquitetura para redes sem fio, formado para redes IEEE 802.11n e LTE, que faz uso de regras Fuzzy para suportar uma abordagem de eficiência energética para economizar energia de bateria, mantendo a QoE em níveis satisfatórios.

O aspecto do *tradeoff* entre o nível do consumo de energia e a qualidade de experiência do usuário foi considerado por este trabalho de tese. Devido a diversidade de tecnologias de redes sem fio, no qual possuem diferentes largura de banda e desiguais consumos de energia. A proposta propôs como diferencial perante os trabalhos relacionados, um equilíbrio entre a largura de banda e consumo de energia.

As avaliações de simulação mostram os benefícios dessa solução, baseada em lógica Fuzzy, para um handover vertical transparente e com eficiência energética. Isto é, quanto aos ganhos relacionados ao consumo de energia, a proposta obteve 24% melhor desempenho do que a abordagem original. Na avaliação da qualidade de serviço por meio da métrica de vazão da rede, a arquitetura Fuzzy obteve um rendimento de 18% superior do que a abordagem desenvolvida por Zineb et al. (2016). Considerando a satisfação do usuário, nas métricas de PSNR, SSIM e VQM, os rendimentos alcançados foram respectivamente 32%, 31% e 91%, logo obtendo ganhos superiores aos trabalhos relacionados avaliados no capítulo 5 deste trabalho.

## 6.1 Principais Contribuições

As principais contribuições desta proposta até o momento foram com relação a estrutura da arquitetura no suporte a decisão de *handover* e quanto as avaliações de desempenho, nesse sentido as contribuições neste trabalho foram:

- A elaboração de um estudo avaliativo sobre os principais trabalhos relacionados sobre o contexto de redes heterogêneas que consideram a questão do balanceamento entre eficiência energética e QoE.
- A concepção e implementação de um algoritmo de inteligência computacional baseado em lógica Fuzzy para a decisão de *handover* em redes sem fio heterogêneas.
- A elaboração de um estudo sobre os principais modelos de baterias sobre o contexto de redes heterógenas
- Implementação de um modelo de bateria realista não-linear com base na proposta de Rakhmatov e Vrudhula (2001).
- A proposição do uso da qualidade de experiência como uma métrica de entrada no sistema Fuzzy.
- A elaboração de um balanceamento de carga distribuindo os dispositivos móveis entre as redes, proporcionado pela identificação dinâmica dos critérios pelo sistema Fuzzy.
- Mecanismo de gerenciamento de mobilidade distribuído para *handover* vertical entre as tecnologias 802.11 e LTE.
- Avaliação do impacto da Qualidade de Experiência no *handover*.
- Avaliação de modelo de consumo de energia de bateria não linear.
- A publicação de um periódico COQUEIRO (2019).

## 6.2 Trabalhos Futuros

Em estudos futuros, a arquitetura irá incluir novas tecnologias de redes sem fio, e novos parâmetros de variáveis linguística de entrada para o sistema Fuzzy. Bem como em cenários dinâmicos, considerando usuários de dispositivos móveis concorrentes nas redes.

Como o sistema Fuzzy apresenta como desvantagem uma maior complexidade quando utilizado vários critérios. Nesse sentido, a solução Fuzzy combinado com outro mecanismo que ofereça o suporte a múltiplos critérios, permitiria aliar a vantagem do Fuzzy quanto aos reduzidos atrasos, combinado com a vantagem de uma estratégia de decisão, que em função de um critério, selecione uma lista das melhores redes.

A otimização do modelo de bateria proposto, considerando suporte a diferentes tipos de baterias, bem como adição de efeitos como a temperatura da bateria do dispositivo móvel. Tais suportes permitem manter a precisão do tempo de vida da bateria considerando a heterogeneidade das tecnologias de rede e dos próprios dispositivos de comunicação do usuário.

A adoção de um mecanismo eficiente de troca de informações entre o dispositivo móvel e da rede no suporte a múltiplos atributos ou critérios para o sistema Fuzzy. No sentido que a troca de informações referentes a valores de diferentes parâmetros tanto de QoS, QoE e consumo de energia para a decisão de handover, não congestionem a rede ou que os níveis de atraso não interfiram na qualidade da aplicação multimídia.



### 6.3 Dificuldades Encontradas

Quanto ao desenvolvimento desta tese, dificuldades foram encontradas principalmente no processo de desenvolvimento e avaliação de desempenho da arquitetura. Entre as principais dificuldades encontradas pode-se citar:

- O procedimento de implementar o sistema Fuzzy no simulador *Network Simulator* envolveu um estudo aprofundado da lógica Fuzzy e do referido simulador de eventos discretos.
- A tese envolveu um estudo aprofundado sobre o 802.11n e LTE, para a utilização dos mesmos no simulador, devido a não possibilidade da utilização equipamentos de redes para os testes práticos;
- A implementação da proposta, trabalhos relacionados e criação dos cenários de redes para avaliação de desempenho no simulador. Foi realizado um estudo das linguagens de programação C++(implementação da arquitetura Fuzzy) e *Otcl*(desenvolvimento dos cenários de redes);
- O estudo de modelos de bateria realísticos, dos principais modelos matemáticos que os envolvem e sua inserção no simulador quanto implementação e intensidade computacional;
- A determinação de intervalos de confiança para coleta de resultados no processo de simulação. Teve como dificuldade uma elevada quantidade de repetições nas simulações, tendo como consequência grande geração de dados armazenados e elevado tempo de execução nas simulações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIT MANSOUR, A.; ENNEYA, N.; OUADOU, M. **A velocity-aware handover trigger in two-tier heterogeneous networks.** *Future Internet*, v. 10, n. 1, p. 9, 2018.

ALI, T.; SAQUIB, M. **Analytical framework for WLAN-cellular voice handover evaluation.** *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 12, n. 3, p. 447-460, 2013.

ALDHAIBANI, O., et al. **"An SDN-Based Architecture for Smart Handover to Improve QoE in IEEE 802.11 WLANs."** *2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. IEEE, 2018.

ALI, T. M.; SAQUIB, M. **Analytical framework for WLAN-cellular voice handover evaluation.** *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 12, n. 3, p. 447-460, 2013.

BRITO, I. V. S.; FIGUEIREDO, G. B. **"Improving QoS and QoE through seamless handoff in software-defined IEEE 802.11 mesh networks."** *IEEE Communications Letters* 21.11 (2017): 2484-2487.

BECVAR, Z.; MACH, P. **Mitigation of redundant handovers to femtocells by estimation of throughput gain.** *Mobile Information Systems*, v.9 n.4, p.315-330, 2013.

CHANDAVARKAR, B. R.; REDDY, G. R. M. **Survey paper: Mobility management in heterogeneous wireless networks.** *Procedia Engineering*, v. 30, p. 113-123, 2012.

CHEGETANAI, G.; O'REILLY, G. B. **"Survey on Simulation tools for Wireless Mobile Ad Hoc Networks"**, *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*, pp. 1-7, Mar. 2015.

CHEN, J. et al. **"QoE-Aware Intelligent Vertical Handoff Scheme Over Heterogeneous Wireless Access Networks."** *IEEE Access* 6 (2018): 38285-38293.

CHIEN, S. F. et al. **Smart predictive trigger for effective handover in wireless networks.** In: *2008 IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2008. p. 2175-2181.

CHEN, M.; RINCON-MORA, G. A. **Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance**. IEEE transactions on energy conversion, v. 21, n. 2, p. 504-511, 2006.

CHHAGAN, L.; LAXMI, V; GAUR, M. S. **“Video streaming over MANETs: Testing and analysis using real-time emulation”**, Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 190-195, 2013.

CHIASSEIRINI, C. F.; RAO, R. **Improving battery performance by using traffic shaping techniques**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v. 19, n. 7, p. 1385-1394, 2001.

**CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast, 2016–2021**. San Jose, CA: Cisco, 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-forecast-qa.html>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

COQUEIRO, T. et al. **A Fuzzy Logic System for Vertical Handover and Maximizing Battery Lifetime in Heterogeneous Wireless Multimedia Networks**. Wireless Communications and Mobile Computing, v. 2019, 2019.

DAHLAM, E. PARKVALL, S. SKÖLD, J. **“4G LTE/LTE – Advanced for Mobile Broadband”**. Academic Press. ISBN: 978 – 0 – 12 – 385489 – 6. 2011

DERUYCK, M. et al. **“Comparison of power consumption of mobile WiMAX, HSPA and LTE access networks”**. Conference on Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE). pp. 1 – 7. 2010.

DOYLE, M.; FULLER, T. F.; NEWMAN, J. **Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell**. Journal of the Electrochemical society, v. 140, n. 6, p. 1526-1533, 1993.

EBERHART, R.; YUHUI, S. “**Computational Intelligence: Concepts to Implementation**”, Imprint: Morgan Kaufmann, Elsevier, ISBN 9781558607590, Print, pp. 269-372, 2007.

ENGELKE, U. et al. “**Visual Attention in Quality Assessment**”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 28, N° 6, pp. 50-59, 2011

ENGELKE, U.; ZEPERNICK, H. J. **Perceptual-based Quality Metrics for Image and Video Services: A Survey**. In: Next Generation Internet Networks, 3rd Euro NGI Conference on, p.190-197, 2007.

**Evalvid**. <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/>. Access in 2018.

FULLER, T. F.; DOYLE, M.; N., John. **Relaxation phenomena in lithium-ion-insertion cells**. Journal of the Electrochemical Society, v. 141, n. 4, p. 982-990, 1994.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHUIT, Ricardo. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos Fuzzy, lógica Fuzzy e aplicações**. Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress/ Tutorials - IFSA95, pages 01 – 38., July 1995.

GOUDARZI, P.; HOSSEINPOUR, M. “**Video Transmission over MANETs with enhance quality of experience**”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 4, Pp. 2217-2225, Jan 2011.

GUSTAFSSON, Eva.; JONSSON, Annika. “**Always best connected.**” *IEEE Wireless communications* 10.1 (2003): 49-55.

HANDY, M.; TIMMERMANN, D. **Simulation of mobile wireless networks with accurate modelling of non-linear battery effects**. In: Proc. Int’l. Conf. Applied Simulation and Modeling. 2003. p. 532-537.

**IEEE 802.11. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control MAC and Physical Layer PHY Specifications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.

ITU-R Recommendation P.800, “**Methods for objective and subjective assessment of quality**”, Technical Report, 1996

ITU-T Recommendation P.910, “**Subjective video quality assessment methods for multimedia applications**”, Technical Report, 2008.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. R. “**Which battery model to use?**”, IET Software, Vol. 3, N°. 6, pp. 445-457, Dec 2009

JONGERDEN, M.; HAVERKORT, B. **Battery modeling**. Thecnical Report in Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2008.

KADAM, A. D.; WAGH, S. S. “**Evaluating MANET routing protocols under multimedia traffic**”, Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, pp. 1-5, 2013.

KAMMOUN, A.; TABBANE, N. “**Fuzzy utility decisional vertical handover algorithm for enhancing network performances.**” *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2016 5th International Conference on.* IEEE, 2016.

KLAUE, J.; RATHKE, B.; WOLISZ, A. **Evalvid—A framework for video transmission and quality evaluation**. In: International conference on modelling techniques and tools for computer performance evaluation. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. p. 255-272.

KIM, T; QIAO, W. **A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 26, n. 4, p. 1172-1180, 2011.

KASSAR, M.; KERVELLA, B.; PUJOLLE, Guy. **An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks**. Computer Communications, v. 31, n. 10, p. 2607-2620, 2008.

KAMMOUN, Amal; TABBANE, Nabil. **Fuzzy utility decisional vertical handover algorithm for enhancing network performances**. In: 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). IEEE, 2016. p. 337-343.

KUMAR, A. et al. **“Simulators for Wireless Networks: A Comparative Study”**, International Conference on Computing Sciences (ICCS), pp. 338-342, Sep. 2012.

LAHIRI, K. et al. **Battery-driven system design: A new frontier in low power design**. In: Proceedings of the 2002 Asia and South Pacific Design Automation Conference. IEEE Computer Society, 2002. p. 261.

MA, C.; YANG, Y.. **A battery-aware scheme for routing in wireless ad hoc networks**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 60, n. 8, p. 3919-3932, 2011.

MA, D; MA, M. **A QoS oriented vertical handoff scheme for WiMAX/WLAN overlay networks**. IEEE Transactions on parallel and distributed systems, v. 23, n. 4, p. 598-606, 2012.

MALATHY, E. M.; MUTHUSWAMY, V. **State of art: vertical handover decision schemes in next-generation wireless network**. Journal of Communications and Information Networks, v. 3, n. 1, p. 43-52, 2018.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. **“An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy logic controller**. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, n. 1-13, 1975.

MANSOUR, A. A.; ENNEYA, N.; OUADOU, M. **"A velocity-aware handover trigger in two-tier heterogeneous networks."** *Future Internet* 10.1 (2018): 9.

MANSOURI, M.; CHERKAOUI, L. **"A battery level aware MADM combination for the vertical handover decision making."** *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017 13th International*. IEEE, 2017.

MARIE, L; NILSSON, M.; **Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment**. p.: 1548–1557, 2001.

OROSZ, P. et al. **“A case study on correlating video QoS and QoE”**. IEEE Network Operations and Management Symposium, pp. 1-5, 2014.

PANIGRAHI, D. et al. **Battery life estimation of mobile embedded systems**. In: VLSI Design 2001. Fourteenth International Conference on VLSI Design. IEEE, 2001. p. 57-63.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **“An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. Cambridge, USA: MIT Press, 1998.

PIAMRAT, K. et al. **“QoE-aware vertical handover in wireless heterogeneous networks.”** *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*. IEEE, 2011.

RANI, P.; BAGHLA, S.; MONGA, H. **“Energy Efficient Network Selection in Heterogeneous Network using TOPSIS.”** 2017

RAKHMATOV, D. N.; VRUDHULA, S. B. K. **“An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems.”** IEEE/ACM Proceedings of the International Conference on Computer-aided design. 2001.

RUFINO, N. M. d. O. **Segurança em Redes sem Fio**. [S.l.]: Novatec Editora, 2015.

SADIQ, A. S.; BAKAR, K. A. **“A Fuzzy logic approach for reducing handover latency in wireless networks.”** *Network Protocols and Algorithms* 2.4 (2011): 61-87.

SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. **“LTE: The UMTS Long Term Evolution”**. John Wiley & Sons, Ltd. 2ª Ed. ISBN: 978 – 0 – 47 – 066025 – 6. 2011.

SILVA, B. F.; SAUSEN, P. S.; SAUSEN, A. **Parameters estimation of the Rakhmatov and Vrudhula model from the optimization method search in improved network**. ISRN Applied Mathematics, v. 2014, 2014.

SILVA, K.C; BECVAR, Z., FRANCES, C.R.L *Adaptive Hysteresis Margin Based on Fuzzy Logic for Handover in Mobile Networks with Dense Small cells*. The Multidisciplinary Open Access Journal IEEE ACCESS, 2018.

SONG, L.; EVANS, J. W. **Electrochemical-thermal model of lithium polymer batteries**. Journal of the Electrochemical Society, v. 147, n. 6, p. 2086-2095, 2000.

SONG, W.; TJONDRONEGORO, D. W. **“Acceptability-Based QoE Models for Mobile Video”**. IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 16, N°. 3, pp. 738-750, 2014.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. **“Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control**. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, n 1, p. 116-132, 1995.

TUYSUZ, M. F. **"An energy-efficient QoS-based network selection scheme over heterogeneous WLAN–3G networks."** *Computer Networks* 75 (2014): 113-133.

TUYSUZ, M. F.; TRESTIAN, R. **"Energy-efficient vertical handover parameters, classification and solutions over wireless heterogeneous networks: a comprehensive survey."** *Wireless Personal Communications* 97.1 (2017): 1155-1184.

WANG, Z; LU, L.; BOVIC, A.; **Video quality assessment based on structural distortion measurement, Signal Processing: Image Communication**, vol. 19, no. 2, 2004. Wi-Fi Alliance

WINKLER, S. **Perceptual video quality metrics** – a review, in Digital Video Image Quality and Perceptual Coding, cap.5, CRC Press, 2005

XU, Y. et al. **"QoE-aware mobile association and resource allocation over wireless heterogeneous networks."** *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*. IEEE, 2014.

YALA, L.; FRANGOUDIS, P. A.; KSENTINI, A. **"QoE-Aware Computing Resource Allocation for CDN-as-a-Service Provision."** *GLOBECOM*. 2016.



YAN, X.; ŞEKERCIOĞLU, Y. A.; NARAYANAN. **A survey of vertical handover decision algorithms in Fourth Generation heterogeneous wireless networks.** *Computer networks*, v. 54, n. 11, p. 1848-1863, 2010.

ZADEH, L. A. **"Fuzzy sets, Information and Control."** Vol. 8, 1965, pp. 338-353.

ZHANG, B.; QI, W.; ZHANG, J. **"An energy efficiency and ping-pong handover ratio optimization in two-tier heterogeneous networks."** *Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 2018 IEEE 8th Annual*. IEEE, 2018.

ZINEB, A. B.; AYADI, M.; TABBANE, S. **QoE-based vertical handover decision management for cognitive networks using ANN.** In: 2017 Sixth International Conference on Communications and Networking (ComNet). IEEE, 2017. p. 1-7.

ZINEB, A. B.; AYADI, M.; TABBANE, S. **"QoE-Fuzzy VHO approach for heterogeneous wireless networks (HWNs)."** *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. IEEE, 2016.

\_\_\_\_\_ **"QoE-based vertical handover decision management for cognitive networks using ANN."** *Communications and Networking (ComNet), 2017 Sixth International Conference on*. IEEE, 2017.

ZOU, L.; TRESTIAN, R.; and MUNTEAN, G. M. **"E 3 DOAS: Balancing QoE and energy-saving for multi-device adaptation in future mobile wireless video delivery."** *IEEE Transactions on Broadcasting* 64.1 (2018): 26-40.

## ANEXOS

O código – fonte utilizado para simulação do ambiente de redes sem fio heterogêneo.

```

set max_fragmented_size 1024

#add udp header(8 bytes) and IP header (20bytes)

set packetSize 1052

#check input parameters
if {$argc != 3} {
    puts ""
    puts "Wrong Number of Arguments! No arguments in this topology"
    puts ""
    exit (1)
}

global ns

#random used in movement of MN
set seed [lindex $argv 0]
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]
}

#defines function for flushing and closing files
proc finish {} {
    global ns f namtrace
    $ns flush-trace
    close $f
    close $namtrace
    puts " Simulation ended."
    exit 0
}

#$defaultRNG seed [lindex $argv 0]
Mac/802_11 set pr_limit_ [lindex $argv 1] ;#1.0 for link down only
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set shutdown_on_ack_ [lindex $argv
2]

# set global variables
set output_dir .
set traffic_start 5
set traffic_stop 100
set simulation_stop 100

#create the simulator
set ns [new Simulator]
#$ns use-newtrace

#open file for trace
set f [open old-video.tr w]
$ns trace-all $f

set nb_mn 30

$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 45 ;# domain number

```



```

# Now we add 802.11 nodes
#

# parameter for wireless nodes
set opt(chan)          Channel/WirelessChannel    ;# channel type for 802.11
set opt(prop)          Propagation/TwoRayGround   ;# radio-propagation model
802.11
set opt(netif)         Phy/WirelessPhy           ;# network interface type 802.11
set opt(mac)           Mac/802_11                ;# MAC type 802.11
set opt(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface queue type 802.11
set opt(ll)            LL                         ;# link layer type 802.11
set opt(ant)           Antenna/OmniAntenna        ;# antenna model 802.11
set opt(ifqlen)        50                        ;# max packet in ifq 802.11
set opt(adhocRouting)  DSDV                      ;# routing protocol 802.11
set opt(umtsRouting)   ""                       ;# routing for UMTS (to reset
node config)

set opt(x)              2000                      ;# X dimension of the topography
set opt(y)              2000                      ;# Y dimension of the topography

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

#create the topography
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
#puts "Topology created"
set chan [new $opt(chan)]

# create God
create-god 30                                     ;# give the number of nodes

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_]]

# configure Access Points
$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

# configure Base station 802.11
set bstation802 [$ns node 10.0.0] ;
$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]"
# we need to set the BSS for the base station
set bstationMac [$bstation802 getMac 0]
set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]
puts "bss_id for bstation=$AP_ADDR_0"
$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0
$bstationMac enable-beacon

```

```

set bstation802_1 [$ns node 11.0.0] ;
$bstation802_1 set X_ 620.0
$bstation802_1 set Y_ 350.0
$bstation802_1 set Z_ 0.0
puts "bstation802_1: tcl=$bstation802_1; id=[$bstation802_1 id];
addr=[$bstation802_1 node-addr]"
# we need to set the BSS for the base station
set bstationMac_1 [$bstation802_1 getMac 0]
set AP_ADDR_1 [$bstationMac_1 id]
puts "bss_id for bstation=$AP_ADDR_1"
$bstationMac_1 bss_id $AP_ADDR_1
$bstationMac_1 enable-beacon

# creation of the wireless interface 802.11
$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON
for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
set ifacell_($i) [$ns node 10.0.$i] ;# node
id is 8.
$ifacell_($i) random-motion 0 ;# disable
random motion
$ifacell_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation802 node-addr]] ;#attach
mn to basestation
$ifacell_($i) set X_ 450.$i
$ifacell_($i) set Y_ 330.0
$ifacell_($i) set Z_ 0.0
# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.
$ns at 5.0 "$ifacell_($i) setdest 750.($i) 330.0 3.0"
puts "ifacell_($i): tcl=$ifacell_($i); id=[$ifacell_($i) id]; addr=[$ifacell_($i)
node-addr]"
}

# add link to backbone
$ns duplex-link $bstation802 $router6 100Mb 40ms CBQ
$ns duplex-link $bstation802_1 $router7 100Mb 25ms CBQ

set opt(netif)          Phy/WirelessPhy/OFDM
set opt(mac)            Mac/LTE

# radius =
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 7.91016e-15

Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

# configure Access Points
$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

set lte [$ns node 9.0.0] ;
$lte set X_ 450
$lte set Y_ 350
$lte set Z_ 0.0
puts "lte: tcl=$lte; id=[$lte id]; addr=[$lte node-addr]"
set clas [new SDUClassifier/Dest]
[$lte set mac_(0)] add-classifier $clas
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set bs_sched [new LTEScheduler/BS]
$bs_sched set-default-modulation $default_modulation
[$lte set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched
[$lte set mac_(0)] set-channel 1

set lte_1 [$ns node 12.0.0] ;
$lte_1 set X_ 670
$lte_1 set Y_ 350
$lte_1 set Z_ 0.0
puts "lte_1: tcl=$lte_1; id=[$lte_1 id]; addr=[$lte_1 node-addr]"
set clas_1 [new SDUClassifier/Dest]
[$lte_1 set mac_(0)] add-classifier $clas_1
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set bs_sched_1 [new LTEScheduler/BS]
$bs_sched_1 set-default-modulation $default_modulation
[$lte_1 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched_1
[$lte_1 set mac_(0)] set-channel 0

# creation of the wireless interface 802.16
$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON
for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
set iface16_($i) [$ns node 9.0.$i] ;# node
id is 8. ;# disable
$iface16_($i) random-motion 0 ;# disable
random motion
$iface16_($i) base-station [AddrParams addr2id [$lte node-addr]] ;#attach mn to
basestation
$iface16_($i) set X_ 450.$i
$iface16_($i) set Y_ 330.0
$iface16_($i) set Z_ 0.0
set clas_($i) [new SDUClassifier/Dest]
[$iface16_($i) set mac_(0)] add-classifier $clas_($i)
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
set ss_sched($i) [new LTEScheduler/SS]
[$iface16_($i) set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched($i)
[$iface16_($i) set mac_(0)] set-channel 1
# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.
$ns at 5.0 "$iface16_($i) setdest 750.($i) 330.0 3.0"
puts "iface16_($i): tcl=$iface16_($i); id=[$iface16_($i) id]; addr=[$iface16_($i)
node-addr]"
}

$ns duplex-link $lte $router6 100Mb 40ms CBQ
$ns duplex-link $lte_1 $router8 100Mb 25ms CBQ

$ns duplex-link-op $router0 $router1 orient right
$ns duplex-link-op $router1 $router2 orient right
$ns duplex-link-op $router2 $router3 orient right
$ns duplex-link-op $router1 $router4 orient down

```

```

$ns duplex-link-op $router2 $router5 orient down
$ns duplex-link-op $router4 $router6 orient left-down
$ns duplex-link-op $router4 $router7 orient right-down
$ns duplex-link-op $router5 $router8 orient right-down

$ns duplex-link-op $router6 $lte orient left-down
$ns duplex-link-op $router6 $bstation802 orient right-down

$ns duplex-link-op $router7 $bstation802_1 orient down

$ns duplex-link-op $router8 $lte_1 orient down

# add interfaces to MultiFaceNode
for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    $multiFaceNode($i) add-interface-node $iface11_($i)
    $multiFaceNode($i) add-interface-node $iface16_($i)
}

# install ND modules

# now WLAN
set nd_bs [$bstation802 install-nd]
$nd_bs set-router TRUE
$nd_bs router-lifetime 1800

set nd_bs3 [$bstation802_1 install-nd]
$nd_bs3 set-router TRUE
$nd_bs3 router-lifetime 1800

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    set nd_mn_($i) [$iface11_($i) install-nd]
}

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

set nd_bs5 [$lte_1 install-nd]
$nd_bs5 set-router TRUE
$nd_bs5 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    set nd_mn2_($i) [$iface16_($i) install-nd]
}

# install interface manager into multi-interface node and CN
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set debug_ 1

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    set handover($i) [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2]
    $multiFaceNode($i) install-ifmanager $handover($i)
    $nd_mn_($i) set-ifmanager $handover($i)
    $handover($i) nd_mac $nd_mn_($i) [$iface11_($i) set mac_(0)]
    $nd_mn2_($i) set-ifmanager $handover($i)
    $handover($i) nd_mac $nd_mn2_($i) [$iface16_($i) set mac_(0)] ;
}

set ifmgmt_cn [$router0 install-default-ifmanager]

# install MIH in multi-interface node
for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    set mih($i) [$multiFaceNode($i) install-mih]
}

```

```

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
$handover($i) connect-mih $mih($i)
}

# install MIH on AP/BS
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 [$bstation802_1 install-mih]
set tmp_bs [$bstation802_1 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$lte install-mih]
set tmp_bs [$lte set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$lte_1 install-mih]
set tmp_bs [$lte_1 set mac_(0)]
$tmp_bs mih $mih_bs
$mih_bs add-mac $tmp_bs

# Now we can register the MIH module with all the MACs
for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
set tmp2 [$iface11_($i) set mac_(0)] ;#in 802.11 one interface is created
$tmp2 mih $mih($i)
$mih($i) add-mac $tmp2
set tmp2 [$iface16_($i) set mac_(0)]
$tmp2 mih $mih($i)
$mih($i) add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC
}

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set Fuzzy($i) [new FuzzySystem]
$Fuzzy($i) set fuzzifyFlag 0
$Fuzzy($i) set outputCombinationFlag 1
$Fuzzy($i) set fuzzifyFlag 1
$Fuzzy($i) result-file "result.txt"
$Fuzzy($i) read-input-file "handover-rules.txt"
$Fuzzy($i) print-Fuzzy-rule-set "Fuzzy-rules.txt"
$handover($i) install-Fuzzy-system $Fuzzy($i)

}

# set the starting time for Router Advertisements
$ns at 2 "$nd_bs start-ra"
$ns at 2 "$nd_bs2 start-ra"
$ns at 2 "$nd_bs3 start-ra"

$ns at 2 "$nd_bs5 start-ra"

#####
for {set i 1} {$i < 2} {incr i} {

set udp_($i) [new Agent/myUDP]

$ns attach-agent $router0 $udp_($i)

$udp_($i) set packetSize_ $packetSize

```



```

$udp_($i) set fid_ [expr $i]
$ns bind-flowid-to-SBTS [expr $i]

$udp_($i) set_filename sd_a0$i

set null_($i) [new Agent/myEvalvid_Sink]

$ns attach-agent $multiFaceNode($i) $null_($i)

$ns connect $udp_($i) $null_($i)

$null_($i) set_filename rd_a0$i

set original_file_name_($i) st_a01
set trace_file_name_($i) video$i.dat
set original_file_id_($i) [open $original_file_name_($i) r]
set trace_file_id_($i) [open $trace_file_name_($i) w]

set pre_time_($i) 0

while {[eof $original_file_id_($i)] == 0} {
    gets $original_file_id_($i) current_line

    scan $current_line "%d%s%d%d%f" no_ frametype_ length_ tmp1_ tmp2_

    #set time [expr int(($tmp2_ - $pre_time)*1000000.0)]
    set time [expr 1000 * 1000/30]

    if { $frametype_ == "I" } {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }

    if { $frametype_ == "P" } {
        set type_v 2
        set prio_p 0
    }

    if { $frametype_ == "B" } {
        set type_v 3
        set prio_p 0
    }
}

```

```

    }

    if { $frametype_ == "H" } {
        set type_v 1
        set prio_p 0
    }

    puts $trace_file_id_($i) "$time $length_ $type_v $prio_p $max_fragmented_size"
    set pre_time $tmp2_
}

close $original_file_id_($i)
close $trace_file_id_($i)
set end_sim_time_($i) $tmp2_
puts "$end_sim_time_($i)"

set trace_file_($i) [new Tracefile]
$trace_file_($i) filename $trace_file_name_($i)
set video_($i) [new Application/Traffic/myEvalvid]
$video_($i) attach-agent $udp_($i)
$video_($i) attach-tracefile $trace_file_($i)
$handover($i) add-flow $null_($i) $udp_($i) $iface16_($i) 1
#-----
$ns at 5.0 "$video_($i) start"
$ns at 100.1 "$video_($i) stop"
}
$ns at 100.1 "finish"

#####

#####
for {set i 2} {$i <= $nb_mn} {incr i} {
    set source_($i) [new Agent/UDP]
    $source_($i) set fid_ [expr $i]
    $ns color [expr $i] "red"
    $ns bind-flowid-to-SBTS [expr $i]

    set sink_($i) [new Agent/LossMonitor]
    $ns attach-agent $router0 $source_($i)
    $ns attach-agent $multiFaceNode($i) $sink_($i)
    $ns connect $source_($i) $sink_($i)

    set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]
    $source_($i) set packetSize_ 100

```

```
$cbr_($i) set packetSize_ 100
$cbr_($i) set rate_ 1Mb
$cbr_($i) attach-agent $source_($i)

$ns at 5.0 "$cbr_($i) start"
$ns at 5.0 "$ns trace-annotate \"Starting UDP CBR flow from CN to MN COLOR: red\""

$handover($i) add-flow $sink_($i) $source_($i) $iface16_($i) 1
}
#####

$ns run
```