



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

KETYLLEN DA COSTA SILVA

**ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO *HANDOVER*
EM REDES MÓVEIS DENSIFICADAS**

TD:09/2018

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018**



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

KETYLLEN DA COSTA SILVA

**ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO *HANDOVER*
EM REDES MÓVEIS DENSIFICADAS**

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

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018**



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

**ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO *HANDOVER*
EM REDES MÓVEIS DENSIFICADAS**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM ____ / ____ / ____

Professor Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

ORIENTADOR

Professora Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araújo

CO-ORIENTADORA

Professor Dr. Diego Lisboa Cardoso

MEMBRO PPGEE/UFPA

Professor Dr. Marcelino Silva da Silva

MEMBRO PPGEE/UFPA

Professor Dr. Tássio Costa de Carvalho
MEMBRO EXTERNO - FACOMP/UFPA

Professor Dr. Marcos César da Rocha Seruffo
MEMBRO EXTERNO - FCT/UFPA

Visto:

Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
COORDENADORA DO PPGEE/ITEC/UFPA

“Se enxerguei mais longe foi porque me apoiei em ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter concedido a mim uma vida tão abençoada e pela grande oportunidade em realizar este sonho. Obrigada por Sua força imensurável!

Aos meus pais Lobato e Diana, por serem a extensão da minha vida na terra, pelo amor e apoio incondicional, por sempre me indicarem os melhores caminhos a serem seguidos.

Aos meus irmãos Kelly, Erick, Mariane e Keytson que juntamente com meus pais, e meus dois sobrinhos Pedro Lukas e Maria Eduarda, me permitirem essa família de tanto amor. Eu amo vocês!

Ao meu amor Luís Augusto, pela ajuda contínua ao longo dessa trajetória, por todas as normatizações da ABNT, pelos elogios “coruja” e, principalmente pelo amor dedicado a mim.

Aos meus avós paternos Jurita e Mariana, e aos maternos Laurindo (*in memoriam*) e Osvaldina, por contribuírem para a minha formação como ser humano.

Ao meu professor e orientador Dr. Carlos Renato Lisboa Francês por ter me acolhido durante toda minha trajetória acadêmica. Por ter apoiado e melhorado todas as ideias que tive, pelas oportunidades e pelo apoio em todos os momentos, muito obrigada.

A minha co-orientadora Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araújo por ser essa pessoa tão querida, que sempre te enche de forças pra seguir adiante. Muito obrigada pela amizade e por toda ajuda de sempre.

Ao meu supervisor no período de mobilidade no laboratório 5G Mobile Research em Praga, professor Dr. Zdeněk Bečvář. Obrigada pela acolhida e por todo o aprendizado compartilhado.

Aos amigos e amigas pela amizade e apoio de todos os dias compartilhados. Por serem sempre, a presença mais intensa e necessária ao longo dessa trajetória.

A todos os amigos integrantes do LPRAD (Laboratório de Planejamento de Redes de Alto desempenho) por cada dia de convivência e aprendizado.

Aos professores do PPGEE e aos demais que contribuíram com minha formação, não só com instrução técnica, mas com princípios que substancialmente se fizeram e fazem importantes para a minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização desta tese.

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas.....	VIII
Lista de Figuras.....	XI
Lista de Tabelas.....	XIII
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1 – Introdução.....	16
1.1. Definição do problema.....	20
1.2. Objetivos.....	20
1.2.1. Objetivos Específicos.....	20
1.3. Organização da Tese.....	21
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	23
2.1. Considerações Iniciais.....	23
2.2. A evolução das Redes Móveis.....	23
2.3. LTE.....	24
2.3.1. Arquitetura LTE.....	26
2.3.2. Capacidade e Mobilidade.....	28
2.3.3. <i>Handover</i>	28
2.3.3.1. O processo de <i>Handover</i>	30
2.4. 4G e o <i>LTE-Advanced</i>	32
2.5. Redes Heterogêneas.....	33
2.6. <i>Small cells</i>	35
2.7. Inteligência Computacional.....	36
2.7.1. Lógica <i>Fuzzy</i>	38
2.8. Considerações Finais.....	39
Capítulo 3 – Trabalhos Correlatos.....	40
3.1. Considerações Iniciais.....	40
3.2. Estratégias de <i>handover</i> em redes celulares	40
3.2.1. Algoritmo FMCCS.....	43
3.2.2. Algoritmo STHA.....	45
3.3. Considerações Finais.....	51
Capítulo 4 – <i>Fuzzy-Oriented Handover Decision (FOHD)</i>– Uma abordagem algorítmica de tomada de decisão de <i>handover</i> baseado em lógica <i>fuzzy</i>.....	52
4.1. Considerações Iniciais.....	52
4.2. Decisão de <i>Handover</i> Convencional.....	52
4.3. Decisão de <i>Handover</i> baseada em Margem de Histerese dinâmica.....	52
4.4. Sistema <i>Fuzzy</i> para determinar a Histerese Dinâmica.....	55
4.5. Considerações Finais.....	62
Capítulo 5 – Avaliações de Desempenho.....	63
5.1. Considerações Iniciais.....	63
5.2. Ambiente de Simulação.....	63
5.3. Métricas de Avaliação de Desempenho	66
5.4. Algoritmos Competitivos.....	68
5.5. Comparativo de Desempenho com Algoritmos Competitivos.....	68
5.6. Análises do Impacto das Entradas <i>Fuzzy</i> no desempenho do sistema.....	72
5.7. Considerações Finais.....	75
Capítulo 6 – Conclusão.....	77
6.1. Contribuições da tese.....	78
6.2. Trabalhos Futuros.....	80

6.3. Dificuldades Encontradas.....	81
Referências.....	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

2G	Segunda Geração de Telefonia Móvel
3G	Terceira Geração de Telefonia Móvel
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Quarta Geração de Telefonia Móvel
5G	Quinta Geração de Telefonia Móvel
BC	Best Connection
CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eNodeB	Enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EUA	Estados Unidos da América
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplex
FOHD	Fuzzy-Oriented Handover Decision
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System Mobile
HeNB	Home Enhanced NodeB
HF	<i>Handover</i> Failure
HNB	Home NodeB
HO	<i>Handover</i>
HPP	Handover Ping pong
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMT	Internet Mobile Telecommunication
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
Kbps	Kilobits por segundo
KPI	Key Performance Indicator

LAN	Local Area Network
LPRAD	Laboratório de Planejamento de Redes de Alto desempenho
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MTS	Minimum Time of Stay
NeNB	Neighboring <i>eNodeB</i>
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCC	Política e Controle de Carga
PCRF	Policy and Charging Rule Function
P-GW	Packet Data Network Gateway
PRB	Physical Resource Blocks
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
RSS	Received Signal Strength
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
SAE	System Architecture Evolution
SCeNB	Small cell <i>eNodeB</i>
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SENB	Serving <i>eNodeB</i>
SON	Self Organizing Networks
S-GW	Serving Gateway
SMS	Short Message Service
STHA	Self-tuning Handover Algorithm
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TeNB	Target <i>eNodeB</i>
tSCeNB	Time Spent in SCeNB
tconnSC	Time Connected in SCeNB
TTT	Time To Trigger
UE	User Equipment

UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIFI	Wireless Fidelity
WIMAX	World wide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Lista de Figuras

Figura 1.1. Tendência de crescimento do tráfego mundial de dados móveis.....	16
Figura 1.2. Dispositivos móveis globais por 2G, 3G, 4G.....	17
Figura 1.3. Crescimento do tráfego móvel de dados 4G.....	18
Figura 1.4. Arquitetura do sistema 5G.....	19
Figura 2.1. Arquitetura LTE.....	26
Figura 2.2. Etapas do <i>handover</i>	31
Figura 2.3. Topologia HetNet utilizando <i>macrocells</i> , <i>picocells</i> , <i>small cells</i> e <i>relay</i>	34
Figura 3.1. <i>Handover failure ratio</i> para vários estados de mobilidade e para $\Delta_{HM} = 2\text{dB}$ (plot superior) e $\Delta_{HM}=4\text{dB}$ (plot inferior).....	47
Figura 3.2. <i>Handover Ping pong ratio</i> para vários estados de mobilidade e para $\Delta_{HM} = 2\text{dB}$ (plot superior) e $\Delta_{HM} = 4\text{dB}$ (plot inferior).....	48
Figura 3.3. <i>Ping pong ratio sobre o MTS</i>	48
Figura 4.1.a. Fluxograma da estratégia para otimização da histerese.....	54
Figura 4.1.b. Estratégia para otimização da histerese no decorrer do tempo.....	55
Figura 4.2. Ilustração da arquitetura de lógica <i>fuzzy</i> com entradas e saída do sistema proposto para o algoritmo de decisão de <i>handover</i>	56
Figura 4.3. Ilustração das funções de pertinência de um sistema de lógica <i>fuzzy</i>	57
Figura 4.4. Funções de pertinência para as entradas: μ_{VEL} , μ_{RSRP} e μ_{RSRQ}	58
Figura 4.5. Função de pertinência para a saída do sistema <i>fuzzy</i> proposto $\mu_{HM,d}$	60
Figura 5.1. Blocos funcionais da modelagem do sistema.....	64
Figura 5.2. Exemplo do cenário de simulação, onde temos as eNBs representadas por quadrados vermelhos, as SCeNBs pela variável ‘x’ em preto, e os UEs por círculos azuis.....	65
Figura 5.3. Processo de monitoramento de link de rádio e processo de <i>handover</i>	67
Figura 5.4. Impacto do <i>average number of handover</i>	69
Figura 5.5. Impacto do número SCeNBs no <i>handover failure ratio</i>	70
Figura 5.6. Impacto do número SCeNBs no <i>handover ping pong ratio</i> para $T_{MTS}=2\text{s}$	71
Figura 5.7. Impacto do T_{MTS} no <i>handover ping pong ratio</i> para 200 SCeNBs (linhas sólidas) e 50 SCeNBs (linhas tracejadas).....	71
Figura 5.8. Impacto do <i>average time spent in SCeNBs</i>	72
Figura 5.9. Impacto de várias combinações das entradas do sistema <i>fuzzy</i> (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ) no <i>average number of performed handover</i>	73

Figura 5.10. Impacto de várias combinações das entradas do sistema <i>fuzzy</i> (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ) no <i>handover failure ratio</i>	73
Figura 5.11. Impacto de várias combinações das entradas do sistema <i>fuzzy</i> (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ) no <i>handover ping pong ratio</i>	74
Figura 5.12. Impacto de várias combinações das entradas do sistema <i>fuzzy</i> (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ) no <i>average time spent in SCeNBs</i>	75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características das principais tecnologias celular.....	24
Tabela 3.1 – Síntese dos principais trabalhos correlatos.....	49
Tabela 4.1 – Regras formuladas para determinar o $\mu_{HM,d}$	61
Tabela 5.1 – Parâmetros de Simulação.....	65

Resumo

O crescente aumento no uso de dispositivos e aplicações móveis nos últimos anos, tem levado a uma sobrecarga da infraestrutura da rede responsável pelo escoamento desse tráfego, afetando tanto o desempenho da rede quanto a experiência do usuário. As redes móveis heterogêneas já são realidade e sua densificação tem sido apontada como uma das soluções propostas para atendimento das demandas esperadas para as redes celulares de quinta geração (5G). Nas redes atuais, no entanto, ainda é comum o uso de parâmetros fixos na configuração da rede, mas esta estratégia nem sempre se mostra eficiente. É dentro deste contexto que se consolida o conceito de redes auto organizáveis nas quais os vários parâmetros da rede são ajustados automaticamente com base em medições em tempo real e sistemas inteligentes. Esta tese apresenta uma estratégia para otimização de *handover* em redes LTE com densa implantação de *small cells*. Com base em medições e lógica *fuzzy* são propostos algoritmos para o auto ajuste de parâmetros da rede. A partir de simulação discreta utilizando o MATLAB, os resultados são obtidos e apresentados através das principais métricas de avaliação de desempenho de *handover*.

Palavras - Chaves: *Handover*, Redes móveis, *Small cell*, Lógica *Fuzzy*.

Abstract

The increase in mobile devices and applications in recent years has led to an overload of the network infrastructure responsible for disposing this traffic, thus affecting the performance of the network as the user experience. Heterogeneous mobile networks are already a reality and their densification has been put forward as one of the suggested solutions to meet the expected demands for 5th generation (5G) mobile networks. However, in the current networks, it is still common for fixed parameters to be used for the configuration of the network although this strategy does not always prove to be efficient. It is within this context that the concept of self-organizing networks (SONs) has been established, in which several network parameters are automatically adjusted on the basis of measurements and intelligent systems in real time. This thesis presents a strategy to optimize the *handover* in LTE networks with dense *small cells*. Based on measurements and *fuzzy* logic new algorithms are proposed for self-tuning network parameters. From discrete simulation using MATLAB, the results are evaluated and presented through the main performance metrics of *handover*.

Keywords: *Handover, Mobile networks, Small cell, Fuzzy Logic.*

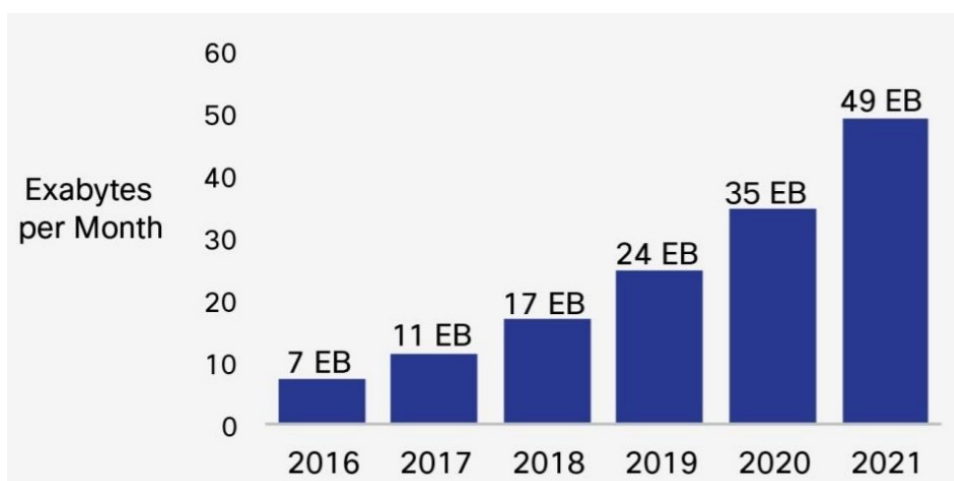
Capítulo 1 - Introdução

Ao longo dos últimos anos, a Internet e as comunicações móveis vêm convergindo para a definição de um novo paradigma: a Internet Móvel. A possibilidade de acessar informação e serviços a qualquer momento e em qualquer lugar vem moldando novos perfis de usuários e novas demandas de aplicações.

Os sistemas de comunicação móvel são, talvez, o elemento mais crítico na estratégia global de Tecnologias da Informação e Comunicação, se sobrepondo a várias outras indústrias. De acordo com o *Wireless World Research Forum* em 2020 haverá sete trilhões de dispositivos sem fio servindo sete bilhões de pessoas, ou seja, a quantidade de dispositivos conectados será 1000 vezes maior que a população mundial [WWRF, 2018]. As tecnologias da informação tornaram-se parte integrante da sociedade, tendo um profundo impacto socioeconômico e enriquecendo-nos diariamente com uma infinidade de aplicações e serviços. Se os prognósticos dos analistas estão corretos, quase todos os objetos físicos que vemos estarão conectados às redes no final da década (Internet das coisas).

A crescente utilização de aplicações baseadas na mobilidade e em grandes transferências de dados leva, por sua vez, à crescente procura por serviços de dados móveis. A Figura 1 permite visualizar uma previsão de crescimento do tráfego de dados móveis nos próximos anos.

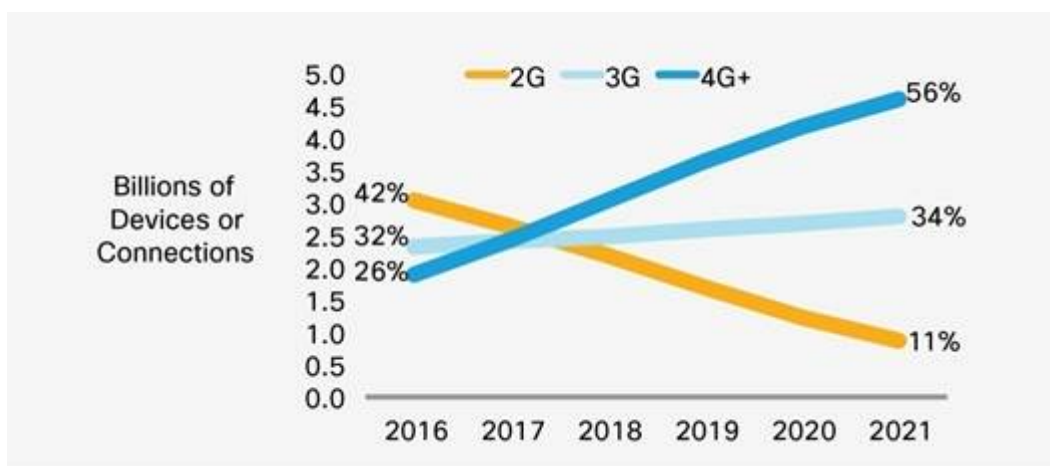
Figura 1.1. Tendência de crescimento do tráfego mundial de dados móveis [CISCO, 2017]



Ao analisar-se a tendência demonstrada na Figura 1.1, percebe-se que foi estimado um crescimento da ordem de 49 exabytes para o ano de 2021, ou seja, um aumento de 7 vezes mais em comparação ao ano de 2016. Uma taxa média de 47% de crescimento ao ano.

Hoje, pode-se dizer que o mundo das comunicações, pelo menos para os usuários finais, como clientes domésticos, pequenas empresas e escritórios, é sem fio. Mesmo que grande parte das conexões à internet ainda utilizem soluções cabeadas, praticamente toda rede possui um ponto de acesso sem fio, e o número de acessos de dados em redes celulares vem evoluindo constantemente conforme pode ser visualizado na Figura 1.2.

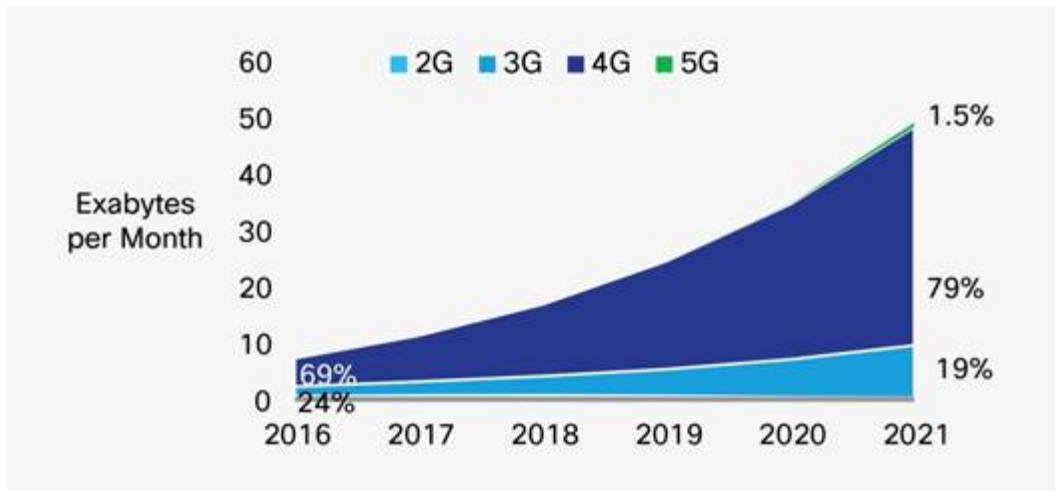
Figura 1.2. Dispositivos móveis globais por 2G, 3G, 4G+ [CISCO, 2017]



Atualmente uma conexão 4G gera quase 10 vezes mais tráfego do que uma conexão não 4G [CISCO, 2017]. Isso ocorre basicamente por duas razões. A primeira é que muitas conexões 4G de hoje são para os dispositivos *high-end*, que têm um consumo médio superior. A segunda é que velocidades mais altas incentivam a adoção e uso de aplicações de alta largura de banda, de tal forma que um smartphone em uma rede 4G é susceptível de gerar significativamente mais tráfego do que o mesmo modelo do smartphone em uma rede 3G ou 3.5G.

As redes de 4ª geração podem suportar taxas de até 1 Gb/s em baixa mobilidade e 100 Mb/s em alta mobilidade. Em 2016 o 4G já era responsável por 69% do total de tráfego móvel e representava a maior parcela de tráfego de dados móveis por tipo de rede. A tendência é de crescimento contínuo em relação a outras redes e representará 79% de todo o tráfego de dados móveis até 2021 conforme pode ser visto na Figura 1.3.

Figura 1.3. Crescimento do tráfego móvel de dados 4G [CISCO, 2017].



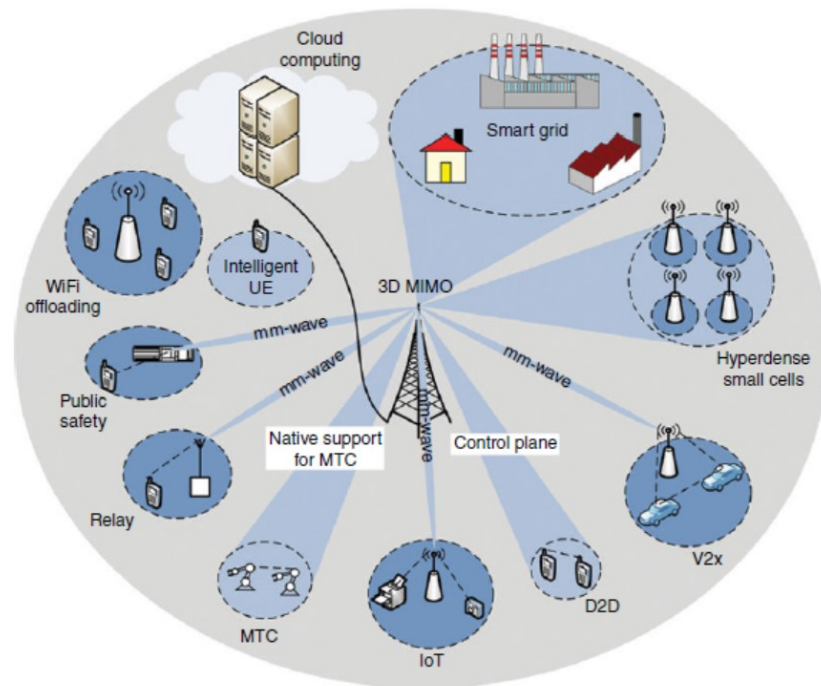
O *LTE-Advanced* foi o primeiro sistema a atender todos os requisitos das redes 4G. No entanto, com o crescimento gigantesco na quantidade de dispositivos móveis e de novos serviços, existem diversos desafios que não podem ser superados nem mesmo pelo 4G, tais como: escassez de espectro, redução no consumo de energia, falta de cobertura, etc.

O contínuo crescimento no volume de tráfego de dados e a necessidade de serviços de banda larga mais sofisticados, tornará imperativo aos padrões atuais proporcionarem uma integração entre as novas tecnologias e a garantia de altas taxas de dados, exigindo uma nova geração de comunicações móveis: o chamado 5G.

A corrida em busca de soluções inovadoras para permitir que a próxima geração de comunicações móveis (era 5G) se estabeleça começou recentemente a nível mundial. Durante os próximos anos a indústria móvel deve preparar-se para o desafio de absorver uma demanda por dados móveis mil vezes maiores do que se tem atualmente [CHEN; ZHAO, 2014] [OMHENI et al, 2018].

Enquanto a padronização das especificações 5G em organismos de normalização, como a *Third Generation Partnership Project* (3GPP) e da ratificação formal das normas 5G pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) ainda estão em andamento, muitos compartilham a visão de segmentação até 2020 para a inicial comercialização de celulares com tecnologias 5G que proverão uma drástica melhoria na experiência do usuário. [BOJKOVIC; BAKMAZ; BAKMAZ, 2015]

Figura 1.4. Arquitetura do sistema 5G [RODRIGUES, 2015].



As redes 5G não são a simples continuação de seu antecessor através da adição de espectro, aumento de capacidade ou por substituição da tecnologia de rádio. Trata-se de repensar fundamentalmente a partir do nível da arquitetura do sistema até a camada física, analisando como prover serviços intensos de dados em áreas densas e de forma satisfatória. Para além disso, o aumento significativo no tamanho e na complexidade das redes móveis, implica em uma gestão de rede muito mais complexa. Por esta razão, as *Self-Organising Networks* (SONs) têm ganhando significativa importância no sentido de automatizar o processo de gerenciamento e minimizar intervenções manuais.

Atualmente aproximadamente 80% do tráfego móvel é gerado em ambientes indoor [RODRIGUES, 2015]. Essa crescente demanda por multimídia sem fio *indoor* e as tendências em curso de convergência móvel, estão pavimentando o caminho para a implantação e densificação de *small cells* [HUANG; KAO; LIAO, 2017]. A Figura 1.4. ilustra a arquitetura dos sistemas de 5G, observa-se a densificação de *small cells* já é apontada como parte integrante desse sistema, sendo considerada uma possível solução para desafogar o tráfego móvel.

Embora o objetivo final da *small cell* seja melhorar a eficiência, a cobertura e ainda assim oferecer os serviços a um custo reduzido de operação, a possibilidade de *handovers* arbitrários entre uma eNodeB (*Enhanced NodeB*) e uma HeNB (*Home eNodeB*), levanta

novos desafios significativos ao processo de gerenciamento de mobilidade [ROY; SHIN; SAXENA, 2012] [SILVA; FRANCES, 2015] [XENAKIS et al, 2016] [AHMAD et al, 2017].

1.1. Definição do Problema

As redes celulares estão passando por uma grande mudança em sua implantação e otimização. Novos elementos de infraestrutura, como pequenas estações de base, estão sendo implantados de forma maciça e não controlada, tornando as redes celulares 5G e os sistemas mais heterogêneos.

A densificação de *small cells* na rede ocasiona um aumento excessivo na ocorrência de *handovers* desnecessários, aumentando por consequência a sobrecarga de sinalização e probabilidade de falhas de *handover*. Desta forma, estratégias para o planejamento e otimização, especialmente no que concerne ao processo de gerenciamento de *handover* e ao crescimento de *small cells* desordenado tornam-se imprescindíveis. O desafio reside nos métodos para planejamento e tomada de decisão quanto ao *handover* já que atual política se mostra ineficiente para lidar com essas novas perspectivas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta tese é o desenvolvimento de algoritmos para tomada de decisão de *handover* em cenários LTE com densa implantação de *small cells*. Objetiva-se alcançar uma estratégia de *handover* mais adequada e que melhor se ajuste às redes móveis atuais, de forma que operadoras possam identificar os principais parâmetros da rede e alocar de forma inteligente a distribuição dos usuários nas células.

As *small cells* ganharam muita atenção devido a suas vantagens em termos de economia de custos na infraestrutura e melhoria da experiência em ambientes *indoor*. No entanto, há grandes divergências e desafios quanto à plena eficácia de sua utilização em ambientes densos e não controlados.

1.2.1. Objetivos Específicos

De forma mais específica, esta proposta apresenta os seguintes objetivos:

- Definição dos principais parâmetros para seleção e tomada de decisão de *handover*.

- Proposição de uma estratégia para tomada de decisão em cenários com densa implantação de *small cells*.
- Investigação das técnicas de inteligência artificial que melhor se adequem a solução do problema.
- Desenvolvimento de algoritmos para otimização do processo de tomada de decisão de *handover*.
- Implementação de um ambiente de simulação propício para caracterização e avaliação da estratégia adotada.
- Realização de avaliação de desempenho por meio de simulação discreta para fins de validação da estratégia desenvolvida.

1.3. Organização da Tese

Este documento está dividido como segue:

- Capítulo 2: Neste capítulo são introduzidos os conceitos, as tecnologias e apresentação do estado da arte necessários para a compreensão do estudo realizado. O capítulo inicia com um breve histórico da evolução das redes móveis, onde destacam-se as características das redes LTE e os principais conceitos que norteiam *small cells*. Em seguida apresenta-se os principais paradigmas de inteligência computacional, com ênfase na apresentação da lógica *fuzzy*.
- Capítulo 3: Apresentam-se os trabalhos relacionados a problemática desta tese, abordando principalmente as soluções para otimização do processo de tomada de decisão de *handover* em redes móveis e as lacunas em aberto quanto a temática.
- Capítulo 4: Este capítulo expõe a principal contribuição desta tese a partir da descrição detalhada da estratégia para otimização do processo de *handover* com apresentação dos algoritmos propostos.
- Capítulo 5: Neste capítulo, apresenta-se o ambiente de simulação, a parametrização, as métricas utilizadas para avaliação de desempenho e por fim a discussão dos resultados.

- Capítulo 6: Neste capítulo, demonstram-se as considerações finais sobre os temas abordados nesta tese, apontando as principais contribuições da tese e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo faz-se uma breve descrição da evolução das redes móveis. Em seguida aborda-se o sistema de comunicações móveis LTE, assinalando suas principais características e a discriminação do processo de *handover*. Posteriormente, são descritos os elementos que compõe as redes heterogêneas, incluindo a caracterização de *small cells*. Por fim os principais conceitos que norteiam lógica *fuzzy* encerram o capítulo.

2.2. Evolução das Redes Móveis

As primeiras gerações de tecnologia móvel transmitiam somente a voz, sendo as principais a TACS (*Total Access Communication System*) na Europa e AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) nos EUA. A segunda geração foi dividida em duas tecnologias CDMA (*Code Division Multiple Access*) nos EUA e GSM (*Global System for Mobile Communication*) na Europa. O CDMA utilizava a tecnologia de espalhamento espectral e multiplexação por divisão de código e foi criada inicialmente para voz e permitia a transmissão de dados a baixas velocidades. O GSM utilizava comutação por circuito com TDM (*Time Division Multiple Access*) para transmissão de voz [KOROWAJCZUK, 2011].

O Primeiro padrão a considerar transmissão de pacotes foi o GPRS (*General Packet Radio Service*), implantado em 2001 com taxas teóricas de 57 a 114 kbps, sendo 14.4 a 28.8 kbps valores mais realísticos. Ele foi seguido pelo EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) em 2002 com taxas teóricas de 384 kbps, sendo 56 kbps um valor mais real. Ambas as tecnologias ainda trabalhavam em canais desenvolvidos para transmissão de voz. A partir disso, ficou claro que era necessário um novo padrão que pudesse prover canais apropriados para transmissão de dados.

Então, surgiu a 3ª Geração para atender essa demanda. Nessa nova geração, o GSM mudou sua tecnologia para CDMA utilizando a tecnologia de transmissão WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) e passou a utilizar o padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [KOROWAJCZUK, 2011]. Inicialmente, o UMTS foi definido para voz, porém tinha potencial para adicionar canais otimizados para dados. Diante

disso surgiu o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) para tráfego de *downlink* e o HSUPA para tráfego de *uplink*. Ambas as tecnologias foram consolidadas no HSPA (*High Speed Packet Data*) e HSPA+ (*Release7*).

Em dezembro de 2008, o 3GPP anunciou o que seria a 4ª Geração de redes móveis chamada LTE que utilizaria a tecnologia OFDM para transmissão, a mesma utilizada em alguns padrões 802.11 e WiMAX. Em testes de laboratório, uma rede experimental de LTE, com 20 MHz de espectro, alcançou, aproximadamente, 300 Mbps de *download* e 75 Mbps de *upload*. Entretanto, a velocidade real de navegação beira aos 100 Mbps de *download* e 50 Mbps de *upload*. A Tabela 2.1 resume as tecnologias com suas respectivas características de transmissão.

Tabela 2.1. Características das principais tecnologias celular, adaptado de [3gpp, 2017]

Geração	2G			3G			4G		5G	
Tecnologia	GSM	GPRS	EDGE	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE (Rel. 8)	LTE- <i>Advanced</i>	LTE- <i>Advanced</i> Pro (4.5G)	-
Vazão teórica (<i>downlink</i>)	14.4 kbps	114 kbps	384 kbps	2 Mbps	7.2/14.4 Mbps	21/42 Mbps	100 Mbps	1 Gbps	3 Gbps	20Gbps
Vazão teórica (<i>uplink</i>)	-	-	473.6 kbps	474 kbps	5.76 Mbps	7.2/11.5 Mbps	50 Mbps	0.5 Gbps	1.5 Gbps	10Gbps
Tamanho do canal (MHz)	0.2	0.2	0.2	5	5	5	20	100	640	Até 1.000
Latência (ms)	500	500	300	250	~ 70	~ 30	~ 10	< 5	<2	<1

2.3. LTE

Alguns serviços que há poucos anos eram praticamente inacessíveis à maioria da população hoje são considerados essenciais e se tornaram amplamente difundidos. Serviços como videoconferência, download de vídeos, jogos interativos e Voz sobre IP, que já são considerados por muitos como necessários, devem aumentar cada vez mais a demanda por largura de banda. É com foco neste cenário que o grupo que padroniza o desenvolvimento dos sistemas celulares, o 3GPP, vem trabalhando para desenvolver padrões que atendam às necessidades das pessoas [ALI-YAHIYA, 2011].

Buscando-se soluções para tornar a transmissão de dados mais eficiente, ao mesmo tempo em que o volume desse tráfego se encontra em ascensão, o padrão LTE foi proposto como o próximo passo rumo ao sistema móvel de 4G, precedido pelas redes 2G e 3G. Seu desenvolvimento fornece melhorias de desempenho, além de reduzir o custo por bit, o que possibilita uma maior disseminação de serviços móveis. Sua padronização está a cargo do 3GPP [AZIZ; SIGLE, 2009].

A constante necessidade de serviços móveis de maior qualidade impulsiona o desenvolvimento de tecnologias com objetivos cada vez mais centrados nas necessidades dos usuários. De forma a cumprir este objetivo, o LTE surge como a tecnologia para redes móveis de maior adoção atualmente. Nesta seção, serão descritas as principais características do sistema de comunicações móveis LTE [KOROWAJCZUK, 2011].

Os principais objetivos especificados para tecnologia LTE são [KOROWAJCZUK, 2011]:

- Coexistência com os padrões legados (2G e 3G) enquanto evolui para uma rede totalmente IP.
- Largura de banda variando de 1,4 a 20 MHz.
- Eficiência espectral três ou quatro vezes melhor que o HSPA (Rel. 6).
- Latência menor que 10 milissegundos para pacotes pequenos (ex.: voz).
- Alta mobilidade (até 120 km/h).
- Raio de cobertura de 5, 30 e 100 km.
- *Downlink* baseado no OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).
- *Uplink* baseado no SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*).
- Suportar os modos FDD e TDD para multiplexação.
- Arquitetura simplificada e gerenciamento de mobilidade.

O padrão LTE possui vários *Releases*, onde o *Release 8* é a versão comercial utilizada, sendo o *Release 10*, também chamado *LTE-Advanced* (LTE-A), considerado o verdadeiro 4G com taxas de 1 Gbps no *downlink* e 100 Mbps no *uplink*.

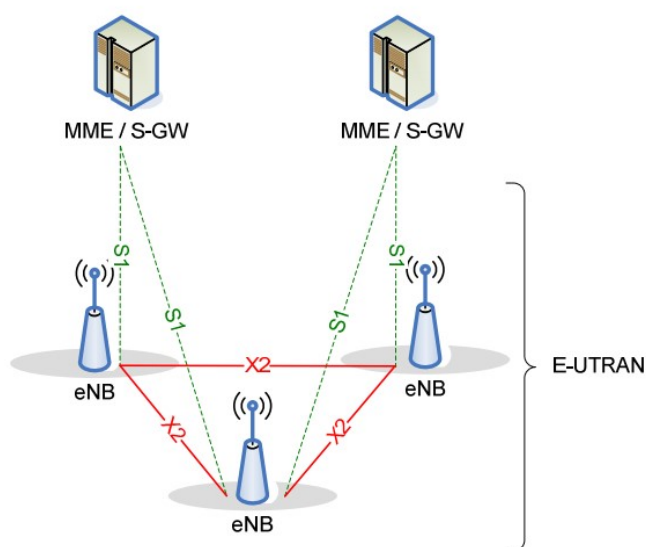
2.3.1. Arquitetura LTE

A arquitetura LTE é uma evolução da arquitetura utilizada no UMTS, porém no LTE a arquitetura é totalmente baseada no padrão IP, o protocolo principal da Internet. Com isso, o tráfego de voz será suportado principalmente através da tecnologia VoIP (*Voice over IP*), possibilitando melhores integrações com serviços de multimídia [VARGAS et al, 2011]. A migração para o padrão IP também permite a integração com outras tecnologias de comunicação baseadas no protocolo IP, como WiMAX e WLAN, por exemplo.

O objetivo principal da arquitetura é ser a mais simplificada possível de modo a diminuir a quantidade de equipamentos que possam apresentar falhas e também o custo associado à implementação. De acordo com [HOLMA; TOSKALA, 2009] e [3GPP, 2010], a arquitetura LTE está dividida em quatro principais domínios de alto nível: UE (*user equipment*), E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*), EPC (*Evolved Packet Core*) e *Services*.

No LTE tem-se uma nova arquitetura, totalmente diferente do que vinha sendo utilizado nas tecnologias anteriores, e um exemplo disto é a estação rádio base, denominada de *eNodeB*, que no LTE passa a realizar tarefas de processamento antes realizadas na RNC (*Radio Network Controller*). As *Enhanced NodeB* do LTE são denominadas desta forma (*eNodeB* ou *eNB*), para se diferenciar da nomenclatura utilizada no UMTS (NodeB). A Figura 2.1. mostra os principais componentes de uma rede LTE (*Core e Acesso*).

Figura 2.1. Arquitetura LTE [3GPP, 2010b]



No LTE a rede é menos complexa do que no UMTS. Por exemplo, não existe no LTE a topologia da RNC existente no UMTS, onde parte de suas funcionalidades foram

transferidas para a *eNodeB* e parte para o *Core Network Gateway*. No LTE também não teremos a central controlando os elementos na rede de acesso. A *eNodeB* irá realizar o controle de tráfego na interface área assegurando QoS para os serviços oferecidos.

A arquitetura chamada de EPS (*Evolved Packet System*) é dividida em rede núcleo (*core network*) e rede de acesso (*access network*). A rede núcleo é conhecida como SAE (*System Architecture Evolution*) e é baseada no EPC. A rede de acesso implementa o padrão de acesso à rádio E-UTRAN que é baseado no LTE. Os termos SAE e LTE têm sido substituídos por EPC e E-UTRAN, respectivamente. O termo LTE tem sido usado como nome comercial do EPS. Esta arquitetura permite uma drástica redução de custos referentes a operação e aquisição de equipamentos, uma vez que o E-UTRAN pode ser compartilhado por várias operadoras enquanto no EPC cada uma possui equipamentos próprios e define a sua própria topologia [KOROWAJCZUK, 2011].

O UE é o dispositivo que o usuário utiliza para comunicação, com um smartphone ou modem 4G. A E-UTRAN consiste no novo padrão que substitui a interface de acesso por rádio das tecnologias UMTS, HSPA e HSPA+, provendo maiores taxas de *downlink* e *uplink*, menor latência, além de ser otimizada para trabalhar com pacotes. É composta de *eNodeB* que agregam todas as funções antes exercidas pela *NodeBs* e RNCs na antiga UTRAN, ou seja, realizam funções de gerenciamento de recursos, controle de admissão, escalonamento, compressão de cabeçalho, criptografia, negociação de QoS no *uplink* e *broadcasts* contendo informações da célula. Além disso, as *eNodeB* podem comunicar-se diretamente através da interface X2, além de se comunicarem com o EPC através da interface S1 [KOROWAJCZUK, 2011].

O SAE é a arquitetura do núcleo da rede definida pelo 3GPP para o LTE. O SAE é a evolução do núcleo da rede GPRS, com algumas diferenças: arquitetura simplificada, conceito de redes *All-IP*, suporte a redes de acesso de altas taxas de velocidade e baixa latência, suporte a mobilidade entre redes de acesso heterogêneas, como E-UTRAN e LTE-*Advanced*, redes de acesso legadas, como GERAN e UTRAN, bem como redes não-3GPP, como WiMAX e cdma2000, por exemplo [KOROWAJCZUK, 2011][OLSSON et al, 2010]. O principal subsistema do SAE é o EPC. No EPC estão contidos os principais elementos da rede. As funções desempenhadas por cada elemento são descritas abaixo:

- **MME (*Mobility Management Entity*)**: é o elemento de controle principal no EPC. Entre as suas funções estão autenticação, segurança, gerenciamento de

mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.

- **S-GW (*Serving Gateway*):** faz o roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G e 3G utilizando a interface S4. Gerencia e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno dos pacotes na rede.
- **P-GW (*PDN Gateway*):** é o roteador de borda entre o EPS e redes de pacotes externas. Realiza a alocação endereços IP para o UE, filtragem de pacotes e auxilia o PCRF na aplicação de políticas de QoS [KOROWAJCZUK, 2011].
- **PCRF (*Policy and Charging Rule Function*):** se refere ao elemento de rede LTE que é responsável pelo PCC – Política e Controle de Carga. O PCRF decide quando e como se deve gerenciar os serviços em termos de QoS e fornece informações a respeito para o P-GW e se é aplicável para o S-GW. Desta forma, provê o QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.
- **HSS (*Home Subscriber Server*):** se refere ao elemento LTE que é o banco de dados de registro do usuário.

2.3.2. Capacidade e Mobilidade

A tecnologia LTE apresenta ótimo desempenho para células de até 5 km, podendo suportar até 200 usuários quando se utiliza canais de 5 MHz e 400 utilizadores considerando uma largura de banda de 20 MHz [SÁ, 2010], [KOROWAJCZUK, 2011]. Além disso, é possível demonstrar um serviço eficaz em células com raio de até 30 km e um desempenho limitado fica disponível em células com tamanho de raio de até 100 km

2.3.3. Handover

O *handover* (HO) é um dos principais procedimentos em qualquer rede móvel, uma vez que garante a liberdade de movimento dos usuários enquanto ainda se presta serviços de alta qualidade. O *Handover* é o procedimento empregado em redes sem fio para tratar a transição de uma unidade móvel de uma célula para outra de forma transparente ao utilizador e, portanto, a satisfação do usuário está diretamente ligada à taxa de sucesso deste procedimento.

O conceito de *handover* não tem sido mais apenas ligado a continuidade de uma chamada telefônica, mas também a continuidade de sessões de streaming, a manutenção de QoS e do acesso à Internet. Um dos desafios da pesquisa para sistemas celulares é a melhoria do sistema de gestão do mecanismo de *handover* que controla e reduz a probabilidade de bloqueio e melhora a qualidade do serviço.

Essa extensão do conceito de *handover* ocorre devido à popularização de *tablets* e *smartphones*, os quais têm permitido a experiência coletiva de usuários que compartilham uma mesma área de cobertura. Recentemente, o cenário de mobilidade em diferentes velocidades com aplicativos em uso tem sido cada vez mais comum.

As especificações 3GPP definem o RSRP (*Reference Signal Received Power*) ou potência de sinal de referência recebida, como a medida de entrada para o algoritmo de HO [3GPP, 2008]. O RSRP é definido como a média linear sobre as contribuições de potência dos *resource elements* que transportam sinais de referência específicos de células dentro da largura de banda de frequência de medição considerada. O RSRP é medido para a *eNodeB* atual, bem como para outras *eNodeB* na vizinhança do usuário. Por fim, o RSRP é usado para classificar as diferentes células no momento de seleção de célula e HO.

Conforme o UE se move na rede, o mesmo pode enfrentar diferentes condições de propagação e interferência. Pode acontecer de uma célula vizinha apresentar melhores condições (maior RSRP) do que a célula atual. Sendo assim, o UE monitora a célula atual (*SeNB* – *serving eNodeB*) e células vizinhas (*NeNBs* - *neighboring eNodeB*) realizando, periodicamente, medições dos canais de rádio *downlink* (RSRP) a fim de identificar se a célula vizinha possui uma melhor condição (RSRP).

O HO é acionado pela *eNodeB*, com base nos relatórios de medição (*measurements reports*) recebidos do UE. O 3GPP descreve os vários eventos que podem acionar um HO, dentre os quais, o principal é o evento A3¹. De acordo com o evento A3, o HO é iniciado quando a seguinte condição for atendida por um determinado período de tempo:

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + \Delta_{HM} \quad (1)$$

¹ Evento A3: o RSRP da célula vizinha se tornou melhor do que o RSRP da célula atual somado com uma margem.

onde o $RSRP_{NeNB}$ e $RSRP_{SeNB}$ são os valores RSRP da *eNodeB* vizinha e da *eNodeB* atual, respectivamente. O Δ_{HM} (*hysteresis*) pode ser entendido como uma margem de segurança, essa margem busca reduzir as chances de um HO falhar. Os valores de *hysteresis* válidos variam entre 0 e de 10 dB com passos de 0,5 dB, o que resulta em 21 valores de *hysteresis* possíveis. Outro parâmetro importante no processo de HO é o *time-to-trigger* (TTT) ou *tempo para o gatilho*. O TTT define o tempo durante o qual a condição da Equação 1 deve ter atendida para iniciar um HO. Os valores de TTT para as redes LTE são especificados pelo 3GPP, que descreve 16 possíveis valores (0, 0,04, 0,064, 0,08, 0,1, 0,128, 0,16, 0,256, 0,32, 0,48, 0,512, 0,64, 1,024, 1,280, 2,560 e 5,120), todos definidos em segundos [3GPP, 2010c].

No LTE, pode-se distinguir entre dois modos diferentes de mobilidade: mobilidade no modo ocioso (*idle*) e mobilidade no modo conectado (*connected*). Quando o UE se encontra no modo *idle* e altera a célula, o processo é chamado resseleção de célula, e quando o UE estiver no modo *connected* e muda de célula, o processo é chamado de *handover*. A rede controla as transições UE de modo *idle* para *connected* e vice-versa [SHOOSHTARI, 2011].

O HO no LTE é classificado como *hard handover*, ao invés do *soft handover* das redes WCDMA. Nesse tipo de HO ocorre uma queda de conexão com a *eNodeB* antiga antes de uma nova conexão com a nova *eNodeB*. A perda de pacotes é evitada através um processo de bufferização dos pacotes seguido de um redirecionamento dos pacotes da antiga para nova *eNodeB*, que repassa os pacotes para o UE.

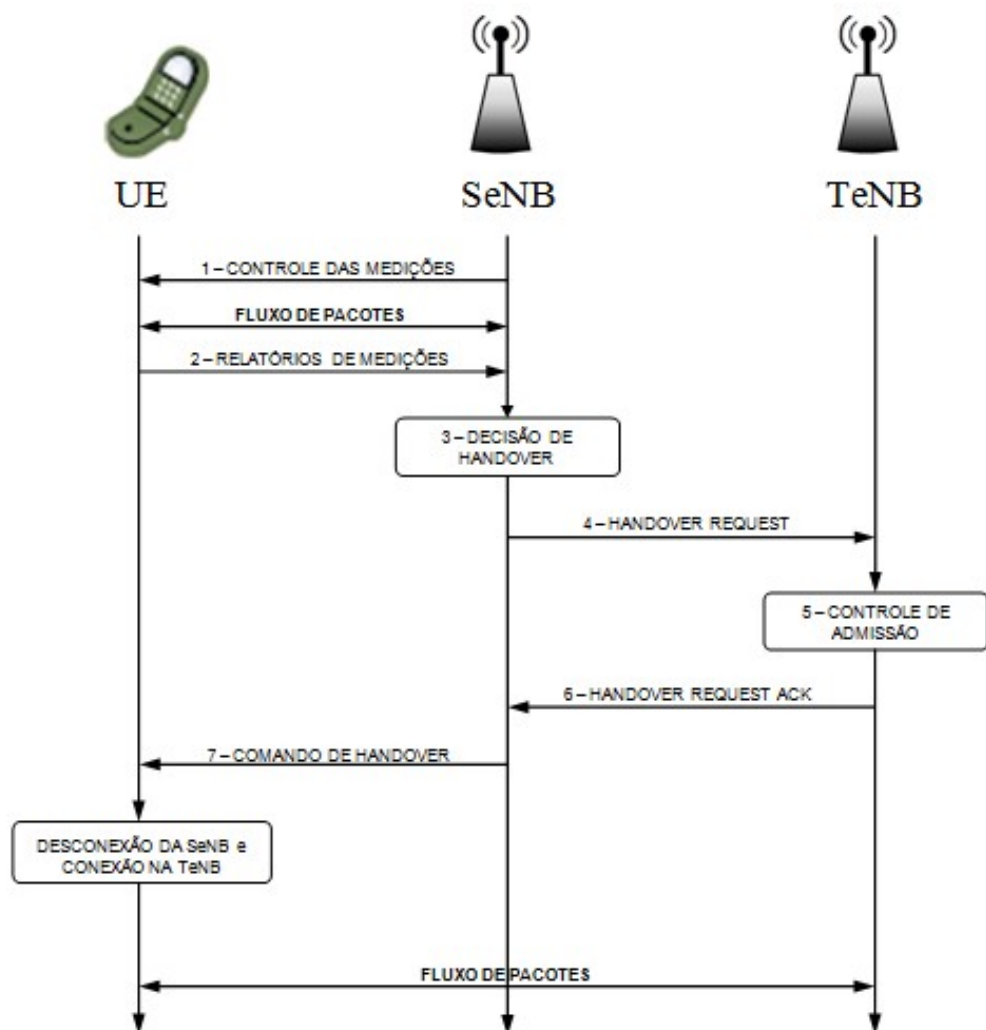
2.3.3.1. O processo de Handover

O EPC não participa do procedimento de HO, todas as mensagens necessárias são trocadas entre o UE e *eNodeB*. O procedimento de HO é ilustrado na Figura 2.2.

1. A *SeNB* configura o procedimento de medição no UE.
2. Um relatório de medição (*MEASURE REPORT*) é enviado pelo UE para *SeNB* quando algumas condições são atendidas (ex: evento A3).
3. A decisão de HO é tomada pela *SeNB* baseada no relatório de medição.

4. Uma mensagem de *HANDOVER REQUEST* é enviada pela *SeNB* para a *TeNB* (*Target eNodeB*) com todas as informações necessárias para realizar o HO.
5. A *TeNB* pode realizar um processo de controle de admissão dependendo das informações de QoS recebidas. Basicamente, a *TeNB* avalia se existem recursos disponíveis para atender o UE.
6. Caso existam recursos, os mesmos são configurados e uma mensagem de *HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE* é enviada para *SeNB*. Caso contrário o HO é rejeitado.
7. Um comando de *HANDOVER* é enviado da *SeNB* para UE. O UE se desconecta da *SeNB* e conecta na *TeNB*.

Figura 2.2. Etapas do *handover*



Uma descrição mais aprofundada do processo de HO pode ser encontrada em [SHOOSHTARI, 2011].

2.4. 4G e o LTE *Advanced*

Como mencionado anteriormente, o padrão LTE na verdade representa um sistema 3G (também são encontradas referências ao LTE como 3.9G). A ITU (*International Telecommunications Union*) estabeleceu as especificações para uma tecnologia ser denominada como sendo 4G. Uma determinada tecnologia é considerada 4G quando for reconhecida como um sistema *IMT-Advanced* [ITU, 2013].

Dentre os principais requisitos definidos pelo ITU para um sistema móvel ser considerado de 4ª Geração tem-se: [4G AMERICAS, 2014]:

- Rede totalmente IP com comutação de pacotes.
- Interoperabilidade com os padrões *Wireless* existentes.
- Uma velocidade de 100 Mbit/s com o usuário em movimento e 1 Gbit/s com o usuário sem movimento.
- Compartilhar dinamicamente os recursos da rede para suportar mais usuários simultâneos.
- Largura do canal escalável de 5-20 MHz, opcionalmente até 40 MHz
- Eficiência espectral de 15 bit/s/Hz, no *downlink*, e 6.75 bit/s/Hz, no *uplink* (o que significa que 1 Gbit/s no *downlink* com um canal inferior a 67 MHz)
- Eficiência espectral do sistema de até 3 bit/s/Hz/ célula no *downlink* e 2.25 bit/s/Hz/célula para uso indoor.
- *Roaming* global através de múltiplas redes.
- Capacidade de oferecer serviços multimídia de alta qualidade.

2.5. Redes Heterogêneas

A fim de atender a demanda em capacidade e cobertura das redes celulares, o conceito de *Heterogeneous Networks* (HetNets) foi introduzido nas redes LTE [NAKAMURA et al, 2013] [ELSAWY; HOSSAIN; KIM, 2013]. A idéia das *HetNets* é implantar várias células menores sob a cobertura de *macrocells* (MeNBs) para estender a cobertura ou aumentar a capacidade em determinadas áreas de alta demanda.

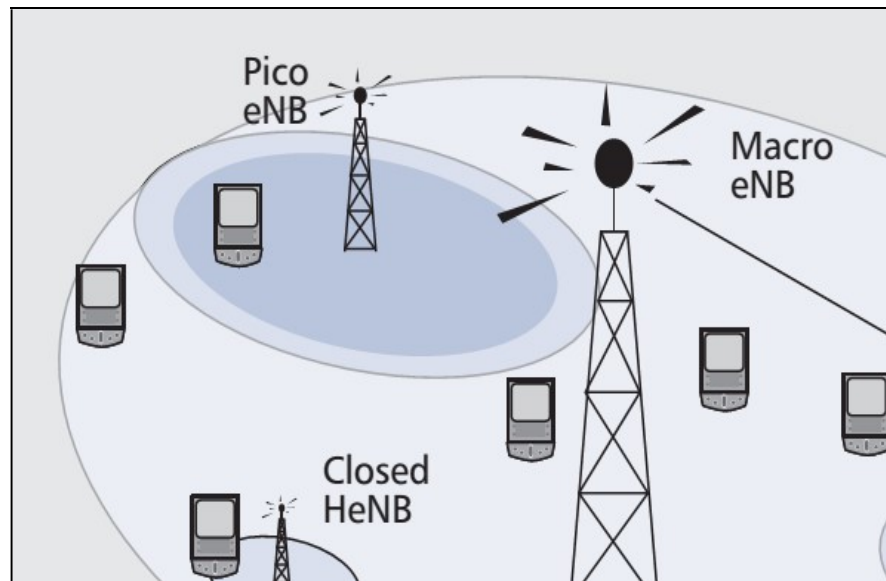
As redes heterogêneas representam uma grande mudança de paradigma em projetos de rede celular. O termo refere-se a uma rede de acesso de múltiplos padrões de rádio que podem ser acessados com o mesmo UE e pode referir-se a estruturas celulares hierárquicas em que múltiplas classes de células com um mesmo padrão de acesso rádio são utilizadas [ELSAWY; HOSSAIN; KIM, 2013], [RAMAZANALI et al, 2016].

É conhecido que os usuários móveis permanecem a maior parte do tempo em ambientes indoor. Diante disso, uma característica proeminente nas redes 5G é a prevalência de *small cells*, conceito definido no release 12 do 3GPP [AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016]. O antigo conceito de celular é aprimorado e substituído pelo conceito de múltiplas camadas de células heterogêneas, dentre as quais temos as *macrocells*, *picocells*, *small cells* e *relay nodes*.

As *macrocells* ou MeNBs são conhecidas por suas elevadas potências de transmissão (5 a 40 W) e grande cobertura (alguns quilômetros). Em seguida temos os *relays nodes*, que funcionam como repetidoras do sinal da *macrocell* utilizando a própria interface aérea como *backhaul*, nesse caso, o *relay node* é visto como um usuário para a *macrocell* e como uma estação base para os demais usuários.

As *picocells* ou PeNBs funcionam com uma potência reduzida e cobrem áreas com algumas centenas de metros. Por último, as *small cells* descritas na seção que segue, referem-se a um termo mais abrangente que englobam diversos tipos de células de menor tamanho. Um exemplo da topologia *HetNet* é ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3. Topologia HetNet utilizando *macrocells*, *picocells*, *small cells* e *relay stations* [DAMNJANOVIC, 2011].



Há razões econômicas e tecnológicas significativas para o rápido desenvolvimento das redes heterogêneas. Os resultados deste desenvolvimento tecnológico terão profundo impacto sobre o futuro das telecomunicações, levantando grandes desafios. Os requisitos para satisfazer as necessidades dos usuários e operadoras de forma eficiente podem ser alcançados adicionando inteligência e capacidade de adaptação às *HetNets*.

2.6. Small cells

As *small cells* são parte integrante dos esforços da indústria de telecomunicações para fornecer comunicação de alto rendimento e serviços de alta qualidade para a casa dos usuários.

As *Small cells* denotadas como SCeNBs são pequenas estações base com baixa potência de transmissão e, portanto, área de cobertura relativamente baixa. Tipicamente, o alcance das SCeNBs é de dezenas a centenas de metros. Com cobertura limitada, o número de UEs cobertos também é limitado em comparação com as MeNBs. No entanto, a principal vantagem das SCeNBs reside na fácil implantação com o mínimo de gastos operacionais em comparação com a construção de uma grande torre que permite ampla cobertura, como as MeNBs [FRIAS, PÉREZ, 2012]. A implantação densa de SCeNBs permite melhorar a capacidade de vazão da rede em áreas com baixo nível de sinal das MeNBs ou em locais com alta concentração de usuários [SMALL CELL FORUM, 2014]. Melhorar a capacidade da rede resulta na elevação de QoS para os usuários e no *offloading* de recursos das MeNBs.

As SCeNBs cobrem *femtocells* denotados como *Femtocell Access Points* (FAPs) ou *Home eNBs* (HeNBs), *microcells* e também *picocells* [SMALL CELL FORUM, 2014]. Enquanto a diferença entre *picocells*, *microcells* e MeNBs convencionais reside apenas na diferença de alcance de cobertura, o conceito de HeNB traz novas especificações para a rede celular convencional. Em geral, o HeNB é uma estação base de baixa potência e de curto alcance para uso doméstico ou de escritório. O objetivo principal das HeNBs é melhorar a qualidade do sinal em áreas cobertas ou sombreadas, aumentar a vazão em áreas com alta densidade de usuários e desafogar as MeNBs, enquanto as frequências mais altas são utilizadas. O HeNB pode operar nas atuais redes sem fio móveis, bem como em redes de nova geração como a LTE-A.

A principal diferença entre o HeNB e outros tipos de SCeNBs é que o HeNB se comunica com o núcleo da rede de operadores através de uma conexão de banda larga comum, como modem a cabo, linha de assinante digital, fibra óptica ou um canal de backhaul de radiofrequência separado. Além disso, enquanto as MeNBs são de total responsabilidade da operadora, os HeNBs são parcialmente controlados por seus proprietários. Os proprietários podem ligar e desligar o HeNB desconsiderando a conexão de outros usuários. Os proprietários podem ainda determinar a posição da HeNB dentro de suas residências de

acordo com sua preferência [CHANDRASEKHAR; ANDREWS; GATHERER, 2008] criando assim problemas no gerenciamento de mobilidade.

Além disso, o HeNB pode oferecer três tipos diferentes de acesso do usuário: aberto, fechado e híbrido [LOPEZ-PEREZ et al, 2008]. Todos os usuários na cobertura de um HeNB podem se conectar a este HeNB se ele funcionar no modo de acesso aberto. Em outras palavras, o HeNB está funcionando como a MeNB comum ou SCeNB no modo de acesso aberto. Desta forma, o HeNB pode desafogar a MeNB servindo vários usuários ao ar livre. No entanto, como no caso de outros tipos de SCeNBs, um grande número de HeNBs na rede pode aumentar a quantidade de *handover* iniciados e assim diminuir o QoS dos usuários.

No caso do HeNB fechado, apenas alguns membros listados no chamado Grupo de assinantes fechados (CSG) podem explorar os recursos do HeNB. O proprietário pode decidir, independentemente da operadora, a quem o acesso é concedido [3GPP, 2012]. A lista CSG pode consistir, por exemplo, em familiares ou funcionários de uma empresa onde os HeNBs estão instalados. Todos os outros UEs não-CSG apenas sofrem a interferência introduzida por este HeNB. No modo de acesso híbrido, uma parte dos recursos é dedicada aos usuários do CSG e o resto da largura de banda não utilizada pode ser compartilhada por outros usuários não-CSG [MUIRHEAD et al, 2016].

2.7. Inteligência Computacional

A busca por sistemas artificiais que apresentam algum tipo de comportamento inteligente, similar ao exibido por muitos sistemas biológicos, incluindo seres humanos, sempre fascinou muitos cientistas. Os sistemas biológicos são resultado de um longo processo de evolução natural e apresentam características como adaptabilidade, tolerância a falhas e robustez a variações ambientais. Tais características são bastante desejáveis em uma grande variedade de problemas das mais diversas áreas de conhecimento, levando diversos pesquisadores a propor estratégias que procuram emular alguns dos aspectos observados em sistemas biológicos naturais. Neste contexto e com o intuito de desvendar os mistérios relacionados à inteligência, surgiu na década de 50 a Inteligência Artificial (IA) [RUSSEL; NORVIG, 2013].

A IA compreende paradigmas computacionais que procuram desenvolver sistemas que apresentam alguma forma de inteligência similar à exibida por determinados sistemas biológicos. Alguns dos paradigmas que compõem a IA foram de fato inspirados em sistemas biológicos (como as redes neurais artificiais e os algoritmos genéticos), enquanto que outros,

apesar de não terem inspiração biológica, tentam gerar sistemas que produzam algum tipo de comportamento próximo ao observado em sistemas naturais (como por exemplo, o raciocínio aproximado dos sistemas nebulosos). A forma como o conhecimento serviu de inspiração para a modelagem computacional da inteligência deu origem aos paradigmas que compõem a IA, onde podem-se destacar como os principais [RÊGO, 2016]:

Paradigma Simbólico: consiste em um conjunto de símbolos que formam estruturas e um conjunto de regras e processos. Quando o conjunto de regras e processos é aplicado no conjunto de símbolos o sistema produz novas estruturas. Os símbolos têm significados semânticos e podem representar conceitos ou objetos. Para lidar com estes conceitos usa-se a lógica proposicional e a lógica de predicados o que permite a solução de problema usando um sistema baseado em regras. Assim um sistema simbólico é capaz de resolver problemas que envolvem dados e as regras sobre estes dados.

Paradigma Conexionista: tem como premissa a suposição de que o comportamento inteligente está relacionado com a dinâmica das conexões entre pequenos nós denominados neurônios, onde tal dinâmica é capaz de representar o conhecimento. Diferentemente do paradigma simbólico, no modelo conexionista o estado dos neurônios representam um conceito ou um objeto e a dinâmica que leva à representação do conceito ou objeto é que estabelece as regras sobre tais objetos e conceitos. Na prática, os dois paradigmas podem se juntar para formar um terceiro paradigma, uma mistura do sistema simbólico com um sistema conexionista.

Paradigma Evolutivo: este paradigma, diferentemente do convencional, não exige, para resolver um problema, o conhecimento prévio de uma maneira de encontrar uma solução. Este paradigma é baseado em mecanismos evolutivos encontrados na natureza, tais como a auto-organização e o comportamento adaptativo. Estes mecanismos foram descobertos e formalizados por Darwin em sua teoria da evolução natural, segundo a qual, a vida na terra é o resultado de um processo de seleção, pelo meio ambiente, dos mais aptos e adaptados, e por isto mesmo com mais chances de reproduzir-se. A diversidade da vida, associada ao fato de que todos os seres vivos compartilham uma bagagem genética comum, pelo menos em termos de seus componentes básicos, é um exemplo eloquente das possibilidades do mecanismo de evolução natural.

Paradigma Nebuloso: A teoria dos conjuntos nebulosos é o modelo mais tradicional para o tratamento da informação imprecisa e vaga. Este paradigma tem por objetivo permitir graduações na pertinência de um elemento a uma dada classe, ou seja, de possibilitar a um elemento de pertencer com maior ou menor intensidade àquela classe. Basicamente, isso se

faz quando o grau de pertinência de um elemento ao conjunto, que na teoria dos conjuntos “clássica” assume apenas os valores 0 ou 1, passa a ser dado por um valor no intervalo dos números reais $[0, 1]$.

Nesta tese, não se pretende discutir nem amplitude nem em profundidade os paradigmas de IA. Para aprofundamento no assunto, sugere-se consultar [RUSSEL; NORVIG, 2013], [FACELI et al, 2011]. Para fins do contexto desta tese, será discutida com maiores detalhes a lógica *fuzzy*.

2.7.1. Lógica Fuzzy

Diferentemente da lógica tradicional usada frequentemente e da lógica booleana, que considera apenas os valores booleanos (verdadeiro ou falso: 0 ou 1, sim ou não), a lógica *fuzzy* ou lógica difusa ou lógica nebulosa compreende os valores entre $[0 e 1]$, variando de acordo com o grau de pertinência destes números. Dessa forma, é possível ter valores intermediários, parcialmente falsos e parcialmente verdadeiros, permitindo certo nível de incerteza.

A lógica *Fuzzy* que foi introduzida primeiramente por Zadeh em 1965, caracterizando-se por ser uma teoria que se utiliza de equações matemáticas para explicar o raciocínio humano. O sistema *fuzzy* é uma técnica de inteligência computacional que utiliza a lógica *Fuzzy* para capturar informações ambíguas, resultantes de medições ou observações descritas em linguagem natural, processá-las e converter seus resultados em um formato numérico, de fácil manipulação e com saídas precisas.

Um sistema *fuzzy* é formado por quatro blocos fundamentais: 1- o fuzzificador, que mapeia os dados precisos dos conjuntos de entrada *fuzzy* relevantes; 2- a base de regras, que são fornecidas por especialistas humanos ou através da extração de dados numéricos, em forma de sentenças linguísticas do tipo *se...então* e ativadas durante o processo de fuzzificação do fuzzificador; 3- a máquina de inferência, onde ocorrem as operações juntamente com a base de regras e os conjuntos *fuzzy* entrados no fuzzificador combinando os antecedentes e implicações do sistema para a geração de um consequente; 4- o defuzzificador, que efetua a interpretação dos conjuntos de entrada, da base de regras e das operações da máquina de inferência e gera uma saída precisa [EBERHART; SHI, 2007]

Existem diversas técnicas de defuzzificação disponíveis na literatura; os mais comumente utilizados são: o centro de gravidade e a média dos máximos. No primeiro, a saída é o valor que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais e no segundo a

saída é obtida considerando-se a média entre os dois elementos mais extremos que correspondem aos dois maiores valores da função de pertinência.

O sistema *fuzzy* tem uma função de pertinência associada que define cada elemento de um conjunto universo a um grau de pertinência que pode variar dentro do intervalo real $[0, 1]$ o grau de pertinência obtido pela função de pertinência demonstra o quanto um dado elemento pertence a um determinado conjunto de uma variável linguística, podendo o mesmo pertencer a mais de um conjunto.

A principal função de um sistema *fuzzy* é converter os valores reais de entrada convertidos através de variáveis linguísticas em graus de pertinência em relação aos conjuntos *fuzzy*, para que sejam tratados pela máquina de inferência simultaneamente por um conjunto de regras *fuzzy*. O fuzzificador ativa o conjunto de regras *fuzzy* da base de regras, que de acordo com a máquina de inferências e as operações correspondentes, calcula o grau de pertinência de um valor real de uma variável e define uma saída precisa resultante dessa técnica, mostrada através do defuzzificador.

A escolha dessa técnica nesta tese se deu por suas inúmeras vantagens, como a facilidade de entendimento, a flexibilidade, a capacidade de modelar funções não lineares baseadas em linguagens naturais, além de ser facilmente adaptada para cenários dinâmicos, com novas informações constantes.

2.8. Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o levantamento do estado da arte das tecnologias envolvidas nesta tese, contemplando os conceitos a cerca de LTE, *small cells*, um apanhado geral sobre as técnicas de inteligência computacional com destaque na apresentação dos conceitos de lógica *fuzzy*.

No próximo capítulo apresentam-se alguns trabalhos correlatos a esta pesquisa, enfatizando não só os estudos que demonstram os desafios técnicos em discussão, como também, avaliando brevemente alguns resultados de pesquisas que vem sendo publicados na literatura em consonância com o estudo desta tese.

Capítulo 3 - Trabalhos Correlatos

3.1. Considerações Iniciais.

Neste capítulo é realizado o levantamento das soluções que vem sendo propostas para otimização do processo de *handover* em redes móveis.

Com as referências apresentadas, ratifica-se que pesquisas relacionadas à problemática apontada nesta tese representa uma área ativa e em aberto na literatura. Apresentam-se também os algoritmos FMCCS e STHA, algoritmos estes, que são utilizados para fins comparativos na análise e resultados desta tese. Por fim, os principais trabalhos estão sumarizados na tabela 3.1 ao término deste capítulo, mostrando de maneira sucinta e direta as considerações de cada trabalho.

3.2. Estratégias de *handover* em redes celulares.

Os principais desafios relacionados ao procedimento de *handover* são estudados em [AHMAD et al, 2017]. Os autores discutem os algoritmos de decisão de *handover* e fornecem uma comparação entre os algoritmos existentes. O artigo mostra que a otimização dos parâmetros de decisão de *handover* é o desafio mais proeminente. Os autores concluem que os valores dos parâmetros devem ser alterados dinamicamente ou ainda, devem ser adaptados de acordo com as preferências do UEs. Algumas soluções que já vem propondo a adaptação dos parâmetros de decisão de *handover* são discutidas, em [BECVAR & MACH, 2013], [SONG; MOON; HAN, 2015] e [LIN; CASANOVA; FATTY, 2016].

Em [BECVAR & MACH, 2013], os autores apresentam um novo procedimento de *handover* baseado em uma estimativa no *throughput* do UE. O ganho no *throughput* é derivado a partir da estimativa dos níveis de sinais de todas as células envolvidas e do tempo gasto pelos UEs nas *femtocells*. O *handover* é iniciado somente se o ganho estimado de *throughput* do UE exceder um limiar predefinido. Os resultados mostram alta eficiência na proposta de decisão e na mitigação de *handovers* redundantes. No entanto, a ideia é limitada a células com um raio muito pequeno de cobertura onde a estimativa é precisa e não pode ser aplicada a *small cells* de modo geral.

Um esquema de auto otimização que ajusta os parâmetros de *handover* para minimizar as *Radio Link Failures* (RLFs) para *small cells* é apresentado em [SONG; MOON; HAN, 2015]. O esquema primeiro detecta os tipos de RLFs e, em seguida, ajusta os parâmetros de

handover de acordo com as falhas detectadas. Os resultados da simulação mostram que o esquema pode eliminar as RLFs. No entanto, o tempo de convergência do algoritmo é alto e a análise do efeito do *ping pong* é negligenciada. Com o mesmo objetivo de mitigar os problemas de mobilidade, em [LIN; CASANOVA; FATTY, 2016] uma abordagem de otimização de *handover* orientada a dados é mostrada. Os autores avaliam cinco tipos de *handovers*: *handovers: too-late handover, too-early handover, handover to wrong cell, handover ping pong* e o *handover* desnecessário. A abordagem proposta coleta dados de medições do nível do sinal e fornece um modelo para estimar a relação entre os *KPI (Key Performance Indicators)* indicadores de desempenho chave (que é uma média ponderada dos cinco diferentes problemas de mobilidade acima citados) e os recursos coletado da base de dados.

Com base no modelo, os parâmetros de *handover*, incluindo a margem de histerese e o *time-to-trigger* (TTT), são otimizados para minimizar os KPIs. A simulação mostra que a abordagem proposta pode efetivamente mitigar os problemas de mobilidade. No entanto, a rede neural considerada para estimar a função KPI requer uma grande diversidade de treinamentos para a operação do mundo real, o que é uma restrição notável para as redes móveis com densa implantação de SCeNBs.

Os autores de [LEE; GIL; KIM, 2010] propõem um esquema de histerese de *handover* adaptativa baseado em uma função custo que se concentra na melhoria de desempenho em termos de relação de falha de *handover* em tempo real. A função custo para *handover* vertical na rede heterogênea é fornecida como uma soma ponderada de funções normalizadas seguindo fatores dominantes: uma diferença de carga entre as eNBs de destino e de serviço, a velocidade do UE e o tipo de serviço. Os resultados da simulação mostram uma menor taxa de falha de *handover* do que os esquemas comparados, mas outros indicadores de desempenho de *handover* importantes, como o número de *handovers* ou a taxa de *handovers ping pong* não são considerados.

Além da margem de histerese, também podem ser considerados outros parâmetros para melhorar a eficiência no processo de *handover*. Em [MEHTA; AKHTAR; KARANDIKAR, 2015], investiga-se o impacto de vários *offsets* e temporizadores sobre a eficiência do *handover* em redes heterogêneas. A análise mostra que para valores de *offset* altos e positivos, que são típicos de cenários com apenas *macrocells*, levam a um maior número de falhas de *handover* em redes heterogêneas. Por outro lado, os valores de *offset* baixos e negativos resultam em um *ping pong* mais frequente (ou seja, *handovers* não-benéficos realizadas entre duas eNBs). Em [KUANG et al, 2015], o impacto de três parâmetros relacionados ao *handover* (TTT, margem de histerese e RSRP) é analisado em termos de relação de falha de *handover* e efeito *ping pong*

em um cenário realístico. Os autores também investigam o impacto das técnicas de CRE (*Cell Range Expansion*) e coordenação de interferência entre células ICIC (*Inter-cell Interference Coordination*) na eficiência do suporte de mobilidade. O artigo mostra que o impacto do CRE e ICIC depende do tipo de *handover* (ou seja, se é do tipo macro-pico, pico-macro, pico-pico ou macro-macro). Os autores propõem ainda um mecanismo de ICIC dinâmico que auxilia no processo de *handover*. A combinação proposta de *handover* com ICIC permite uma redução eficiente da interferência. No entanto, o índice de *ping pong* é aumentado principalmente em cenários com UEs em alta velocidade.

Em [FISCHIONE; ATHANASIOU; SANTUCCI, 2014], os autores propõem uma abordagem intitulada *GELS (Generalized Extended Last Squares Handover)* é um novo modelo matemático para selecionar e otimizar a margem de histerese. Os autores melhoram seu trabalho anterior a partir de uma modelagem do processo de *handover* levando em consideração um mecanismo de *handover* convencional [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009]. O sistema proposto permite a otimização dinâmica considerando a probabilidade de interrupção e a probabilidade de *handover*. Os resultados mostraram que o *GELS* supera os esquemas de *handovers* avaliados. No entanto, o ganho é obtido ao custo de alta complexidade.

O artigo [DAVAASAMBUU; YU; SATO, 2015] propõe um algoritmo para auto otimização da histerese de *handover* com nós de retransmissão móvel duplo para redes sem fio em ambientes móveis de alta velocidade. O mecanismo proposto adapta a margem de histerese e o *offset* com base na velocidade do veículo e no indicador de desempenho de *handover* da célula caracterizada a fim de minimizar as falhas de *handover*, os *handovers ping pong* e indicadores de RLFs. Os resultados mostram desempenho superior em relação aos esquemas convencionais e reforçam que a configuração de parâmetros fixos é adequada somente para cenários comuns. No entanto, em um ambiente de alta velocidade, faz-se necessário esquema mais flexíveis. Em [XENAKIS et al, 2013], os autores visam otimizar o *handover* ao empregar decisões de *handover* com base em alertas de interferência e eficiência energética, explorando para tanto, duas margens de histerese de *handover*. A primeira margem de histerese é considerada para evitar células que podem comprometer a continuidade do serviço, por exemplo, devido a péssima condição de canal. A segunda margem identifica a célula com os requisitos mínimos em termos de RSRP. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo proposto permite duplicar o *offloading* das *macrocells*, aumentar a capacidade de *uplink* e reduzir o nível de interferência nos UEs. Por outro lado, a probabilidade de *handover* é aumentada.

Estudos realizados em [AHMAD et al, 2016] e [KUANG et al, 2015] mostram que as redes LTE podem ser gerenciadas de forma eficiente por algoritmos baseados em lógica *fuzzy*. A ideia da lógica *fuzzy* é explorada também para o controle do processo de *handover*. Por exemplo, em [MUÑOZ; BARCO; BANDERA, 2015], um sistema de decisão *handover* baseado em lógica *fuzzy* é proposto. Este sistema modifica os parâmetros relacionados à decisão de *handover* para ajustar a área de serviço de uma célula. Assim, a cobertura da célula congestionada é reduzida enquanto a cobertura das células adjacentes menos sobrecarregadas é aumentada. O sistema *fuzzy* é melhorado por um processo de *Q-Learning* a fim de selecionar a ação mais apropriada visando o balanceamento de carga ou a otimização de *handover*. A insatisfação do usuário em termos de bloqueio de chamadas e taxa de queda de chamadas mantêm valores semelhantes aos demais esquemas. No entanto, omitindo métricas e parâmetros relacionados à mobilidade (como a velocidade do UE) a decisão de *handover* leva a uma degradação de desempenho caso *small cells* sejam implantadas.

Outro algoritmo similar baseado em lógica *fuzzy* é apresentado em [KWONG et al, 2016]. O algoritmo permite adaptar regras *fuzzy* e funções de pertinência de acordo com dados históricos disponíveis dentro de uma área de rastreamento. São consideradas três entradas para este algoritmo: RSRP, taxa de erro de bloqueio e Qualidade de serviço (QoS). A implementação demonstra que esta abordagem minimiza as despesas operacionais e o número de *handovers* desnecessários em 20% quando comparado ao mecanismo de *handover* convencional. Outra otimização no processo de *handover* baseada em lógica *fuzzy* é apresentado em [AIBINU et al, 2017], onde os autores propõem uma decisão inteligente de *handover* híbrida.

O RSS é considerado como um gatilho do procedimento de *handover* e é acompanhado por um sistema neural que prevê o número de usuários na rede. A rede neural é utilizada para a determinação dos coeficientes do modelo para uma predição efetiva do nível RSS no sistema de gerenciamento de decisão de *handover*. No entanto, como no esquema acima citado, os parâmetros relacionados à mobilidade não são levados em consideração. Além disso, o algoritmo é de uma complexidade muito alta, de modo que a adequação à implantação de SCeNBs densas fica comprometido.

3.2.1. Algoritmo FMCCS

Alguns trabalhos analisados visam estabelecer a melhor forma de equilibrar os fatores envolvidos na comunicação móvel e gerenciar os usuários de forma a aproveitar melhor os recursos da rede e com isso obter uma maior eficiência. Nesse sentido, os autores em [HUSSEIN et al, 2016] propõem um novo algoritmo chamado FMCCS (*Fuzzy Multiple-*

Criteria Cell Selection), o qual tem por finalidade otimizar o processo de *handover*. O FMCCS considera um sistema *fuzzy* integrado com o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) que é uma técnica para Ordenação de Preferências por Similaridade com a Solução Ideal. O sistema *fuzzy* baseado no TOPSIS é empregado como um MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*) ou processo de tomada de decisão de múltiplos critérios que realiza avaliações e ponderação de critérios representados por variáveis linguísticas. O método TOPSIS foi proposto inicialmente por [HWANG; YOON, 1981]. O princípio básico do TOPSIS consiste em escolher uma alternativa que esteja tão próxima quanto possível da solução ideal positiva (benefício) e o mais distante quanto possível da solução ideal negativa (custo). A solução ideal é formada tomando-se os melhores valores alcançados pelas alternativas durante a avaliação em relação a cada critério de decisão, enquanto a solução ideal negativa é composta de forma similar, porém, tomando-se os piores valores. [HWANG; YOON, 1981] [KAHRAMAN, 2008].

Na abordagem clássica do método TOPSIS, os valores dos elementos que compõem a matriz de decisão são números *crisp*. Apesar da facilidade de entendimento desse método, sua aplicação de forma isolada em modelos de seleção se mostra inviável por não ser capaz de lidar com decisões sob incerteza. Visando adequar o método TOPSIS para tomada de decisão em cenários incerteza, [CHEN, 2000] propôs a combinação deste método com a lógica *fuzzy* clássica proposta por [ZADEH, 1965]. Nesse trabalho a matriz de decisão D é o próprio UE. O problema MCDM pode ser expresso na forma da matriz como segue:

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & \cdot & \cdot & \cdot & C_n \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2n} \\ A_3 & x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{mn} \end{matrix}$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n], \text{ and } \sum_{j=1}^n w_j = 1$$

onde A_i , $i = 1, 2, \dots, m$, são as alternativas (opções) a serem escolhidas; C_j , $j = 1, 2, \dots, n$, são os critérios (atributos) com os quais cada alternativa é avaliada. x_{ij} é o resultado numérico da i -ésima alternativa em relação ao j -ésimo critério; e w_j é o peso de cada critério. A sequência de passos proposta pelo algoritmo é demonstrada abaixo:

Step 1: Formulate the linguistic ratings \tilde{x}_{ij} for alternatives with respect to each criterion and the appropriate linguistic variables \tilde{W}_j of criteria weights.

Step 2: Normalize the data using Eq. (14) for the benefit criteria and Eq.(15) for the cost criteria.

$$r_{ij} = \frac{[x_{ij} - \min\{x_{ij}\}]}{[\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}]} \quad (14)$$

$$r_{ij} = \frac{[\max\{x_{ij}\} - x_{ij}]}{[\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}]} \quad (15)$$

Step 3: Formulate the weighted normalized fuzzy decision matrix \tilde{v} that is calculated by Eq. (13).

Step 4: Determine fuzzy positive ideal (FPIS) and fuzzy negative ideal (FNIS) indicated as (A^*) in Eq. (16) and (A^-) in Eq. (17), respectively:

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*) = \{(\max_i v_{ij} | i = 1, 2, \dots, m), \\ j = 1, 2, \dots, n\} \quad (16)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) = \{(\min_i v_{ij} | i = 1, 2, \dots, m), \\ j = 1, 2, \dots, n\} \quad (17)$$

Step 5: Compute the Euclidean distance (separation measures) of each alternative from A^* and A^- using Eqs. (18) and (19):

$$d_i^* = \sum_j^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*), i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$d_i^- = \sum_j^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

Step 6: Calculate the closeness coefficient or similarities to an ideal solution using Eq. (20):

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-} \quad (20)$$

A decisão de *handover* do FMCCS considera uma combinação de *critérios-S*, em que *S* se refere à qualidade do sinal no *downlink* (definido como RSRP), disponibilidade de blocos de recursos para *handover* de dados e *Signal to Interference plus Ruise Ratio* (SINR). Os detalhes de modelagem encontram-se em [HUSSEIN et al, 2016]. Os resultados mostram que o FMCCS reduz a frequência dos *handovers ping pong* e a relação de falha de *handover*. O esquema é avaliado apenas em cenários com *macrocells* e não há garantia de flexibilidade para ambientes densos.

3.2.2. Algoritmo STHA

Em [SILVA; BECVAR; FRANCÊS, 2018] apresenta-se o trabalho inicial desenvolvido com a proposta de otimizar o processo de tomada de decisão de *handover*. O STHA (*Self-tuning Handover Algorithm*) permite estimar se o *handover* para uma nova célula é eficiente ou não e assim evitar *handovers* que não são benéficos. O algoritmo integra uma condição de *handover* baseada em lógica *fuzzy* que realiza a comparação do nível de sinal do

eNB de serviço com um novo limiar (*threshold*) gerado como saída do sistema *fuzzy*. Para que o *handover* aconteça as condições abaixo precisam ser satisfeitas:

1. *Condição de handover convencional*, i.e., nível de sinal da eNB vizinha é maior que o nível de sinal da eNB de serviço mais Δ_{HM} :

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + \Delta_{HM} \quad (1)$$

onde, $RSRP_{SeNB}$ e $RSRP_{NeNB}$ representam valores de RSRP da eNB de serviço e das vizinhas respectivamente.

2. *Condição de handover proposta* baseada no sistema *fuzzy* que reflete um valor agregado de *handover* para o usuário:

$$RSRP_{SeNB} < RSRP_{FLT} \quad (2)$$

onde $RSRP_{FLT}$ é o valor de *threshold* obtido a partir da saída do sistema *fuzzy*.

A segunda condição introduzida neste artigo impõe a parte de otimização em que o nível de RSRP do eNB de serviço deve estar abaixo de um limiar. A título de exemplificar a diferença para o *handover* convencional temos que: Se o UE está conectado na eNB A e recebendo o sinal com um nível de -80 dBm. O UE identifica duas eNB vizinhas B e C com níveis de sinal de -75 e -77 dBm, respectivamente. Se apenas a primeira condição de *handover* fosse assumida, o UE executaria o *handover* para a eNB B, mesmo que o nível de sinal da célula atual fosse satisfatório e pudesse fornecer o *throughput* exigido. No entanto, com a nova condição derivada no sistema *fuzzy* proposto, o *handover* é realizado somente se todas as entradas do algoritmo (velocidade do UE, RSRP, RSRQ) indicarem que a conexão de serviço se tornará insuficiente para o UE e que o *handover* para uma das as células vizinhas será benéfica. Com o objetivo de obter precisão na análise, distinguiu-se na modelagem e na avaliação três estados de mobilidade conforme descrito nos intervalos abaixo. Esses intervalos são considerados para verificar a robustez do algoritmo para adaptar o limiar às mudanças nas velocidades dos usuários durante a simulação.

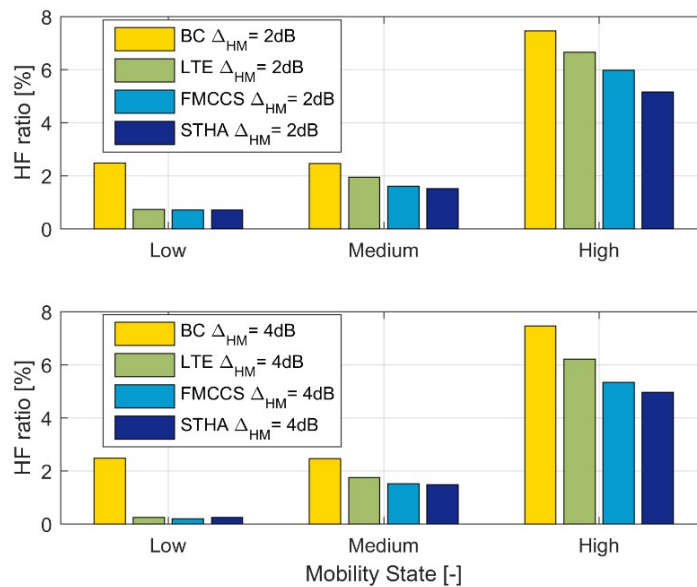
1. Mobilidade Baixa: de 0 a 10 km / h.
2. Mobilidade Média: de 10 a 50 km / h.
3. Mobilidade alta: acima de 50 km / h.

Na análise de desempenho das simulações são avaliados dois níveis de histereses, $\Delta_{HM} = 2\text{dB}$ e 4dB . Os principais resultados são brevemente apresentados abaixo.

Na figura 3.1 o *handover failure ratio* é apresentado. Observa-se que, com o aumento da velocidade do UE, o HF também aumenta, já que os UEs atravessam com mais frequência as bordas da célula e movem-se rapidamente para uma fora da área de cobertura e a conexão é

perdida antes do *handover* ser completado. Além disso, nota-se que a chance de falhas aumenta com a histerese porque o *handover* é iniciado mais tarde se a histerese for ajustada para um valor mais alto. Além disso, pode-se ver que o algoritmo STHA sempre atinge a HF mais baixa, desconsiderando a velocidade e os níveis de histerese do UE. Os algoritmos FMCCS, LTE e BC levam à taxa de falha de *handovers* igual a 6%, 6,6% e 7,5%, respectivamente, para altas velocidades. Em contraste, o algoritmo STHA atinge apenas 5% de taxa de falha para ambos os níveis de histerese. Essa melhoria é alcançada pelo fato de que a nova condição elimina *handovers*, que deveriam ser redundantes com base na qualidade do sinal e na velocidade do UE. O ganho de desempenho é o resultado de uma combinação de todas as três entradas do sistema *fuzzy* e pelo próprio sistema de lógica *fuzzy*. Cada parâmetro tem uma contribuição específica para o ganho, mas a análise de seu impacto no desempenho é omitida devido a limitações de páginas do artigo impostas pela conferência.

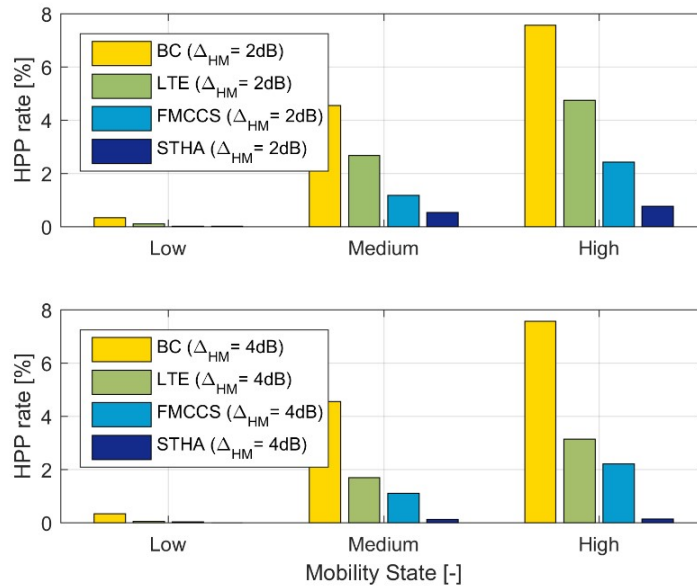
Figura 3.1. *Handover failure ratio* para vários estados de mobilidade e para $\Delta_{HM} = 2\text{dB}$ (*plot superior*) e $\Delta_H = 4\text{dB}$ (*plot inferior*).



Na Figura 3.2. apresenta-se a métrica *Handover Ping Pong* (HPP). Pode-se observar que a proporção de *handovers ping pong* aumenta novamente a partir do aumento da velocidade do UE. Isto é resultante de uma conexão mais curta dos UEs sob cobertura da *small cell* se a velocidade do UE for aumentada. Contrariamente, a proporção de *handovers ping pong* é reduzida com uma histerese maior. Este é um fato bem conhecido, já que a histerese reduz o número de *handovers ping pong*. Uma observação importante da Figura 3.2. é que o STHA mantém níveis muito baixos de HPP. Mesmo que os algoritmos competitivos FMCCS, LTE e BC cheguem a taxas de HPP em cerca de 2,5%, 4,7% e 7,5%, respectivamente, o HPP do STHA está sempre abaixo de 1% mesmo para uma menor

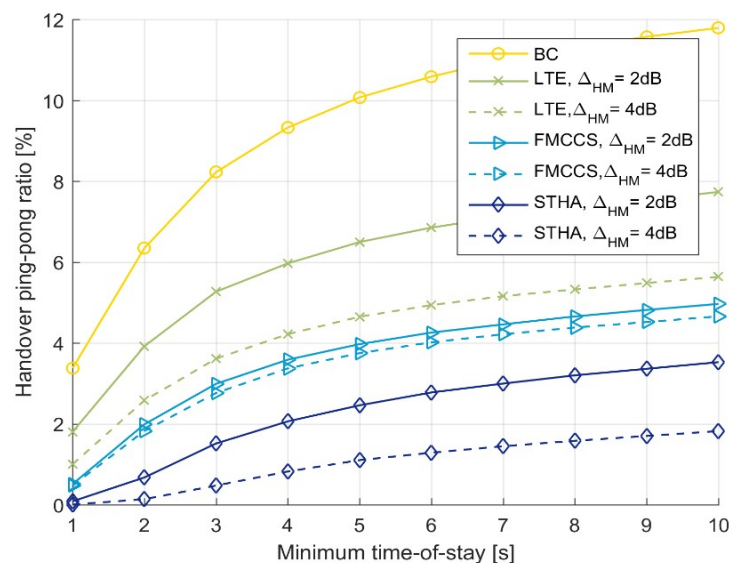
histerese e com UEs em alta velocidade. Para uma histerese mais alta, a taxa de *ping pong* é eliminada pelo algoritmo proposto. A melhoria é novamente graças à nova condição baseada em lógica difusa proposta, evitando *handovers*, que supostamente são redundantes.

Figura 3.2. *Handover ping pong ratio* para vários estados de mobilidade e para $\Delta_{HM} = 2\text{dB}$ (plot superior) e $\Delta_H = 4\text{dB}$ (plot inferior).



Analisa-se ainda o impacto do t_{MTS} na taxa de *handover ping pong* na Figura 3.3. Pode-se ver que a redução da HPP pelo algoritmo STHA, demonstrada na Figura 3.2. é válida para ampla gama de t_{MTS} considerados para definição do *handover ping pong*. Como é de se esperar, o HPP aumenta com t_{MTS} . Desconsiderando o t_{MTS} , o HPP alcançado pelo STHA é o mais baixo de todas as abordagens comparadas.

Figura 3.3. *Ping pong ratio sobre o t_{MTS} .*



Os resultados de simulação mostram que o algoritmo proposto reduz a taxa de falha de *handovers* e o efeito *ping pong*.

Todos os trabalhos apresentados possuem contribuições para a otimização do processo de *handover*, porém também possuem lacunas que devem ser preenchidas para que os mesmos possam ser aplicados de forma eficiente. A Tabela 3.1 descreve a síntese dos principais trabalhos abordados neste capítulo.

Tabela 3.1. Síntese dos principais trabalhos correlatos

Referência	Método	Características Principais	Principais lacunas encontradas
[BECVAR & MACH, 2013]	Algoritmo baseado na estimativa de <i>throughput</i> do UE	O <i>handover</i> é iniciado somente se o ganho estimado de <i>throughput</i> do UE exceder um limiar predefinido que toma por base o <i>throughput</i> e o tempo gasto pelos UEs na <i>femtocells</i> .	A ideia é limitada a células com um raio muito pequeno de cobertura como <i>femtocells</i> .
[SONG; MOON; HAN, 2015]	Algoritmo de otimização de parâmetros para <i>small cells</i> dinâmicas	O esquema detecta os tipos de RLFs e, em seguida, ajusta os parâmetros de <i>handover</i> em conformidade	O tempo de convergência do algoritmo é alto e a análise do efeito do <i>ping pong</i> é negligenciado.
[LIN; CASANOVA; FATTY, 2016]	Data-driven <i>Handover</i> approach (DHA)	Com base no modelo, os parâmetros de <i>handover</i> a margem de histerese e o time-to-trigger (TTT), são otimizados para minimizar o KPI.	A rede neural que estima a função KPI requer uma grande diversidade de treinamento para a operação do mundo real, o que é uma restrição notável para as redes móveis com densa implantação de SCeNBs.
[KUANG et al, 2015]	Estudo baseado em medições	O impacto das técnicas de <i>Cell Range Expansion</i> (CRE) e	O índice de <i>handover ping pong</i> é aumentado, principalmente em

		coordenação de interferência entre células (ICIC) são avaliadas para otimizar o <i>handover</i>	cenários de alta velocidade.
[FISCHIONE; ATHANASIOU; SANTUCCI, 2014]	Algoritmo GELS	Modelo matemático para selecionar e otimizar a margem de histerese	O ganho é obtido ao custo de alta complexidade.
[XENAKIS et al, 2013]	Algoritmo de <i>interference-aware</i>	Otimizar o <i>handover</i> ao empregar decisões de <i>handover</i> com base em alertas de interferência e eficiência energética	A probabilidade de <i>handover</i> é aumentada.
[MUÑOZ; BARCO; BANDERA, 2015]	Algoritmo baseado em <i>fuzzy</i>	Algoritmo que modifica parâmetros de <i>handover</i> e através de Q-learning	Omitindo métricas e parâmetros relacionados à mobilidade (como a velocidade do UE) a decisão de <i>handover</i> leva a uma degradação de desempenho caso <i>small cells</i> sejam implantadas.
[AIBINU et al, 2017]	Algoritmo híbrido para <i>handover</i>	Algoritmo utiliza uma rede neural para predição do RSS que é utilizado como gatilho para tomada de decisão de <i>handover</i> .	Os parâmetros relacionados à mobilidade não são levados em consideração. Além da alta complexidade algoritmo.
[CARDOSO et al, 2017]	Algoritmo inteligente de <i>handover</i>	Baseado em medições e lógica <i>fuzzy</i> .	O algoritmo é avaliado em um cenário simplista e os resultados comparados apenas com um modelo.
[HUSSEIN et al, 2016]	Algoritmo FMCCS	Baseado em lógica <i>fuzzy</i> e no método TOPSIS combinados.	O esquema é avaliado apenas em cenários com <i>macrocells</i> e não há

			garantia de flexibilidade para ambientes densos.
[SILVA; BECVAR; FRANCÊS, 2018]	Algoritmo STHA	Define um <i>threshold</i> dinâmico que dependendo das condições da rede e da velocidade do UE pode facilitar ou dificultar o <i>handover</i>	O impacto de dos parâmetros utilizados no sistema <i>fuzzy</i> é omitido.

3.3. Considerações Finais.

Neste capítulo, foram apresentados trabalhos que ilustram o estado da arte de técnicas e soluções empregadas no processo de gestão de *handover* em redes móveis, objetivou-se também demonstrar lacunas existentes na literatura que são utilizadas como objeto de estudo desta tese.

A partir das análises descritas, a principal contribuição da tese consiste na concepção de um esquema de decisão de *handover*, que é capaz da adaptação dinâmica da margem de histerese com base em um novo sistema de lógica *fuzzy*.

Capítulo 4 –Fuzzy-Oriented Handover Decision (FOHD)– Uma abordagem algorítmica de tomada de decisão de *handover* baseado em lógica *fuzzy*

4.1. Considerações Iniciais

Nesta seção, apresenta-se uma nova estratégia baseada em lógica *fuzzy* para otimização do processo de tomada de decisão de *handover*. Inicialmente, é contextualizado como se dá o princípio básico de um algoritmo de decisão de *handover* convencional. Em sequência, é apresentada uma visão geral de mais alto nível do algoritmo de *handover* proposto a partir da incorporação de controle de lógica *fuzzy* para tomada de decisão.

4.2. Decisão de *Handover* Convencional

À medida que um UE se move na rede, o mesmo pode enfrentar diferentes condições de propagação e de interferência, admitindo-se que uma célula vizinha pode apresentar melhores condições do que a célula atual. Sendo assim, o UE monitora a célula atual (SeNB – *serving eNodeB*) e células vizinhas (NeNBs – *neighboring eNodeB*) realizando, periodicamente, medições dos canais de rádio *downlink* (RSRP), com a intenção de identificar se a célula vizinha possui uma melhor condição (RSRP) que a atual. A decisão de *handover* convencional é baseada estritamente na comparação de RSRP entre as eNB [3GPP, 2012]. O RSRP é a métrica que indica a potência média dos *RE -resource elements* - que contêm sinais de referência da célula. Em sua forma simples, a decisão de *handover* é iniciada se a seguinte condição prevalecer para um determinado período de tempo:

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + \Delta_{HM} \quad (1)$$

Onde o $RSRP_{NeNB}$ e $RSRP_{SeNB}$ são os valores RSRP da *eNodeB* vizinha e da *eNodeB* atual, respectivamente; e Δ_{HM} (*histerese*) pode ser entendido como uma margem de segurança, cujo propósito é evitar o efeito “ping pong”.

4.3. Decisão de *Handover* baseada em Margem de Histerese dinâmica

Em [SILVA; BECVAR. FRANCÊS, 2018], a decisão de *handover* tomava por base uma nova condição que era avaliada uma vez que a condição de decisão de *handover*

convencional era satisfeita (passo 1 do algoritmo a seguir). A condição de decisão impõe que o *handover* seja realizado somente se todas as entradas do algoritmo *fuzzy* indicarem que a conexão de serviço não é suficiente para fornecer o rendimento necessário e que o *handover* para uma das células vizinha é mais vantajoso. Em contrapartida, nesta tese, propõe-se derivar uma margem de histerese dinâmica, determinada pelo sistema de lógica *fuzzy* multi-critérios, que melhore a decisão de *handover* de forma auto-otimizada.

A lógica *fuzzy* é efetivamente utilizada no contexto de processos complexos mal definidos e é adequada para lidar com um grande número de parâmetros imprecisos. Neste sentido, o objetivo desta tese é propor um mecanismo capaz de reduzir o número de *handovers* redundantes, mantendo uma alta utilização das SCeNBs. O princípio geral da estratégia desenvolvida é exemplificado no fluxograma da figura 4.1.a. e descrito na sequência de passos que segue:

No primeiro passo, o RSRP da eNB de serviço é comparado com o RSRP das eNB vizinhas. Então, no segundo passo, se alguma eNB vizinha oferecer o RSRP de um nível superior ao da eNB atual, o sistema *fuzzy* determina o valor da margem de histerese dinâmica. No terceiro passo, a margem de histerese dinâmica derivada pelo sistema de lógica *fuzzy* é considerada para a decisão de *handover*. Esses principais passos do algoritmo proposto estão resumidos a seguir:

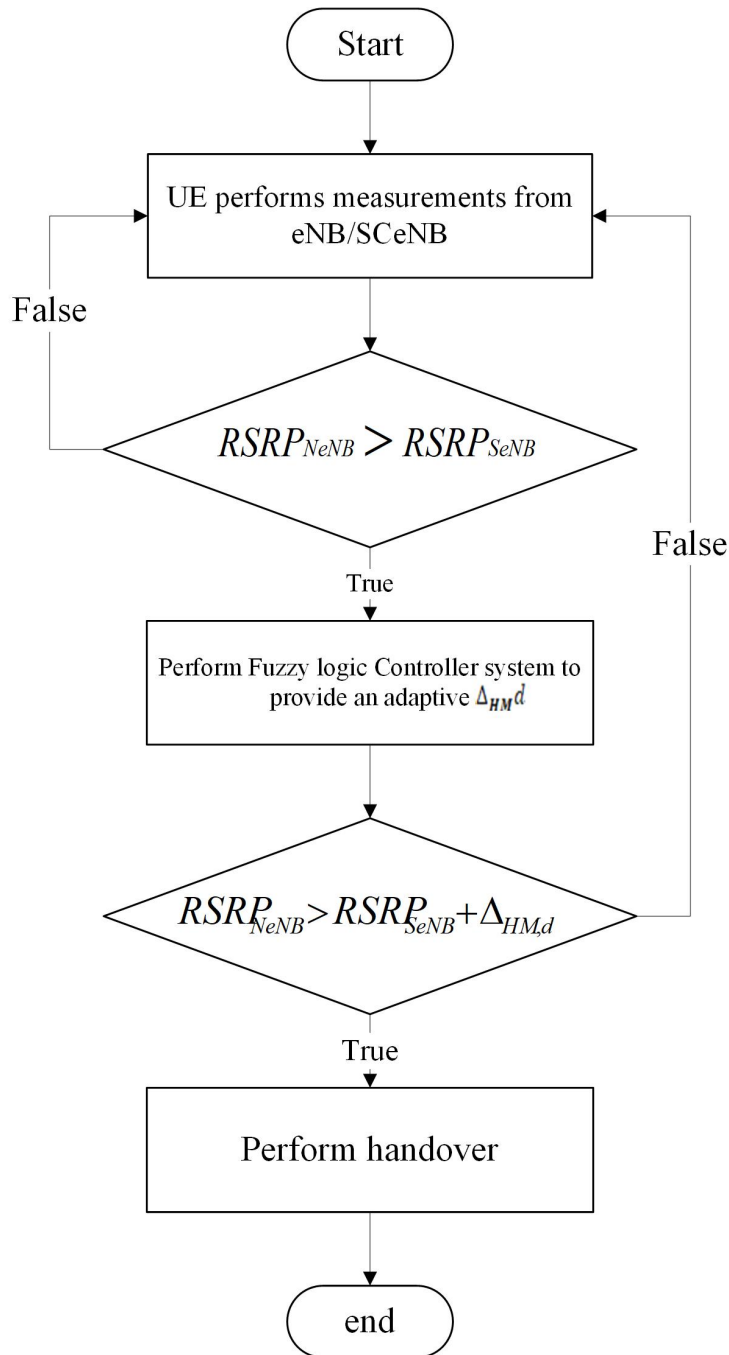
1. Checar uma condição preliminar para gatilho do processo de decisão

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} \quad (2)$$

2. Se (2) for satisfeita, então determina-se uma *margem de histerese dinâmica* ($\Delta_{HM,d}$) através de uma novo sistema baseado em lógica *fuzzy* (descrito em detalhes na próxima subseção).
3. Executa uma decisão de *handover* comum considerando a nova margem de histerese baseada em lógica *fuzzy*:

$$RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + \Delta_{HM,d} \quad (3)$$

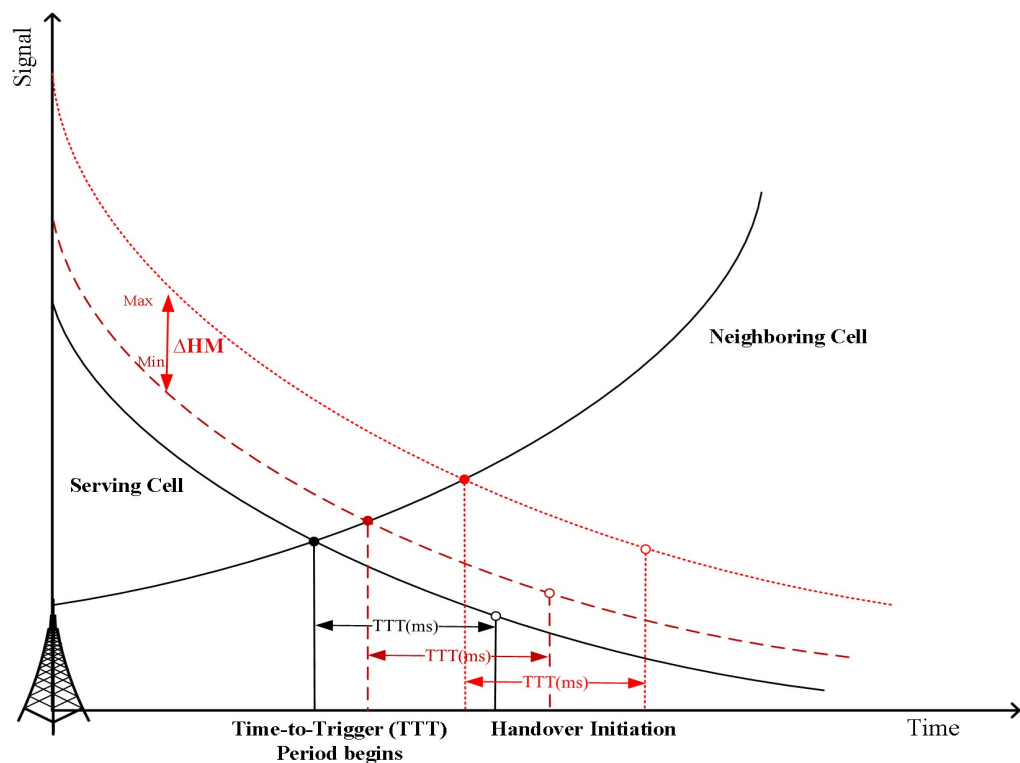
Figura 4.1a. Fluxograma da estratégia para otimização da histerese.



A margem de histerese (Δ_{HM}) é o principal parâmetro para gerenciamento do ponto de partida do procedimento de *handover* na etapa de preparação. No esquema convencional, este parâmetro é mantido fixo independentemente da dinâmica da rede. Na Figura 4.1.b, ilustra-se em curvas pretas o comportamento convencional da Δ_{HM} . Em contraste, nas curvas vermelhas, o princípio da estratégia desenvolvida nesta tese é brevemente mostrado. Nas curvas tracejadas observa-se a flexibilidade de valores que podem ser assumidos, exemplificando os valores mínimos e máximos, que consequentemente implica diferentes pontos de iniciação do

handover. O procedimento de *handover* usa diferentes parâmetros para controle, especialmente durante o ponto de disparo. Esses parâmetros precisam de uma configuração específica para atingir os valores ideais, que afetam a decisão de *handover*. Em relação a isto, o $\Delta_{HM,d}$ desempenha um papel importante no processo de entrega, uma vez que o sucesso e a eficiência, em grande medida, consistem na iniciação e decisão de entrega adequadas. Assim, a principal contribuição desta tese consiste na introdução de um esquema de *handover* capaz de adaptação dinâmica da margem de histerese ($\Delta_{HM,d}$) com base no controlador de lógica *fuzzy* considerando a velocidade do UE, a qualidade do canal e potência do sinal. Tem-se como foco minimizar o número de *handovers* redundantes, assim como a taxa de falha de *handover*.

Figura 4.1.b. Estratégia para otimização da histerese no decorrer do tempo.



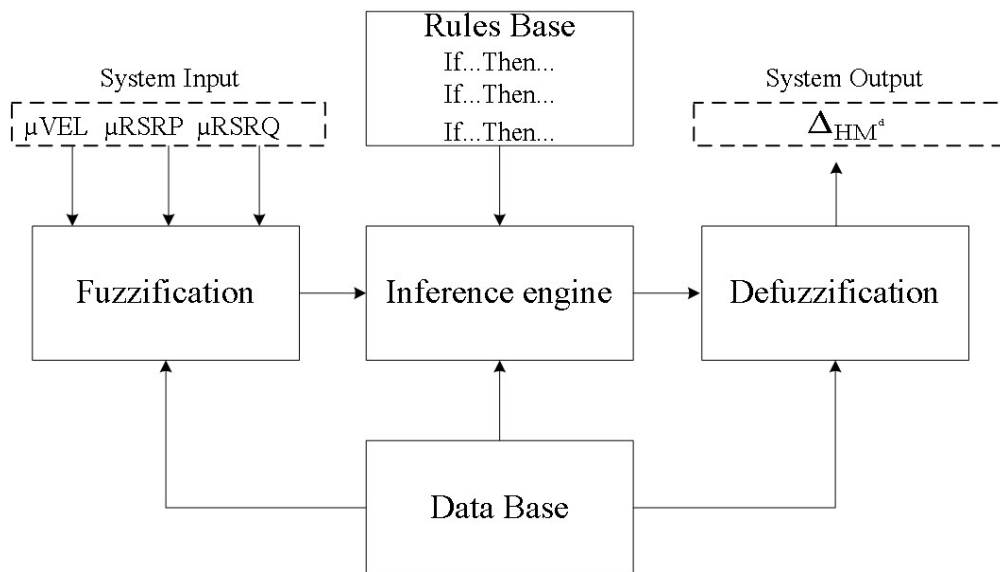
4.4. Sistema *Fuzzy* para determinar a Histerese Dinâmica

Os sistemas de lógica *fuzzy* foram desenvolvidos para gerenciar a imprecisão e a incerteza em um processo de raciocínio de um sistema inteligente, como um sistema baseado em conhecimento, um sistema especializado ou um sistema de controle lógico [ZADEH, 1965]. Os sistemas de lógica *fuzzy* são muito úteis para a otimização automática de parâmetros de rede. Tal processo é composto comumente de três etapas básicas: coleta de dados, avaliação e

execução de uma ação de controle. Na Figura 4.2. é apresentada a arquitetura do sistema *fuzzy* proposto. Para uma maior compreensão do conceito proposto, primeiro se explicita uma arquitetura de sistemas de lógica *fuzzy* genérica e, em seguida, expõe-se a aplicação ao problema de decisão de *handover* objeto desta tese.

O primeiro passo no sistema de lógica *fuzzy* é o processo de *fuzzificação*. Nesta etapa, as entradas são traduzidas em variáveis lingüísticas (por exemplo, *baixa*, *média* e *alta*) e uma função de pertinência é calculada para cada entrada do sistema *fuzzy*. A função de pertinência é uma curva que define como cada ponto no espaço de entrada é mapeado para um valor de associação (ou grau de pertinência). Normalmente, as funções de pertinência são expressas em forma de funções matemáticas. O processo de *fuzzificação* também envolve a transformação dos valores das variáveis de entrada em um mapeamento de escala. O mapeamento de escala traduz o intervalo dos valores de entrada em universos de discurso correspondentes, encontrando a representação *fuzzy* de valores de entrada não *fuzzy*.

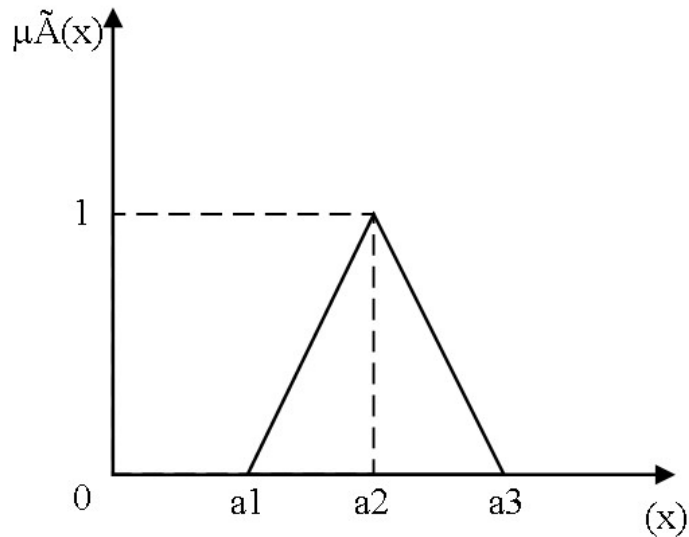
Figura 4.2. Ilustração da arquitetura de lógica *fuzzy* com entradas e saída do sistema proposto para o algoritmo de decisão de *handover*.



O segundo bloco, base de dados, define as funções de pertinência *fuzzy* que permitem atribuir os graus de pertinência aos conjuntos *fuzzy*. Essa tarefa é construída a partir de conceitos, que são subjetivamente definidos e baseados em conhecimentos especializados. O conjunto *fuzzy* \tilde{A} em um universo de discurso X é descrito pela função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ onde $x \in (0,1)$ e $x \in \mathfrak{R}$. O valor da função $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é denotado como o grau de pertinência de x em \tilde{A} . Conforme mostrado nas Figura 4.3. e Figura 4.4., adota-se uma função de pertinência triangular para todas as entradas e saídas, pois esta função é adequada para operações em tempo real

devido à sua simplicidade na modelagem e facilidade de interpretação [JANTZEN, 2013] [WITOLD, 1994].

Figura 4.3. Ilustração das funções de pertinência de um sistema de lógica fuzzy.



Um conjunto *fuzzy* triangular \tilde{A} pode ser designado por um triplete $(a1, a2, a3)$. A forma matemática é expressa da seguinte forma:

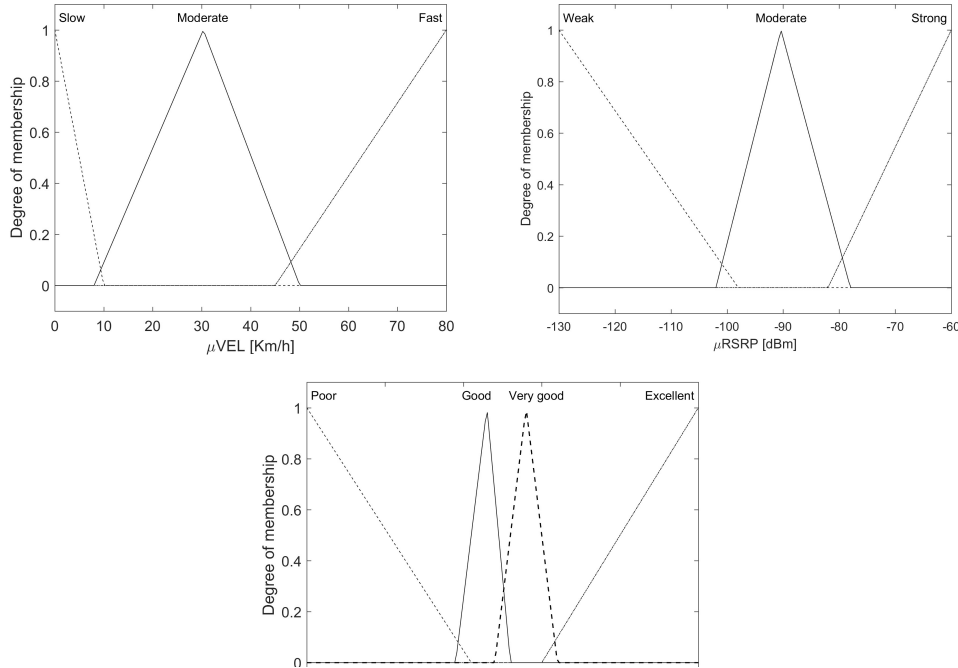
$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a1 \\ \frac{x - a1}{a2 - a1} & a1 < x \leq a2 \\ \frac{a3 - x}{a3 - a2} & a2 < x \leq a3 \\ 0 & x > a3 \end{cases} \quad (4)$$

O próximo bloco do sistema de lógica *fuzzy*, a *Base de Regras*, compreende todas as relações possíveis entre as entradas e saídas do sistema. Um exemplo de um sistema *fuzzy* com duas entradas $x1$ e $x2$ (antecedentes) e uma única saída y (consequente) é descrita por uma coleção de proposições linguísticas r no formato *IF-THEN*:

$$\text{IF } x1 \text{ is } \tilde{A}_1^k \text{ and IF } x2 \text{ is } \tilde{A}_2^k \text{ THEN } y \text{ is } \tilde{B}^k \text{ for } k = 1, 2, \dots, r \quad (5)$$

onde \tilde{A}_1^k e \tilde{A}_2^k são conjuntos *fuzzy* representando k-ésimas entradas (antecedentes) e \tilde{B}^k é o conjunto *fuzzy* representando k-ésimas saídas (consequente).

Figura 4.4. Funções de pertinência para as entradas: (a) μ_{VEL} , (b) μ_{RSRP} , e (c) μ_{RSRQ} .



A parte chave de cada sistema de lógica *fuzzy* é o *mecanismo de inferência*, que identifica as regras a serem disparadas e calcula os valores *fuzzy* das variáveis de saída usando o método de inferência *max-min*. [ROSS, 2010]. Este método testa as magnitudes de cada regra e seleciona a de mais alto valor. A principal vantagem do método *max-min* é a simplicidade computacional. No mecanismo de inferência, um operador de implicação *fuzzy* é aplicado para obter um novo conjunto *fuzzy* baseado no consequente de cada regra (um conjunto *fuzzy*) e valor antecedente obtido. Então, as saídas obtidas para cada regra são combinadas em um único conjunto *fuzzy* usando um operador de agregação *fuzzy*. Em outras palavras, a regra com o mais alto grau de verdade é selecionada e então, a função de pertinência resultante a ser ativada é determinada. A saída (consequente) é dada por:

$$\mu_{\tilde{B}_k}(y) = \max_k \left[\min \left[\mu_{\tilde{A}_1^k}(VEL), \mu_{\tilde{A}_2^k}(RSRP), \mu_{\tilde{A}_3^k}(RSRQ) \right] \right] \quad (6)$$

for $k = 1, 2, \dots, r$

Finalmente, o processo de *Defuzzificação*, que tem o significado oposto da *Fuzzificação*, fornece uma ação de controle não *fuzzy* a partir de uma ação de controle *fuzzy* inferida. Este passo consiste em uma transformação do conjunto *fuzzy* agregado $\mu_{\tilde{B}_k}(y)$ em um único número crisp. Esta transformação corresponde à determinação do Centro de Gravidade (COG) [BAI;

ZHUANG; WANG, 2006]. A média ponderada da função de pertinência ou o centro da gravidade da área delimitada pela curva da função de pertinência é calculada para ser o valor mais nítido da quantidade *fuzzy*, da seguinte forma:

$$\mu_{\tilde{B}_k}(y) = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{\tilde{B}_k(y)} y}{\sum_{i=1}^N \mu_{\tilde{B}_k(y)}} \quad (7)$$

onde $\mu_{\tilde{B}_k(y)}$ é o centroide de cada função de pertinência simétrica.

Nesta proposta, considera-se três entradas no processo de *Fuzzificação*: velocidade do UE, RSRP e RSRQ. O primeiro parâmetro de entrada é a velocidade do UE denotada como μ_{VEL} . Os UEs de alta velocidade podem passar pelas SCeNBs em um curto intervalo de tempo, causando o *handover* frequente e, portanto, gerando uma excessiva carga de sinalização de *handover* para a rede [SHEN et al, 2014]. Na Figura 4.4. , a caracterização dos três conjuntos da velocidade do EU é descrita: Lento (de 0 a 10 km/h), Moderado (de 8 a 50 km/h) e Rápido (de 45 a 80 km/h). É importante notar que as funções de pertinência se sobrepõem devido ao limite de transição suave, que é uma característica subjacente dos conjuntos *fuzzy*; isto é, os valores de entrada durante o processo de *fuzzificação* podem pertencer a mais de um conjunto *fuzzy* com diferente grau de pertinência mostrado nas funções de pertinência individual de cada parâmetro.

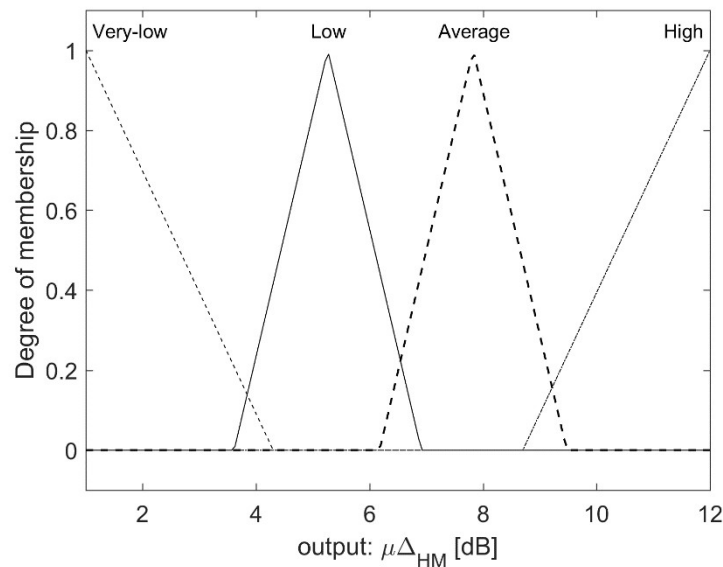
Como segunda entrada, considera-se a potência de sinal recebida representada pelo RSRP, denotada como μ_{RSRP} , considerando três estados, (definidos com base no intervalo de RSRP do 3GPP): Fraco (-160 a -95 dBm), Moderado (-100 para -73 dBm) e Forte (-80 a -20 dBm), como mostrado na Figura 4.4. . Com o objetivo de definir uma célula adequada para o *handover*, a medida de RSRP fornece uma indicação da cobertura celular e a potência dos sinais recebidos que são utilizados para executar a decisão de *handover*.

Além disso, considerando cenários com densa implantação de SCeNBs, a eficiência da comunicação de rádio não depende apenas do nível do sinal da eNB de serviço, mas também do ruído e interferência causados pelas eNB vizinhas. Assim, o parâmetro RSRQ (denotado como μ_{RSRQ}) é considerado como a terceira entrada do sistema. A Figura 4.4. mostra os conjuntos de μ_{RSRQ} definidos da seguinte maneira: Pobre (de -60 a -18 dB), Bom (de -22 a -12 dB), Muito Bom (de -14 a -6 dB) e Excelente (de -10 a +20 dB) em relação à definição de intervalos de RSRQ no 3GPP.

Os intervalos e a granularidade de todos os parâmetros de entrada são definidos com base nos intervalos de valores comumente esperados nas redes móveis como assumido no 3GPP [3GPP, 2017].

Todas as três entradas são combinadas pela máquina de inferência para gerar a saída do sistema *fuzzy* proposto representado por $\Delta_{HM,d}$. São definidos quatro conjuntos *fuzzy* para a saída $\Delta_{HM,d}$, para obter uma granularidade razoável no espaço de saída (ver Figura 4.5.): Muito baixo (de 1 a 4.5 dB), Baixo (de 3.5 a 7 dB), Média (de 6 a 9.5 dB) e Alto (de 8.5 a 12 dB).

Figura 4.5. Função de pertinência para a saída do sistema fuzzy proposto $\Delta_{HM,d}$.



Formulou-se 36 regras *fuzzy* (o número de regras é determinado pela combinação de todos os estados possíveis das três variáveis de entrada, isto é, $3 \times 3 \times 4$). As regras são definidas considerando os seguintes aspectos e requisitos:

- Se μ_{Vel} for *Baixo*, o $\Delta_{HM,d}$, deve ser ajustado para valores mais baixos para proporcionar uma liberdade para encontrar eNBs mais adequadas. Por outro lado, se o μ_{Vel} for *Alto* o $\Delta_{HM,d}$ deve ser ajustado para valores mais altos para evitar o *handover* prematuro. Neste caso, é preferível tolerar uma conexão sub-ótima temporária em vez de executar *handovers* desnecessários.

- Se μ_{RSRP} for *Fracó* o $\Delta_{HM,d}$, deve ser configurado para valores mais baixos para facilitar o *handover*, enquanto que se o μ_{RSRP} for *Forte*, $\Delta_{HM,d}$ deve ser configurado para valores mais altos para manter a conexão atual.

- Se μ_{RSRQ} for *Pobre* o $\Delta_{HM,d}$ deve ser configurado para valores mais baixos para facilitar o *handover*, uma vez que não há vantagens de insistir em uma conexão incorreta. Por outro lado, se o μ_{RSRQ} for *Excelente* o $\Delta_{HM,d}$, deve ser configurado para valores mais altos para

manter a experiência de conexão. A Tabela 4.1 mostra como todas as regras e consequentes definições do $\Delta_{HM,d}$.

Tabela 4.1. Regras Formuladas para Determinar o $\mu\Delta_{HM,d}$

Regra N°.	μ_{VEL}	μ_{RSRP}	μ_{RSRQ}	$\mu\Delta_{HM,d}$
1	Baixo	Fraco	Pobre	Muito Baixo
2	Baixo	Fraco	Bom	Muito Baixo
3	Baixo	Fraco	Muito bom	Muito Baixo
4	Baixo	Fraco	Excelente	Muito Baixo
5	Baixo	Moderado	Pobre	Muito Baixo
6	Baixo	Moderado	Bom	Muito Baixo
7	Baixo	Moderado	Muito bom	Muito Baixo
8	Baixo	Moderado	Excelente	Baixo
9	Baixo	Forte	Pobre	Muito Baixo
10	Baixo	Forte	Bom	Muito Baixo
11	Baixo	Forte	Muito bom	Baixo
12	Baixo	Forte	Excelente	Médio
13	Médio	Fraco	Pobre	Muito Baixo
14	Médio	Fraco	Bom	Baixo
15	Médio	Fraco	Muito bom	Baixo
16	Médio	Fraco	Excelente	Médio
17	Médio	Moderado	Pobre	Muito Baixo
18	Médio	Moderado	Bom	Baixo
19	Médio	Moderado	Muito bom	Baixo
20	Médio	Moderado	Excelente	Médio
21	Médio	Forte	Pobre	Muito Baixo
22	Médio	Forte	Bom	Baixo
23	Médio	Forte	Muito bom	Médio
24	Médio	Forte	Excelente	Alto
25	Alto	Fraco	Pobre	Baixo
26	Alto	Fraco	Bom	Médio
27	Alto	Fraco	Muito bom	Médio
28	Alto	Fraco	Excelente	Médio
29	Alto	Moderado	Pobre	Médio
30	Alto	Moderado	Bom	Alto
31	Alto	Moderado	Muito bom	Alto
32	Alto	Moderado	Excelente	Alto
33	Alto	Forte	Pobre	Médio
34	Alto	Forte	Bom	Alto
35	Alto	Forte	Muito bom	Alto
36	Alto	Forte	Excelente	Alto

As seqüência de etapas individuais do algoritmo de decisão de *handover* baseado na lógica *fuzzy* proposto (por meio da determinação da margem de histerese adaptativa $\Delta_{HM,d}$ estão resumidas no Algoritmo 1.

Algoritmo 1. Proposed *handover* decision algorithm with *fuzzy* logic-based determination of dynamic hysteresis margin

1. *IF* $RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB}$
2. Converts $\{\mu_{VEL}, \mu_{RSRP}$ and $\mu_{RSRQ}\}$ to *fuzzy* sets
3. Calculate the degree of truth for each *fuzzy* rule acc. to (4)
4. Computes the antecedent of each k rule by implication operator:

$$\mu_{\tilde{b}_k}(y) = \min\left[\mu_{A_1^k}(VEL), \mu_{A_2^k}(RSRP), \mu_{A_3^k}(RSRQ)\right]$$
5. Calculate the outputs of each triggered rule acc. to the proposed rule base and the membership functions of the output defined in TABLE I
6. Aggregate outputs obtained for each rule into a single *fuzzy* set:

$$\mu_{\tilde{\Delta}_{HM,d}} = \max_k\left[\mu_{\tilde{b}_k}(y)\right]$$
7. Transform the output value of $\mu_{\tilde{\Delta}_{HM,d}}$ into a crisp value $\Delta_{HM,d}$ by center of gravity method acc.to (7)
8. *IF* $RSRP_{NeNB} > RSRP_{SeNB} + \Delta_{HM,d}$
9. PERFORM *handover*
10. *ELSE* DO NOT PERFORM *handover*
11. *END*

4.5. Considerações Finais

Nesta seção, é apresentada uma nova abordagem baseada em lógica *fuzzy* para ajuste dinâmico da margem de histerese. Inicialmente, é contextualizado o princípio básico de um algoritmo de decisão de *handover* convencional. Em seguida, é apresentada uma visão geral de mais alto nível do algoritmo de decisão de *handover* proposto, a partir da incorporação de controle de lógica *fuzzy* para tomada de decisão.

Capítulo 5 – Avaliação de Desempenho

5.1. Considerações Iniciais

Este capítulo se inicia com considerações importantes sobre o ambiente de simulação, assim como o processo de escolha do simulador e parâmetros utilizados na modelagem do sistema. Em sequência apresentam-se as métricas de avaliação de desempenho e a descrição dos algoritmos competitivos. Por fim, discute-se os resultados obtidos a partir de duas seções da seguinte forma: a apresentação do comparativo de desempenho com algoritmos competitivos e em sequência, a análise do impacto das entradas *fuzzy* no desempenho do sistema.

5.2. Ambiente de Simulação

Segundo [JAIN, 1990] existem três técnicas para avaliação de desempenho de um determinado sistema. São elas: a modelagem analítica, simulação e medidas de um sistema real (aferição). A seleção da técnica correta depende do tempo e recursos disponíveis para solucionar o problema e o nível desejado de detalhamento e precisão.

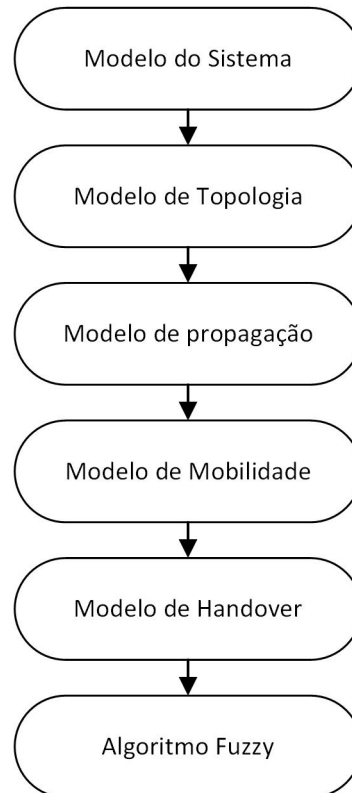
A simulação computacional é a técnica utilizada nesta tese, pois trata-se de uma técnica de menor custo e complexidade, tornando mais prática a modelagem e estudo de um sistema celular móvel. É possível projetar e analisar uma série de cenários de celulares móveis usando simulação por computador. Nesta tese a solução por simulação discreta é realizada com o software MATLAB®.

O MATLAB (do inglês MATrix LABoratory) é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico e gráficos científicos. Além disso, muitas funções especializadas já estão internamente implementadas. A partir da estrutura básica do MATLAB, diversos pacotes de expansão foram desenvolvidos, de modo a potencializar e otimizar seu uso para algumas aplicações específicas – e que, em geral, demandariam muitas linhas de código [MATLAB, 2018]. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração de tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em outras linguagens.

Em geral o usuário e a funcionalidade do MATLAB crescem juntos, pois com o tempo, ele começa a escrever suas próprias funções, agregando capacidades específicas. Isto

faz com que, aos poucos, o MATLAB comece a mimetizar, ou até mesmo suplantar, softwares científicos específicos de diversas áreas. A Figura 5.1. descreve os principais blocos funcionais da estrutura desenvolvida para implementação e modelagem do trabalho desenvolvido.

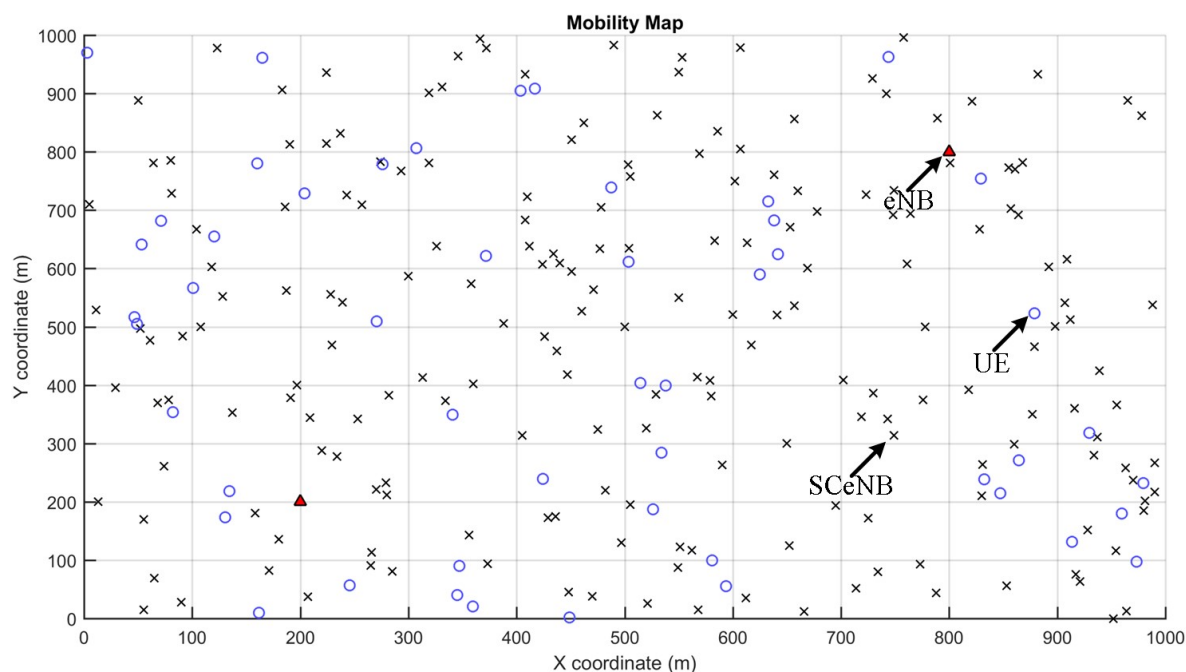
Figura 5.1. Blocos funcionais da modelagem do sistema.



A modelagem e parametrização do sistema se deu em consonância com as especificações técnicas do 3GPP [3GPP, 2017]. Considera-se um sistema LTE com uma largura de banda de 5Mhz, 25 PRBs e 2Ghz de frequência. Cada eNodeB com potência de transmissão de até 43 dBm e 20 dBm para as SCellNBs.

Com respeito a topologia, assumiu-se uma área geográfica de 1000 m x 1000 m, onde dentro desta área foram dispostas 2 eNBs, até 200 SCellNBs e 50 UEs conforme ilustrado no exemplo na Figura 5.2. As SCellNBs e os UEs são dispostos aleatoriamente no início da simulação enquanto as 2 eNBs estão localizados em posições predefinidas, perto dos cantos da área, para que estas eNB possam fornecer cobertura para toda a área de simulação.

Figura 5.2. Exemplo do cenário de simulação, onde temos as eNBs representadas por triângulo vermelho, as SCellNBs pela variável 'x' em preto, e os UEs por círculos azuis.



A propagação de sinal das eNBs para os UEs é derivada de acordo com os modelos recomendados pelo *Small cell Forum*. Assim os modelos *Okumura-Hata* e *ITU-R P.1238* são usados para propagação de sinal das eNBs e das SCellNBs, respectivamente. Os principais parâmetros de simulação estão sumarizados na Tabela 5.1

Tabela 5.1. Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor
Área de Simulação	1000x1000m
Frequência	2 GHz
Potência de transmissão das eNBs/SCeNBs	43/20 dBm
Número de eNB/SCeNB/UEs	2/200/50
Modelo de Propagação da eNBs/SCeNBs	<i>Okumura Hata Model/ITU-R P1238</i>
Número de setores por eNB	1 setor (antenas omnidirecionais)
Altura da antena para eNBs/UEs	30/1.5
Modelo de Mobilidade	<i>Random Waypoint Mobility</i>
Tempo de Simulação	900 s por drop
Número de drops de simulação	25 drops

Quanto à mobilidade, assumiu-se para todos os 50 usuários da rede o modelo *random waypoint* [CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002]. O modelo de mobilidade é um fator de grande importância e possui grande influência no desempenho e no projeto da rede. O modelo *Random Waypoint* faz com que o nó móvel permaneça parado em um ponto no ambiente de simulação durante um determinado período, uma vez transcorrido este tempo, o nó escolhe

uma velocidade e posição aleatória no cenário como destino - tais valores são escolhidos de modo a serem uniformemente distribuída entre valores predefinidos. O processo é reiniciado quando o nó chega ao ponto de destino [CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002]. Para variabilidade, os UEs sofrem variação de velocidade aleatória em um intervalo de 0 a 80 km/h.

5.3. Métricas de Avaliação de Desempenho

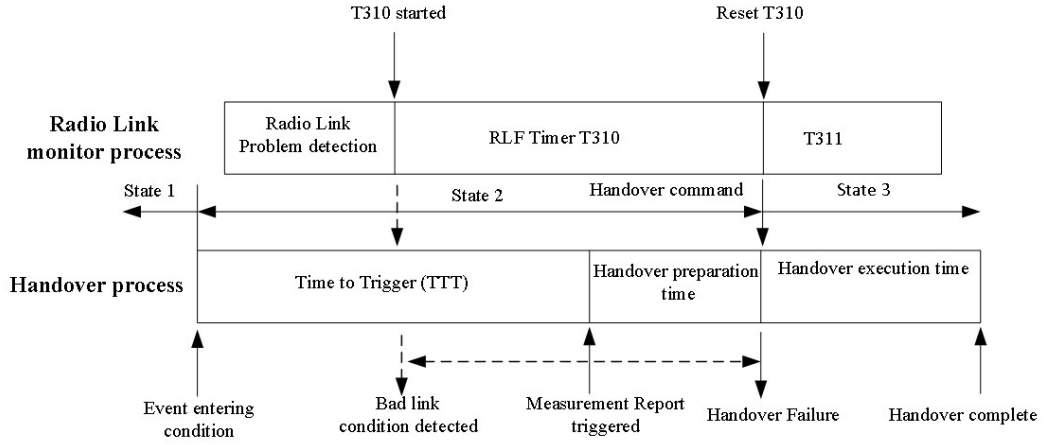
Nesta seção, são descritas as principais métricas de avaliação utilizadas como indicadores de desempenho de *handover*. As métricas são: *Average number of performed handovers*, *Handover failure ratio*, *Ping pong ratio*, e *Time spent in SCeNBs*.

O *average number of performed handovers* ($N_{HO,AVG}$) é calculado como a soma dos números de *handover* ocorridos pelos UEs (N_{HO}) sobre o total do UEs na simulação (N_{UE}).

$$N_{HO,AVG} = \frac{N_{HO}}{N_{UE}} \quad (8)$$

Para a modelagem do *handover failure ratio*, o procedimento de *handover* é dividido em três estados de acordo com LTE [3GPP, 2012], como mostrado na Figura 5.3. O *Estágio 1* é definido pelo instante que precede a condição do Evento A3 no 3GPP. No *estágio 2*, o UE desencadeia o relatório de medição se a condição do Evento A3 se mantiver durante toda a duração do tempo para disparar. O *estágio 3* ocorre quando o UE recebe com sucesso o comando de *handover* da eNB de serviço e inicia o processo de execução de *handover*. Na modelagem utilizada, os eventos de falha de entrega são determinados de acordo com o SINR de *downlink*. Como no LTE-A, assume-se que, quando o SINR é menor que o limite Q_{out} , uma condição de canal ruim é indicada e o tempo T310 é iniciado. A falha de *handover* é declarada quando o T310 expira.

Figura 5.3. Processo de Monitoramento de Link de Rádio e Processo de Handover [3GPP, 2012]



O *Handover Failure ratio (HF)*, é definida como uma relação entre o número de falhas de *handover* (N_{fail}) e o número de todas as tentativas de *handover*. O número de tentativas de *handover* é dado pela soma do número de *handovers* falha e do número de transferências bem-sucedidas (N_{suc}):

$$HF = \frac{N_{fail}}{N_{fail} + N_{suc}} \quad (9)$$

A terceira métrica, o *handover ping pong (HPP) ratio*, é definida da seguinte forma. Se uma conexão realiza *handover* a uma nova célula e é devolvida à célula original em menos de um determinado instante de tempo crítico, denotado como *minimum time-of-stay* (t_{MTS}), o *handover* é considerado como *handover ping pong*. A taxa de *handovers ping pong* representa o número de *handovers ping pong* (N_{PP}) dividido pelo número total de *handovers*, incluindo: i) o número de *handovers ping pong*, ii) o número de *handovers não ping pong* (N_{nPP}), ou seja, com a permanência mais do que t_{MTS} , e iii) o número de *handovers* que falharam (N_{fail}).

$$HPP = \frac{N_{nPP}}{N_{nPP} + N_{PP} + N_{fail}} \quad (10)$$

Por último, o *time spent in small cells* (t_{SCeNB}) é entendido como a duração média de conexão dos usuários com as SCeNBs (t_{connSC}) pelo tempo de simulação (t_{sim}).

$$t_{SCeNB} = \frac{\left(\frac{\sum t_{connSC}}{N_{UE}} \right)}{t_{sim}} \quad (11)$$

5.4. Algoritmos Competitivos

Nas simulações executadas, o algoritmo de *handover* proposto nesta tese é comparado com três esquemas competitivos previamente descritos na seção de trabalhos correlatos, assim também com o algoritmo *STHA*, desenvolvido inicialmente e comparado como a esta proposta a fim de demonstrar a superioridade da proposta atual:

- *Best Connection (BC)* representando algoritmo que considera que UE sempre estará conectado à célula que fornecer o RSRP mais alto.
- LTE Convencional (nas figuras denotado como LTE) é o algoritmo de *handover* implementado de acordo com o 3GPP conforme especificado em [3GPP, 2011].
- *Fuzzy Multiple-Criteria Cell Selection (FMCCS)* definido e proposto em [HUSSEIN et al, 2016] é um algoritmo baseado em lógica *fuzzy* integrado com TOPSIS.
- *Self-Tuning Handover Algorithm (STHA)* definido em [SILVA; BECVAR; FRANCÊS, 2018] adiciona uma nova condição de *handover* baseada em *fuzzy* para melhorar a decisão de *handover*. Este algoritmo deu-se como um trabalho preliminar, que serve como base para o algoritmo desenvolvido nesta tese. Assim, o incluímos para demonstrar a superioridade da nova proposta em relação ao STHA.

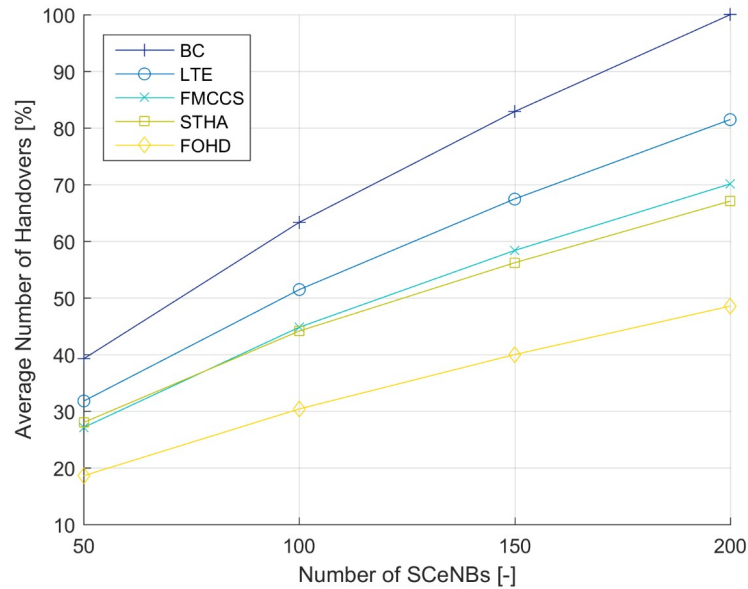
5.5. Comparativo de Desempenho com Algoritmos Competitivos

Com o levantamento das configurações iniciais realizadas no MATLAB, a simulação então foi realizada. Foram executadas 25 instâncias de simulação, a repetição dos cenários ocorreu com mesma configuração, mesma duração, com variação das posições da SCeNBs e com aleatoriedade no posicionamento e percurso dos usuários.

O tempo de simulação foi de 900 segundos - tempo esse tido como suficiente para que o ambiente apresentasse um comportamento estável. Inicialmente, investiga-se o impacto do *average number of handovers* (veja a Figura 5.4.). Como era esperado, o número de *handovers* aumenta com o crescimento do número de SCeNBs já que mais SCeNBs aparecem disponíveis na rede e por conseguinte os UEs realizam *handovers* mais frequentemente para evitar perdas de conexão. O algoritmo proposto supera significativamente todos os esquemas

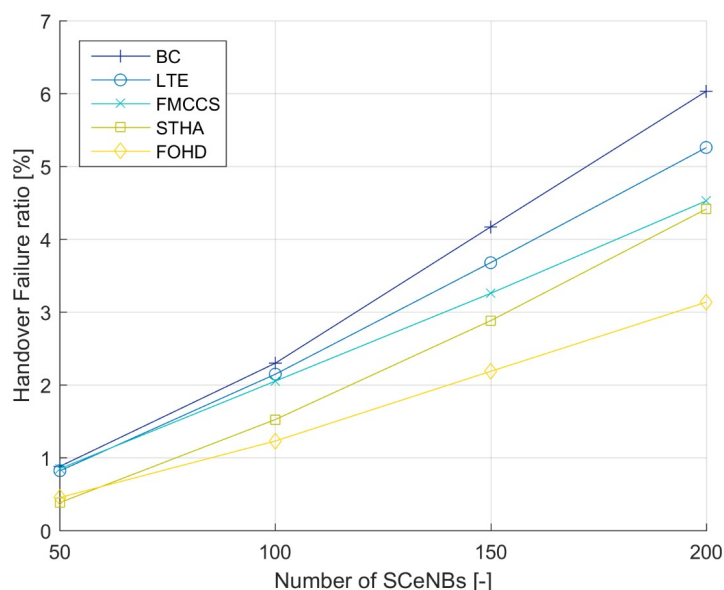
comparados, graças à adaptação inteligente da margem de histerese que permite mitigar *handovers* redundantes. O ganho introduzido pelo algoritmo proposto aumenta com o número de SCellNs e atinge melhoria de 18%, 22%, 33% e 52% comparados aos algoritmos STHA, FMCCS, LTE e BC, respectivamente, para o cenário com 200 SCellNs implantadas.

Figura 5.4. Impacto do average number of handovers.



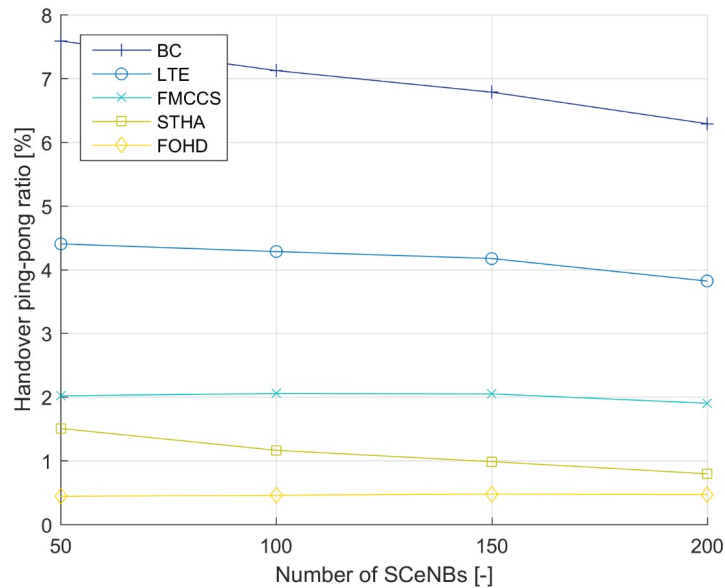
Na Figura 5.5. , a relação de falhas de *handover* é representada. Pode-se verificar que a relação HF aumenta com o número de SCellNs. Este aumento é causado por uma interferência mais forte imposta no cenário com mais SCellNs levando a rápidas quedas no SINR. A figura mostra ainda que, para as baixas densidades de SCellNs (aproximadamente até 100 SCellNs), o algoritmo proposto atinge desempenho semelhante a proposta anterior - o STHA. Tanto o algoritmo proposto como a STHA superam os três algoritmos competitivos e reduzem a relação de HF para quase metade. Para maiores densidades de SCellNs (mais de 100), o desempenho de STHA piora e converge para o FMCCS (ou seja, para relação HF cerca de 4.5%). Ao contrário, o algoritmo proposto ainda é capaz de manter uma baixa relação HF (cerca de 3%), mesmo para 200 SCellNs.

Figura 5.5. Impacto do número de SCellNs no handover failure ratio.



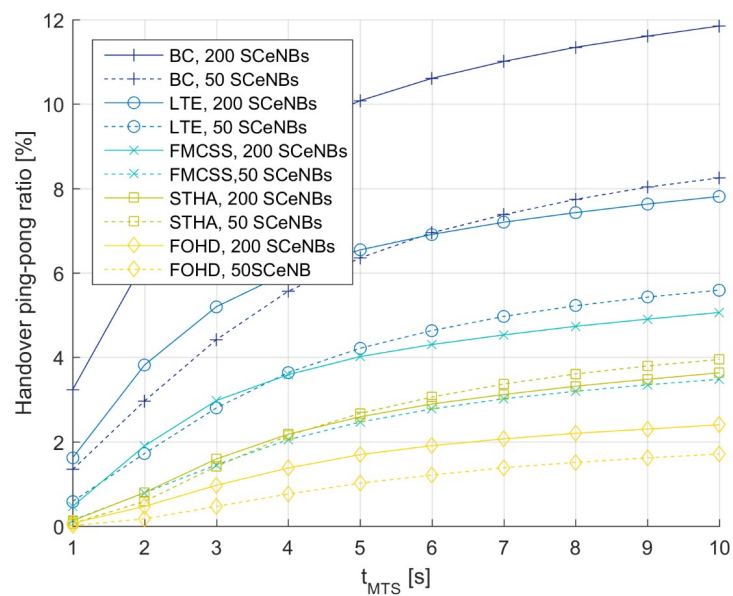
O impacto do número de SCellNs no efeito ping pong (representado pela relação HPP) está ilustrado na Figura 5.6. para $t_{MTS} = 2s$. A figura ilustra a superioridade do algoritmo proposto, que mantém a relação HPP sempre abaixo de 0.5% para todos os cenários investigados. Este desempenho distinto é alcançado pelo fato de que o algoritmo otimiza a margem de histerese de *handover* que está diretamente relacionada à diminuição da proporção de *handovers* desnecessários. Em contraste, as soluções competitivas levaram a uma relação de HPP relativamente alta (1.5%, 2%, 4.4% e 7.5%, para STHA, FMCCS, LTE e BC, respectivamente) para densidades de SCellNs baixa a média (até 50 SCellNs). O HPP das quatro soluções competitivas diminui para maior densidade de SCellNs. Essa diminuição deve-se ao fato de que com maior densidade de SCellNs, a probabilidade de a conexão ser entregue a uma nova SCellNB é aumentada em comparação com a probabilidade de *handover* retornar a SCellNB de serviço. No entanto, mesmo para 200 SCellNs, a proporção de HPP ainda está em 0.7%, 1.9%, 3.8% e 6.2% para os algoritmos STHA, FMCCS, LTE e BC, respectivamente, enquanto o esquema proposto mantém a proporção de HPP em 0.4%.

Figura 5.6. Impacto do número de SCellNs no handover ping pong ratio para $t_{MTS} = 2s$.



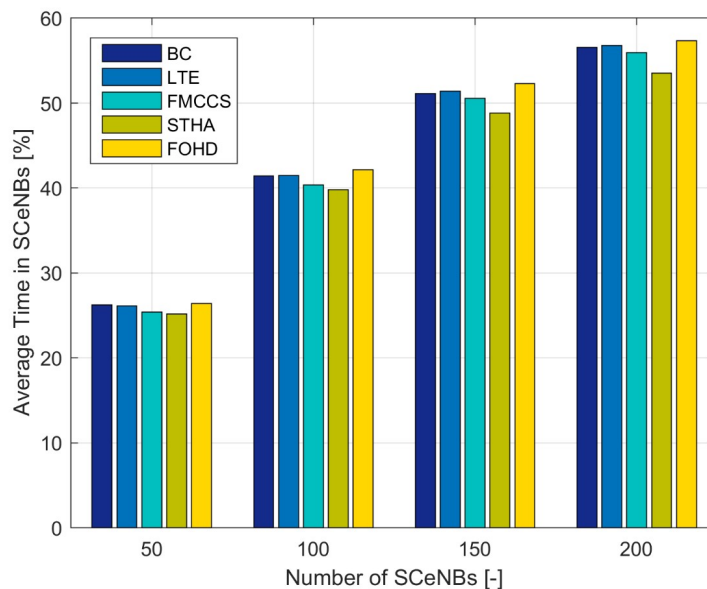
Como o efeito do ping pong é definido pelo t_{MTS} , também demonstra-se o impacto do t_{MTS} sobre a proporção de HPP na Figura 5.7. A proporção de HPP aumenta com t_{MTS} porque mais *handovers* são considerados como ping pong a partir do aumento no t_{MTS} . Podemos ver que a redução na proporção de HPP demonstrada na Figura 5.6. é válida para um amplo intervalo de t_{MTS} e o algoritmo proposto supera todos os esquemas competitivos independente do t_{MTS} .

Figura 5.7. Impacto do t_{MTS} no ping pong ratio para 200 SCellNs (linhas sólidas) e 50 SCellNs (linhas tracejadas).



Por último, avalia-se o *average time spent in SCeNBs*. Muitos algoritmos de *handover* concentram-se em mitigar *handover* enquanto diminui o tempo em que os UEs estão conectados as SCeNBs. No entanto, essa mitigação leva a uma subutilização de recursos fornecidos pelas SCeNBs e, conseqüentemente, a uma perda no potencial de SCeNBs para melhorar o rendimento da rede. Como pode-se observar na Figura 5.8. , a proposta melhora levemente o tempo gasto pelos UEs nos SCeNBs em comparação com todos os algoritmos competitivos. O ganho mais notável (de 1% a 4% dependendo do número de SCeNBs) é introduzido em relação à STHA, que atinge o desempenho mais próximo em todas as outras métricas de desempenho investigadas. O prolongamento do tempo gasto em SCeNBs é introduzido pela combinação de todas as três entradas do sistema *fuzzy*, resultando na margem de histerese adaptada de acordo com a qualidade do canal.

Figura 5.8. Impacto do Average time spent in SCeNBs.



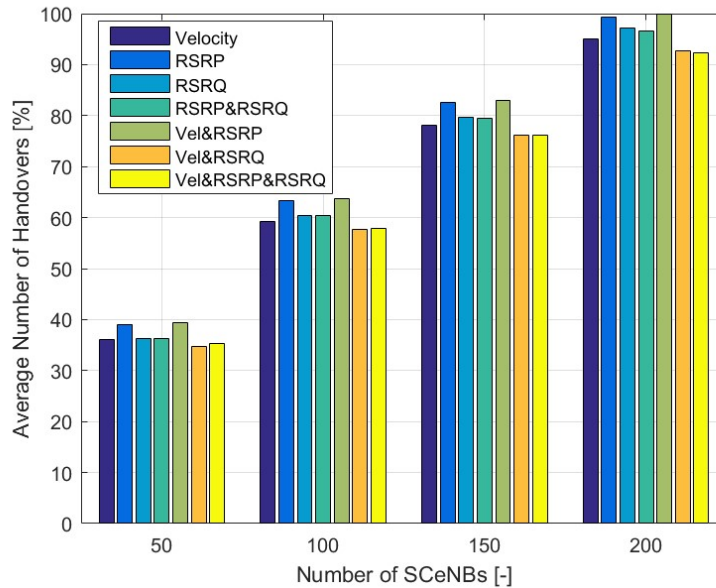
5.6. Análises do Impacto das Entradas *Fuzzy* no desempenho do sistema.

Nesta subseção, avalia-se o impacto das entradas individuais no sistema *fuzzy* e suas combinações para identificar a importância das entradas no desempenho geral do sistema proposto. Como na subseção anterior, as quatro métricas de desempenho, *Average Number of Handovers*, *Handover Failure ratio*, *Ping pong ratio* e *Average time Spent in SCeNBs*, que já estão previamente descritos na seção IV são investigadas.

Na Figura 5.9. , o número médio de *handovers* realizados é avaliado. Pode-se observar que a velocidade e RSRQ são entradas-chave para o sistema de lógica *fuzzy*. A combinação de velocidade e RSRQ leva ao menor número de *handovers* e a inclusão de RSRP não alteram

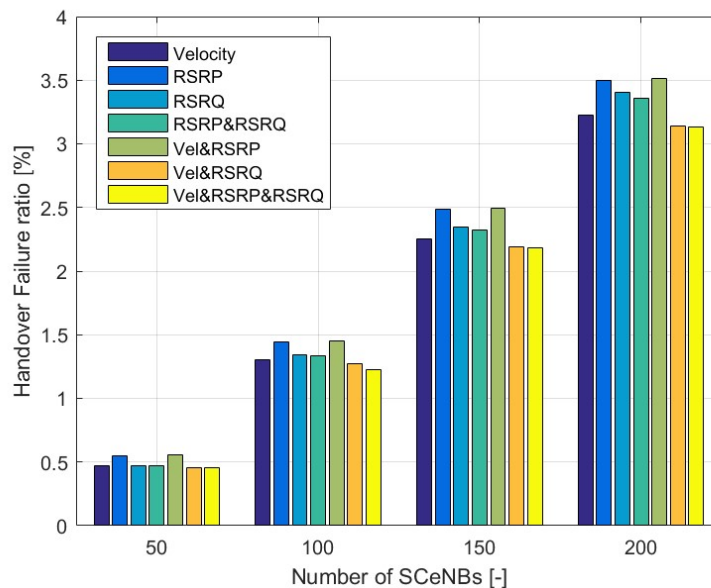
essas métricas de desempenho, principalmente porque, do ponto de vista de decisão de *handover*, o RSRQ já inclui informações sobre o RSRP.

Figura 5.9. Impacto de várias combinações das entradas do sistema fuzzy (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ,) no average number of performed handovers.



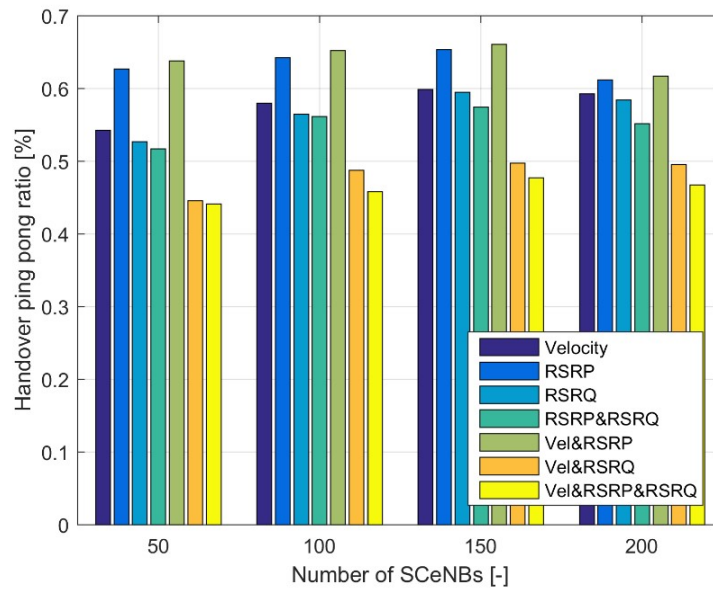
O impacto de várias combinações das entradas sobre a relação HF está representado na Figura 5.10. Como na figura anterior, a velocidade e RSRQ são de grande importância para a relação HPP e a melhoria introduzida pela inclusão do RSRP é redundante como as principais informações relacionadas as falhas de *handover* (ou seja, a qualidade do canal) já cobertas pelo RSRQ.

Figura 5.10. Impacto de várias combinações das entradas do sistema fuzzy (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ,) no handover failure ratio.



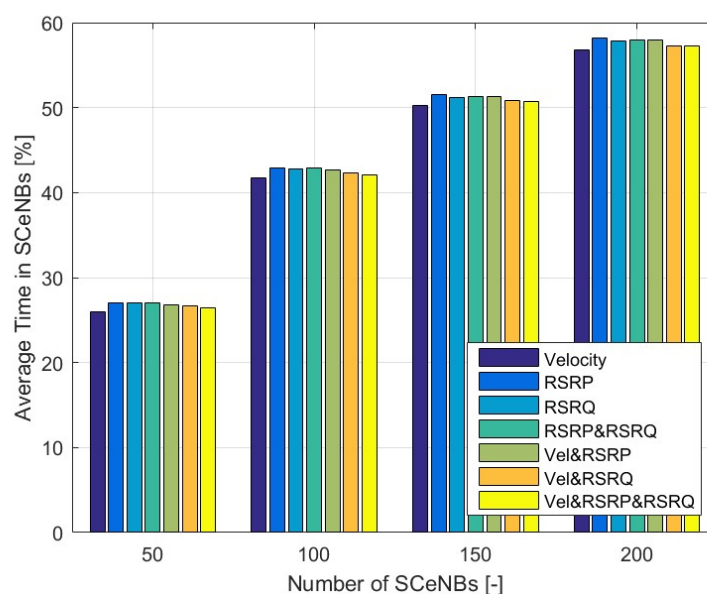
Na Figura 5.11. , analisa-se o impacto das entradas do sistema *fuzzy* na relação HPP. Neste caso, podemos ver que o ganho de desempenho é gerado novamente por uma combinação de velocidade e RSRQ. No entanto, o RSRP pode melhorar de forma notável a proporção de HPP para maiores densidades de SCellNs. O RSRP fornece ao UE informações essenciais sobre a força do sinal da célula atual e de células vizinhas. Isso ajuda a determinar o instante ideal para o *handover* e a evitar o efeito ping pong se o *handover* não for necessário.

Figura 5.11. Impacto de várias combinações das entradas do sistema fuzzy (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ,) no handover ping pong ratio.



Por último, o impacto de várias das combinações das entradas no *average time spent in SCellNs* é retratado na Figura 5.12. Pode-se observar pequenas variações para todas as combinações de entrada consideradas.

Figura 5.12. Impacto de várias combinações das entradas do sistema *fuzzy* (Velocidade do UE, RSRP, RSRQ) no *average time spent in SCellNBs*.



A partir da análise de todas as três entradas definidas, observa-se que a velocidade do UE e o RSRQ são as entradas mais importantes para o sistema de lógica *fuzzy* proposto. No entanto, a consideração da terceira entrada, RSRP, mostra-se útil para reduzir a proporção de *handovers ping pong* em cenários com densa implantação de SCellNBs.

5.7 – Considerações Finais

Neste capítulo, introduziu-se um algoritmo de decisão de *handover* que explora um novo sistema de lógica *fuzzy* para a determinação dinâmica da margem de histerese. O algoritmo proposto leva a um desempenho superior, melhorando os indicadores-chave de desempenho de *handover* em comparação com soluções de última geração. A solução proposta elimina quase por completo o efeito de ping pong e, além disso, também reduz a relação de falha de *handover* e o número total de *handovers* em comparação com algoritmos competitivos. Com relação às soluções competitivas, as melhorias alcançadas não são ao custo da redução do tempo gasto pelos UEs nas SCellNBs.

O algoritmo proposto mantém o tempo gasto nas SCellNBs ao mesmo nível que os demais algoritmos, que demonstram uma pior performance em termos do número de *handovers* realizados, proporção de ping pong e relação de falha de *handover*. Assim, o algoritmo proposto permite preservar os benefícios das SCellNBs, enquanto todos os indicadores-chave de

desempenho de *handover* são notavelmente melhorados. Isso indica a adequação do algoritmo proposto para futuras redes móveis com cenários de alta densidade de SCeNBs.

Capítulo 6 - Conclusão

As demandas no tráfego móvel estão aumentando devido a proliferação de dispositivos móveis, serviços e aplicativos emergentes. Como reflexo, a procura de serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma contínua e em ritmo exponencial, fazendo com que as operadoras estejam constantemente a investir em diversas soluções para prover aumento de capacidade.

Nesse contexto, a densificação por meio de SCellBs vem sendo proposta como possível alternativa para atender a essas limitações, ou seja, provisionar mais estações bases (SCellBs) para atender uma determinada área geográfica. A densificação de SCellBs fornece maior capacidade, no entanto traz um aumento significativo no número de *handovers* na rede, elevando a sobrecarga e aumentando as problemáticas quanto ao processo de gerenciamento de mobilidade.

Esta tese teve por objetivo a concepção de algoritmos para otimização do processo de tomada de decisão *handover* em cenários de densa implantação de SCellBs. Os esquemas baseados em lógica *fuzzy* exploram a velocidade do usuário e a qualidade de canal de rádio para o auto ajuste de parâmetros do processo de *handover*.

Inicialmente é descrito e avaliado um algoritmo de auto ajuste em [SILVA; BECVAR; FRANCÊS, 2018] com intuito de minimizar o efeito de ping pong e a relação de falha de *handover* (ou seja, a proporção de *handovers* não concluídos com sucesso) explorando um sistema de lógica *fuzzy* para inserção de uma nova condição no processo de tomada de decisão. Após cumprir a condição de *handover* convencional, o nível de sinal da eNB de serviço é comparado com um *threshold* gerado a partir da saída do sistema *fuzzy* e então, essa nova condição é avaliada na etapa de iniciação do processo de *handover*. A partir dos resultados iniciais obtidos, deu-se continuidade ao trabalho e o estende-se nas seguintes dimensões:

- Primeiro, um novo algoritmo baseado em lógica *fuzzy* foi proposto. O sistema *fuzzy* é integrado à decisão de *handover* convencional através de uma margem de histerese de ajuste dinâmico. Isso significa que ambos os níveis de sinal das eNBs de serviço e destino são colocados no contexto de uma margem de histerese de ajuste dinâmico.
- Em segundo lugar, é proposto um novo esquema de inferência *fuzzy* adaptativo para fins de otimização de *handover*. Este novo esquema de inferência deriva

dinamicamente a margem de histerese de acordo com a velocidade do UE e com os níveis de potência do sinal e qualidade do canal.

- Em terceiro lugar, demonstra-se o desempenho superior do esquema de decisão de *handover* proposto em relação aos algoritmos de decisão de *handover* de última geração (incluindo o trabalho anterior [SILVA; BECVAR; FRANCÊS, 2018]) e mostra-se que o efeito do ping pong pode ser quase que totalmente eliminado pelo algoritmo proposto. Investigou-se o desempenho a partir do crescimento do número de SCeNBs a fim de confirmar a robustez do algoritmo proposto. Também se confirmou que o tempo gasto pelos UE conectados nas SCeNBs é mantido em um nível semelhante ao dos algoritmos competitivos garantindo que os benefícios da implantação de densas SCeNBs sejam preservados.
- Em quarto lugar, para melhor compreender as principais fontes do ganho de desempenho, avalia-se em detalhes o impacto de cada entrada do sistema de lógica *fuzzy* no desempenho do algoritmo proposto.

O desenvolvimento eficiente de algoritmos de tomada de decisão de *handover* necessitam de um processo minucioso na seleção dos parâmetros de *handover* e na ótima configuração ótima dos mesmos. Dessa forma, os resultados das simulações permitiram analisar o comportamento das principais métricas de desempenho de *handover* em cenários de grande mobilidade. Mais ainda, com os resultados obtidos, foi possível validar a superioridade da estratégia em comparação aos algoritmos competitivos.

6.1. Contribuições da Tese

Como principais contribuições desta tese, destacam-se:

- A investigação de soluções que garantam suporte ao crescente tráfego móvel, contribuindo principalmente na discussão da densificação da rede por meio de SCeNBs.
- A proposição de uma estratégia para o estudo e avaliação do *handover*, sobretudo considerando o impacto da densificação de SCeNBs.
- A concepção e implementação de dois novos algoritmos de tomada de decisão de *handover* multicritério baseado em lógica *fuzzy*.
- A realização de um estudo aprofundado da tecnologia LTE, compreendendo as principais características e parâmetros envolvidos na modelagem dos componentes da rede.

- A elaboração e desenvolvimento de funções no MATLAB, indispensáveis para a toda a modelagem do sistema LTE e das SCeNBs no simulador.
- A realização de uma análise de sensibilidade nos parâmetros de entrada (Velocidade, RSRP e RSRQ) para diferentes níveis de carga do sistema.
- A partir do Programa de Mobilidade (SMART2), a autora desta tese passou parte do período de doutorado na *Czech Technical University (CVUT)* em Praga, onde realizou estudos no *5G Mobile Research Lab*. Como resultado e contribuição, fortaleceram-se os laços de cooperação entre as instituições, além da divulgação do trabalho desenvolvido através de artigos internacionais e periódicos.
- A divulgação do trabalho desenvolvido nesta tese por meio de publicação de artigos em conferências e periódicos. Estes artigos foram aceitos e publicados conforme listados abaixo:

Livros

- **SILVA, K. C.;** FRANCES, C. R. L. *Analysis of Handover based on the use of Femtocells in LTE Networks*. Saarbrücken. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015 p.88.

Periódicos

- **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.
- **SILVA, K. C.;** ARAUJO, J. P. L.; FRANCES, C. R. L. *A Performance Evaluation of WLAN-Femtocell-LTE beyond the Capacity Crunch. Does Femtocell have to overcome WLAN or can they coexist in HetNets?.* Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications.v.15, p.402 - 416, 2016.
- **SILVA, K. C.;** FRANCES, C. R. L.; SILVA, C. P. A.; DONZA, A. C. S.; VIJAYKUMAR, N. L. *Analysis of handover based on the use of femtocells in LTE networks*. International Journal of Recent Development in Engineering and Technology., v.2, p.19 - 28, 2014.

Conferências Internacionais

- **SILVA, K.C;** BECVAR, Z., CARDOSO, E; FRANCES, C.R.L *Self-tuning Handover Algorithm Based on Fuzzy Logic in Mobile Networks with Dense Small cells: IEEE WCNC 2017 International Conference Network Conference*, Barcelona, 2018.

- CARDOSO, E; SILVA, K.C; FRANCES, C.R.L *Intelligent handover procedure for heterogeneous LTE networks using fuzzy logic*: Aceito e apresentado na IEEE WCMC 2017 *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Valencia, 2017.
- SILVA, K. C., VIJAYKUMAR, N. L., FRANCÊS, C. R. L., SILVA, C.P.A., DONZA, A.C.S., *Analysis of Handover Based on the Use of Femtocells in LTE Networks*. Aceito e apresentado na IRCESM: 2014 *International Research Conference on Engineering, Science and Management*, Dubai, UAE, Junho de 2014.
- SILVA, K. C., VIJAYKUMAR, N. L., FRANCÊS, C. R. L., SILVA, C.P.A., DONZA, A.C.S., *An approach for analysis the impact of LTE-based femtocell network - Case study based on discrete simulation*. Aceito para publicação na ICWN: 2014 *International Conference on Wireless Networks*, Las Vegas, Nevada, USA, julho de 2014.

6.2. Trabalhos Futuros

Como possíveis desdobramentos desta tese, seria de grande relevância considerar outras métricas para avaliar eficientemente a percepção dos usuários. Isso significa, por exemplo, que parâmetros como *throughput*, devem ser levados em consideração. Também sugere-se a proposição de um algoritmo para predição do nível sinal das SCeNBs. Isso poderia prolongar o tempo das SCeNBs com impacto negativo minimizado na probabilidade de *handover*.

A investigação de soluções que buscam diretamente ou indiretamente o balanceamento de carga em redes LTE também é uma área de intensa investigação pela comunidade científica. Os aspectos quanto a busca por uma maior automação das eNodeBs, melhor planejamento e utilização dos recursos disponíveis na célula, além da redução de custos, motivam a necessidade de aperfeiçoamento contínuo nas estratégias de planejamento.

A importância em avaliar modelos para planejamento de capacidade para sistemas celulares, sobretudo investigando estratégias para minimizar o consumo de energia, mantendo níveis aceitáveis de qualidade de serviço também é significativo. A partir da realização de simulações ou da implementação de modelos markovianos buscar métodos de otimização do consumo de energia elétrica nos ambientes onde há o crescente tráfego de Internet gerado pela telefonia celular de banda larga.

6.3. Dificuldades Encontradas

Cabe ressaltar, que ao longo do desenvolvimento da tese, foram encontradas dificuldades para a consecução do trabalho, as quais serão apresentadas aqui, com o objetivo de orientar pesquisadores e estudantes que venham a utilizar conhecimentos disponíveis nesta tese, dentre as quais destaca-se:

- A realização de um estudo aprofundado da tecnologia LTE, compreendendo as principais características, assim como também das *small cells* e da lógica *fuzzy*.
- Compreensão e definição dos parâmetros empregados no controlador *fuzzy*, sobretudo na definição das funções de pertinência e seus intervalos.
- Identificação e testes dos parâmetros com maior relevância ao processo de tomada de decisão de *handover*, e na definição dos indicadores de desempenho: *average number of handovers*, *handover failure* e *handover ping pong*.
- A principal dificuldade que norteou a tese, se deu na fase de implementação e modelagem de todas as camadas do sistema através do MATLAB com ênfase na:
 - Criação e composição do sistema LTE e na caracterização das *small cells*.
 - Caracterização dos componentes da rede e dos diferentes cenários, assim como das funções referente ao modelo de mobilidade e *handover*.
 - Modelagem de todas as cinco métricas utilizadas para fins de avaliação de desempenho.
 - Implementação e avaliação de quatro diferentes algoritmos competitivos utilizados para validação da proposta.
 - Nas simulações, os cenários avaliados consumiram bastante tempo de execução, já que os testes foram feitos de forma exaustiva com grande número de *drops* e com variações quanto a quantidade de *small cells* dispersas no cenário.

Referências

- 3GPP TR 36.839 V11.1.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Mobility enhancements in heterogeneous networks (Release 11)*, Dezembro, 2012.
- 3GPP TS 36.300 V8.12.0, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall Description; Stage 2. (Release 8) 2010b.* Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.12.00_60/ts_136300v081200p.pdf>, acesso em 23 mar. 2014.
- 3GPP TS 36.214 V8.2.0 (2008-03), *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Layer-Measurements (Release 8)*. 2008.
- 3GPP TS 36.300 V10.1.0, *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10)*. 2010a. Disponível em: <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36300-a10.pdf> >, acesso em 23 fev. 2014.
- 3GPP, *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management*, TS 36.133, v.14.4.0, Agosto, 2017.
- 3GPP, TR 36.331, section 5.3.11, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC)*; 2010c. Protocol specification. Technical Report. Disponível em: <www.3gpp.org>, acesso em 24 fev. 2018.
- 4G AMÉRICAS. *Inside 3GPP Release 12: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements*. White Paper, 2014. Disponível em: <http://www.4gamericas.org/documents/Executive%20Summary_3GPP%20Release%2012_FINAL%283%29%20%282%29.pdf>. Acesso em 22 março 2018.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. *Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 18, n. 3, p. 1617-1655, 2016.

- AHMAD, M.; SALEEM, A.; HESHAM, K.; JAVAID, N. *Survey on fuzzy logic applications in wireless and mobile communications for LTE Networks*. Complex Intelligent Software Intensive Systems, 2016.
- AHMAD, R.; SUNDARARAJAN, E. A.; OTHMAN N. E.; ISMAIL, M. *Handover in LTE-advanced wireless networks: state of art and survey of decision algorithm*, Telecommunication Systems, 2017.
- AIBINU, A. M.; ONUMANYI, A.J.; ADEDIGBA, A.P.; IPINYOMI, M.; FOLORUNSO, T.A.; SALAMI, M.J.E. *Development of hybrid artificial intelligent based handover decision algorithm*. International Journal of Engineering Science and Technology, 2017.
- ALI-YAHIYA, T. *Understanding LTE and its Performance*. Springer New York Dordrecht Heidelberg. London, 2011.
- AZIZ D.; SIGLE, R. *Improvement of LTE Handover Performance through Interference Coordinatination*. IEEE 69th Vehicular Technology Conference, 2009.
- BAI, Y.; ZHUANG, H.; WANG, D. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, Springer-Verlag, 2006.
- BĂLAN, I. M., et al. *An enhanced weighted performance-based handover parameter optimization algorithm for LTE networks*; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2011, Number 1, Page 1. 2011.
- 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.
- BOJKOVIC, Z.; BAKMAZ, B.; BAKMAZ, M. *Recent trends in emerging technologies toward 5G networks*, Advances in circuits, systems, signal processing and telecommunications, vol. 2, Issue 1, 2015.
- CARDOSO, E. H.; SILVA, K. C; FRANCÊS, C.R.L.; *Intelligent handover procedure for heterogeneous LTE networks using fuzzy logic*, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2017.

- CAMP T.; BOLENG J.; DAVIES V. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.
- CHANDRASEKHAR, V.; ANDREWS, J.; GATHERER, A. *Femtocell networks: a survey*, IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp. 59 – 67, Setembro, 2008.
- CHEN, C.T. *Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment*. *Fuzzy Sets and Systems*, v.114, p.1-9, 2000.
- CHEN, S; ZHAO, J. *The Requirements Challenges and Technologies for 5G of Terrestrial Mobile Telecommunication*, IEEE Comm. Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 36-43, 2014.
- CISCO, *Cisco Virtual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016-2021*. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Acesso em 25 de março de 2018. Publicado em 07 de fevereiro de 2017.
- DAMNJANOVIC, A. et al. *A survey on 3GPP heterogeneous networks*, *Wireless Communications*, IEEE, vol.18, no.3, pp.10,21, June 2011.
- DAVAASAMBUU, B.; YU, K.; SATO, T. *Self-optimization of handover parameters for long term evolution with dual wireless mobile relay nodes*. *IEEE Wireless Communications*, 2015.
- EBERHART, R. C., SHI, Y. *Computational intelligence: concepts to implementations*. Elsevier, 2011.
- ELSAWY, H.; HOSSAIN, E; KIM, D. *HetNets with cognitive small cells: user offloading and distributed channel access techniques*, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 6, pp. 28-36, Jun. 2013.
- FACELI, K.; LORENA, A.; GAMA, J.; CARVALHO, A. *Inteligência Artificial - Uma abordagem de Aprendizagem de Máquina*, LTC, 1ª ed.2011.
- FISCHIONE, C.; ATHANASIOU, G.; SANTUCCI, F. *Dynamic Optimization of Generalized Least Squares Handover Algorithms*, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014.

- FRIAS, Z.; PÉREZ, J. *Techno-economic analysis of femtocell deployment in long term evolution networks*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2012.1 pp. 1-15, 2012.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, New York, 2009.
- MATLAB, Disponível em: < <https://www.mathworks.com> >. Acesso em 25 de janeiro de 2018.
- HUANG, P. H.; KAO, H.; LIAO, W. *Cross-Tier Cooperation for Optimal Resource Utilization in Ultra-Dense Heterogeneous Networks*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017.
- HUSSEIN, Y. S.; ALI, B. M.; RASID, M. F. A.; SALI, A.; MANSOOR, A. M. *A novel cell-selection optimization handover for long-term evolution (LTE) macrocell using fuzzy TOPSIS*. Computer Communications, 2016.
- HWANG, C.L; YOON, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application*. Springer-Verlag: Berlim, 1981.
- JAIN, RAJ. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*, John Wiley & Sons, 1990.
- JANTZEN, J. *Foundations of fuzzy control: a practical approach*. John Wiley & Sons, 2013.
- KAHRAMAN, C. *Fuzzy Multicriteria Decision Making- Theory and Application with Recent Developments*, 1 ed. Springer Science, Turkey, 2008.
- KOROWAJCZUK, L. *LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. Wiley, 2011.
- KUANG, Q.; BELSCHNER, J.; BLEICHER, Z.; DROSTE, H.; SPEIDEL, J. *A measurement-based study of handover improvement through range expansion and interference coordination*. Wireless Communications and Mobile Computing, 2015.
- KWONG, C. F.; CHUAH, T. C.; TAN, S. W.; AKBARI-MOGHANJOUGH, A. *An adaptive fuzzy handover triggering approach for Long-Term Evolution network*, Expert Systems, 2016.

- LEE, D.; GIL, G.; KIM, D. *A cost-based adaptive handover hysteresis scheme to minimize the handover failure rate in 3GPP LTE system*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010.
- LIN, P.; CASANOVA, L. F. G.; FATTY, B. K. S. *Data-Driven Handover Optimization in Next Generation Mobile Communication Networks*. Mobile Information Systems, 2016.
- LOPEZ-PEREZ, D.; VALCARCE, A.; DE LA ROCHE, G.; LIU, E.; ZHANG, J. *Access methods to WiMAX femtocells: A downlink system level case study*, Proc. 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 2008.
- MEHTA, M.; AKHTAR, N.; KARANDIKAR, A. *Impact of Handover Parameters on Mobility Performance in LTE HetNets*. Twenty First National Conference on Communications, 2015.
- MUIRHEAD, D.; IMRAN, M. A.; ARSHAD, K. *A survey of the challenges, opportunities and use of multiple antennas in current and future 5G small cell base stations*. IEEE Access, v. 4, p. 2952-2964, 2016.
- MUÑOZ, P.; BARCO, R.; DE LA BANDERA, I. *Load balancing and handover joint optimization in LTE networks using Fuzzy Logic and Reinforcement Learning*, Computer Networks, 2015.
- NAKAMURA, T. et al. *Trends in small cell enhancements in LTE Advanced*, IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 2, pp. 98-105, Feb. 2013.
- OLSSON, M. et al. *SAE and the Evolved Packet Core - driving the mobile broadband revolution*. Academic Press. Elsevier, 2010.
- OMHENI, N.; BOUABIDI, I.; GHARSALLAH, A.; ZARAI, F.; OBAIDAT, M.S. *Smart mobility management in 5G heterogeneous networks*, in IET Networks, vol. 7, 2018.
- RAMAZANALI, H.; MESODIAKAKI, A.; VINEL, A.; VERIKOUKIS, C. *Survey of user association in 5G HetNets*. In Communications. (LATINCOM), 2016 8th IEEE Latin-American Conference on (pp. 1-6). IEEE. Novembro, 2016.
- RÊGO, L. *Estratégia para Predição de Consumo de Energia Elétrica de Curto Prazo: Uma Abordagem Baseada em Densificação com Mean Shift para Tratamento de Dias*

Especiais. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPA, 2016.

RODRIGUEZ, J. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons, 2015.

ROSS, T. *Fuzzy logic with engineering applications*. Wiley, 2010.

ROY A.; SHIN J.; SAXENA N.; *Multi-objective handover in LTE macro/femto-cell networks*. In Proceedings of Journal of Communications and Networks, 2012.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence – a modern approach*. Prentice-Hall, 2013.

SÁ, S. R. *Algoritmo para Desenvolver uma Ferramenta de Planejamento para o Sistema de Comunicações Móveis LTE*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática, Instituto Universitário de Lisboa. Lisboa, 2010.

SEZIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. *LTE—the UMTS long term evolution from theory to practice*. Wiley, 2009.

SHEN, Q.; LIU, J.; HUANG, Z.; GAN, X.; ZHANG, Z.; CHEN, D. *Adaptive double thresholds handover mechanism in small cell LTE-A network*. IEEE WCSP, 2014.

SHOOSHTARI, A. N. *Optimizing handover performance in LTE networks containing relays*. Dissertação de Mestrado em Ciência da Tecnologia. School of Electrical Engineering, Department of Communications and Networking. Espoo, 2011.

SILVA, K. C.; FRANCES, C. R. L. Analysis of Handover based on the use of Femtocells in LTE Networks. pp 1-88. Saarbrücken. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.

SILVA, K.C.; BECVAR, Z.; FRANCÊS, C.R.L. *Self-tuning Handover Decision Based on Fuzzy Logic in Mobile Networks with Dense Small Cells*. IEEE WCNC, 2018. Disponível em: <http://5gmobile.fel.cvut.cz/Papers~/WCNC18_STHA_Fuzzy.pdf>

SMALL CELL FORUM, *Interference Management in UMTS Femtocells*. Disponível em: <http://scf.io/en/documents/all_documents.php>, 2014. Acessado em: 25 de março de 2018.

- SONG, M.; MOON, S.; HAN, S. *Self-optimization of handover parameters for dynamic small-cell networks*, *Wireless Communications & Mobile Computing*, v.15 n.11, p.1497-1517, Agosto, 2015.
- VARGAS, B. J. E. et al. *Performance of CS Fallback from LTE to UMTS*, *Communications Magazine*, IEEE, vol.51, no.9, 2013.
- WITOLD, P. *Why triangular membership functions?.* *Fuzzy sets and Systems*, 1994.
- WWRF, *Wireless Word Research Forum*, Disponível em: < <http://www.wwrf.ch/> >. Acesso em 15 de março de 2018.
- XENAKIS, D.; PASSAS, N.; MERAKOS AND C. VERIKOUKIS, “Energy-efficient and interference-aware handover decision for the LTE-Advanced femtocell network,” *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013.
- XENAKIS, D.; PASSAS, N.; MERAKOS, L.; VERIKOUKIS, C. *Handover decision for small cells: Algorithms, lessons learned and simulation study*, *Computer Networks*, 2016.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets. Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.