

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Informática

Guilherme Rodrigues Melo de Oliveira

**SOFTH: MECANISMO BASEADO EM REDE DEFINIDA
POR SOFTWARE PARA DECISÃO DE HANDOVER**

Belo Horizonte

2017

Guilherme Rodrigues Melo de Oliveira

**SOFTH: MECANISMO BASEADO EM REDE DEFINIDA
POR SOFTWARE PARA DECISÃO DE HANDOVER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Orientadora: Profa. Dra. Fátima
de Lima Procópio Duarte
Figueiredo

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

O48s Oliveira, Guilherme Rodrigues Melo de
Softw: mecanismo baseado em rede definida por software para decisão de Handover / Guilherme Rodrigues Melo de Oliveira. Belo Horizonte, 2017.
79 f.: il.

Orientadora: Fátima de Lima Procópio Duarte Figueiredo
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Informática

1. Redes locais de computadores. 2. Análise de redes (Planejamento). 3. Arquitetura de redes de computador. 4. Telefonia pela Internet. 5. Jogos por computador. I. Figueiredo, Fátima de Lima Procópio Duarte. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Informática. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 681.3.01:621.39

Ficha catalográfica elaborada por Fernanda Paim Brito– CRB 6/2999

Guilherme Rodrigues Melo de Oliveira

**SOFTH: MECANISMO BASEADO EM REDE DEFINIDA
POR SOFTWARE PARA DECISÃO DE HANDOVER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Profa. Dra. Fátima de Lima Procópio
Duarte Figueiredo – PUC Minas
(Orientador)

Profa. Dra. Jussara de Almeida Marques –
UFMG (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Humberto Torres Marques Neto –
PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 04 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me fortaleceu durante toda a caminhada e fez possível a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, irmã e avós, por toda compreensão em momentos de ausência, apoio incondicional e amor imensurável sempre.

À Fernanda, por ser minha companheira em todos os momentos.

À minha orientadora Fátima, pelas longas conversas, por todo apoio e excelente orientação.

A todos amigos e colegas que ajudaram na minha caminhada e fazem parte do meu dia-a-dia.

Agradeço a CAPES pela concessão da taxa e também à PUC-MG pela concessão da bolsa parcial e pela estrutura fornecida.

Aos professores da PUC-MG que ajudaram em minha formação.

A todos da secretaria, sempre solícitos e colaborativos.

*“O verdadeiro homem mede a sua força,
quando se defronta com o obstáculo.”*

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

As redes de celulares têm, como importante medida de qualidade de serviço, o número de *handovers* bem ou mal sucedidos. Como *handover*, entende-se a mudança de área de cobertura da rede. Este trabalho apresenta o SoftH (SDN-based *Handover*), um mecanismo de decisão de *handover* para redes de celular. O mecanismo SoftH, baseado em SDN (*Software Defined Network*), teve como objetivo atingir alta assertividade das decisões de *handover*, tomadas por um controlador SDN. Foram utilizadas algumas métricas para realizar a decisão, incorporando algumas apresentadas na literatura e outras adotadas neste trabalho. A ferramenta escolhida para avaliar a solução foi Network-Simulator 3 (ns-3), juntamente com o módulo OFSwitch13, que permite simular elementos pertencentes ao conceito de SDN. Foram simulados três cenários: dois baseados em trabalhos da literatura e outro proposto neste trabalho. As métricas avaliadas foram *handovers* desnecessários, *handovers* falhos, tempo médio de *handover*, número de conexões por eNodeB, vazão e utilização da largura de banda. Os resultados mostraram que o impacto da introdução do controlador SDN no mecanismo foi irrelevante em relação ao tempo de *handover* e, ao mesmo tempo, foi responsável por manter um percentual crescente de vazão durante o *handover*. Além disso, o mecanismo reduziu o percentual de *handovers* falhos e desnecessários em comparação com trabalhos da literatura. O mecanismo também foi capaz de selecionar células menos congestionadas, possibilitando bom desempenho da rede como um todo. O SoftH ainda conseguiu reduzir o percentual de pacotes perdidos da rede e teve utilização eficiente da largura de banda.

Palavras-chave: Decisão de *handover*, SDN, Redes de celular.

ABSTRACT

The cellular networks have as important measure of quality of service, the number of successful or unsuccessful handovers. The handover process occurs when a mobile node changes your coverage area. This work presents SoftH, a SDN-based handover decision mechanism for cellular networks. The SoftH mechanism, based on SDN (Software Defined Network), aimed to achieve a high assertiveness of the transfer decisions, centering all decisions on an SDN controller. Some metrics were used to make the decision, incorporating some metrics presented in the literature and others are proposed in this work. The tool chosen to evaluate the solution was Network-Simulator 3 (ns-3), together with the OFSwitch13 module, which allows to simulate elements belonging to the SDN concept. Three scenarios were simulated: two based on literature and another one proposed in this work. The metrics evaluated were unnecessary handovers, failure handovers, average handover time, number of connections per eNodeB, throughput and bandwidth utilization. The results showed that the impact of the introduction of the SDN controller on the mechanism was irrelevant to the handover time and, at the same time, it was responsible for maintaining an increasing percentage of throughput during the handover. In addition, the mechanism reduced the percentage of failure and unnecessary handovers in comparison with works of the literature. The proposed mechanism was also able to select less congested cells, enabling good performance of the network as a whole. Finally, the SoftH mechanism reduced the percentage of lost packets on the network and had an efficient use of bandwidth.

Keywords: Handover decision. SDN. Cellular Network

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Arquitetura 5G	17
FIGURA 2 – Arquitetura das Redes LTE	18
FIGURA 3 – Pilha de Protocolos do Plano de Dados	19
FIGURA 4 – Pilha de Protocolos do Plano de Controle	20
FIGURA 5 – Estrutura dos quadros LTE	22
FIGURA 6 – Recursos Tempo-Frequência	22
FIGURA 7 – Processo de <i>handover</i> abrupto	26
FIGURA 8 – Processo de <i>handover</i> indiferente	26
FIGURA 9 – Processo de <i>handover</i> suave	26
FIGURA 10 – Arquitetura SDN	29
FIGURA 11 – Proposta de Integração entre SDN e LTE	34
FIGURA 12 – Proposta de Integração entre SDN e LTE	35
FIGURA 13 – Proposta de Integração entre SDN e LTE	36
FIGURA 14 – Fluxograma do algoritmo A2-A4-RSRQ	37
FIGURA 15 – Componentes de decisão de <i>handover</i> do SoftH	42
FIGURA 16 – Arquitetura do mecanismo SoftH	43
FIGURA 17 – Fluxograma do algoritmo de <i>handover</i> do SoftH	44
FIGURA 18 – Arquitetura Básica do Módulo LENA	53
FIGURA 19 – Disposição das células no Cenário 1	57
FIGURA 20 – Disposição das células no Cenário 2	59
FIGURA 21 – Disposição das células no Cenário 3	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Portadoras definidas no ns-3	57
---	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Principais Características das Redes LTE	17
QUADRO 2 – Portadoras LTE	21
QUADRO 3 – Faixas de valores RSRP	23
QUADRO 4 – Faixas de valores RSRQ	25
QUADRO 5 – Componentes de decisão de <i>handover</i> utilizadas na literatura	39
QUADRO 6 – Regras de <i>handover</i> para grupos de velocidade e QCI.....	47
QUADRO 7 – Ambiente de Simulação.....	52
QUADRO 8 – Parâmetros de simulação do primeiro cenário	58
QUADRO 9 – Parâmetros de simulação do segundo cenário	59
QUADRO 10 – Parâmetros de simulação do terceiro cenário.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Tempo médio de <i>handover</i>	62
GRÁFICO 2 – Percentual de handovers falhos.....	63
GRÁFICO 3 – Percentual de handovers desnecessários	65
GRÁFICO 4 – Distribuição de UE's por eNodeB com o algoritmo A2-A4-RSRQ ...	67
GRÁFICO 5 – Distribuição de UE's por eNodeB com o mecanismo SoftH.....	68
GRÁFICO 6 – Taxa de perda de pacotes	69
GRÁFICO 7 – Vazão média de um nó.....	70
GRÁFICO 8 – Percentual de utilização da largura de banda	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

ABC *Always Best Connected*

CAC *Call Admission Control*

DNS *Domain Name Service*

eNodeB *Evolved NodeB*

EPC *Evolved Packet Core*

FDD *Frequency-Division Duplex*

GBR *Guaranteed Bit-Rate*

GTP *GPRS Tunneling Protocol*

HSS *Home Subscriber Server*

IP *Internet Protocol*

IPTV *TV over IP*

ITU *International Telecommunication Union*

ITU-R *ITU Radio communications Sector*

LTE *Long Term Evolution*

MAC *Medium Access Control*

MME *Mobility Management Entity*

MRO *Mobility Robustness Optimization*

NAT *Network Address Translation*

NBI *Northbound Interface*

NFV *Network Function Virtualization*

NGN *Next Generation Networking*

non-GBR *Non Guaranteed Bit-Rate*

OCD *Operator-centered Design*

OFDM *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*

PCRF *Policy Control and Changing Rules Function*

PDCP *Packet Data Convergence Protocol*

PGW *Packet Data Network Gateway*

PLR *Packet Loss Ratio*

QCI *Quality of Service Class Identifiers*

QoS *Quality of Service*

RAN *Radio Access Network*

RAT *Radio Access Tecnology*

RB *Resource Block*

RF *Radio Frequency*

RLC *Radio Link Control*

RNTI *Radio Network Temporary Identifier*

RRC *Radio Resource Control*

RRM *Radio Resource Management*

RS *Reference Signals*

RSRP *Reference Signal Received Power*

RSRQ *Reference Signal Received Quality*

RSSI *Received Signal Strength Indicator*

RSS *Received Signal Strength*

SBI *Southbound Interface*

SCD *Service-centered Design*

SCTP *Stream Transmission Control Protocol*

SC-FDMA *Single Carrier Frequency-Division Multiple Access*

SDN *Software Defined Networks*

SGW *Serving Gateway*

TDD *Time-Division Duplex*

TEID *Tunneling End ID*

TTI *Transmission Time Interval*

UCD *User-centered Design*

UE *User Equipament*

UHD *Ultra High Definition*

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

VoIP *Voice over IP*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Problema	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Organização da dissertação	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Redes 5G	15
2.2	<i>Long Term Evolution (LTE)</i>	17
2.2.1	<i>Arquitetura</i>	17
2.2.2	<i>Gerenciamento das portadoras de rádio</i>	20
2.2.3	<i>Camada física</i>	21
2.2.4	<i>Medições de sinais referência em células</i>	23
2.2.4.1	<u><i>Reference Signal Received Power (RSRP)</i></u>	23
2.2.4.2	<u><i>Reference Signal Received Quality (RSRQ)</i></u>	24
2.2.5	<i>Handover</i>	25
2.3	Redes Definidas por Software (SDN)	27
3	TRABALHOS RELACIONADOS.....	33
3.1	Integração entre redes de celular e SDN	33
3.2	Algoritmos de decisão de <i>handover</i>	36
4	SOFTH.....	41
4.1	Arquitetura e algoritmo de <i>handover</i> do SoftH	42
5	SIMULAÇÕES.....	51
5.1	Ambiente de Simulação	51
5.1.1	<i>Integração entre ns-3 e OFSwitch13</i>	52
5.1.2	<i>Métricas de avaliação</i>	54
5.2	Cenários Simulados	56

6	RESULTADOS	61
6.1	Tempo médio de execução dos <i>handovers</i>	61
6.2	Handovers falhos	62
6.3	Handovers desnecessários	64
6.4	Distribuição de UE's por eNodeB.....	66
6.5	Taxa de perda de pacotes	68
6.6	Análise da utilização de SDN em relação a decisão de <i>handover</i> ...	70
6.7	Utilização da largura de banda	71
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

As redes de celulares e suas respectivas tecnologias evoluíram em todos os aspectos ao longo dos anos. A mudança de perfil dos usuários e também os novos requisitos estabelecidos para os serviços oferecidos estão associados à evolução das gerações das redes de celulares, desde a primeira até a quinta geração. Os dispositivos móveis evoluíram muito e ganharam diversas interfaces de comunicação, o que ocasionou em aumento da sua popularidade. Desde a primeira geração (1G), que representava a tecnologia analógica de celulares, até as redes *Long Term Evolution* (LTE), também conhecidas como 4G, muitos aspectos mudaram para satisfazer aos requisitos dos usuários. Não somente a tecnologia evoluiu, mas também as aplicações. Novos serviços como *streaming*, *Voice over IP* (VoIP), jogos online, vídeos em *Ultra High Definition* (UHD), *TV over IP* (IPTV) passaram a ser comuns e muito utilizados, aumentando de forma significativa o fluxo de tráfego de dados e a complexidade dos seus requisitos mínimos.

Existe uma forte tendência para a integração entre diversos tipos de redes como WiFi, WiMAX, Bluetooth, 4G, ZigBee e outros, para atender completamente aos requisitos dos usuários das redes (SUN et al., 2014). A importância dessa integração está ligada a diversos fatores, tais como a possibilidade de prover novos serviços, o fornecimento de maior cobertura e o aumento da variabilidade e da disponibilidade de recursos. Essa integração de redes heterogêneas faz parte da ideia da *Next Generation Networking* (NGN), um conceito amplo que aborda evoluções futuras das redes, incluindo 5G. O principal objetivo de NGN é fornecer uma rede que seja capaz de transportar todos tipos de serviços e informações (voz, dados e multimídia) através da integração de diferentes tecnologias de rede (JACOBS, 2016). As redes de quinta geração possibilitarão a integração de múltiplas tecnologias de rede e, ao mesmo tempo, proverão uma camada de abstração aos usuários, que enxergam toda essa diversidade como apenas uma única rede. Além disso, toda essa integração fornecerá aos usuários o que chamamos de *Always Best Connected* (ABC), ou seja, independentemente de sua posição ou mobilidade, eles estarão sempre conectados à melhor rede disponível para atender a todas as suas demandas. O protocolo que deve ser utilizado em todas as redes e serviços é o *Internet Protocol* (IP), ou seja, todo tráfego deve ser realizado através de pacotes. De acordo com o *International Telecommunication Union* (ITU), que é o órgão responsável por questões mundiais de telecomunicação, os princípios básicos do conceito de NGN são: continuidade, convergência de serviços e transparência (JANEVSKI, 2014).

Além da tendência de integração, a infraestrutura, de forma geral, tende a crescer, tanto em número de dispositivos e de serviços quanto no número de estações capazes de fornecer os serviços. No ano de 2020, são esperados 50 bilhões de dispositivos conectados no mundo inteiro e um aumento na ordem de 1000 vezes no tráfego de dados móveis em

relação à situação atual. A mudança de paradigma na utilização das redes por parte dos usuários, certas limitações infraestruturais (escalabilidade, gerenciamento, custo, etc) e o aumento da complexidade das topologias através das integrações, começam a exigir uma nova arquitetura para suportar toda demanda gerada (LIU; JIANG, 2016).

As redes 5G são mais flexíveis e capazes de evoluir mais facilmente em relação as redes tradicionais. Elas também são capazes de prover comunicação convergente entre diversas tecnologias e compor um sistema de comunicação universal com redes cabeadas, redes sem fio, redes de celulares, nuvens e data-centers, roteadores e outros dispositivos. Sistemas 5G são autônomos e capazes de se adaptar a situações específicas de demanda de *Quality of Service* (QoS), além de oferecer segurança, resiliência, robustez, integridade de dados e mobilidade (VANNITHAMBY; TALWAR, 2017). Outro aspecto importante é que as redes da próxima geração são capazes de lidar com a mobilidade dos usuários com o objetivo de garantir a conectividade em qualquer situação, fornecendo, sempre ao usuário, a conexão com a melhor rede disponível. As redes 5G tem como maior desafio, o grande número de padrões desconhecidos e novas aplicações. Além disso, a gestão e a operação da rede deve se basear nas aplicações que estão consumindo a largura da banda. Ou seja, as políticas de QoS estão voltadas às aplicações e aos seus requisitos específicos. Dentre os principais requisitos da nova geração de redes, estão: dezenas de milhares de usuários que deverão trafegar altas taxas de dados, *links* de grande capacidade e melhorias em relação as rede 4G como latência, eficiência espectral, cobertura e sinalização (HAKIRI; BERTHOU, 2015).

Para melhor gerenciamento de redes heterogêneas de grande escala, estabelecendo topologias complexas e simplificando operações dos usuários nesses ambientes, existe a necessidade de um controle centralizado das redes e de uma programação dos componentes, como possibilitam as *Software Defined Networks* (SDN) ou Redes Definidas por Software (LIYANAGE; GURTOV; YLIANTTILA, 2015). Normalmente, os elementos das redes tradicionais responsáveis pelo roteamento e encaminhamento de pacotes possuem os planos de controle e de dados unificados em um mesmo dispositivo. SDN é um paradigma capaz de alterar a forma tradicional das redes através da separação do plano de dados e do plano de controle, ou seja, o controle da rede é separado do sistema de encaminhamento de pacotes, permitindo a programação de diversas funções da rede. Dentre os principais benefícios estão a centralização do controle que possibilita uma visão geral da rede, a programabilidade que transforma todo o gerenciamento da rede em *software* e a abstração que permite ao usuário focar apenas na aplicação, abstraindo da infraestrutura que provê o serviço (BRIEF, 2013).

Nem sempre é possível manter um celular conectado sempre a mesma estação rádio base, já que o nó é capaz de trafegar em altas velocidades e em direções previamente não conhecidas. O conceito de transição entre diferentes células é denominado *handover* cujo

processo não é simples, pois envolve um grande número de informações relacionadas à rede. Dentre elas estão o congestionamento, a cobertura, a mobilidade, recursos fornecidos pela rede, protocolos e parâmetros definidos pela topologia, além de outros que são capazes de influenciar diretamente no desempenho da rede e, conseqüentemente, na qualidade do serviço entregue aos usuários (AKKAMAHADEVI; SHANKAR, 2016). Dessa forma, a mobilidade é um aspecto que não será desconsiderado na próxima geração de redes de celular, pois, cada vez mais, os usuários sempre esperam receber a melhor qualidade de serviço, mesmo que se encontrem em movimento e independentemente de onde estiverem, além disso, está diretamente relacionada à qualidade da conexão dos usuários e também à utilização dos recursos da rede. Com isso, é de suma importância que a transição entre as diferentes células seja realizada sem a percepção do usuário e também sem a perda da conexão, ou seja, de maneira suave.

1.1 Problema

As redes móveis continuam em franco crescimento e, portanto, a tendência é que elas cada vez evoluam mais, tornando o seu gerenciamento mais complexo. Conforme visto anteriormente, pode-se afirmar que, cada vez mais, o fluxo de dados de redes móveis aumenta, juntamente com o crescimento físico das redes de maneira geral. Devido a esse fato, a mobilidade dos usuários será um aspecto cada vez mais crítico, pois qualquer entrega de serviço não deverá sofrer degradações severas que prejudiquem a qualidade entregue ao usuário final, independentemente se o usuário estiver parado ou em movimento. Um dos processos principais que caracteriza a mobilidade é o *handover*, que consiste basicamente em fazer com que uma sessão de um usuário seja mantida quando o mesmo realiza o processo de conexão a uma estação rádio base diferente da que ele está conectado. Dessa forma, um *handover* deve ser executado, de maneira suave, com pequenos atrasos, baixa perda de pacotes e obedecendo os requisitos mínimos de QoS para qualquer tipo de aplicação.

Para permitir que isso seja possível, a escolha da estação rádio base para a qual o equipamento do usuário se conectará deve ser bastante assertiva, permitindo que uma decisão ótima seja tomada no momento do *handover* (DELGADO, 2016). Essa assertividade está ligada diretamente ao desempenho geral das redes móveis. Existem algumas técnicas para garantir a eficácia de *handover*, tais como o algoritmo *Mobility Robustness Optimization* (MRO), algoritmos adaptáveis de *handover*, mecanismos de predição, otimização e decisão de *handovers*. Todas as técnicas citadas podem representar desafios, pois o desempenho das mesmas está fortemente ligado à qualidade do canal e também à velocidade de processamento do equipamento do usuário. Além disso, os algoritmos de otimização de *handover* tendem a aumentar a taxa de *ping-pong* e as técnicas

de predição tem dificuldades em definir o próximo *handover* se os usuários adotarem movimentos aleatórios (AKKAMAHADEVI; SHANKAR, 2016). De forma mais eficiente, as técnicas de tomada de decisão de *handover* utilizam, de alguma forma, a infraestrutura da rede para recuperar informações relevantes. Utilizando a comunicação entre a estação rádio base e os equipamentos dos usuários, algumas informações como o tipo de aplicação, a velocidade dos nós e a qualidade e potência do sinal podem ser coletadas. Com uma gama de informações relevantes, um dos maiores desafios é coletar essas informações, com o objetivo de realizar a decisão de *handover* assertiva e, tudo isso, sem que o usuário perceba a transição entre células, caracterizando um *handover* suave.

Neste contexto, o problema abordado neste trabalho é a ausência de um mecanismo que separe a transmissão de dados do controle e seja capaz de prover mobilidade em redes de celular, com assertividade em decisões de *handovers* de forma eficiente e sem a percepção do usuário. Para isso, neste trabalho, é proposto um mecanismo que utiliza o conceito de SDN para melhorar o desempenho da rede em geral, principalmente a assertividade dos *handovers*, sendo capaz de prover mobilidade em redes móveis. O conceito de SDN foi utilizado com o intuito de obter uma visão geral da rede. O controlador central tem condições de tomar a melhor decisão no momento do *handover* analisando e processando as principais informações que são relevantes no processo. A preocupação em relação a melhoria do desempenho das redes móveis está ligada ao crescimento no número de usuários e também de dispositivos esperados para os próximos anos, mostrando que sua relevância continuará alta em um futuro próximo. Além disso, propostas eficientes de mecanismos de *handover* no plano de controle podem trazer experiências muito melhores aos usuários em relação a qualidade do serviço que é entregue a eles.

1.2 Objetivos

Considerando as redes móveis, o objetivo deste trabalho é desenvolver um mecanismo de *handover* suave baseado no conceito de SDN que seja capaz de oferecer mobilidade para os usuários. É importante que o mecanismo seja capaz de realizar *handovers* suaves, evitando a queda de conexão durante o processo de troca de células e que não sobrecarregue a infraestrutura de uma rede móvel. Com o objetivo de ter um melhor gerenciamento da rede, o conceito de SDN foi aplicado no mecanismo. Foi utilizado um controlador centralizado capaz de gerenciar os elementos da rede e, além disso, ter ciência da situação e também dos recursos de cada um dos elementos. Para alcançar os objetivos destacados, foram realizadas simulações com comparação de resultados com trabalhos relacionados. Dentre os objetivos específicos do trabalho, estão:

- a) Realizar a integração da infraestrutura de uma rede de celular com o conceito de

SDN através de um controlador, virtualizando funções da estação rádio base.

- b) Construção de um algoritmo de *handover* eficiente, que incorpora componentes de decisão de trabalhos da literatura e também com novas propostas de componentes de decisão.
- c) Comparar o mecanismo proposto com algoritmos da literatura, analisando métricas relevantes ao contexto, sendo elas:
 - ***Handovers* falhos;**
 - ***Handovers* desnecessários;**
 - **Distribuição de UE's por eNodeB;**
 - **Tempo médio de *handover*;**
 - ***Packet Loss Ratio* (PLR);**
 - **Vazão;**
 - **Utilização da largura de banda.**

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico onde são descritos conceitos relevantes para a leitura deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta um resumo dos principais trabalhos relacionados encontrados na literatura. O Capítulo 4 traz um detalhamento mais aprofundado do mecanismo SoftH, trazendo detalhes da implementação e também suas principais características. O Capítulo 5 traz detalhes dos ambientes de simulação e também dos cenários de simulação executados. O Capítulo 6 traz os resultados obtidos nas simulações realizadas. O Capítulo 7 traz as principais conclusões obtidos durante a elaboração do trabalho e também propostas de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Redes 5G

As redes 4G hoje estão atingindo um nível de maturidade elevado e pesquisas estão levando a tecnologia LTE ao ápice de seu desempenho. Em um futuro próximo, é esperado um aumento no fluxo de dados no tráfego de redes móveis, além disso, existirão diversos dispositivos conectados em ambientes heterogêneos com o objetivo de fornecer novos serviços e maior cobertura. A mudança de paradigma na utilização das redes por parte dos usuários e certas limitações infraestruturais, começam a exigir uma nova arquitetura para suprir toda demanda gerada. Algumas das limitações das redes atuais são (LAURIDSEN et al., 2017):

- **Escalabilidade:** com o crescimento de diversos serviços que ocasionam um grande volume de tráfego de dados, as redes tradicionais são incapazes de acompanhar o aumento da largura de banda causado pela demanda;
- **Gerenciamento:** as redes móveis dependem atualmente de sistemas de gestão que exigem recursos significativos de conhecimentos e da própria plataforma para operação da rede. Como esses sistemas são manuais, ou seja, dependem muito dos operadores, as redes estão propensas a erros de configuração e longos atrasos no fornecimento de serviços e na resolução de problemas;
- **Inflexibilidade:** a inclusão de novos serviços ou protocolos é um processo complexo, pois é impossível realizar a paralisação de serviços importantes. Além disso é necessário um período de tempo para testes, assegurar garantias de qualidade e outros motivos que tornam as redes atuais inflexíveis;
- **Custo:** a utilização ineficiente e inflexível de largura de banda das redes e o aumento da complexidade das topologias, fazem com que custos com manutenção e compra de equipamentos sejam elevados.

No início de 2012, o *ITU Radio communications Sector* (ITU-R) iniciou o programa denominado “*IMT for 2020 and beyond*” com o objetivo de preparar e impulsionar as pesquisas e atividades em todo o mundo, relacionadas as redes 5G (YANG et al., 2015). Com a previsão de lançamento oficial para o ano de 2020, as redes de quinta geração ainda estão em desenvolvimento e existem diversas especulações a respeito dos seus requisitos. A procura pela melhor arquitetura para aplicar os conceitos da nova geração se tornou a principal preocupação para os pesquisadores. O nome que está ganhando mais força são as redes definidas por software, que podem ser o elemento principal no desenvolvimento

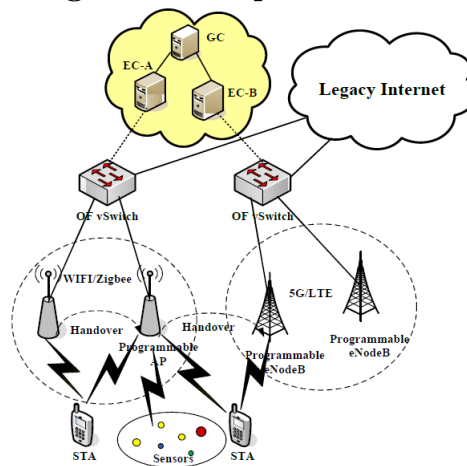
das redes de quinta geração. Além da importância de reduzir custos em infraestrutura, é necessário também tornar as redes simples e gerenciáveis. Dessa forma, SDN e NFV são as chaves principais para suportar os novos requisitos de comunicação sem fio que acompanharão as redes de próxima geração. As redes 5G deverão ser baseadas no conceito *User-centered Design* (UCD), diferentemente das redes 3G que utilizavam o conceito *Operator-centered Design* (OCD) e das redes 4G que utilizavam o conceito *Service-centered Design* (SCD). Isto significa que o desenvolvimento das redes da próxima geração será totalmente focado em todas as necessidades, vontades e limitações dos usuários, fazendo com que eles tenham a melhor experiência possível (CHO et al., 2014).

As redes 5G são mais flexíveis, mais baratas e capazes de evoluir mais facilmente do que as redes tradicionais. Elas também são capazes de prover a integração entre diversas tecnologias e prover um sistema de comunicação unificado formado por sistemas de satélites, redes de celulares, nuvens e *data-centers*, roteadores, redes cabeadas e outros diversos dispositivos. A autonomia é outro fator importante, pois os sistemas 5G são capazes de se adaptarem a situações específicas de demanda de QoS. Devido a diversidade de elementos das redes da próxima geração, aspectos como segurança, resiliência, robustez e integridade de dados são prioridades nas redes 5G. As redes da próxima geração são capazes de lidar com a mobilidade dos usuários com o objetivo de garantir a conectividade em qualquer situação, fornecendo ao usuário sempre a conexão com a melhor rede disponível (HAKIRI; BERTHOU, 2015). Além disso, elas são constituídas por um grande número de padrões desconhecidos e novas aplicações e, por isso, a gestão e a operação da rede devem-se basear nas aplicações que estão consumindo a largura da banda. Ou seja, as políticas de QoS devem ser voltadas às aplicações e os seus requisitos específicos. Os principais requisitos da nova geração de redes são:

- Dezenas de milhares de usuários deverão ser atendidos por várias dezenas de megabits por segundo;
- Links de grande capacidade para diversas células;
- Em relação as redes 4G, alguns aspectos devem ser melhorados, como: eficiência espectral, sinalização, cobertura e outros;
- Níveis de latência próximos a zero.

A Figura 1 representa uma arquitetura 5G baseada em SDN. É verificado que existem células heterogêneas (WiFi, LTE, ZigBee), onde as estações são conectadas a *switches* OpenFlow que realizam o tráfego de pacotes e também fornecem internet aos dispositivos. Por fim, todo o controle e visão da rede ficam por conta dos controladores, que neste exemplo estão dispostos em nuvem.

Figura 1 – Arquitetura 5G



Fonte: (SUN et al., 2014)

2.2 Long Term Evolution (LTE)

2.2.1 Arquitetura

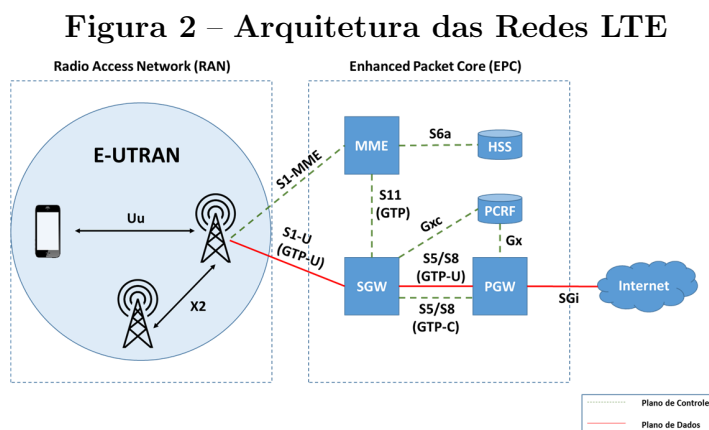
As redes LTE foram especificadas em 2008 pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) com o principal objetivo de suprir as necessidades dos usuários em relação aos novos serviços oferecidos. Diferentemente das redes *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), o tráfego das redes LTE é totalmente IP, ou seja, trafega apenas pacotes. As principais características destas redes são picos de taxas de dados de 100 Mbps para *downlink* e 50 Mbps para *uplink*, latência de 5 ms para largura de banda maior ou igual a 5 MHz e esquema de acesso ao espectro OFDMA que permite a alocação de recursos tanto no domínio do tempo, *Time-Division Duplex* (TDD), quanto no domínio da frequência, *Frequency-Division Duplex* (FDD) (CAPOZZI et al., 2013). O Quadro 1 resume as principais características das redes LTE.

Quadro 1 – Principais Características das Redes LTE

Características	Parâmetros	Valores
Taxa de Dados	Downlink Uplink	100 Mbps 50 Mbps
Latência	Largura de Banda (Maior ou igual a 5MHz)	5 ms
Mobilidade	Menor ou igual a 15 km/h até 120 km/h até 350 km/h	Otimizada Alto desempenho Mantêm conexão
Largura de Banda	-	1,4 - 20 MHz
Modulação	-	OFDMA Alocação TDD e FDD

Fonte: Adaptado de Capozzi et al. (2013)

Podemos dizer que a arquitetura LTE é separada em duas partes principais, sendo elas a E-UTRAN, representando a infraestrutura da rede e sendo responsável pela parte aérea de comunicação, e o *Evolved Packet Core* (EPC), composto por elementos da arquitetura que realizam a parte de controle dos UEs e que permitem a convergência de dados e voz. Os principais elementos da arquitetura são: eNodeBs, UEs, MME, PGW, SGW, HSS e PCRF. Além dos elementos da arquitetura, existem as interfaces que são responsáveis pela ligação desses elementos, sendo elas: Uu, X2, S1, S5, S6, S8, Gx e SGI (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009). A Figura 2 mostra a disposição dos elementos e como estão conectados dentro da arquitetura LTE.



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada um dos elementos da rede possui algumas funcionalidades específicas que ajudam no controle da rede de forma geral. As principais características de cada um dos elementos são:

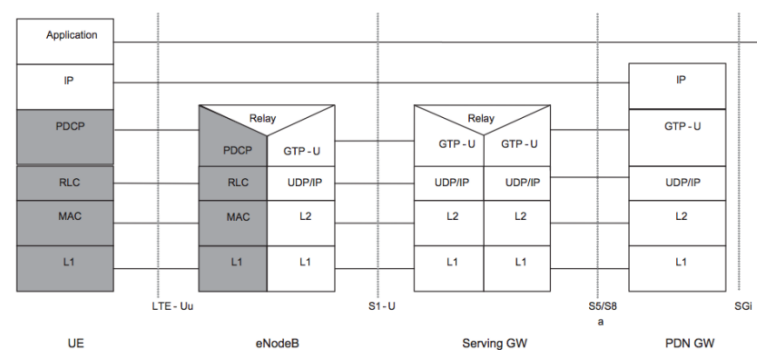
- **User Equipment (UE):** qualquer dispositivo utilizado por um usuário final para se comunicar
- **Evolved NodeB (eNodeB):** estação que controla os procedimentos da interface aérea da rede. Além disso contém o *Radio Resource Management* (RRM) que possui diversas funções que auxiliam o processo de alocação de recursos;
- **Serving Gateway (SGW):** *gateway* responsável pelo roteamento de pacotes entre os diversos nós da rede e também pelo processo de *handover* vertical, ou seja, entre redes de diferentes tecnologias;
- **Packet Data Network Gateway (PGW):** *gateway* responsável por conectar as redes LTE com redes externas;
- **Mobility Management Entity (MME):** responsável por acompanhar a mobilidade dos usuários, executar o processo de *handover* horizontal, ou seja, entre

redes com mesma tecnologia, e rastreamento e paginação para os UEs em relação ao estabelecimento de conexão;

- **Home Subscriber Server (HSS)**: elemento da rede responsável por armazenar informações relacionadas aos assinantes, como por exemplo perfil de QoS e disponibilidade de redes durante *roaming*;
- **Policy Control and Changing Rules Function (PCRF)**: elemento da rede responsável por gerenciar, através de *software*, as políticas definidas pelo provedor de serviço. Além disso, este elemento é capaz de autorizar fornecimento de requisitos de QoS e verifica se alguma solicitação viola algum tipo de restrição.

Existem alguns protocolos que são responsáveis por regulamentar operações que ocorrem dentro da arquitetura LTE e eles são divididos em duas categorias distintas: protocolos do plano de dados e protocolos do plano de controle. Os protocolos responsáveis pela transmissão de pacotes IP partindo ou saindo dos UE'S são classificados como protocolos do plano de dados. Uma portadora de rádio EPC atravessa diversas interfaces, mapeadas em portadoras de rádio de camadas mais baixas. Nas interfaces S1 e S5/S8 o *GPRS Tunneling Protocol (GTP)* é utilizado para realizar a operação de encapsulamento de dados dos usuários e o endereço IP juntamente com o *Tunneling End ID (TEID)* são capazes de identificar o túnel GTP (CHAVES et al., 2015). Os UE's não utilizam o protocolo GTP e dessa forma, a comunicação entre os UE's e as eNodeB's é realizada através dos protocolos *Radio Link Control (RLC)* e *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*. A Figura 3 mostra a pilha de protocolos do plano de dados.

Figura 3 – Pilha de Protocolos do Plano de Dados

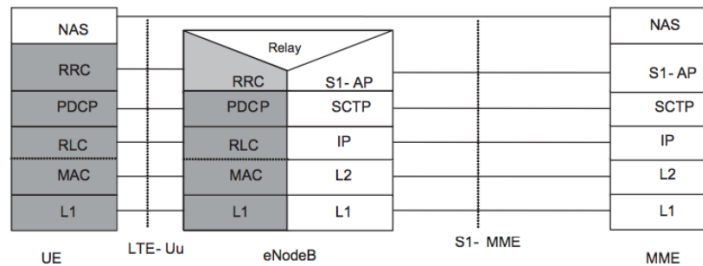


Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

Os protocolos responsáveis pela comunicação entre os UE's e o elemento MME são caracterizados como protocolos do plano de controle. Além dos citados anteriormente, também é utilizado o *Radio Resource Control (RRC)*, cujas principais funções são a configuração de camadas de mais baixo nível e o estabelecimento das portadoras de rádio.

Para realizar a comunicação entre a eNodeB e o elemento MME, é utilizado o protocolo *Stream Transmission Control Protocol* (SCTP). A Figura 4 mostra a pilha de protocolos do plano de controle.

Figura 4 – Pilha de Protocolos do Plano de Controle



Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

2.2.2 Gerenciamento das portadoras de rádio

Quando um UE se conecta a uma eNodeB é estabelecida uma conexão lógica de rádio chamada *bearer*, ou mais comumente chamada de portadora de rádio. Sua principal função é o gerenciamento de provisionamento de QoS na interface aérea. Inicialmente uma portadora básica, com tempo de duração igual ao tempo de vida da conexão, é estabelecida entre a UE e a eNodeB permitindo uma conectividade simples e o controle de mensagens entre os dois elementos da rede. A partir do momento que o UE solicita um serviço específico, por exemplo VoIP, uma portadora dedicada é estabelecida. A portadora pode ser classificada como *Guaranteed Bit-Rate* (GBR), com uma taxa de bits garantida e imune a perda de pacotes, ou *Non Guaranteed Bit-Rate* (non-GBR), que não possuem taxa de bits garantida, compartilham o limite da banda com outras portadoras e são suscetíveis a perdas de pacotes (EKSTROM, 2009).

Nas redes UMTS existiam quatro classes diferentes de QoS: *Conversational*, *Streaming*, *Interactive* e *Background*. As redes LTE utilizaram um mapeamento diferente, sendo que um conjunto de requisitos foi traduzido para nove diferentes portadoras, através de valores de *Quality of Service Class Identifiers* (QCI) que especificam o comportamento do encaminhamento de pacotes para cada fluxo e assim permite a diferenciação dos fluxos. Cada classe de QoS é traduzida em relação a sua portadora (GBR ou non-GBR), nível de prioridade do fluxo, atraso máximo permitido e nível aceitável de perda de pacotes. O Quadro 2 mostra as portadoras das redes LTE.

Quadro 2 – Portadoras LTE

<i>QCI</i>	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso Máximo	Perda de Pacotes
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}
2	GBR	4	150 ms	10^{-3}
3	GBR	5	300 ms	10^{-6}
4	GBR	3	50 ms	10^{-3}
5	non-GBR	1	100 ms	10^{-6}
6	non-GBR	7	100 ms	10^{-3}
7	non-GBR	6	300 ms	10^{-6}
8	non-GBR	8	300 ms	10^{-6}
9	non-GBR	9	300 ms	10^{-6}

Fonte: Adaptado de Ali e Zeeshan (2011)

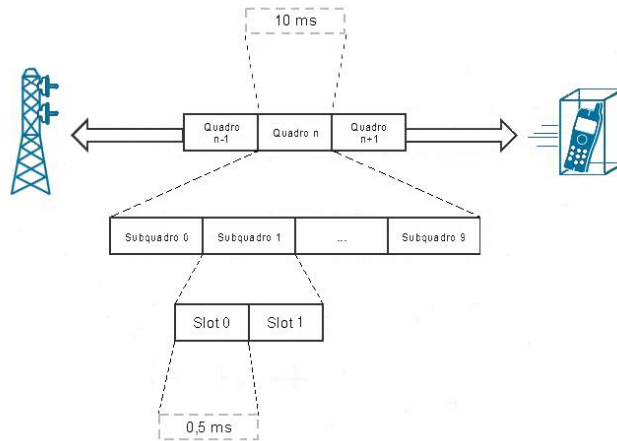
2.2.3 Camada física

A arquitetura LTE fornece uma tecnologia de acesso a rádio bastante flexível. Um exemplo que ilustra bem essa situação é o suporte a largura de banda flexível, ou seja, de acordo com a solicitação da aplicação o valor da largura de banda pode variar entre 1,4 MHz até 20 MHz para atender de forma satisfatória os requisitos mínimos de QoS.

Para fornecer uma distribuição melhor dos recursos de rádio, o sistema LTE adotou um esquema de acesso ao espectro baseado em *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM). Para o enlace de *downlink* é utilizado o OFDMA, capaz de explorar subportadoras em todo o espectro, além de fornecer alta escalabilidade, equalização simples e robustez contra atenuação de sinal. Para o enlace de *uplink* é utilizado o *Single Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA), capaz de explorar apenas as subportadoras adjacentes do espectro, porém é capaz de aumentar a potência de sinal dos UEs considerando a limitação de bateria dos mesmos. Os dois esquemas permitem múltiplos acessos, atribuindo conjunto de subportadoras para usuários de forma individual.

O esquema de acesso ao espectro OFDMA permite a alocação de recursos tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo. Os recursos no domínio do tempo são distribuídos a cada *Transmission Time Interval* (TTI) com duração de 1 ms. O tempo é dividido em quadros, sendo que o quadro das redes LTE é composto de 10 TTIs consecutivos. Cada TTI é composto por 2 *slots* de tamanho 0,5 ms, correspondentes a 7 símbolos OFDM (MAGALHAES; GUARDIEIRO, 2014). O esquema do quadro LTE é representado na Figura 5

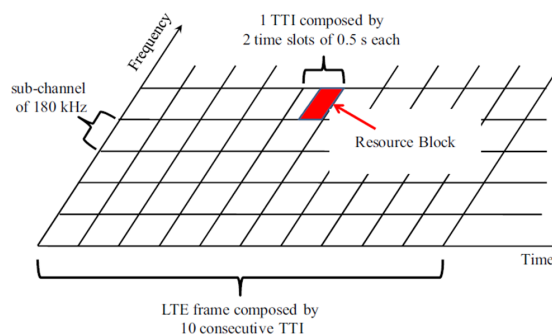
Figura 5 – Estrutura dos quadros LTE



Fonte: Elaborado pelo autor

No domínio da frequência, a largura de banda total é dividida em sub-canais de 180 kHz, sendo que cada um destes sub-canais possui 12 subportadoras OFDM consecutivas e de mesmo tamanho. Dessa forma, um recurso de ambos domínios é composto por no mínimo dois *slots* de tempo no domínio do tempo e um sub-canal no domínio da frequência, formando o chamado *Resource Block* (RB) (MAGALHAES; GUARDIEIRO, 2014). A Figura 6 mostra a disposição de um RB dentro de ambos domínios.

Figura 6 – Recursos Tempo-Frequência



Fonte: (CAPOZZI et al., 2013)

Além da distribuição dos recursos realizadas no espectro, as redes LTE utilizam procedimentos do RRM que estão presentes nas eNodeBs. Alguns destes procedimentos como relatórios da qualidade do canal de transmissão, sistema de modulação de acordo com a demanda, esquema de retransmissão e outros, são encontrados tanto na camada física, quanto na camada Medium Access Control (MAC) e interagem entre si com o objetivo de aproveitar melhor os recursos de rádio.

2.2.4 Medições de sinais referência em células

Em redes LTE, os nós UE e eNodeB tem a responsabilidade de realizar medições dos sinais de rádio, presentes na camada física, conforme especificado no documento TS 36.214 do 3GPP. Os valores retornados por estas medições são transmitidos às camadas superiores na pilha LTE, sendo aproveitados em diversas aplicações. Durante o processo de *handover* ou o processo de seleção/reseleção de célula, é necessário medir a força e a qualidade do sinal das células vizinhas para que seja feita a escolha da melhor célula durante o período de transição (ROLIN, 2014). Dessa forma, o UE é capaz de medir dois sinais de referência dentro das células, sendo eles o *Reference Signal Received Power* (RSRP) e o *Reference Signal Received Power (Reference Signal Received Quality* (RSRQ)).

2.2.4.1 Reference Signal Received Power (RSRP)

Um dos sinais de referência é o RSRP, cuja principal função é realizar a medição da cobertura *downlink*, medido em dBm, sendo a medição mais básica da camada física. De acordo com o 3GPP, o RSRP é definido pela potência média linear dos *Reference Signals* (RS) do âmbito de *downlink*, considerando toda a largura de banda do canal. As medições do RSRP trazem informações relevantes sobre o nível de potência do sinal que o UE recebe.

Os valores de RSRP estão definidos na faixa entre -140 dBm e -44 dBm. Através dos valores reportados, a melhor célula no âmbito de *downlink* da interface de rádio é selecionada, para que a operação de *handover* possa ser executada. O 3GPP padronizou estes valores reportados através de um mapeamento dos valores de RSRP para uma tabela de índices, que são utilizados por algoritmos de *handover*. Os valores são divididos em 98 faixas e são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Faixas de valores RSRP

Índice reportado	Valor medido em quantidade	Unidade
RSRP_00	RSRP < -140	dBm
RSRP_01	-140 <= RSRP < -139	dBm
RSRP_02	-139 <= RSRP < -138	dBm
...
RSRP_95	-46 <= RSRP < -45	dBm
RSRP_96	-45 <= RSRP < -44	dBm
RSRP_97	-44 <= RSRP	dBm

Fonte: (ETSI, 2013)

O RSRP foi acrescentado as redes de celular a partir da consolidação das redes LTE. Além do parâmetro RSRP, existe também o chamado *Received Signal Strength Indicator*

(RSSI), sendo que ambos trabalham de forma conjunta, sendo o RSSI uma métrica tradicional presente desde as gerações anteriores das redes de celular. O parâmetro RSSI é utilizado para mostrar todos os sinais de referência, podendo ser estes utilizados ou não pela conexão, em um único indicador, acompanhado de ruídos térmicos e interferências. Não é necessário que o UE envie as medições de RSSI ao eNodeB correspondente, pois este parâmetro deve ser calculado a partir do RSRP.

Durante a medição do RSSI na largura de banda, são consideradas todas as subportadoras ativas, fazendo com que o RSSI resultante seja capaz de medir de forma eficiente a potência de *Radio Frequency* (RF). O parâmetro RSRP é responsável pelo cálculo da média da potência RF, em todos sinais de referência da banda passante, dessa forma, para o RSRP, é calculada a média da potência em cada uma das subportadoras. O cálculo de RSRP é realizado como mostrado na Equação 2.1, onde N representa o número de RB's em que o RSSI é medido, em função da largura de banda utilizada.

$$RSRP = RSSI - 10 \cdot \log(12 \cdot N) \quad (2.1)$$

2.2.4.2 Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Além do parâmetro RSRP, existe outro sinal de referência importante nas redes LTE, o chamado *Reference Signal Received Quality* (RSRQ). Diferentemente do RSRP, o RSRQ tem como o seu principal objetivo a medição da qualidade do sinal de referência recebido através de indicadores. Através deste indicador é possível verificar a existência de interferências de sinal.

Comumente utilizado em algoritmos de *handover*, este parâmetro é utilizado como critério para se determinar a melhor célula, ou seja, com o melhor valor de RSRQ. Os parâmetros RSRP e RSRQ podem ou não trabalhar em conjunto, pois o RSRQ traz informações adicionais relevantes a medição RSRQ, cabendo às redes LTE utilizar um, ou outro, ou ambos. O RSRQ representa a qualidade do sinal recebida pelo UE conectado a um determinado eNodeB, sendo definida pela Equação 2.2, onde N representam os RB's em que o RSSI é medido, multiplicado pela razão do valor do parâmetro RSRP e RSSI.

$$RSRQ = N \times \frac{RSRP}{RSSI} \quad (2.2)$$

Os valores de RSRQ estão definidos na faixa entre -19,5 dB e -3 dB. Da mesma forma que o RSRP, também existe um mapeamento dos valores de RSRQ para uma tabela de índices do 3GPP, que são utilizados por algoritmos de *handover*. Os valores são divididos em 35 faixas e são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Faixas de valores RSRQ

Índice reportado	Valor medido em quantidade	Unidade
RSRQ_00	$\text{RSRQ} < -19,5$	dB
RSRQ_01	$-19,5 \leq \text{RSRQ} < -19$	dB
RSRQ_02	$-19 \leq \text{RSRQ} < -18,5$	dB
...
RSRQ_32	$-4 \leq \text{RSRQ} < -3,5$	dB
RSRQ_33	$-3,5 \leq \text{RSRQ} < -3$	dB
RSRQ_34	$-3 \leq \text{RSRQ}$	dB

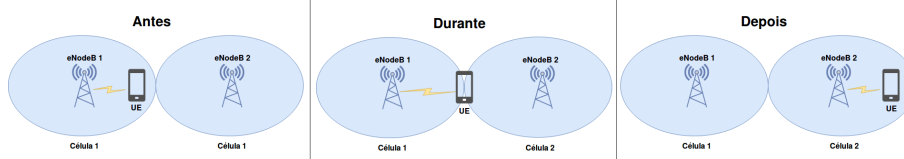
Fonte: (ETSI, 2013)

Segundo Rolin (2014), uma relação entre QoS e o parâmetro RSRQ pode ser estabelecida, partindo do princípio que o valor do parâmetro interfere diretamente na rede e conseqüentemente na qualidade de serviço entregue por ela como um todo. Existem três categorias de divisão dos valores de RSRQ relacionado a QoS. A primeira categoria garante uma conexão de ótima qualidade e para isso deve possuir um valor de RSRQ superior à -9 dB. A segunda categoria compreende os valores entre -9 dB e -12 dB, onde existe a degradação da qualidade do serviço entregue, porém com níveis ainda aceitáveis. A terceira categoria abrange valores inferiores à -13 dB, onde a taxa de dados transmitida é muito abaixo dos níveis de QoS, obrigando o UE realizar a transição para uma nova célula.

2.2.5 *Handover*

Um *handover* em sistemas de comunicação sem fio pode ser classificado como abrupto, indiferente ou suave (HAN; WU, 2010), podendo ser ainda horizontal ou vertical. A diferença básica entre um *handover* horizontal para um vertical, é que no vertical ocorre transição entre células com *Radio Access Technology* (RAT) diferentes (por exemplo de uma célula LTE para uma Wi-Fi), enquanto que no horizontal ocorre transição entre células com mesma RAT (por exemplo de uma célula LTE para outra LTE). Em *handovers* abruptos, antes do UE iniciar o processo de transição para outro eNodeB, ou seja, alterar sua frequência para a nova célula, é necessário que haja a interrupção da sua conexão atual, para que a nova conexão seja estabelecida. A grande desvantagem deste processo é a interrupção da aplicação, mesmo que curta, causada pelo rompimento abrupto da conexão atual para iniciar a conexão com a eNodeB de destino. A Figura 7 representa o processo do *handover* abrupto.

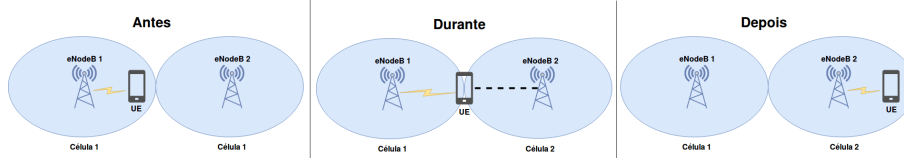
Figura 7 – Processo de *handover* abrupto



Fonte: Elaborado pelo autor

Em *handovers* indiferentes não existe a interrupção da conexão atual, diferentemente do processo abrupto. Isto acontece, devido ao estabelecimento da nova conexão em paralelo com a atual e o fluxo de informação é transmitido pelo UE em ambas conexões, até que a nova conexão seja estabelecida por completo. O processo de *handover* indiferente faz com que o UE utilize duas portadoras com divisão em tempo, permitindo o paralelismo entre as duas conexões. A Figura 8 representa o processo do *handover* indiferente.

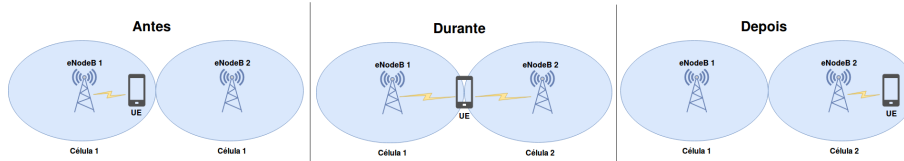
Figura 8 – Processo de *handover* indiferente



Fonte: Elaborado pelo autor

Os *handovers* suaves são caracterizados pelo comportamento assíncrono, devido ao fato da existência de dois fluxos correspondentes a dois caminhos de forma temporária. De forma mais simples, o UE é conectado de forma simultânea em vários (dois ou mais) eNodeB's e ambos os fluxos são considerados tanto pelo UE, quanto pelo eNodeB, com o objetivo de recuperar apenas um fluxo de informação. O UE tem a capacidade de adicionar ou liberar conexões, analisando sempre a condição atual do canal durante a transição entre células. Da mesma forma que os *handovers* indiferentes, os *handovers* suaves não interrompem a conexão durante a troca de eNodeB's. A Figura 9 representa o processo do *handover* suave.

Figura 9 – Processo de *handover* suave



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os padrões estabelecidos pelo 3GPP, um *handover* pode ser desencadeado por cinco diferentes eventos que são delimitados por dois limiares (3GPP,

2010) que podem ser definidos por diversos aspectos relevantes ao contexto de um *handover* como potência de sinal, qualidade do sinal e outros. Os eventos são:

- **Evento A1:** desencadeado quando a célula atual atinge um valor melhor que o limiar definido;
- **Evento A2:** desencadeado quando a célula atual atinge um valor pior que o limiar definido;
- **Evento A3:** desencadeado quando uma célula vizinha se torna melhor do que a célula atual por um valor de deslocamento definido. O valor do deslocamento pode ser positivo ou negativo;
- **Evento A4:** desencadeado quando a célula vizinha atinge um valor melhor que o limiar definido;
- **Evento A5:** desencadeado quando a célula atual torna-se pior do que o valor do limiar, enquanto a célula vizinha se torna melhor do que o valor do limiar.

Os eventos de *handover* são utilizados na construção de algoritmos que gerenciam a transição de um UE entre células. Analisando, por exemplo, a qualidade do sinal, é possível definir o melhor momento para um *handover* ser executado. Verificando a qualidade da célula de origem e da célula de destino, é possível utilizar os eventos definidos para padronizar os algoritmos de decisão de *handover*.

2.3 Redes Definidas por Software (SDN)

A tecnologia da área de redes se encontra em diversos níveis da sociedade e com diversos níveis de aplicação. Várias vertentes utilizam as redes de alguma forma como a Internet, redes locais, redes de celulares e outras (GUEDES et al., 2012). Com o grande sucesso da Internet, alguns problemas foram criados. A Internet se tornou algo de muita importância e adquiriu um status de estabilidade para seus usuários. Desta forma, pesquisas com novas tecnologias e protocolos são inviáveis, pois existe o risco da interrupção das atividades. Outro fator é a plena utilização da adoção de tecnologias já desenvolvidas que impedem algum tipo de inovação. Na prática, as redes atuais atingiram um nível de maturidade extremo, ou seja, seus protocolos e tecnologias estão muito bem definidos, conseguindo atender de forma eficiente suas demandas. Porém, esta maturidade faz com que as redes tenham pouca flexibilidade e por isso são classificadas como “calcificadas” (GUEDES et al., 2012).

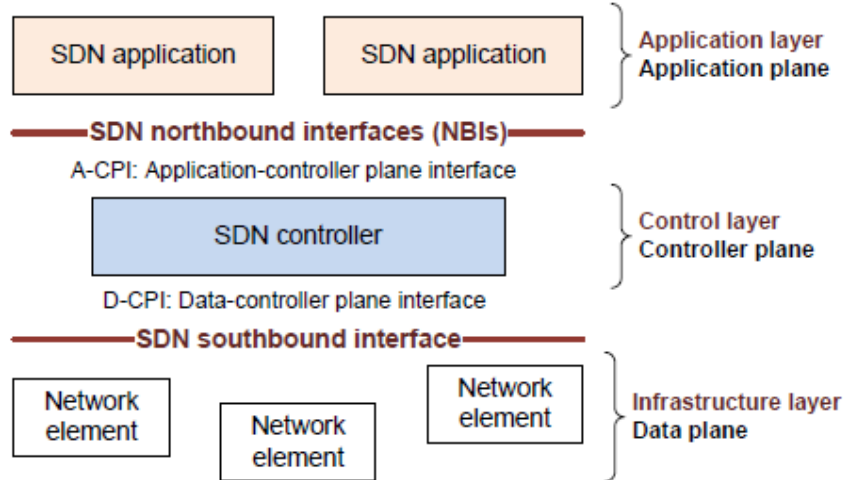
Atualmente os elementos das redes responsáveis por rotear ou encaminhar pacotes, possuem planos de dados e controles unificados. O plano de dados basicamente é o

caminho de cada pacote, ou seja, é o plano responsável por encaminhar os pacotes. Já o plano de controle é responsável por gerenciar como são feitas as decisões de encaminhamento, como por exemplo o destino de um pacote. As redes definidas por software representam uma mudança de paradigma nas redes tradicionais. A proposta das SDN's é realizar a separação dos planos de dados e de controle, permitindo a programação do encaminhamento de pacotes da rede através de um elemento central denominado controlador (KARAMAN et al., 2015). O paradigma das redes definidas por *software* surgiu a partir de duas propostas de *firewalls* (CASADO et al., 2006) (CASADO et al., 2007), onde foram propostos esquemas de segurança de redes que não utilizavam elementos de “barreira” para filtrarem o tráfego antes de repassarem os pacotes aos demais elementos. A proposta era fazer com que cada elemento da rede pudesse ser capaz de controlar o tráfego através de políticas de segurança instalados em cada um deles. Em caso de fluxos desconhecidos, os elementos da rede se comunicariam com um elemento central da rede e assim tomariam uma ação em relação ao fluxo. Posteriormente, os autores das duas propostas de *firewall* utilizam o mesmo conceito para criar o protocolo OpenFlow, cujo principal objetivo é programar os elementos de comutação da rede, fornecendo uma interface entre o controlador (considerado o elemento central da rede) e os demais elementos da rede através da separação do plano de dados e do plano de controle. O protocolo permitiu a padronização de diversos fabricantes através da programação e isso fez com que as SDN's se popularizassem. Existem três princípios que devem basear o desenvolvimento de uma rede definida por *software*. São eles:

- **Separação do plano de controle e do plano de dados:** Basicamente é o que fundamenta o paradigma das SDN's. É necessário que exista a separação do plano de dados, que é responsável pelo encaminhamento dos pacotes, e do plano de controle, através da utilização de um elemento central da rede para torna-la programável e centralizada.
- **Controle centralizado da rede:** Em relação ao controle local, onde cada elemento da rede tem sua própria configuração, a utilização de um controlador centralizado tem uma visão geral dos recursos disponíveis e a partir daí toma decisões melhores para alocar os recursos. Além disso, a escalabilidade é melhorada com a separação dos planos juntamente com a centralização do controle, fornecendo uma visão mais geral em relação aos recursos.
- **Exposição do estado e dos recursos da rede para aplicações externas:** Fornecer uma interface de comunicação para o controlador obter informações em relação aos recursos da rede e repassar as informações obtidas para o plano de aplicação.

A arquitetura de uma SDN pode ser definida em três planos e duas interfaces de comunicação (TR-502, 2014). O plano de dados representa a infraestrutura da rede, ou seja, é composto por todos os elementos de comutação programáveis (*switches*, roteadores, etc), que são responsáveis por verificar a tabela de fluxos e indicar ao hardware a ação a ser tomada de acordo com uma regra para determinado fluxo. As características de cada um dos elementos da rede são passadas para o controlador através da *Southbound Interface* (SBI). O plano de controle é composto pelo controlador SDN que também é chamado de sistema operacional da rede, pois é responsável pelo controle direto dos elementos da rede, por isolar os detalhes de cada componente, pelo fornecimento de uma visão centralizada e unificada de toda a topologia e prover uma interface mais eficiente aos administradores da rede no plano de aplicação. A *Northbound Interface* (NBI) é a interface responsável por conectar o controlador às aplicações SDN, ou seja, repassar as informações e o controle da rede aos administradores e receber requisições do plano de aplicação. O plano de aplicação é composto por serviços e aplicações fornecidos pelo controlador. A Figura 10 apresenta a disposição dos elementos dentro de uma arquitetura SDN.

Figura 10 – Arquitetura SDN



Fonte: (TR-502, 2014)

As redes tradicionais possuem uma grande quantidade e uma enorme variedade de *hardwares* proprietários. Para lançar um novo serviço, é necessária instalação de novos equipamentos e nem sempre é uma tarefa fácil encontrar espaço e energia para suportar as novas demandas. Além disso, o ciclo de vida destes equipamentos está cada vez menor e existe a necessidade de trocas constantes dos mesmos, acarretando em mais custos. De forma complementar às SDN's, existe um conceito denominado *Network Function Virtualization* (NFV) cuja principal ideia é utilizar princípios da virtualização para separar dos *hardwares* proprietários diversas funções das redes (*Firewall*, *Domain Name Service* (DNS), *Network Address Translation* (NAT) e outros) e permitir que elas sejam executadas

através de *softwares* (HAN et al., 2015).

O controlador é o elemento da rede responsável pelo plano de controle. Ele possui informações completas da topologia da rede assim como a localização de outros elementos da rede e também informações relevantes dos elementos, endereços MAC e tabelas de roteamento. Um controlador SDN é responsável pela manutenção de todas as regras de uma rede e também por fornecer as ações necessárias que devem ser tomadas pelo elemento de encaminhamento de pacotes para tratar cada tipo de fluxo de dados quando o mesmo não possui uma regra em sua tabela de fluxos (PFAFF et al., 2012).

Existem dois modos de operação em um controlador SDN: reativo e proativo. No modo reativo o elemento comutador reage ao recebimento de pacotes, ou seja, quando um determinado fluxo chega ao elemento comutador, o controlador é acionado para inserir as entradas das tabelas de fluxos em cada dispositivo da rede. Essa abordagem é capaz de gerenciar melhor a memória dos equipamentos, pois adiciona apenas fluxos necessários. Por outro lado, necessita de um tempo adicional para cada adição de fluxo e além disso, caso o elemento comutador perca sua conexão, sua funcionalidade será limitada. Já no modo proativo, o controlador insere diversas entradas na tabela de fluxos quando o elemento comutador é ligado. Essa abordagem não necessita de um tempo extra para encaminhar o pacote, pois a regra já está definida na tabela. Além disso, uma possível perda de conexão com o controlador não irá interromper o tráfego (FERNANDEZ, 2013).

Na maioria das vezes, os diversos fabricantes dos equipamentos de rede utilizam na configuração de seus produtos o que chamamos de *softwares* proprietários, ou seja, seu uso, redistribuição ou modificação é proibido, ou requer uma permissão, ou é restrito de tal forma que você não possa efetivamente reproduzi-lo de forma livre. Para a aplicação do conceito de SDN é necessário que a programação seja transferida para o controlador e que elementos comutadores sejam capazes de comunicar entre si. Para isso, foi desenvolvido o protocolo OpenFlow, que é aplicado para redes definidas por *software* e é completamente *open-source*. Ele foi desenvolvido originalmente na Universidade de Stanford com o principal objetivo de permitir a experimentação de novos protocolos de rede em dispositivos comerciais e ao mesmo tempo permitir o fluxo tradicional das redes. A característica básica do protocolo, também compartilhada pelo conceito de SDN, é a divisão do plano de dados e do plano de controle em elementos distintos, estabelecendo um padrão de comunicação entre o controlador e os dispositivos da rede em uma arquitetura SDN. Além disso, o protocolo trouxe uma união entre o meio acadêmico e a indústria, permitindo que equipamentos de diversas marcas possuam o mesmo código de programação e possibilitando o desenvolvimento de novas tecnologias (GUEDES et al., 2012).

Resumidamente, uma Rede Definida por *Software* pode ser definida pela existência

de um controle centralizado e programável, definido por um software, que é capaz de controlar os elementos responsáveis pelo encaminhamento de pacotes e gerência da rede, através de uma interface de programação estruturada. Estas interfaces dos elementos disponibilizam recursos ao software para que ele seja capaz de definir e alterar entradas da tabela de roteamento dos elementos, por exemplo o protocolo OpenFlow, e também virtualizar diversas funções da rede. O *software* atribuído ao controlador tende a ser uma aplicação monolítica de forma estruturada, porém ele pode ser implementado baseando-se em um controlador para aplicações de forma geral, verificando as necessidades específicas para cada tipo de rede (GUEDES et al., 2012).

Além da utilização de SDN já citada anteriormente, ela também pode ser aplicada às redes de celular. Existe um grande esforço para simplificar o núcleo das redes de celular, para que o seu gerenciamento seja mais simples. O plano de controle distribuído em várias entidades torna difícil a implementação de novos serviços. Dessa forma, a centralização de todas as funcionalidades em uma entidade de controle única, através dos conceitos de SDN é capaz de facilitar o gerenciamento dos elementos da rede. Na Seção 3.1 é abordado a integração entre redes de celular e o conceito de SDN, trazendo trabalhos da literatura que realizaram a integração.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo aborda trabalhos relacionados à integração de redes de celular e redes definidas por *software*, na seção 3.1, e a algoritmos de decisão de *handover*, na seção 3.2.

3.1 Integração entre redes de celular e SDN

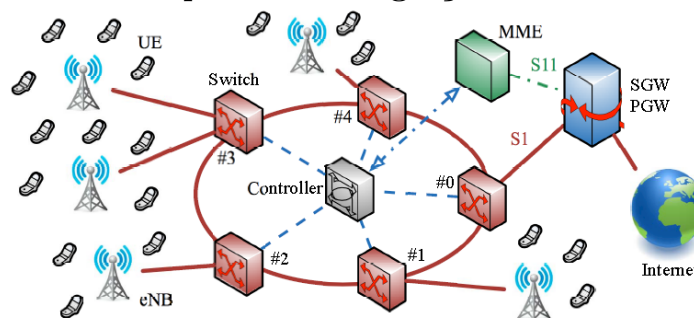
As redes LTE atualmente, são as principais representantes das redes de celulares. Existe um grande esforço para simplificar o núcleo destas redes, para que o seu gerenciamento seja mais simples e que possa se adequar à quinta geração. O plano de controle distribuído em várias entidades torna difícil a implementação de novos serviços. Centralizando todas as funcionalidades em uma entidade de controle única, através dos conceitos de SDN e NFV, pode se reduzir o número de mensagens de controle e permitir melhor gerenciamento do eNodeB. O gerenciamento de recursos é de responsabilidade dos eNodeB's, não sendo visível a outros elementos, o que dificulta o processo de alocação de recursos. Existem várias pesquisas que têm como objetivo integrar o conceito de SDN a redes de celular. A principal diferença entre os trabalhos está na maneira como o conceito de SDN é integrado à arquitetura LTE legada, através do controle das entidades da *Radio Access Network* (RAN), das entidades do EPC ou ambos (KHAN; PORTMANN, 2016).

Seguindo a linha na qual o controlador é responsável por gerenciar a interface aérea, o trabalho de Bhaumik et al. (2012) utiliza SDN para aumentar o desempenho da RAN. Através de um controlador central utilizando uma estrutura de nuvem, é feito o gerenciamento de diversas funcionalidades da interface aérea. Porém, existem muitos limitadores para a arquitetura proposta. A principal dificuldade está relacionada aos altos índices de latência e também de *overhead* durante as transmissões, sendo necessário um *link* principal de alta velocidade para trocar informações entre os eNodeB's distribuídos e o controlador que está em nuvem. Essa abordagem se torna inadequada para redes de celular do futuro, que propõem tudo integrado com grande volume de tráfego.

Em outros casos, o controlador é capaz de gerenciar elementos pertencentes ao EPC. No trabalho de Chaves et al. (2015) são discutidos os principais aspectos envolvidos na integração entre o protocolo OpenFlow e as redes LTE, promovendo flexibilidade e programabilidade para a rede. São discutidos quais são os tópicos de pesquisa em aberto para possibilitar a integração, dentre eles: escalabilidade, mobilidade e roteamento, interoperabilidade e avaliação de desempenho dos modelos propostos. Os autores do trabalho propuseram um novo módulo OpenFlow denominado OFSwitch13, que possui mais recursos que a versão do módulo OpenFlow originalmente implementado no simulador ns-3. Para avaliar a integração entre o módulo LTE e o módulo OpenFlow, foi criado um cenário onde as interfaces S1 foram construídas totalmente com *switches*

OpenFlow. Foi desenvolvido um controlador responsável pelo controle de admissão, capaz de se comunicar com o MME e obter informações sobre as portadoras de rádio. Com isso, é possível auxiliar o MME a gerenciar os pedidos de alocação de recursos e encontrar o menor caminho entre as eNodeB's e o *gateway*. A Figura 11 mostra o cenário simulado no trabalho de Chaves et al. (2015), demonstrando como foi feita a disposição dos elementos para permitir a integração entre o conceito de SDN e as redes LTE. Foi utilizada uma topologia em anel constituída de 5 *switches* OpenFlow. No *switch* 0 foi conectado o gateway SGW/PGW unificado, que tem conexão à internet, através da interface S1. Os demais *switches* estão conectados aos eNodeB's, que, por sua vez, formam as células de cobertura dos UE's. O controlador central orquestra os *switches* e possui conexão lógica com o MME para buscar informações relevantes.

Figura 11 – Proposta de Integração entre SDN e LTE



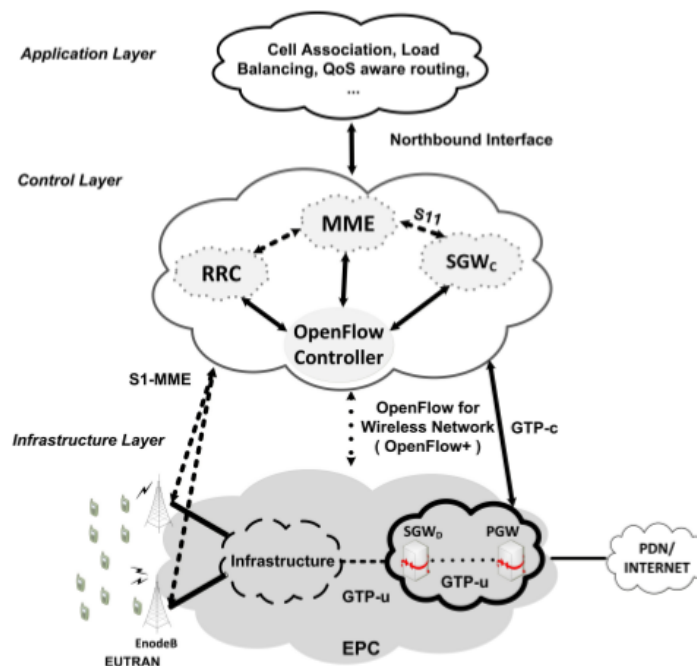
Fonte: (CHAVES et al., 2015)

Na seção de trabalhos futuros do trabalho de Chaves et al. (2015), é proposta a avaliação e a construção de novas arquiteturas e topologias utilizando o módulo OFSwitch13 e também novas estratégias para melhorar QoS e a experiência dos usuários através da programabilidade dos controladores. O aspecto de mobilidade também não foi abordado, pelos autores, no trabalho, pois, em todas as simulações, os nós se mantinham estáticos. Porém, a mobilidade foi outro ponto de suma importância citado como trabalho futuro.

Em Khan e Portmann (2016) foi feita uma proposta de uma arquitetura LTE baseada em SDN similar à de Chaves et al. (2015), inclusive utilizando o simulador ns-3 e o módulo OFSwitch13. Foi integrado um controlador à arquitetura padrão capaz de supervisionar o núcleo da rede com o principal objetivo de melhorar o desempenho do usuário final. A arquitetura proposta conta com *switches* OpenFlow. O objetivo dos *switches* é realizar o processamento de pacotes GTP. Além de processar os pacotes, os *switches* podem fazer uma das funções do SGW, que é processar o campo TEID de pacotes com origem do eNodeB ou PGW. Algumas funções, como controle de recursos das conexões, que antes eram gerenciadas pelos eNodeB's, foram repassadas ao controlador. A Figura 12 mostra como a arquitetura proposta, onde foi utilizado o conceito de SDN

e foi feita a divisão em três camadas: aplicação, controle e infraestrutura. A camada de infraestrutura é composta pelos eNodeB's e também pelos UE's. Além deles, também foi utilizada uma adaptação do SGW/PGW capaz de processar pacotes GTP. Na camada de controle, o controlador gerencia o RRC dos eNodeB's, o MME e também o SGW. Na camada de serviço é apresentada a abstração fornecida pelo controlador, provendo serviços, tais como: associação de células, balanceamento de carga e decisão de *handover*.

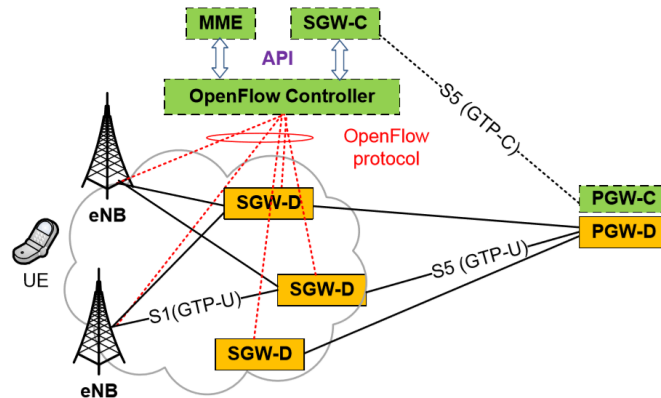
Figura 12 – Proposta de Integração entre SDN e LTE



Fonte: (KHAN; PORTMANN, 2016)

Existe, também, a possibilidade do controlador gerenciar tanto o EPC, quanto a RAN. Em Sama et al. (2014), foi proposta uma arquitetura com o objetivo de reduzir custos de sinalização e também de gerenciamento do núcleo da rede. Porém, não foram realizadas simulações para validar a arquitetura. O foco principal da arquitetura proposta é o elemento SGW. Nele, a arquitetura é separada em plano de dados e plano de controle, ou seja, a aplicação do conceito de SDN. O plano de dados é constituído por *switches* OpenFlow, enquanto o plano de controle é gerenciado por um controlador centralizado. A Figura 13 mostra a proposta de arquitetura. O eNodeB tem suas funções de rádio mantidas e é conectado aos *switches* OpenFlow, capazes de processar pacotes GTP. O controlador é responsável por gerenciar o MME e também o plano de controle do SGW. O PGW não teve qualquer alteração e é conectado aos *switches* e também ao SGW.

Figura 13 – Proposta de Integração entre SDN e LTE



Fonte: (SAMA et al., 2014)

3.2 Algoritmos de decisão de *handover*

Além da arquitetura, um mecanismo de decisão de *handover* precisa de um algoritmo para realizar a tomada de decisão. Existem diversos fatores envolvidos no processo de transição entre células. Eles são importantes para decidir em qual célula o UE deve se conectar. Um mecanismo de decisão de *handover* eficiente deve considerar fatores como condições da rede, condições dos UE's e os serviços utilizados, para tomar decisões mais assertivas (XU; ZHAO; ZHU, 2014). Como visto anteriormente, os *handovers* podem ser baseados em medições realizadas entre UE's e eNodeB's, desencadeados por uma série de eventos definidos. Por trás de todo o processo, existe um algoritmo, que é utilizado para realizar todas as comparações necessárias.

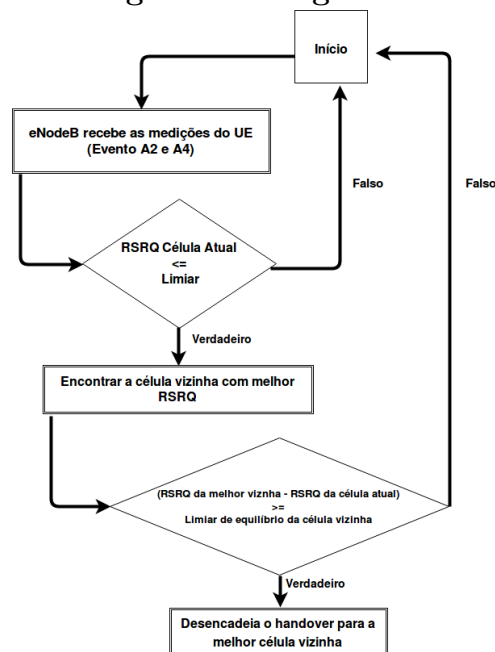
Um dos algoritmos para gerenciar o *handover* é o A2-A4-RSRQ (PROJECT, 2015), cuja funcionalidade está diretamente relacionada às medições dos eventos A2 e A4 para desencadear um *handover*, que foram apresentados na Seção 2.2.5. O algoritmo recebe como parâmetro dois valores. O primeiro parâmetro é denominado limiar da célula de serviço (*ServingCellThreshold*), que é representado por um índice de RSRQ, cujo valor é comparado com o valor de RSRQ da célula atual através dos eventos A2. O segundo parâmetro é denominado de deslocamento de célula vizinha (*NeighbourCellOffset*), que é um valor de compensação (NAMRATA; SEEMA; VIJAYALAKSHMI, 2015) e será explicado adiante.

O algoritmo trabalha inicialmente com as medições realizadas pelos UE's e entregues ao eNodeB. A primeira validação realizada é a comparação do valor do RSRQ atual com o limiar de RSRQ definido pelo parâmetro *ServingCellThreshold*, caracterizando o evento A2, onde o UE recebe um sinal de baixa qualidade e irá se beneficiar de um *handover*. Caso o valor do limiar seja menor que valor da célula atual, o algoritmo irá

voltar ao início e comparar os valores de medição, caso contrário, irá retornar qual a melhor opção de célula para o UE realizar a transição (KHAN; PORTMANN, 2016).

A Figura 14 apresenta um fluxograma com os passos de execução do algoritmo. Ao receber a informação da melhor célula vizinha, o algoritmo realiza uma nova comparação, desta vez caracterizando o evento A4, onde é verificado se é realmente benéfico para o UE se transferir para a célula vizinha. O parâmetro *NeighbourCellOffset* pode ser definido como uma forma de validar se realmente a célula vizinha é uma boa opção. É feita a diferença entre o RSRQ da célula escolhida com o RSRQ da célula atual e o resultado é comparado com o parâmetro. Caso o resultado seja maior ou igual ao parâmetro, o *handover* é executado pelo UE da sua célula de origem para sua célula de destino. O valor do parâmetro de compensação costuma ser baixo por padrão, pois a validação mais importante é feita no início do algoritmo, e o *handover* é sempre desencadeado (KHAN; PORTMANN, 2016).

Figura 14 – Fluxograma do algoritmo A2-A4-RSRQ



Fonte: Adaptado de Namrata, Seema e Vijayalakshmi (2015)

Na Seção 3.1, a arquitetura utilizada em Khan e Portmann (2016) foi apresentada. Nela, a funcionalidade de decisão de *handover* do RRC foi centralizada no controlador. Quando o eNodeB recebe relatórios de medição relacionados a evento de *handover*, são repassadas mensagens ao MME, que pode ser acessado pelo controlador. Isso permite ao controlador tomar decisões, analisando as requisições que contém informações relacionadas aos índices de RSRQ da célula atual e também das vizinhas. Dessa forma, a célula capaz de fornecer a melhor vazão é escolhida. O controlador envia uma requisição para o eNodeB selecionado e o mesmo executa um controle de admissão, para verificar a possibilidade de

aceitar uma nova conexão. Depois de confirmado o processo de *handover*, o controlador envia as informações da transição para o eNodeB atual que repassa para o UE. Ao término da transição, o controlador atualiza a tabela de fluxos.

No algoritmo de *handover* proposto em Khan e Portmann (2016), o controlador utiliza uma gama de informações disponíveis para melhorar a vazão dos usuários, graças à visão centralizada da rede. Quando as medições relacionadas a *handover*, fornecidas pelo eNodeB, são encaminhadas, o controlador é capaz de determinar a eNodeB candidata mais adequada à transição. Inicialmente, o UE envia uma mensagem para o eNodeB atual, quando o índice de RSRQ se torna menor do que o limite ou o recebido RSRQ da célula candidata. Essa mensagem é encaminhada para o controlador. A partir desse momento, é verificada a proporção entre a potência do sinal e carga da célula para tomar a decisão.

Mesmo utilizando o conceito de SDN, os autores de Khan e Portmann (2016) não consideram um fator importante na decisão de *handover*, a velocidade. Por outro lado, o trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014) não utilizou o conceito de SDN no mecanismo proposto, porém é destacado que a velocidade é um dos fatores mais críticos na tomada de decisão. Em algoritmos tradicionais, os atrasos de *handover* acontecem em decorrência da própria decisão do *handover*, o que, conseqüentemente, aumenta a taxa de *handovers falhos*. O algoritmo de Xu, Zhao e Zhu (2014) atua de uma forma onde o UE é capaz de prever o valor de RSRQ em um próximo intervalo, não sendo necessário realizar medições de sinal. Dessa forma, o atraso na decisão de *handover* é menor e o UE é conectado a um outro eNodeB, antes que seu canal atual comece a se deteriorar.

O algoritmo proposto em Xu, Zhao e Zhu (2014) utiliza as vantagens das *macrocells* e das *picocells*. O modelo de mobilidade Gauss-Markov é utilizado para prever a velocidade e a direção dos UE's de forma periódica. Os índices de RSRQ são adotados para verificar a qualidade do sinal da célula. Além disso, são também utilizados a velocidade do UE e o tipo de aplicação do mesmo. Se o UE se move de forma lenta, ou move-se em velocidades médias e utiliza serviços que não são de tempo real, ele é alocado em *picocells* adjacentes. Se o UE se move em velocidades médias e utiliza serviços de tempo real, ou se move em alta velocidade, o UE é alocado em *macrocell*.

Existe outro tipo de abordagem na tomada de decisão de *handovers*. Ela é apresentada em Wang, Huang e Tung (2014), e utiliza dados históricos, tanto do UE quanto do eNodeB, para a tomada de decisão. Informações da célula e também tempos de permanência do UE em determinadas células, auxiliam na construção de um histórico de informações sobre a rede. Dessa forma, é possível realizar análises probabilísticas em cima das chances do momento de realização de um *hadover* por parte do UE. Como as redes são muito dinâmicas e existem diversos fatores que contribuem para suas alterações,

as tomadas de decisões podem não ser tão assertivas em certos casos, pois a tarefa de identificação de padrão é difícil e as tomadas de decisão podem não ser tão assertivas.

Em comum, a maioria dos algoritmos analisados utilizam o RSRQ como base de tomada de decisão e pode-se afirmar que o índice é um dos fatores importantes na tomada de decisão. Além disso, como destacado em Xu, Zhao e Zhu (2014), a velocidade é outro ponto importante quando a mobilidade dos usuários é analisada. Por fim, a centralização das funcionalidades da rede permite a implementação de novos serviços e uma integração maior da arquitetura em geral. Todos esses pontos são importantes para o desenvolvimento de um mecanismo eficiente de tomada de decisão de *handover*.

Contudo, foi constatado que em nenhum dos trabalhos levantados, existe um mecanismo de *handover* que engloba todas os componentes de decisão relevantes. Com o objetivo de construir um mecanismo de decisão de *handover*, foi proposto neste trabalho o SoftH. Trata-se de um mecanismo baseado em SDN, capaz de realizar decisões de *handover* assertivas. A partir do levantamento das diversos componentes de decisão de *handover*, foi construído um algoritmo para o mecanismo, utilizando componentes da literatura e também, propondo novos componentes. O Quadro 5 apresenta a comparação entre os trabalhos descritos nessa seção, juntamente com o SoftH, verificando quais componentes de decisão estão presentes em cada um deles. O algoritmo de *handover* do SoftH engloba os principais componentes da literatura, sendo que apenas dois não são utilizados. Os dados históricos não têm uma assertividade muito boa, pois as redes são dinâmicas e é difícil encontrar padrões estatísticos. O tipo de serviço foi substituído pelo QCI, que mede a qualidade de serviço da rede e trata-se de uma componente oficial do 3GPP. No Capítulo 4 serão apresentados detalhes sobre a implementação dos componentes no SoftH.

Quadro 5 – Componentes de decisão de *handover* utilizadas na literatura

Componentes de decisão	A2-A4-RSRQ	Khan e Portmann	Wang, Huang e Tung	Xu, Zhao e Zhu	SoftH
Congestionamento		X			X
Controlador SDN		X			X
Dados Históricos			X		
Múltiplas Células					X
QCI					X
RSRQ	X	X		X	X
Tipo de Serviço				X	
Velocidade				X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

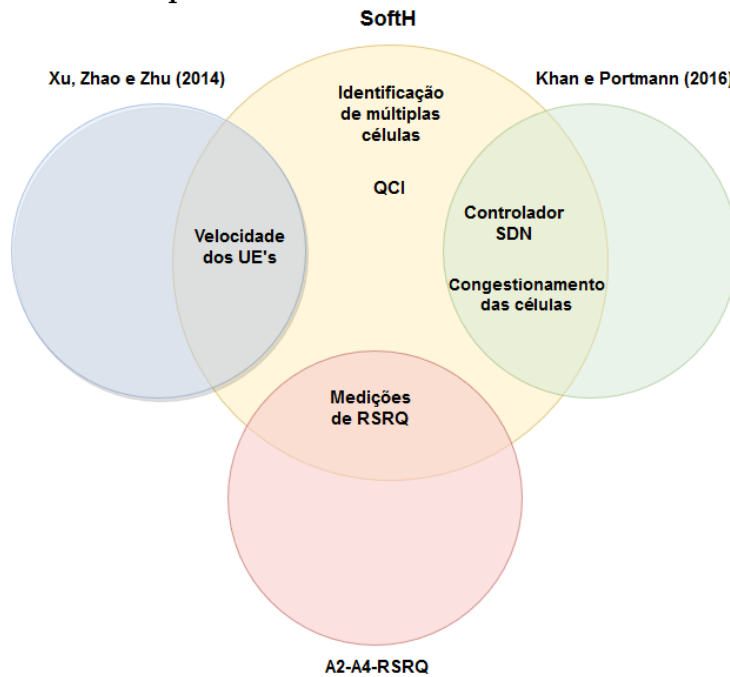
4 SOFTH

Durante o processo de *handover*, uma quantidade considerável de mensagens são trocadas entre eNodeB's e UE's. É necessário processar essas informações da melhor maneira possível, com o objetivo de selecionar a melhor célula para transição. Para o processamento de maneira mais rápida desse volume de informações, é ideal ter uma visão unificada, pois, assim, é possível ter a ciência do contexto geral da rede e obter melhor gerenciamento da mesma. O conceito de redes definidas por *software*, SDN, é indicado para esses casos, pois a principal ideia de uma SDN é a separação do controle lógico da rede do plano de encaminhamento de pacotes.

O objetivo deste trabalho foi definir um mecanismo capaz de realizar decisões assertivas no momento do *handover* em uma rede de celular. Para atender a esses requisitos, foi proposto o SoftH, um mecanismo de *handover* suave que utiliza o conceito de SDN e é capaz de realizar decisões de *handovers* de maneira assertiva, realizando uma escolha adequada da célula para transição de um UE. Analisando os algoritmos de *handover* levantados no Capítulo 3, foi constatado que nenhum algoritmo engloba todas as métricas relevantes no processo de decisão de *handover*. Dessa forma, durante a construção do algoritmo de *handover* do SoftH, foram utilizadas as principais métricas de decisão dos trabalhos da literatura e também foram incluídas novas.

A Figura 15 apresenta as contribuições de outros trabalhos e também as novas propostas de métricas para a construção do SoftH. As medições de RSRQ utilizadas pelo algoritmo A2-A4-RSRQ também foram utilizadas pelo mecanismo SoftH, pois representam a qualidade do sinal da célula e são relevantes na decisão de *handover*. A partir do trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), foi utilizada a velocidade média dos UE's, que é um componente relevante para análise de mobilidade dos UE's. A partir do trabalho de Khan e Portmann (2016), foram utilizados dois componentes. O primeiro é o controlador SDN, que permite uma visão centralizada da rede e obtenção de informações dos elementos da rede. O segundo é o controle do congestionamento das células, evitando a deterioração da qualidade de transmissão nas células. Além dos componentes da literatura, também foram propostos novos componentes. O primeiro é uma adaptação da proposta do algoritmo A2-A4-RSRQ, que permite a identificação de apenas uma célula candidata a *handover*. O SoftH é capaz de identificar até duas células potenciais. O segundo componente, é a utilização do QCI, que determina a qualidade de serviço de determinada aplicação e é um componente regulamentado pelo 3GPP (ETSI, 2010). A partir da definição do QCI, é definido o índice de RSRQ que deve ser utilizado como limiar para decisão de *handover*. A aplicação dos componentes no SoftH, será detalhada na Seção 4.1.

Figura 15 – Componentes de decisão de *handover* do SoftH



Fonte: Elaborado pelo autor

Como visto anteriormente, a tendência de convergência entre diferentes tipos de rede, cabeadas ou não, é levantada por vários autores. As redes LTE são as principais representantes das redes de celular atualmente. Muitos trabalhos da literatura apontam uma infraestrutura de redes 5G que incorporaram as redes LTE. Dessa forma, considerando os pontos apresentados, a rede LTE foi escolhida para avaliação do SoftH.

4.1 Arquitetura e algoritmo de *handover* do SoftH

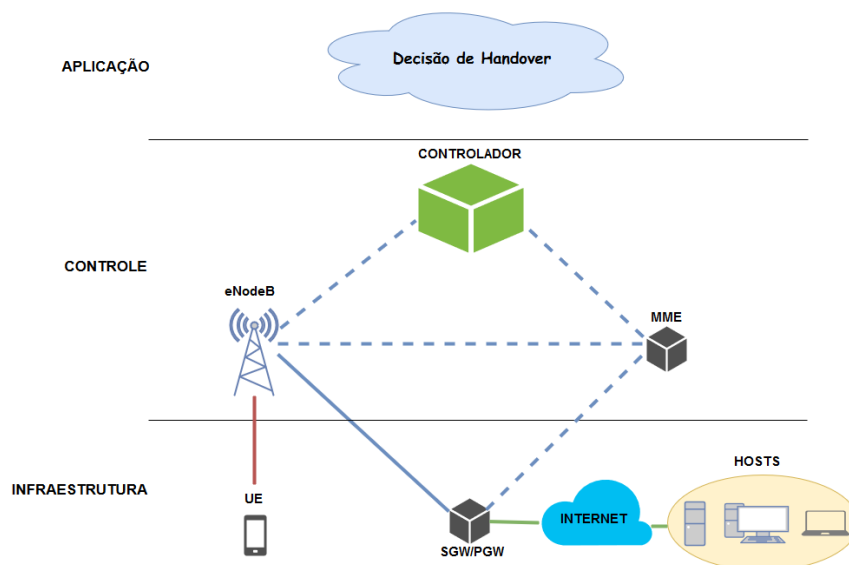
Esta seção descreve a arquitetura e o algoritmo do SoftH. O conceito principal utilizado para a integração entre a rede LTE e SDN foi a centralização do gerenciamento da rede, que é uma das principais ideias das SDN's.

Em muitos trabalhos onde foi proposto algum tipo de arquitetura com a integração entre LTE e SDN, não existem validações com testes ou simulações (BANSAL et al., 2012), (BASTA et al., 2013), (MAHMOODI; SEETHARAMAN, 2014), (SAMA et al., 2014), (AL-SAMMAN; DOUFEXI; BEACH, 2016). Durante a construção da arquitetura do SoftH, todas as validações foram realizadas através de simulações. Não foram utilizados *switches* e todos elementos da arquitetura LTE legada foram mantidos. Isso se deve ao fato do algoritmo de decisão de *handover* analisar fatores externos aos pacotes, como RSRQ da célula, velocidade dos UE's e quantidade de nós conectados a um eNodeB, sem a necessidade da utilização dos *switches* OpenFlow.

Como visto anteriormente, é necessário decidir como o conceito de SDN é integrado

à arquitetura LTE legada. Foi utilizado o controle tanto do EPC quanto da RAN, permitindo que o controlador acumule uma quantidade maior de informações da rede. A novidade em relação à topologia LTE tradicional é a inclusão de um controlador, que é conectado aos eNodeB's e também ao MME, com o objetivo de recuperar e processar informações relevantes ao processo. Em relação à conexão com o eNodeB, o controlador recebe como informações relevantes a quantidade UE's conectados àquele eNodeB e também a velocidade média de cada um dos UE's. A conexão com o MME permite que o controlador seja capaz de processar informações de portadoras dos UE's da rede e também permite ao controlador enviar a decisão de *handover* diretamente para o MME. Os demais elementos da rede não tiveram mudanças e por isso seguem o padrão de uma rede LTE comum. A Figura 16 mostra a nova arquitetura proposta, onde foi feita a divisão em três camadas, seguindo o conceito de SDN. A camada de infraestrutura é composta pelos UE's, o *gateway* unificado SGW/PGW e os demais *hosts* que são responsáveis por fornecer os serviços para os usuários. Na camada de controle existem três elementos. O controlador é capaz de gerenciar o eNodeB e também o MME, como descrito anteriormente. Por fim, a camada de aplicação representa a abstração fornecida pelo controlador e representa o mecanismo de decisão de *handover*.

Figura 16 – Arquitetura do mecanismo SoftH

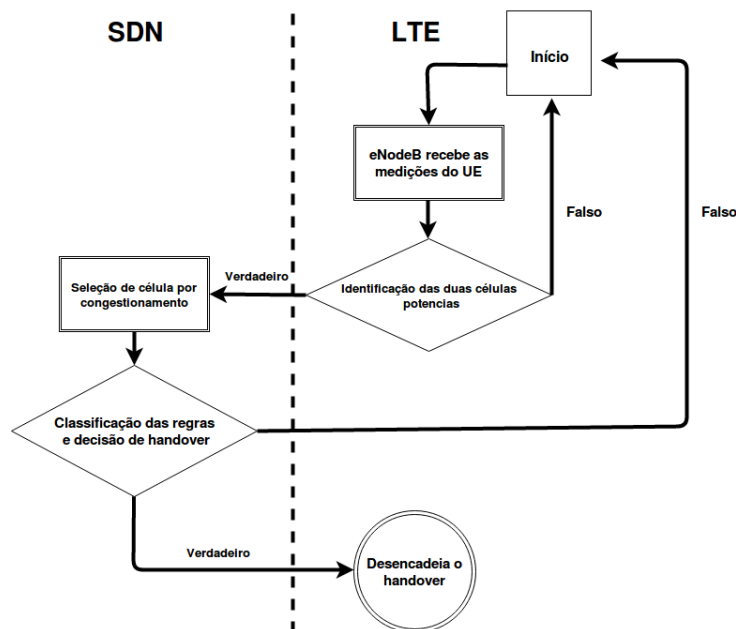


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o processo de transição de um UE, partindo de uma determinada célula para outra, é necessário utilizar algum algoritmo para orquestrar o *handover*. Para desenvolver o mecanismo SoftH, o algoritmo de *handover* escolhido foi uma adaptação do algoritmo A2-A4-RSRQ, descrito no Capítulo 3. A Figura 17 apresenta o fluxograma com todos os passos realizados pelo mecanismo para decisão de *handover*, no qual as responsabilidades da arquitetura LTE e do controlador estão divididas. Inicialmente, o eNodeB recebe as medições da célula em relação ao índice de RSRQ de cada UE conectado a ela. A partir

dos índices obtidos, são identificadas até duas células que são candidatas ao processo de transição. Caso não sejam identificadas células potenciais, o algoritmo retorna ao estado inicial. Caso sejam identificadas duas células potenciais, é aplicado um algoritmo para verificar qual das duas está menos congestionada e, então, selecioná-la. Depois de selecionada, a célula é avaliada por um algoritmo. Nele, existem regras que verificam se é necessário realizar o *handover* naquele momento.

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo de *handover* do SoftH



Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo SoftH é dividido em duas partes principais. A primeira parte é referente à seleção de célula candidata ao *handover* e está representada nas linhas de 2 a 7 do Algoritmo 1. A segunda parte é a decisão de *handover* e é representada pelas linhas de 7 a 12 do Algoritmo 1. O Algoritmo 1 recebe como entrada informações do UE cujo *handover* se fez necessário, informações da célula atual onde o UE está conectado e informações das células vizinhas. O resultado do algoritmo é a decisão em realizar ou não o processo de transição de células. O Algoritmo possui três funções importantes que serão destacadas posteriormente, sendo elas: *SelectPotentialCells*, *LessCongestedCell* e *TriggerHandover*.

Algoritmo 1: Algoritmo de *handover* SoftH

Data: UE, CurrentCell, NeighboringCells

Result: True - trigger *handover*, False - don't trigger *handover*

```

1 begin
2   PotentialCells[]  $\leftarrow$  SelectPotentialCells(NeighboringCells)
3   if PotentialCells[0].RSRQ > CurrentCell.RSRQ then
4     ChosenCell  $\leftarrow$  PotentialCells[0]
5     if PotentialCells.size > 1 and
6       PotentialCells[1].RSRQ > CurrentCell.RSRQ then
7         ChosenCell  $\leftarrow$  LessCongestedCell(PotentialCells)
8       if TriggerHandover(ChosenCell, UE.Velocity) then
9         return true
10      else
11        return false
12    else
13      return false

```

Inicialmente, tanto o SoftH quanto o A2-A4-RSRQ (PROJECT, 2015) têm o mesmo comportamento. Ambos recebem, através do eNodeB, as medições do UE e têm a responsabilidade de identificar as potenciais células para *handover*. A primeira diferença do SoftH para o algoritmo A2-A4-RSRQ está relacionada ao limiar de RSRQ recebido como parâmetro. No SoftH, não é necessário informar um limiar fixo como parâmetro para desencadear o *handover*. O controlador monitora o eNodeB o tempo todo. Posteriormente são verificados os relatórios de medições recebidos. Caso o RSRQ da célula atual se torne menor que o RSRQ da célula vizinha, a seleção de células potenciais é realizada. A função responsável é a *SelectPotentialCells*, que é apresentada no Algoritmo 2. Ela recebe informações das células vizinhas e também da célula atual onde o UE está conectado. Por fim, a comparação dos valores de RSRQ de todas elas é realizada, no intuito de verificar a qualidade do sinal.

A segunda mudança realizada para o algoritmo SoftH foi o processo de reconhecimento de células vizinhas potenciais. O algoritmo A2-A4-RSRQ é capaz de identificar apenas uma célula potencial, enquanto o SoftH é capaz de identificar até duas células, simultaneamente, com os melhores valores de sinal de referência RSRQ. A segunda célula potencial só é identificada caso ela tenha o índice RSRQ maior ou igual ao índice 22 do Quadro 4 (equivalente a faixa entre -9 dB e -8,5 dB), pois acima deste valor é garantido que o UE tenha uma conexão de boa qualidade (ROLIN, 2014).

Algoritmo 2: SelectPotentialCells

Data: NeighboringCells, CurrentCell**Result:** Vector up to two positions with potential cells

```

1 begin
2   firstCell ← NeighboringCells[0]
3   secondCell ← NeighboringCells[1]
4   hasSecondCell ← false
5   for cell ∈ NeighboringCells do
6     if cell.RSRQ > firstCell.RSRQ then
7       firstCell ← cell
8       continue
9     if cell.RSRQ > secondCell.RSRQ then
10      secondCell ← cell
11      hasSecondCell ← true
12      continue
13  potentialCells[0] ← firstCell
14  if hasSecondCell and potentialCells[1].RSRQ >= 22 then
15    potentialCells[1] ← secondCell
16  return potentialCells

```

Durante a etapa de seleção de células potenciais, podem ser escolhidas até duas como candidatas a *handover*. Quando existem duas opções, é necessário que apenas uma seja escolhida. A terceira mudança foi implementada com o objetivo de realizar a melhor escolha entre as duas opções. A escolha é baseada no congestionamento dos eNodeB's. O Algoritmo 3 mostra a função *LessCongestedCell*, que basicamente compara o número de conexões ativas em cada uma das células e escolhe aquela que estiver com menos conexões ativas, ou seja, menos congestionada.

Algoritmo 3: LessCongestedCell

Data: PotentialCells**Result:** Return the less congested cell

```

1 begin
2   if PotentialCells[0].ActiveConnections < PotentialCells[1].ActiveConnections
3     then
4       return PotentialCells[0]
5   else
6     return PotentialCells[1]

```

Após a escolha da célula candidata a *handover*, a segunda etapa do algoritmo é iniciada. Nela, a função *TriggerHandover*, descrita no Algoritmo 4, é executada e a decisão pela transição entre células é tomada. Além das medições da qualidade do sinal, é importante analisar outros fatores que são relevantes durante o processo de decisão de *handover*. Um dos fatores principais é a velocidade média que o UE se movimenta (XU; ZHAO; ZHU, 2014). Dessa forma, a primeira classificação que é realizada pela função *TriggerHandover* é em relação a velocidade. Assim, a primeira classificação realizada é em relação à velocidade, separando os UE's em dois grupos distintos. O primeiro grupo é para UE's com velocidades médias entre 0 a 30 km/h e o segundo grupo é para EU's com velocidades médias entre 40 a 120 km/h, que respectivamente representam cenários de baixa e alta velocidade em cenários urbanos densos (MOHYELDIN, 2016).

Depois de separar por velocidade, o UE é classificado de acordo com seu QCI, que define a qualidade de transmissão de acordo com a prioridade do fluxo estabelecido para o UE. Os QCI's foram divididos em três grupos, por prioridade, e foram definidas regras de *handover* em cada um deles. Essas regras estão definidas como faixas de RSRQ, que agem como limítrofes de decisão de *handover*. As regras dos dois grupos estão sintetizadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Regras de *handover* por portadora e grupos de velocidade

QCI	Regras de baixa velocidade	Regras de alta velocidade
1, 2, 3 e 4	RSRQ célula atual < RSRQ célula vizinha	RSRQ célula atual < RSRQ célula vizinha
5 e 7	RSRQ célula atual ≤ 23	RSRQ célula atual ≤ 24
6, 8, 9 e Padrão	RSRQ célula atual ≤ 22	RSRQ célula atual ≤ 23

Fonte: Elaborado pelo autor

As escolhas pelos limiares das regras do primeiro grupo foram definidas através da velocidade. UE's que não trafegam em altas velocidades tendem a não mudar sua medição de RSRQ repentinamente. Dessa forma, é possível manter um nó conectado a uma célula por mais tempo, reduzindo o número de *handovers* desnecessários. Caso o UE seja caracterizado pelo primeiro grupo, com velocidades médias entre 0 e 30 km/h, existem três regras para controlar o *handover*, listadas a seguir:

1. QCI's 1, 2, 3 e 4

- As portadoras classificadas com os QCI's entre 1 a 4 são definidas como GBR.
- Caso seja atribuída uma destas portadoras ao UE, o *handover* sempre é realizado caso o RSRQ da célula atual seja menor que o RSRQ da célula vizinha.

2. QCI's 5 e 7

- As portadoras classificadas com os QCI's 5 e 7 são definidas como non-GBR, entretanto tem um limite de atraso de 100 ms, sendo menos prioritárias que o primeiro grupo, porém mais prioritárias que o último grupo de regras.
- Caso seja atribuída uma destas portadoras ao UE, o *handover* é desencadeado quando o *RSRQ* da célula atual for menor ou igual que o índice 23 (equivalente a faixa entre -8,5 dB e -8 dB) do Quadro 4.

3. QCI's 6, 8, 9 e Padrão

- As portadoras classificadas com os QCI's 6, 8 e 9 são definidas como non-GBR, porém tem um limite de atraso de 300 ms, sendo menos prioritárias que o primeiro e o segundo grupo.
- As portadoras são classificadas como padrão, a partir do momento quando um UE se conecta ao eNodeB e não é atribuída nenhuma portadora específica.
- Caso seja atribuída uma destas portadoras ao UE, o *handover* é desencadeado quando o *RSRQ* da célula atual for menor ou igual que o índice 22 (equivalente a faixa entre -9 dB e -8,5 dB) do Quadro 4.

A primeira regra aborda todas as portadoras mais prioritárias e imune a perda de pacotes. Para elas foi definido que, sempre que o índice de RSRQ da célula vizinha seja maior que o atual, o *handover* deve ser realizado, independente da velocidade, pois é importante os UE's estarem conectados a melhor célula quando se trata de portadoras GBR. A segunda regra engloba portadoras non-GBR, mas que possuem um limite de atraso menor que as demais non-GBR. Dessa forma, um índice de RSRQ acima de 23 representa uma boa conexão e atende bem a esta classe e o *handover* só é executado caso esse índice seja menor que 23. A terceira regra engloba portadoras non-GBR, que possuem um limite de atraso de 300 ms, e portadoras padrão, que são atribuídas no momento da conexão. Sendo menos prioritárias que as definidas na segunda regra, foi definido que, caso o limiar de RSRQ seja maior que o índice 22, o *handover* não é executado, caso contrário a transição se faz necessária.

As escolhas pelos limiares das regras do segundo grupo também foram definidas através da velocidade. UE's que trafegam em altas velocidades tendem a mudar sua medição de RSRQ repentinamente, causando *handovers* falhos. Dessa forma, é necessário definir um limite de RSRQ seguro para que ele o UE possa realizar o *handover* antes que a qualidade de sua conexão seja degradada. Caso o UE seja caracterizado pelo segundo grupo, com velocidades médias entre 40 e 120 km/h, existem três regras para controlar o *handover*, sendo elas:

1. QCI's 1, 2, 3 e 4

- A mesma regra número 1 definida para o primeiro grupo de velocidade.

2. QCI's 5, 6 e 7

- Caso seja atribuída uma destas portadoras ao UE, o *handover* é desencadeado quando o *RSRQ* da célula atual for menor ou igual ao índice 24 (equivalente a faixa entre -8 dB e -7,5 dB) do Quadro 4.

3. QCI's 6, 8, 9 e Padrão

- Caso seja atribuída uma destas portadoras ao UE, o *handover* é desencadeado quando o *RSRQ* da célula atual for menor ou igual que o índice 23 (equivalente a faixa entre -9 dB e -8,5 dB) do Quadro 4.

A mesma estrutura de regras do primeiro grupo de velocidade foi também estabelecida para o segundo grupo, alterando apenas as faixas de RSRQ. A primeira regra aborda todas as portadoras mais prioritárias e novamente o mesmo critério foi definido: sempre que o índice de RSRQ da célula vizinha esteja maior que o atual, o *handover* deve ser realizado, independente da velocidade. A segunda regra engloba portadoras non-GBR, mas que possuem um limite de atraso menor que as demais non-GBR. Dessa forma, um índice de RSRQ maior que 24 representa uma boa conexão e define um limite de segurança maior que o índice 22. A terceira regra engloba portadoras non-GBR e padrão, que possuem um limite de atraso de 300 ms. Sendo menos prioritárias que as da segunda regra, foi definido o limiar RSRQ maior ou igual ao índice 23, que ainda representa uma boa conexão e está acima do índice 22, que representa o índice mínimo de boa conexão.

Algoritmo 4: TriggerHandover

Data: ChosenCell, CurrentCell, UE

Result: Decides when handover occurs or not

```

1 begin
2   triggerHandover ← false
3   if UE.VELOCITY ≤ 40 then
4     if UE.QCI ≤ 4 then
5       if CurrentCell.RSRQ < ChosenCell.RSRQ then
6         triggerHandover ← true
7     else if UE.QCI == 5 or UE.QCI == 7 then
8       if CurrentCell.RSRQ ≤ 23 then
9         triggerHandover ← true
10    else
11      if CurrentCell.RSRQ ≤ 22 then
12        triggerHandover ← true
13  else if UE.VELOCITY > 40 and UE.VELOCITY ≤ 100 then
14    if UE.QCI ≤ 4 then
15      if CurrentCell.RSRQ ≤ ChosenCell.RSRQ then
16        triggerHandover ← true
17    else if UE.QCI == 5 or UE.QCI == 7 then
18      if CurrentCell.RSRQ ≤ 24 then
19        triggerHandover ← true
20    else
21      if CurrentCell.RSRQ ≤ 23 then
22        triggerHandover ← true
23  return triggerHandover

```

5 SIMULAÇÕES

5.1 Ambiente de Simulação

A implementação e os testes de uma nova solução para mobilidade em redes LTE em um ambiente real, ou seja, utilizando dispositivos físicos, é algo oneroso e pode apresentar limitações técnicas. Outra possível solução seria a construção de uma rede com dimensões menores e poucos dispositivos, porém limitaria aspectos de escalabilidade e seria necessário um investimento financeiro. Em face disto, a melhor alternativa é a utilização dos simuladores de redes. Para essa finalidade, é necessária a utilização de uma ferramenta capaz de retratar os cenários reais com fidelidade e que retornem dados confiáveis em um ambiente simulado.

Os simuladores são cada vez mais utilizados na atualidade, pois a complexidade das novas tecnologias e suas respectivas implementações físicas exigem um nível de dificuldade maior. Simuladores de eventos discretos de rede são ferramentas de pesquisa que permitem analisar de forma geral protocolos de rede e problemas de desempenho de larga escala (HENDERSON et al., 2006). O ns-3 é um simulador de redes baseado em eventos discretos que pode ser utilizado de forma didática ou para áreas de pesquisa. Em relação ao ns-2, o simulador ns-3 sofreu grandes mudanças e passou por uma grande reestruturação. Uma das novidades do ns-3 é a utilização da linguagem de programação Python para escrever *scripts* de simulação, além da linguagem C++, previamente implementada no ns-2, que tem suporte e documentação completa para o simulador e também permite, ao mesmo tempo, simulação e emulação de cenários (KAMOLTHAM; NAKORN; ROJVIBOONCHAI, 2012).

Neste trabalho, foi aplicado o conceito de SDN sobre a mobilidade dos nós da rede. O simulador Mininet (LANTZ; HELLER; MCKEOWN, 2010) é capaz de prototipar redes definidas por *software* de maneira rápida e simples através de primitivas de virtualização do sistema operacional Linux, além de suportar diversos tipos de controladores conhecidos, tais como: NOX, POX, Floodlight, OpendayLight, Ryu e outros. Vale ressaltar que o simulador não oferece modelos de redes de celulares. Diferentemente do Mininet, o ns-3 foi a ferramenta escolhida para este trabalho pois possui um modelo de rede LTE bem consolidado e também possui um módulo que oferece suporte ao conceito de SDN, o OFSwitch13, que será descrito adiante.

Para que o simulador ns-3 e o módulo OFSwitch13 sejam instalados, o sistema operacional Linux é necessário. Exceto pelo sistema operacional, não existem configurações mínimas recomendadas para instalação das ferramentas citadas anteriormente. Dessa forma, as simulações que foram desenvolvidas ao longo do trabalho,

foram executadas em um *desktop* da marca *IBM* modelo System x3100 M4, com o sistema operacional Linux utilizando a distribuição *Ubuntu* (versão 16.04). As configurações mais relevantes do *desktop*, onde o ambiente de simulação foi instalado, são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Ambiente de Simulação

<i>Parâmetro</i>	Valor
Gráfico	Intel HD Graphics P4000
Memória RAM	32 GB DDR3 1600 MHz SDRAM
Processador	Intel Xeon E3-1200 v2, 3.1 GHz
Sistema Operacional	Ubuntu 16.04

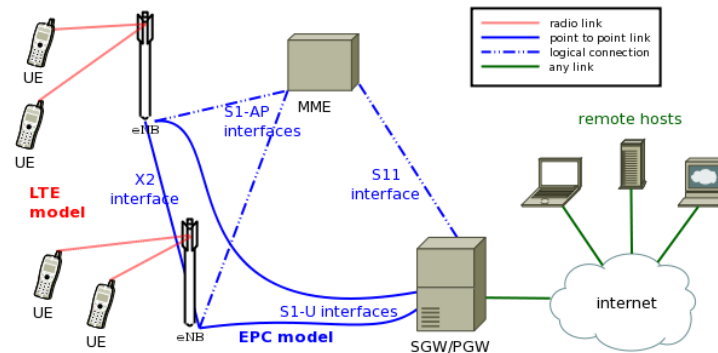
Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.1 Integração entre ns-3 e OFSwitch13

No simulador ns-3, foi utilizado o módulo LENA capaz de simular redes LTE. Além disso, foi utilizado um módulo que é compatível com o protocolo OpenFlow versão 1.3 denominado OFSwitch13 (CHAVES; GARCIA; MADEIRA, 2016), cujo propósito é adicionar novas funcionalidades ao simulador, permitindo a aplicabilidade dos conceitos de SDN. Como não existem exemplos ou módulos que façam a integração total de modelos heterogêneos dentro do simulador e os trabalhos relacionados não definem de forma explícita como foi realizada a integração, foi proposta uma maneira de integração diferente e simples dos dois módulos. Dessa forma, o segundo passo da metodologia foi definir como realizar a integração do módulo OFSwitch13, que possibilita a utilização do conceito de SDN dentro do ns-3, com o módulo LENA, que representa o modelo de redes de celular LTE.

Primeiramente, torna-se necessário conhecer um pouco mais a respeito dos módulos utilizados neste trabalho. A arquitetura LTE no simulador ns3 é modelada através do módulo LENA (BALDO, 2011). A Figura 18 mostra a arquitetura implementada no módulo que possui os principais elementos de uma arquitetura real de uma rede LTE. Neste módulo, existe a separação do modelo LTE do modelo EPC. O primeiro é responsável pela comunicação entre UE's e eNodeB's. O segundo é responsável por fornecer a comunicação entre as eNodeB's e os demais elementos da rede, o MME e o SGW/PGW.

Figura 18 – Arquitetura Básica do Módulo LENA



Fonte: (BALDO, 2011)

O módulo OFSwitch13 é capaz de fornecer suporte ao protocolo OpenFlow versão 1.3 ao ns-3, diferentemente do módulo originalmente implementado no simulador, que contava com a versão 0.8.9 do protocolo OpenFlow. Ele também oferece suporte às redes definidas por *software*, com um modelo de *switch* e um controlador com interface de aplicação. A comunicação entre o *switch* e o controlador é realizada através da pilha de protocolos, dispositivos de rede e canais. Além disso, é possível realizar a conexão com outros tipos de nós do simulador. Com isso, é possível trocar informações entre diferentes nós através da interface de programação fornecida pelo controlador.

Considerando que o simulador ns-3 foi escrito na linguagem C++, que suporta a orientação a objetos (WIKIPEDIA, 2017), cada entidade da rede é modelada através de classes. Para realizar a integração, neste trabalho, o primeiro passo foi a implementação do controlador, cuja classe recebeu o nome de *LteController*. Nele, as principais funções tem como objetivo interceptar e processar as informações do processo de *handover*. A função mais importante implementada no controlador é a de decisão de *handover* através das classificações de regras. Além dela, o *LteController* conta com diversas funções auxiliares, dentre elas:

- Controle de UE's conectados por célula;
- Identificação de duas células potenciais para *handover*;
- Retorno da célula atual de um UE;
- Mapeamento de QCI por UE;
- Mapeamento de UE por *Radio Network Temporary Identifier* (RNTI).

Para realizar o processamento das informações, o controlador precisa receber os parâmetros necessários que são de conhecimento dos eNodeB's, dos UE's e do MME. Dessa forma, quando é necessário interceptar algum tipo de informação, uma instância da classe

LteController é definida dentro da classe que detém as informações relevantes, criando assim uma relação entre as duas, durante a compilação, para possibilitar a chamada das funções do controlador. As classes do simulador que receberam instâncias do controlador foram *LteEnbRrc*, *EpcMme* e *A2A4RsrqHandoverAlgorithm*. Todas as alterações de cada classe e suas funcionalidades são detalhadas abaixo:

- ***LteEnbRrc***: responsável por modelar o RRC do eNodeB. Os métodos alterados foram de configuração e reconfiguração da conexão, onde foi acrescentada a função de mapeamento de RNTI para cada UE, pois os canais são alocados dinamicamente.
- ***EpcMme***: responsável por modelar o MME da arquitetura LTE. O método alterado é o que realiza a atribuição de *bearer*, onde foi acrescentada a função de mapeamento de QCI por UE, com o objetivo de centralizar estas informações no controlador.
- ***A2A4RsrqHandoverAlgorithm***: responsável por modelar o algoritmo de *handover* A2-A4-RSRQ. Foram acrescentadas as funções de identificação de duas células potenciais, a de controle de UE's conectados por célula e a principal função que tem como objetivo realizar a decisão de *handover* de acordo com as regras definidas.

5.1.2 Métricas de avaliação

A mobilidade é um dos fatores relevantes no desempenho das redes e, dessa forma, é importante avaliar as métricas relacionadas a *handover*. As principais métricas utilizadas para avaliar mecanismos de *handover* são: falha de *handover*, *handovers* desnecessários, tempo médio de *handovers* e número de conexões por eNodeB (AKKAMAHADEVI; SHANKAR, 2016). Além disso, como a rede LTE utiliza a comutação por pacotes, é importante considerar métricas que avaliam o desempenho em relação aos pacotes e, por isso, foram avaliadas também a *Packet Loss Ratio* (PLR), a vazão e a utilização da largura de banda (LUKA; ATAYERO; OSHIN, 2016). A seguir, são listadas as métricas que foram avaliadas durante as simulações e suas respectivas definições:

- ***Handovers* desnecessários**: métrica também conhecida como taxa de *ping-pong*, é caracterizada quando um UE executa um *handover* e em um curto espaço de tempo executa novamente um *handover* para a célula original (ALHABO; ZHANG; NAWAZ, 2017). Considerando a Equação 5.1, o percentual de *handovers* desnecessários pode ser calculada pela razão entre o número de *handovers* necessários (H_N) pelo número total de *handovers* executados (H_T).

$$\text{Handovers desnecessários} = 1 - \frac{H_N}{H_T} \quad (5.1)$$

- **Handovers falhos:** um *handover* pode ser considerado falho devido a três motivos: quando ocorre de forma prematura, quando ocorre de forma tardia, ou quando escolhe uma célula que não é adequada (WANG; CHANG; HUANG, 2015). Assim, um *handover* falho pode ser caracterizado quando o UE executa a transição entre as células e os índices de RSRQ da célula de origem e destino são menores do que o valor aconselhável para uma boa conexão. Conforme mostrado na Equação 5.2, o percentual de *handovers* falhos é calculado pela razão entre o número de *handovers* com sucesso (H_S) pelo número total de *handovers* executados (H_T).

$$\text{Handovers falhos} = 1 - \frac{H_S}{H_T} \quad (5.2)$$

- **Tempo médio de handovers:** para verificar o impacto da inclusão de um controlador na arquitetura tradicional LTE e também das alterações realizadas no algoritmo A2-A4-RSRQ, uma avaliação importante que deve ser feita está relacionada aos tempos de execução do *handover*, visto que a decisão durante o processo é um fator que pode interferir diretamente no tempo total. Conforme mostrado na Equação 5.3, a média dos tempos de execução de *handovers* para um cenário, é calculada pela razão entre o somatório dos tempos de execução de *handover* (TH_i) e o número total de *handovers* executados (H_T).

$$\text{Tempo médio de handovers} = \frac{\sum_{i=1}^N TH_i}{H_T} \quad (5.3)$$

- **Número de conexões por eNodeB:** para verificar os benefícios trazidos pela técnica para evitar congestionamento na rede utilizada no mecanismo SoftH, uma avaliação importante a se fazer é em relação a quantidade de conexões de UE's em cada eNodeB, que conseqüentemente representam as células da rede. Conforme mostrado na Equação 5.4, o número de conexões por eNodeB é avaliado pela quantidade de UE's conectados (UE_C) em determinado momento.

$$\text{Número de conexões por eNodeB} = UE_C \quad (5.4)$$

- **PLR (*Packet Loss Ratio*):** métrica caracterizada pela taxa de perda de pacotes durante uma transmissão, ou seja, aqueles pacotes que não foram transmitidos com sucesso. Conforme mostrado na Equação 5.5, o percentual de PLR é calculado pela razão entre o número de pacotes entregues com sucesso (P_E) e o número total de pacotes transmitidos (P_T) (LUKA; ATAYERO; OSHIN, 2016).

$$PLR = 1 - \frac{P_E}{P_T} \quad (5.5)$$

- **Vazão:** métrica conhecida como *throughput*, é caracterizada pela taxa de dados entregue com sucesso. Está diretamente relacionada ao número de usuários ativos na rede e também é influenciada pela distância entre o UE e sua respectiva eNodeB. Conforme mostrado na Equação 5.6, a vazão média para o usuário i é calculada pelo número de bits recebidos corretamente no i -ésimo pacote (x_i) e a soma de todos TTI que constituem o tempo de simulação (T_{soma}) (LUKA; ATAYERO; OSHIN, 2016). Dessa forma, a vazão média da rede é dada pela razão entre o somatório da vazão de cada usuário e o número total de usuários ativos (U_A).

$$Vazão = \frac{\sum_{i=1}^{U_A} \left(\frac{\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M x_i}{T_{soma}} \right)}{U_A} \quad (5.6)$$

- **Utilização da largura de banda:** a largura de banda é medida pela razão de um determinado meio de transmissão e por unidade de tempo. A utilização da largura de banda representa o quanto da largura de banda total foi consumida. Conforme mostrado na Equação 5.7, o percentual de utilização é calculado pela razão entre a largura de banda consumida (B_C) e a largura de banda total (B_T).

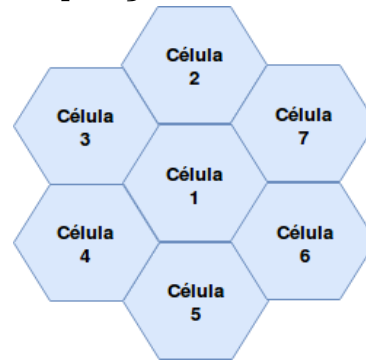
$$Utilização\ da\ largura\ de\ banda = \frac{B_C}{B_T} \quad (5.7)$$

5.2 Cenários Simulados

Foram simulados três cenários. Dois deles foram baseados nos trabalhos de Xu, Zhao e Zhu (2014) e Khan e Portmann (2016). Outro cenário foi construído com parâmetros diferentes, para avaliar métricas que não foram contempladas nos dois trabalhos citados. Todos os cenários simulados têm como finalidade atender aos objetivos que foram propostos no início do trabalho e verificar a eficiência do mecanismo proposto. Como o SoftH é um mecanismo de decisão de *handover*, todos os cenários simulam a mobilidade de usuários. A partir dos resultados, todas as métricas de avaliação descritas anteriormente foram analisadas. Cada simulação teve duração de 100 segundos, tempo suficiente para coletar as informações necessárias e possibilitar a execução de diversos *handovers*.

O primeiro cenário foi construído com o intuito de verificar o tempo médio de *handover*, o número de conexões por eNodeB, o PLR e a vazão. A topologia escolhida foi baseada em um *grid* hexagonal, pois apresenta um melhor desempenho e distribui de forma igual as células vizinhas, possibilitando *handovers* mais aleatórios (HUANG; SHANG, 2013). Foi montado um cenário com 7 eNodeB's e 50 UE's, conforme mostra a Figura 19. Inicialmente, todos concentrados na célula 1, coberta pelo eNodeB 1.

Figura 19 – Disposição das células no Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor

No simulador ns-3, existe a representação de 9 portadoras, também conhecidas como *bearers*, de redes LTE com seus respectivos QCI's, conforme mostra a Tabela 1. A *bearer* DEFAULT é atribuída no momento em que o UE se conecta ao eNodeB e não tem QCI próprio.

Tabela 1 – Portadoras definidas no ns-3

<i>Portadora ns-3</i>	QCI correspondente
GBR_CONV_VOICE	1
GBR_CONV_VIDEO	2
GBR_GAMING	3
GBR_NON_CONV_VIDEO	4
NGBR_IMS	5
NGBR_VIDEO_TCP_OPERATOR	6
NGBR_VOICE_VIDEO_GAMING	7
NGBR_VIDEO_TCP_PREMIUM	8
NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT	9
DEFAULT	10

Fonte: Elaborado pelo autor

Cada um dos UE's do primeiro cenário recebeu uma portadora, sendo que, durante a atribuição, foi feita uma operação de módulo (%) com o identificador do UE (UE_{ID}) pelo número total de UE's (UE_T), para definir de forma igualitária a distribuição, conforme mostra a Equação 5.8. Como a *bearer* DEFAULT não tem QCI definido, foi atribuído o QCI 10 para possibilitar a operação de módulo.

$$Portadora\ atribuída = UE_{ID} \% UE_T \quad (5.8)$$

Para tornar as simulações mais aleatórias, o modelo de mobilidade escolhido para os nós foi o *SteadyStateRandomWaypointMobilityModel*. Nele, o comportamento dos UE's é desconhecido. A variação de velocidade é definida por intervalo de faixa de velocidade.

Durante sua movimentação, o UE pode ou não realizar paradas com tempo definido.

O parâmetro *PathLossModel* indica o modelo de perda de potência na propagação das ondas de rádio usadas na simulação. O modelo escolhido foi o *Cost231PropagationLossModel*. O parâmetro *ChecksumEnabled* foi setado como verdadeiro, pois é necessário quando se utiliza o módulo OFSwitch13 e ele é responsável pelos cálculos de *checksum* durante a transmissão de pacotes.

O escalonador de recursos é responsável por definir como os recursos são distribuídos entre os diferentes usuários e nas redes LTE está presente como um elemento dos eNodeB's. Para este cenário, foi escolhido o escalonador padrão do ns-3, o *RrFfMacScheduler*, que basicamente é uma adaptação do algoritmo *Round-Robin*, onde as atribuições de recursos são igualitárias e não tende a favorecer os resultados do mecanismo.

Em relação aos eNodeB's foi utilizada a potência de transmissão padrão do ns-3, equivalente a 46 dB. Em relação ao raio de alcance, não existe uma padronização na literatura, porém, os valores se aproximam a 1 km, e esse foi o valor escolhido.

A aplicação instalada nos UE's é caracterizada pelo envio de pacotes UDP, da maneira mais rápida possível, com o intuito de utilizar de forma eficiente a largura de banda. O Quadro 8 apresenta, de forma resumida, os principais parâmetros de simulação do primeiro cenário.

Quadro 8 – Parâmetros de simulação do primeiro cenário

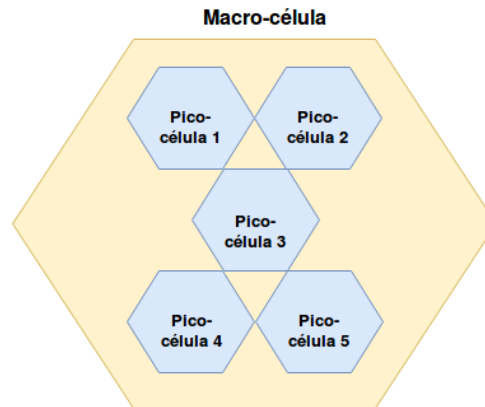
<i>Parâmetro</i>	Valor
Aplicação <i>Downlink</i>	<i>BulkSendApplication</i>
<i>ChecksumEnabled</i>	Verdadeiro
Escalonador	<i>RrFfMacScheduler</i>
Modelo de Mobilidade	<i>SteadyStateRandomWaypointMobilityModel</i>
Nº de eNodeB's	7
Nº de UE's	50
<i>PathLossModel</i>	<i>Cost231PropagationLossModel</i>
Potência de Transmissão do eNodeB	46 dB
Raio de alcance da célula	1 km
Tempo de Simulação	100 s
Velocidade do UE	0 – 80 km/h

Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo cenário foi construído baseado no trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), com o intuito de verificar o percentual de *handovers* falhos e desnecessários. No trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), foi criado um cenário com um alto índice de UE's por eNodeB. Para isso foi utilizado o conceito de *macrocell*, que representam eNodeB's de longo alcance e alta potência capazes de formar células com coberturas maiores, e *picocell*,

que representam eNodeB's de pouco alcance que formam células com cobertura menores. Foram construídas cinco *picocell's*, ou seja, eNodeB's de pequeno alcance, e uma *macrocell*, com eNodeB de longo alcance, conforme mostra a Figura 20. Além disso, foram utilizados 100 UE's, inicialmente, todos concentrados no eNodeB 1.

Figura 20 – Disposição das células no Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo de mobilidade escolhido para os nós foi o *GaussMarkovMobilityModel*, que é uma implementação do modelo de Gauss-Markov, descrito em Camp, Boleng e Davies (2002), onde os nós começam com uma velocidade e direção específica, e a cada intervalo de tempo definido, esses parâmetros são calculados com base nos anteriores e com base em uma variável Gaussiana randômica. O Quadro 9 apresenta, de forma resumida, os principais parâmetros de simulação do segundo cenário.

Quadro 9 – Parâmetros de simulação do segundo cenário

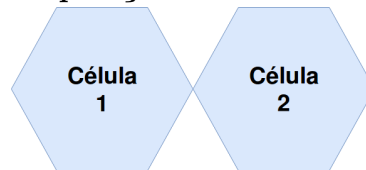
<i>Parâmetro</i>	Valor
Aplicação <i>Downlink</i>	<i>BulkSendApplication</i>
<i>ChecksumEnabled</i>	Verdadeiro
Escalonador	<i>RrFfMacScheduler</i>
Modelo de Mobilidade	<i>GaussMarkovMobilityModel</i>
Nº de eNodeB's	6
Nº de UE's	100
<i>PathLossModel</i>	<i>Cost231PropagationLossModel</i>
Potência de Transmissão do eNodeB	30 dB
Raio de alcance da picocell	1 km
Raio de alcance da picocell	150 m
Tempo de Simulação	100 s
Velocidade do UE	0 – 100 km/h

Fonte: Elaborado pelo autor

O terceiro cenário foi construído baseado no trabalho de Khan e Portmann (2016), com o intuito de analisar os efeitos da utilização de SDN, comparando a vazão obtida

com outros algoritmos de *handover* da literatura. O simulador do trabalho de Khan e Portmann (2016) é o ns-3 e, dessa forma, todas as parametrizações foram replicadas. Foi criado um cenário com diversificação entre UE's estáticos e UE's em movimento. Com isso, foram simulados 2 eNodeB's e 9 UE's, sendo inicialmente 8 concentrados na primeira célula e apenas um na segunda célula, conforme mostra a Figura 21. Um dos UE's da primeira célula parte em direção a segunda célula com velocidade constante, enquanto todos os outros UE's da simulação, são estáticos.

Figura 21 – Disposição das células no Cenário 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Especialmente neste cenário, cada simulação teve duração de 55 segundos, tempo informado no trabalho de Khan e Portmann (2016). Para simular a transição do UE da primeira célula para a segunda célula, o modelo de mobilidade escolhido para os nós foi o *ConstantVelocityMobilityModel*. Nele, a velocidade é fixa (neste caso 20 m/s) e pode-se definir a direção para a qual o UE deve-se mover (direção horizontal, utilizando apenas o eixo X). O parâmetro *PathLossModel* utilizado foi o *FriisPropagationLossModel*. O parâmetro *ChecksumEnabled* recebeu valor verdadeiro e o tipo de aplicação *BulkSendApplication* foi mantida. Em relação aos eNodeB's, o raio de alcance de cada um é de 1,2 km, a potência de transmissão é de 40 dB e o escalonador utilizado foi o *RrFfMacScheduler*. O Quadro 10 apresenta, de forma resumida, os principais parâmetros de simulação do primeiro cenário.

Quadro 10 – Parâmetros de simulação do terceiro cenário

<i>Parâmetro</i>	Valor
Aplicação <i>Downlink</i>	<i>BulkSendApplication</i>
<i>ChecksumEnabled</i>	Verdadeiro
Escalonador	<i>RrFfMacScheduler</i>
Modelo de Mobilidade	<i>ConstantVelocityMobilityModel</i>
Nº de eNodeB's	2
Nº de UE's	9
<i>PathLossModel</i>	<i>FriisPropagationLossModel</i>
Potência de Transmissão do eNodeB	40 dB
Raio de alcance da célula	1,2 km
Tempo de Simulação	55 s
Velocidade do UE	70 km/h

Fonte: Elaborado pelo autor

6 RESULTADOS

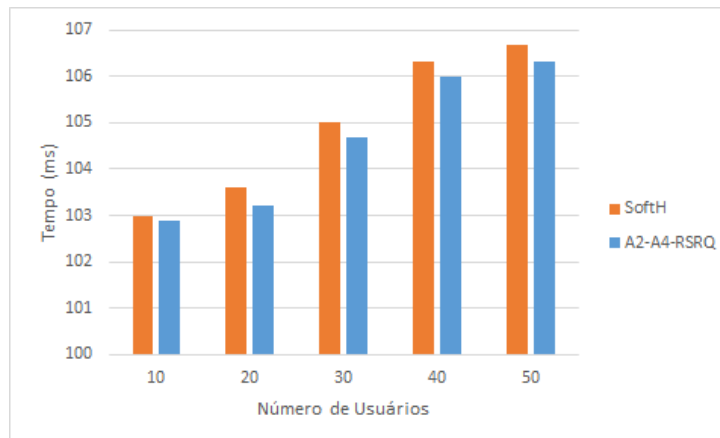
Este capítulo apresenta, de forma geral, os resultados obtidos durante as simulações, com análises quantitativas. Todos os resultados foram construídos a partir dos passos descritos no capítulo anterior, referente a metodologia deste trabalho. O principal objetivo do SoftH é garantir um índice baixo de *handovers* falhos e desnecessários, vazão capaz de prover qualidade às aplicações, um índice baixo de PLR e a distribuição equilibrada de UE's por eNodeB. Os resultados de simulação possibilitaram a análise de eficiência do SoftH, através dessas métricas.

6.1 Tempo médio de execução dos *handovers*

Para realizar a validação de eficiência do mecanismo SoftH, é necessário que seja verificado se todas as alterações feitas, tanto em arquitetura quanto em algoritmo, trouxeram efeitos negativos no tempo de execução do *handover*, visto que o processo de decisão é crítico e pode influenciar diretamente no tempo total. O tempo de execução da transição de um UE para outra célula é caracterizado pela diferença entre o tempo da conclusão da conexão do UE ao eNodeB de destino e o tempo de início da verificação de possibilidade da execução do *handover*. Dessa forma, as medições de tempo de *handover* buscam avaliar se o tempo de execução *handover* é considerado baixo o suficiente para que quaisquer tipos de aplicações não sejam prejudicadas e que os usuários não tenham a ciência de que houve uma mudança de rede, fazendo com que o *handover* seja caracterizado como suave.

O Gráfico 1 apresenta a comparação entre o tempo médio de *handover* e o número de usuários presentes no cenário. Nele, o número de UE's é variado, iniciando com 10 e terminando com 50. As simulações foram executadas utilizando os parâmetros do Cenário 1. Foram simulados o algoritmo A2-A4-RSRQ e o mecanismo SoftH. Dessa forma, foi possível avaliar o impacto da introdução do conceito de SDN e as melhorias realizadas no algoritmo de *handover* utilizado como referência.

Analisando os resultados obtidos no Gráfico 1, os tempos médios de *handover* do SoftH são similares aos do algoritmo A2-A4-RSRQ. O impacto da introdução de um controlador na arquitetura LTE e também a realização de adaptações no algoritmo A2-A4-RSRQ foi pequeno. De forma quantitativa, a diferença de tempos dos dois algoritmos comparados não foi maior que 1 ms em nenhum dos cenários com variação no número de usuários. Os resultados do A2-A4-RSRQ foram ligeiramente melhores pois o mesmo não atribui a decisão de *handover* para outro elemento da rede e este comportamento era esperado durante as simulações. Essa pequena elevação no tempo é considerada positiva, pois indica que o impacto do controlador não foi grande.

Gráfico 1 – Tempo médio de *handover*

Fonte: Dados da pesquisa

6.2 Handovers falhos

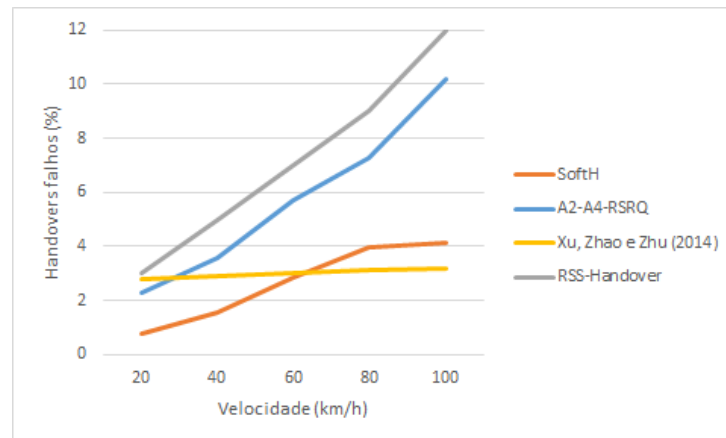
Quando um algoritmo ou mecanismo toma decisões corretas durante o processo de transição de células, deve garantir que o *handover* será suave. Um *handover* é caracterizado como falho quando ocorre de forma prematura, tardia ou quando uma célula não adequada é escolhida e isso acarreta em um índice de RSRQ ruim, tanto na célula de origem, quanto na célula de destino, fornecendo uma conexão de má qualidade. Dessa forma, é ideal que as decisões sejam assertivas para que o percentual de *handovers* falhos seja baixo.

O Gráfico 2 apresenta a relação entre a velocidade, que varia de 0 a 100 km/h, e o percentual de *handovers* falhos. A variação da velocidade, nesse caso, foi utilizada também para validar a classificação de regras realizada pelo controlador do mecanismo SoftH, que influencia diretamente na decisão de *handover* que, por consequência, também influencia no percentual de *handovers* falhos. A parametrização utilizada para as simulações foi a descrita no Cenário 2 do Capítulo 5. Para gerar os resultados do mecanismo SoftH, a contagem de *handovers* falhos é feita por células de destino com índice de RSRQ menor que 22. Como visto anteriormente, o índice 22 de RSRQ é o limiar mínimo que representa uma boa conexão entre o UE e o eNodeB.

No Gráfico 2, foi feita a comparação entre três mecanismos de *handover*. Um algoritmo de *handover* simples e tradicional que tem sua decisão baseada em limiares fixos de *Received Signal Strength* (RSS), o mecanismo proposto por Xu, Zhao e Zhu (2014), que foi descrito no Capítulo 3, o algoritmo A2-A4-RSRQ, também descrito no Capítulo 3, e o mecanismo SoftH.

Os resultados esperados para o Gráfico 2 são que, com o aumento da velocidade, o percentual de *handovers* falhos tende a aumentar. Isto se deve ao fato de quanto

Gráfico 2 – Percentual de handovers falhos



Fonte: Dados da pesquisa

maior a velocidade do UE, melhor deve ser a capacidade de decisão do mecanismo de *handover*. Sendo mais assertiva, em um menor período de tempo, a decisão deve propiciar o *handover* para uma célula antes que o índice de qualidade da conexão caia bruscamente. Considerando cenários de alta velocidade, a tendência é acontecer uma transição falha entre as células de origem e destino, caso não exista um controle dinâmico do mecanismo.

Analisando o comportamento do algoritmo baseado em índices de RSS, é constatado que o percentual de *handovers* falhos aumenta proporcionalmente ao aumento de velocidade, chegando a um percentual de 12% com velocidade de 100 km/h. Este resultado é explicado de maneira simples, pois os limiares de RSS são definidos no início da simulação e são estáticos. Em cenários com baixas velocidades, fixando um limiar que mantenha um nível bom de conexão, o percentual de falhas no *handover* tende a ser baixo, pois não existe grande variação da qualidade do sinal. Em cenários com maiores velocidades, o limiar fixo já não se mostra tão eficiente, pois podem ocorrer quedas ou aumentos no sinal repentinos, devido ao tempo de permanência do UE nas células e a variação da distância do eNodeB e do UE em um curto espaço de tempo.

O mecanismo proposto em Xu, Zhao e Zhu (2014) mostra uma constância do percentual baixo de *handovers* falhos para cenários com diferentes velocidades, alcançando um percentual médio próximo de 3%. Dentre diversas propostas do trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), a predição da próxima posição dos UE's utilizando o modelo de decisão de *Markov*, o cálculo de RSRQ prévio ao *handover* e também a classificação por velocidade, faz com que o percentual de *handovers* desnecessários seja bem baixo, pois evita ao máximo, transições que não sejam benéficas ao UE.

O comportamento do mecanismo SoftH é similar ao de Xu, Zhao e Zhu (2014), constatando-se que o percentual de *handovers* falhos se mantém baixo, mesmo com altas velocidades, alcançando um percentual máximo de aproximadamente 4% com velocidade

de 100 km/h e um percentual mínimo perto de 0% para UE's com velocidade de 20 km/h. Os resultados obtidos estão diretamente relacionados à eficiência do classificador de regras do controlador. Neste cenário, não existem portadoras dedicadas. Todos os UE's tem portadoras padrões. Em cenários com velocidades mais baixas, as regras para manter o UE o máximo possível em um eNodeB colaboram para evitar os *handovers* falhos, visto que a portadora padrão faz com que os UE's permaneçam nas células até que seu índice não represente mais uma boa conexão. Já em cenários de alta velocidade, a troca de células é feita antes que o índice de RSRQ caia de forma repentina, visto que a regra para portadora padrão possui uma margem em relação ao índice mínimo de boa conexão, fazendo com que o UE execute o *handover* antes da degradação da conexão. O mecanismo SoftH se mostrou muito melhor que o algoritmo baseado em RSS em todos os cenários e também se mostrou melhor em cenários até 60 km/h comparando com o trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014) e 1% pior em cenários com velocidades maiores que 60 km/h.

Com a utilização de faixas de RSRQ estáticas, os resultados em cenários de alta velocidade utilizando o mecanismo SoftH não foram equivalentes ou superiores ao mecanismo proposto em Xu, Zhao e Zhu (2014). Alguns conceitos importantes poderiam ter sido utilizados neste caso, para conseguir um desempenho melhor. A utilização de redes neurais, por exemplo, seria uma opção para definir as regras de forma dinâmica de acordo com as condições da rede. Outra forma mais simples, seria dividir as regras de RSRQ em intervalos de velocidade menores, tendo uma precisão maior na decisão do *handover*.

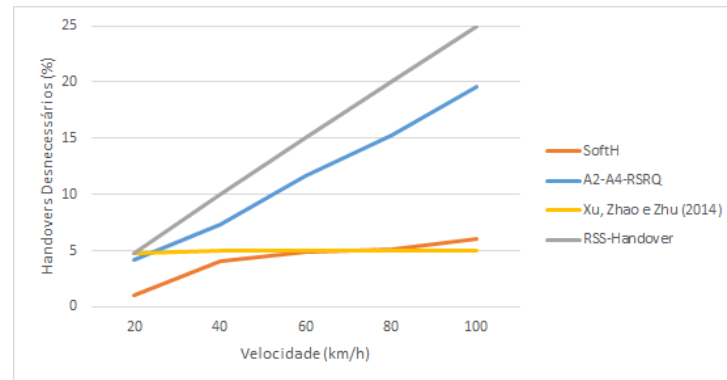
6.3 Handovers desnecessários

Além do percentual de *handovers* falhos, existe outra métrica importante capaz de influenciar o desempenho geral das redes de celulares. Quando um algoritmo ou mecanismo toma as decisões de *handover*, supõe-se que aquela foi a melhor escolha no contexto. Porém, em alguns casos, isso nem sempre é verdadeiro. Um *handover* é caracterizado como desnecessário quando, em um curto espaço de tempo, o UE executa a transição para determinada célula de destino e executa novamente outra transição, retornando à célula de origem. Um *handover* desnecessário pode ser classificado como um *handover* falho, pois a transição não atendeu aos requisitos do UE e foi necessária uma nova transição. Porém, ele é mais específico, pois é caracterizado quando essa situação ocorre em um curto espaço de tempo e o UE deve retornar à célula anterior. Mais uma vez, como nos *handovers* falhos, é ideal que as decisões sejam assertivas para que o percentual dessa métrica também seja baixo.

O Gráfico 3 apresenta a comparação entre a velocidade dos UE's, que varia entre 0

a 100 km/h, e o percentual de *handovers* desnecessários. A parametrização utilizada foi a descrita no Cenário 2 dentro do Capítulo de Metodologia. Nos resultados do mecanismo SoftH, o tempo utilizado para caracterizar um *handover* desnecessário, ou seja, o intervalo entre dois *handovers* executados por um mesmo UE, é de 2 segundos.

Gráfico 3 – Percentual de handovers desnecessários



Fonte: Dados da pesquisa

Como mostrado no Gráfico 3, os mesmos mecanismos de decisão de *handover* da seção anterior foram comparados. Os resultados esperados para este gráfico são que, com o aumento da velocidade, o percentual de *handovers* desnecessários tende a aumentar, semelhante ao comportamento do Gráfico 2. Isto se deve ao fato de quanto maior a velocidade, maior é a probabilidade de se executar uma transição para uma célula que não atenda aos requisitos do UE, obrigando o retorno do UE para a célula de origem.

Inicialmente, analisando o comportamento do algoritmo baseado em índices de RSS, é constatado que o percentual de *handovers* desnecessários aumenta de forma gradual conforme o aumento de velocidade, chegando a um percentual de 25% com velocidade de 100 km/h. Os resultados ruins apresentados pelo algoritmo baseado em índices de RSS se devem ao seu comportamento estático, através do qual os limiares de RSS são definidos no início da simulação e não é possível ter ciência do contexto de cada decisão. Em cenários com baixas velocidades, fixando um limiar que mantenha um nível bom de conexão, o percentual de *handovers* desnecessários tende a ser baixo, pois os níveis de RSS pioram de forma mais lenta, e não exigem que o UE saia da célula atual em um curto espaço de tempo. Em cenários com maiores velocidades, o limiar fixo já não se mostra tão eficiente, pois podem ocorrer quedas ou aumentos de RSS repentinos, forçando o UE a conectar-se em outra célula.

O comportamento do mecanismo proposto em Xu, Zhao e Zhu (2014) mostra uma constância do percentual baixo de *handovers* desnecessários para cenários com diferentes velocidades, alcançando um percentual médio próximo de 5%. De forma semelhante ao cenário de *handovers* falhos, as várias propostas do mecanismo do trabalho de Xu, Zhao

e Zhu (2014) também ajudaram a obter um percentual baixo de *handovers* desnecessários e novamente sendo bem melhor que o algoritmo baseado em índices de RSS.

O comportamento do mecanismo SoftH é similar ao de Xu, Zhao e Zhu (2014), constatando-se que o percentual de *handovers* desnecessários se mantém baixo, mesmo com altas velocidades, alcançando um percentual máximo de aproximadamente 6% com velocidade de 100 km/h e um percentual próximo de 0% para faixa de velocidade de 20 km/h dos UE's. Novamente, os resultados obtidos são influenciados pelo classificador de regras do controlador. Como são as mesmas regras utilizadas na análise dos *handover* falhos, a explicação para os resultados obtidos é semelhante. Em cenários com velocidades mais baixas, as regras para manter o UE o máximo possível em um eNodeB colaboram para evitar os *handovers* desnecessários. A transição é feita antes que ocorra degradação daquela conexão e uma célula com um índice de RSRQ superior à atual é selecionada, evitando o retorno do UE em pouco tempo. Já em cenários de alta velocidade, como existe a tendência de mudança brusca no índice de RSRQ, a regra para a portadora padrão faz com que o UE execute o *handover* para uma célula melhor. Como a qualidade da célula anterior já está degradada, a chance do UE retornar a ela em um curto espaço de tempo é baixa. O mecanismo SoftH se mostrou muito melhor que o algoritmo baseado em RSS em todos os cenários e também se mostrou melhor ou equivalente em cenários até 80 km/h comparando com o trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014) e 1% pior em cenários com velocidade maior que 80 km/h. É importante ressaltar, que o SoftH não é uma tentativa de melhorar o mecanismo proposto em Xu, Zhao e Zhu (2014). A proposta é um novo mecanismo para tentar alcançar um bom índice de assertividade nas decisões e isso implica na redução do percentual de *handovers* falhos e desnecessários.

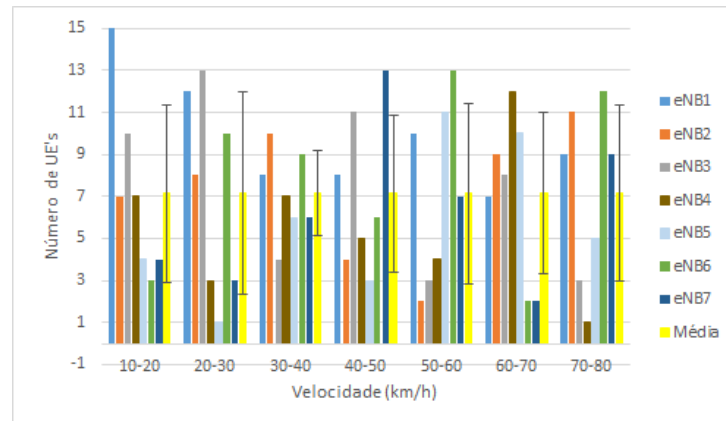
6.4 Distribuição de UE's por eNodeB

Além da decisão durante o processo de *handover*, é importante que, durante a conexão entre um UE e um eNodeB, a conexão seja de boa qualidade. Caso o mecanismo verifique apenas o índice de RSRQ e a velocidade, é provável que um determinado eNodeB receberá mais conexões que é capaz de suportar, piorando a qualidade durante a transmissão. Uma das possibilidades é utilizar técnicas para evitar o congestionamento dos eNodeB's. Como visto anteriormente, o algoritmo A2-A4-RSRQ é capaz de identificar uma célula potencial por vez. Com a adaptação do algoritmo, são identificadas duas células potenciais (com índice de RSRQ mínimo de 22) e são verificados quantos UE's estão conectados a cada uma delas. A partir dessa verificação, o eNodeB que possuir menos UE's conectados a ele é escolhido.

Para realizar a avaliação da técnica de congestionamento utilizada, foi verificada a quantidade de UE's conectados aos eNodeB's. Para efeito de comparação foi utilizado

o algoritmo A2-A4-RSRQ para verificar o impacto da não utilização da técnica de congestionamento. Os Gráficos 4 e 5 apresentam cada um dos eNodeB's e o número final de UE's conectados a ele para o algoritmo A2-A4-RSRQ e o mecanismo SoftH, respectivamente, variando a velocidade dos UE's entre 10 e 100 km/h. A parametrização utilizada foi descrita no Cenário 1 do Capítulo 5.

Gráfico 4 – Distribuição de UE's por eNodeB com o algoritmo A2-A4-RSRQ



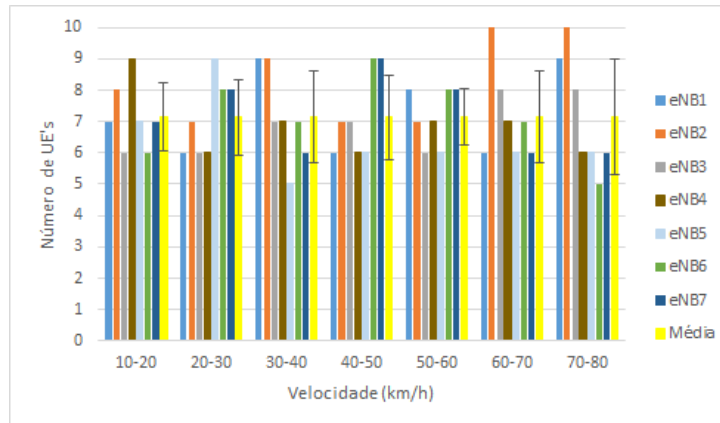
Fonte: Dados da pesquisa

Analisando o Gráfico 4, que mostra os resultados da distribuição de UE's por eNodeB para o algoritmo A2-A4-RSRQ, percebe-se que a distribuição é desigual para cada eNodeB, independentemente da faixa de velocidade. O algoritmo A2-A4-RSRQ não utiliza uma técnica para evitar o congestionamento e, além disso, possui apenas uma escolha de célula potencial, causando esse desequilíbrio durante a distribuição dos UE's por eNodeB.

O Gráfico 5 mostra os resultados da distribuição de UE's por eNodeB para o mecanismo SoftH. Diferentemente do Gráfico 4, percebe-se que a distribuição é equilibrada para cada eNodeB, independentemente da faixa de velocidade. O mecanismo SoftH conta com uma técnica para evitar o congestionamento, que já foi descrita na metodologia, e, além disso, o seu algoritmo de *handover* é capaz de identificar duas células potenciais para transição, colaborando também para o equilíbrio da distribuição de UE's por eNodeB.

Para ilustrar a diferença entre os dois gráficos foi necessário calcular a dispersão dos resultados obtidos, que nada mais é do que a indicação da regularidade de um conjunto de dados em função da média aritmética. Uma das formas de calcular esta dispersão é o desvio padrão, cujo resultado é calculado pela raiz quadrada da variância. Nos Gráficos 4 e 5 foi acrescentada uma coluna de média dos valores, que tem valor igual sempre, e o cálculo do desvio padrão de acordo com os valores de cada eNodeB para cada faixa de velocidade. No Gráfico 4, onde são apresentados os resultados relacionados ao A2-A4-RSRQ, temos valores de desvio padrão maiores que o Gráfico 4, mostrando que a distribuição não é tão eficiente. No Gráfico 5, onde são apresentados os resultados relacionados ao SoftH, temos

Gráfico 5 – Distribuição de UE's por eNodeB com o mecanismo SoftH



Fonte: Dados da pesquisa

valores de desvio padrão mais próximos de 0, o que indica uma regularidade das amostras em relação a média, mostrando que a distribuição foi mais equilibrada

6.5 Taxa de perda de pacotes

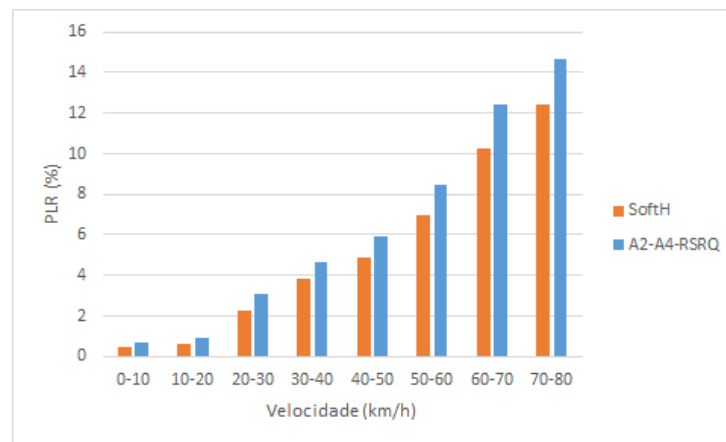
Ao simular a arquitetura de rede para o mecanismo SoftH, todos elementos da arquitetura LTE estão presentes. Além da arquitetura tradicional, foi acrescentado um controlador, capaz de gerenciar diversas funções da rede. Juntamente com a adição do controlador, a customização de um algoritmo de decisão de *handover* é um dos fatores que contribui para melhorar o desempenho das redes em geral. A combinação da utilização do controlador juntamente com o algoritmo A2-A4-RSRQ customizado trouxe a melhoria na assertividade das decisões e isso só foi possível com a ciência do controlador em relação aos diversos elementos e características da rede. Para realizar a validação da inclusão do controlador à arquitetura, é necessário que seja verificado se houve benefícios com as alterações feitas. Dessa forma, além de avaliar métricas diretamente relacionadas aos *handovers*, é importante também avaliar métricas relacionadas aos pacotes, pois a rede LTE é comutada por pacotes e, conseqüentemente, essas métricas são importantes para o desempenho da rede.

Durante as transmissões, uma conexão está sujeita à perda de pacotes e um dos fatores relacionados a esta perda é a mobilidade dos usuários. Conforme visto anteriormente, os *handovers* desnecessários e falhos são decisões que não foram feitas de maneira assertiva e fazem com que os UE's estejam conectados à células com índices de RSRQ ruins. O RSRQ é responsável por medir a qualidade do sinal da célula e quanto pior for o índice, pior é a qualidade da conexão. Conexões ruins são suscetíveis à perda de pacotes.

Dessa forma, a avaliação da taxa de perda de pacotes, conhecida como PLR, é de

suma importância para também realizar a validação de eficiência do mecanismo SoftH, ou seja, verificar se o mecanismo é capaz de prover um percentual baixo de perda de pacotes. O Gráfico 6 apresenta a comparação entre o percentual pacotes perdidos e as faixas de velocidade do cenário, sendo que a velocidade varia entre 0 a 80 km/h. As parametrizações utilizadas foram as descritas no Cenário 1 do Capítulo 5. Com o objetivo de comparar os resultados, foram feitas as simulações tanto com o algoritmo A2-A4-RSRQ, quanto com o mecanismo SoftH.

Gráfico 6 – Taxa de perda de pacotes



Fonte: Dados da pesquisa

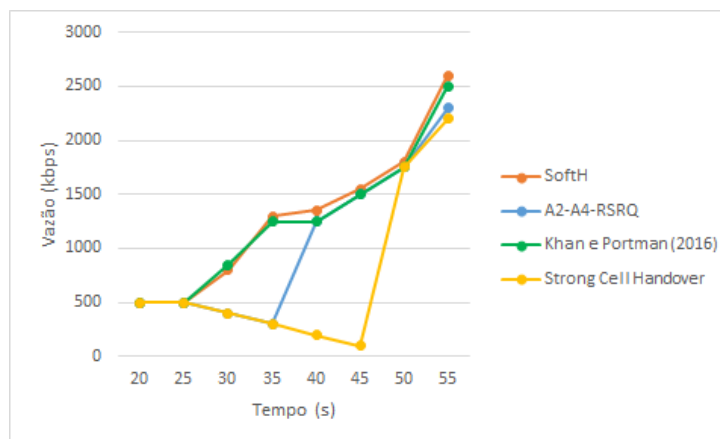
Através da análise do Gráfico 6, é constatado que o aumento da velocidade dos UE's também aumenta o percentual de pacotes perdidos. O mecanismo SoftH apresenta um percentual de PLR próximo de 0% para faixas de velocidade mais baixas e para faixas de altas velocidades, alcançando um percentual máximo de aproximadamente 12%. O algoritmo A2-A4-RSRQ apresenta a PLR também próxima de 0% para velocidades baixas e próximo de 14% para velocidades mais altas.

Quanto maior a velocidade, maior a dificuldade em realizar escolhas assertivas durante a transição de células. Quando o UE se conecta ou permanece em uma célula com o índice de RSRQ ruim, a PLR também tende a aumentar. Para velocidades mais baixas, de 0 a 20 km/h, o algoritmo A2-A4-RSRQ e o SoftH são equivalentes, trazendo taxas de pacotes perdidos similares e com valores baixos. Isso se dá pelo fato do algoritmo A2-A4-RSRQ ser capaz de realizar escolhas assertivas enquanto os UE's trafegam em baixas velocidades, quando um bom limiar é escolhido antes da simulação. À medida que a velocidade dos UE's aumenta, o SoftH sempre apresenta resultados melhores, perdendo menos pacotes.

6.6 Análise da utilização de SDN em relação a decisão de *handover*

O trabalho de Khan e Portmann (2016) apresentou uma proposta semelhante ao mecanismo SoftH em relação a arquitetura, utilizando o conceito de SDN, e realizou algumas comparações com algoritmos de decisão da literatura. O Gráfico 7 apresenta a relação entre o tempo, que varia entre 0 a 55 segundos, e a vazão, medida em kbps, de um único nó durante a transição entre duas células. A medição do tempo, neste caso, foi utilizada também para validar a assertividade da decisão em um determinado momento da simulação, e o impacto das decisões em relação à vazão. A parametrização utilizada para as simulações foi a descrita no Cenário 3 do Capítulo 5.

Gráfico 7 – Vazão média de um nó



Fonte: Dados da pesquisa

Como mostrado no Gráfico 7, foi feita a comparação entre dois mecanismos de *handover* e dois algoritmos de *handover*, sendo eles: um algoritmo de *handover* simples e tradicional que tem sua decisão baseada em limiares RSRP, o algoritmo A2-A4-RSRQ, o mecanismo proposto por Khan e Portmann (2016), que foi descrito no Capítulo de Trabalhos Relacionados, e o mecanismo SoftH.

Inicialmente, analisando o comportamento dos algoritmos baseado em índices de medição RSRP e A2-A4-RSRQ respectivamente, é constatado que a vazão do nó tem uma queda em determinado momento da simulação. No primeiro, a vazão chega a se aproximar de 0 kbps, para posteriormente retomar o aumento da vazão. O resultado ruim apresentado por ambos os algoritmos se dá pelo fato de seus comportamentos serem bastante semelhantes, variando apenas o índice de medição que utilizam para decisão de *handover*.

Por outro lado, o comportamento do SoftH e do mecanismo proposto em Khan e Portmann (2016) são bem semelhantes. Ambos apresentam um aumento gradual da

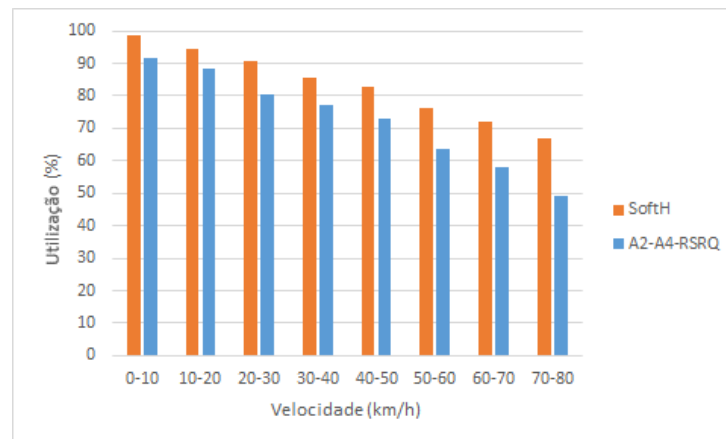
vazão durante a simulação, sem apresentar quedas durante a transição entre as duas células do cenário. A ciência do contexto da rede para tomada de decisões é benéfica nos dois mecanismos, que utilizam o conceito SDN para montar as arquiteturas e possuem um controlador responsável por diversas funções da rede.

6.7 Utilização da largura de banda

Na seção anterior, a vazão foi analisada em relação a um UE apenas e tinha como objetivo analisar a utilização do conceito de SDN para tomada de decisão. Não sendo menos importante, é necessário também analisar a utilização da rede através da largura de banda. Para avaliar o mecanismo SoftH de maneira geral, é importante atribuir várias portadoras aos UE's, de forma com que o classificador de regras consiga aplicar todas as regras atribuídas definidas por ele. Dessa forma, foram utilizadas as parametrizações do Cenário 1, descrito no Capítulo 5, onde cada UE recebe uma portadora, sendo ela padrão ou específica.

O Gráfico 8 apresenta a comparação entre faixas de velocidade, variando entre 0 a 80 km/h, e o percentual de utilização da rede, que representa o quanto da largura de banda total, o UE atingiu. Para analisar os resultados de utilização, as mesmas simulações feitas com o mecanismo SoftH, foram feitas também com o A2-A4-RSRQ.

Gráfico 8 – Percentual de utilização da largura de banda



Fonte: Dados da pesquisa

Através da análise do Gráfico 8 é constatado que o aumento da velocidade dos UE's diminui o percentual de utilização. O mecanismo SoftH apresenta um percentual de utilização próximo de 100% para faixas de velocidade mais baixas e para faixas de altas velocidades, alcançando um percentual de aproximadamente 70%. O algoritmo A2-A4-RSRQ apresenta o percentual de utilização também próximo de 100% para velocidades baixas e para faixas de velocidades mais altas, o algoritmo atinge um percentual próximo de 50%. Estes resultados, de certa forma, eram esperados, pois como

visto na análise de PLR, as taxas de pacotes perdidos do mecanismo SoftH sempre eram menores que a do algoritmo A2-A4-RSRQ e isto tem impacto na utilização da banda.

Analisando os resultados obtidos, percebe-se novamente, a influência da velocidade, assim como aconteceu na avaliação de PLR. Além disso, foi avaliada também a decisão de *handover* em relação às portadoras de cada UE. No algoritmo A2-A4-RSRQ, exceto pelo parâmetro de índice de RSRQ, não existem outros fatores que são analisados durante a decisão. Já o mecanismo SoftH é capaz de realizar as decisões analisando tanto a velocidade, quanto as portadoras atribuídas a cada UE. O reflexo do classificador de regras pode ser visto nos resultados obtidos. Os UE's com portadoras GBR sempre realizam o *handover* em caso de descoberta de células com índice RSRQ maior. Já os UE's com portadoras non-GBR e padrão, se mantêm o máximo de tempo possível nas células, enquanto usufruírem de uma boa conexão. Estas regras, juntamente com a classificação de acordo com a velocidade, fazem com que decisões de *handover* sejam mais assertivas e também reflitam na utilização.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo apresentar o SoftH, um mecanismo que utiliza o conceito de SDN em decisões de *handover* em redes de celular. O mecanismo de decisão permite que uma gama de informações seja processada de maneira mais eficiente, já que o SoftH tem uma visão unificada da rede através do controlador SDN. O controlador tem informações diretas do eNodeB e também do MME. O eNodeB envia ao controlador algumas informações como a quantidade UE's conectados àquele eNodeB e também a velocidade média de cada um dos UE's. O MME permite que o controlador seja capaz de processar informações de *bearers* dos UE's da rede e também permite ao controlador enviar a decisão de *handover* diretamente para o MME. O algoritmo de decisão de *handover* analisa fatores externos aos pacotes, como RSRQ da célula, velocidade dos UE's e quantidade de nós conectados a um eNodeB.

Além da integração do controlador à arquitetura LTE, foi desenvolvido um algoritmo de *handover*, responsável por orquestrar as decisões. Ele foi baseado no algoritmo A2-A4-RSRQ. Não foi estabelecido um limiar para executar o *handover* e sempre que o índice de RSRQ da célula atual for menor do que o das células vizinhas, o processo de decisão se inicia. O primeiro diferencial do algoritmo é a identificação de duas células potenciais para *handover*, diferentemente do algoritmo A2-A4-RSRQ que é capaz de identificar apenas uma. Após a identificação das duas células, é verificada aquela com menor congestionamento, ou seja, aquela com menor número de conexões ativas. Posteriormente, a decisão é classificada de acordo com um conjunto de regras. Inicialmente, é analisada a velocidade média do UE, depois a *bearer* atribuída e por fim, o índice de RSRQ da célula atual é comparado com o da célula potencial e os índices definidos nas regras. Durante a classificação é utilizado o QCI, que é responsável por medir a qualidade de serviço de uma rede, possibilitando definir índices de RSRQ de acordo com o tipo de fluxo trafegado.

Foram feitas simulações utilizando o simulador ns-3 em conjunto com o módulo OFSwitch13 para validação do mecanismo. Foram verificadas métricas relacionadas a *handover* e também métricas relacionadas à comutação de pacotes, além de comparar com outros trabalhos relacionados da literatura. Foram avaliados três cenários distintos. O primeiro cenário foi utilizado para avaliar o número de conexões por eNodeB, a PLR e a vazão. O segundo cenário foi o mesmo utilizado em Xu, Zhao e Zhu (2014) e foram avaliados os índices de *handovers* falhos e desnecessários. O terceiro cenário foi o mesmo utilizado em Khan e Portmann (2016) e teve como objetivo analisar os impactos da utilização de SDN em comparação com outros algoritmos de *handover*.

A análise dos resultados foi dividida em duas partes. A primeira para resultados

relacionados ao *handover* e a segunda para resultados relacionados aos pacotes trafegados na rede. Os resultados mostraram, primeiramente, que a nova arquitetura do SoftH não teve impacto sobre os tempos de *handover*. Em comparação com o algoritmo A2-A4-RSRQ utilizando a arquitetura LTE tradicional, os tempos médios de *handover* foram similares, não atingindo 1 ms de diferença. Analisando o percentual de *handovers* falhos, mesmo em cenários de alta velocidade, o percentual chegou ao máximo de 4% e em alguns cenários esteve próximo de 0%. Comparando com o trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), onde o percentual se manteve próximo de 3% em todos os cenários, o SoftH obteve sempre resultados superiores em cenários com UE's trafegando em velocidades até 60 km/h. Para cenários com velocidades superiores à 60 km/h, os resultados foram ligeiramente inferiores, com diferença de 1%. Novamente, comparando com o trabalho de Xu, Zhao e Zhu (2014), também foi analisado o percentual de *handovers* desnecessários. Mais uma vez, o SoftH conseguiu resultados equivalentes ou superiores, em cenários com UE's trafegando até 80 km/h. Em cenários com velocidades superiores a 80 km/h, o SoftH obteve resultados ligeiramente inferiores. O SoftH alcançou um percentual máximo de 6% de *handovers* desnecessários e mínimo de aproximadamente 0%.

Em relação aos resultados relacionados aos pacotes trafegados na rede foram analisadas as seguintes métricas: vazão, PLR e utilização da largura de banda. A vazão teve como objetivo analisar o impacto da utilização de SDN no mecanismo de decisão de *handover*. Em relação a outros mecanismos de *handover*, o SoftH e o mecanismo de Khan e Portmann (2016) apresentaram aumento de vazão contínuo e não tiveram quedas durante o período de transição, enquanto mecanismos que não utilizam SDN tiveram queda de vazão. A utilização da rede, em comparação com o algoritmo A2-A4-RSRQ, foi sempre maior para o SoftH. A taxa de perda de pacotes foi menor em todos cenários, quando comparado com o A2-A4-RSRQ.

Como trabalhos futuros, é sugerida a comparação do SoftH com outros mecanismos e também algoritmos da literatura para consolidar a eficiência do mecanismo. Com o objetivo de se adequar as redes da próxima geração, é sugerido realizar simulações e testes em cenários 5G para verificar a eficiência do SoftH nesse tipo de cenário. Além disso, é importante analisar outras métricas relacionadas a comutação de pacotes, como *jitter*, sinalização e *fairness*. Existem também propostas de melhorias para o mecanismo SoftH. Uma das sugestões é a implementação de um *Call Admission Control* (CAC) mais eficiente. Ele seria incorporado no processo de decisão, analisaria as condições da rede e possibilitaria uma acurácia maior de decisão, permitindo ou não novas conexões nas células de destino. Outra melhoria a ser implementada é a utilização de redes neurais para definir as regras de decisão. Com o treinamento de uma rede neural, o mecanismo é capaz de definir as melhores regras de decisão baseando-se no estado na rede, resolvendo o problema da utilização de regras estáticas.

REFERÊNCIAS

3GPP. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-utra); user equipment (ue) radio transmission and reception (release 10). TECHNICAL SPECIFICATION, v. 36, 2010.

AKKAMAHADEVI, M.; SHANKAR, A. R. A survey on different handover mechanisms in the lte network. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL ELECTRONICS & COMPUTER SCIENCE ENGINEERING, p. 39–42, 2016.

AL-SAMMAN, I.; DOUFEXI, A.; BEACH, M. A c-ran architecture for lte control signalling. In: 2016 IEEE 83RD VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.

ALHABO, M.; ZHANG, L.; NAWAZ, N. A trade-off between unnecessary handover and handover failure for heterogeneous networks. In: EUROPEAN WIRELESS 2017; 23TH EUROPEAN WIRELESS CONFERENCE. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

ALI, S.; ZEESHAN, M. A delay-scheduler coupled game theoretic resource allocation scheme for lte networks. In: FRONTIERS OF INFORMATION TECHNOLOGY (FIT), 2011. Washington, DC, USA: IEEE, 2011. p. 14–19.

BALDO, N. THE NS-3 LTE MODULE BY THE LENA PROJECT. 2011.

BANSAL, M. et al. Openradio: A programmable wireless dataplane. In: PROCEEDINGS OF THE FIRST WORKSHOP ON HOT TOPICS IN SOFTWARE DEFINED NETWORKS. New York, NY, USA: ACM, 2012. (HotSDN '12), p. 109–114. ISBN 978-1-4503-1477-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2342441.2342464>>.

BASTA, A. et al. A virtual sdn-enabled lte epc architecture: A case study for s-/p-gateways functions. In: 2013 IEEE SDN FOR FUTURE NETWORKS AND SERVICES (SDN4FNS). [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–7.

BHAUMIK, S. et al. ClouDIQ: A framework for processing base stations in a data center. In: PROCEEDINGS OF THE 18TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING. New York, NY, USA: ACM, 2012. (Mobicom '12), p. 125–136. ISBN 978-1-4503-1159-5. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2348543.2348561>>.

BRIEF, O. S. Openflow™-enabled mobile and wireless networks. OPEN NETWORKING FOUNDATION, 2013.

CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING, Wiley Online Library, v. 2, n. 5, p. 483–502, 2002.

CAPOZZI, F. et al. Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey. *COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 678–700, Second 2013. ISSN 1553-877X.

CASADO, M. et al. Ethane: Taking control of the enterprise. In: *PROCEEDINGS OF THE 2007 CONFERENCE ON APPLICATIONS, TECHNOLOGIES, ARCHITECTURES, AND PROTOCOLS FOR COMPUTER COMMUNICATIONS*. New York, NY, USA: ACM, 2007. (SIGCOMM '07), p. 1–12. ISBN 978-1-59593-713-1. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1282380.1282382>>.

CASADO, M. et al. Sane: A protection architecture for enterprise networks. In: *PROCEEDINGS OF THE 15TH CONFERENCE ON USENIX SECURITY SYMPOSIUM - VOLUME 15*. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2006. (USENIX-SS'06). Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1267336.1267346>>.

CHAVES, L. J. et al. Integrating openflow to lte: Some issues toward software-defined mobile networks. In: *2015 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW TECHNOLOGIES, MOBILITY AND SECURITY (NTMS)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2015. p. 1–5. ISSN 2157-4952.

CHAVES, L. J.; GARCIA, I. C.; MADEIRA, E. R. M. Ofswitch13: Enhancing ns-3 with openflow 1.3 support. In: *PROCEEDINGS OF THE WORKSHOP ON NS-3*. New York, NY, USA: ACM, 2016. (WNS3 '16), p. 33–40. ISBN 978-1-4503-4216-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2915371.2915381>>.

CHO, H. H. et al. Integration of sdr and sdn for 5g. *IEEE ACCESS*, v. 2, p. 1196–1204, 2014. ISSN 2169-3536.

DELGADO, P. A. Estudio del impacto del handover en redes lte. *REVISTA TELEMÁTICA*, v. 15, n. 1, p. 31–46, 2016. ISSN 1729-3804. Disponível em: <<http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele/article/view/213>>.

EKSTROM, H. Qos control in the 3gpp evolved packet system. *COMMUNICATIONS MAGAZINE*, IEEE, v. 47, n. 2, p. 76–83, February 2009. ISSN 0163-6804.

ETSI, T. 23 203 v8.9.0: Technical specification group services and system aspects: Policy and charging control architecture. *3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP TS 23.303 VERSION 8.9.0 RELEASE 8)*, (OCT. 2010), p. 1–116, 2010.

ETSI, T. 136 133 v11. 6.0: Lte: Evolved universal terrestrial radio access (e-utra). *REQUIREMENTS FOR SUPPORT OF RADIO RESOURCE MANAGEMENT (3GPP TS 36.133 VERSION 11.6. 0 RELEASE 11)*, (OCT. 2013), p. 58–59, 2013.

FERNANDEZ, M. P. Comparing openflow controller paradigms scalability: Reactive and proactive. In: *ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS (AINA)*, 2013 IEEE 27TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. Washington, DC, USA: IEEE, 2013. p. 1009–1016. ISSN 1550-445X.

GUEDES, D. et al. Redes definidas por software: uma abordagem sistêmica para o desenvolvimento de pesquisas em redes de computadores. *MINICURSOS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES-SBRC 2012*, v. 30, n. 4, p. 160–210, 2012.

HAKIRI, A.; BERTHOU, P. Leveraging sdn for the 5g networks: Trends, prospects and challenges. ARXIV PREPRINT ARXIV:1506.02876, 2015.

HAN, B. et al. Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations. IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE, v. 53, n. 2, p. 90–97, Feb 2015. ISSN 0163-6804.

HAN, J.; WU, B. Handover in the 3gpp long term evolution (lte) systems. In: 2010 GLOBAL MOBILE CONGRESS. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

HENDERSON, T. R. et al. Ns-3 project goals. In: PROCEEDING FROM THE 2006 WORKSHOP ON NS-2: THE IP NETWORK SIMULATOR. New York, NY, USA: ACM, 2006. (WNS2 '06). ISBN 1-59593-508-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1190455.1190468>>.

HUANG, F.; SHANG, T. The effect of hexagonal grid topology on the throughput benefit of network coding. In: 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN COMPUTING AND COMMUNICATIONS AND IEEE INTERNET OF THINGS AND IEEE CYBER, PHYSICAL AND SOCIAL COMPUTING. [S.l.: s.n.], 2013. p. 580–584.

JACOBS, S. ENGINEERING INFORMATION SECURITY: THE APPLICATION OF SYSTEMS ENGINEERING CONCEPTS TO ACHIEVE INFORMATION ASSURANCE. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

JANEVSKI, T. NGN ARCHITECTURES, PROTOCOLS AND SERVICES. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.

KAMOLTHAM, N.; NAKORN, K. N.; ROJVIBOONCHAI, K. From ns-2 to ns-3-implementation and evaluation. In: IEEE. COMPUTING, COMMUNICATIONS AND APPLICATIONS CONFERENCE (COMCOMAP), 2012. Washington, DC, USA: IEEE, 2012. p. 35–40.

KARAMAN, M. A. et al. Quality of service control and resource prioritization with software defined networking. In: NETWORK SOFTWAREZATION (NETSOFT), 2015 1ST IEEE CONFERENCE ON. Washington, DC, USA: IEEE, 2015. p. 1–6.

KHAN, F. H.; PORTMANN, M. A system-level architecture for software-defined lte networks. In: 2016 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND COMMUNICATION SYSTEMS (ICSPCS). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–10.

LANTZ, B.; HELLER, B.; MCKEOWN, N. A network in a laptop: Rapid prototyping for software-defined networks. In: PROCEEDINGS OF THE 9TH ACM SIGCOMM WORKSHOP ON HOT TOPICS IN NETWORKS. New York, NY, USA: ACM, 2010. (Hotnets-IX), p. 19:1–19:6. ISBN 978-1-4503-0409-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1868447.1868466>>.

LAURIDSEN, M. et al. From lte to 5g for connected mobility. IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE, v. 55, n. 3, p. 156–162, March 2017. ISSN 0163-6804.

LIU, G.; JIANG, D. 5g: Vision and requirements for mobile communication system towards year 2020. CHINESE JOURNAL OF ENGINEERING, Hindawi Publishing Corporation, v. 2016, 2016.

LIYANAGE, M.; GURTOV, A.; YLIANTTILA, M. SOFTWARE DEFINED MOBILE NETWORKS (SDMN): BEYOND LTE NETWORK ARCHITECTURE. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

LUKA, M. K.; ATAYERO, A. A.; OSHIN, O. I. Call admission control techniques for 3gpp lte: A survey. In: 2016 SAI COMPUTING CONFERENCE (SAI). [S.l.: s.n.], 2016. p. 691–700.

MAGALHAES, J. H.; GUARDIEIRO, P. A proposal of a two-stage scheduling mechanism for real-time traffic applications in lte networks. In: COMPUTER NETWORKS AND DISTRIBUTED SYSTEMS (SBRC), 2014 BRAZILIAN SYMPOSIUM ON. Washington, DC, USA: IEEE, 2014. p. 130–137.

MAHMOODI, T.; SEETHARAMAN, S. On using a sdn-based control plane in 5g mobile networks. In: WIRELESS WORLD RESEARCH FORUM, MEETING. [S.l.: s.n.], 2014. v. 32.

MOHYELDIN, E. MINIMUM TECHNICAL PERFORMANCE REQUIREMENTS FOR IMT-2020 RADIO INTERFACE(S). [S.l.], January 2016. 12 p.

NAMRATA, K.; SEEMA, S.; VIJAYALAKSHMI, M. Optimization of qos in 4g networks using handover management. INTERNATIONAL JOURNAL OF EMERGING TECHNOLOGY IN COMPUTER SCIENCE & ELECTRONICS (IJETCSE), v. 14, p. 398–402, apr 2015.

PFAFF, B. et al. Openflow switch specification, version 1.3. 0. OPEN NETWORKING FOUNDATION, 2012.

PROJECT ns . DESIGN DOCUMENTATION - LTE MODULE. nov. 2015. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#sec-handover-algorithm>>.

ROLIN, E. C. Análise da qualidade e do desempenho da cobertura celular long term evolution em curitiba, paraná. 2014.

SAMA, M. R. et al. Enabling network programmability in lte/epc architecture using openflow. In: 2014 12TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODELING AND OPTIMIZATION IN MOBILE, AD HOC, AND WIRELESS NETWORKS (WiOPT). [S.l.: s.n.], 2014. p. 389–396.

SESLIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. LTE, THE UMTS LONG TERM EVOLUTION: FROM THEORY TO PRACTICE. Hoboken, NJ, USA: Wiley Publishing, 2009. ISBN 0470697164, 9780470697160.

SUN, G. et al. Software defined wireless network architecture for the next generation mobile communication: Proposal and initial prototype. JOURNAL OF COMMUNICATIONS, v. 9, n. 12, p. 946–953, 2014.

TR-502, O. Sdn architecture. OPEN NETWORKING FOUNDATION, 2014.

VANNITHAMBY, R.; TALWAR, S. TOWARDS 5G: APPLICATIONS, REQUIREMENTS AND CANDIDATE TECHNOLOGIES. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

WANG, Y. H.; CHANG, J. L.; HUANG, G. R. A handover prediction mechanism based on lte-a ue history information. In: 2015 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORK-BASED INFORMATION SYSTEMS. [S.l.: s.n.], 2015. p. 167–172.

WANG, Y. H.; HUANG, G. R.; TUNG, Y. C. A handover prediction mechanism based on lte-a ue history information. In: 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER, INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS (CITS). [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.

WIKIPEDIA. C++. Aug 2017. Disponível em:
<<https://pt.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>>.

XU, J.; ZHAO, Y.; ZHU, X. Mobility model based handover algorithm in lte-advanced. In: 2014 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL COMPUTATION (ICNC). [S.l.: s.n.], 2014. p. 230–234. ISSN 2157-9555.

YANG, F. et al. A flexible three clouds 5g mobile network architecture based on nfv sdn. CHINA COMMUNICATIONS, v. 12, n. Supplement, p. 121–131, December 2015. ISSN 1673-5447.