

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

**Algoritmo de Sleep Mode para Redes LTE em Conectividade Dual**

**Ivanês Lian Costa Araújo**

DM 31/2015

UFPA/ITEC/PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
BELÉM - PARÁ - Brasil  
2015

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

**Ivanés Lian Costa Araújo**

**Algoritmo de Sleep Mode para Redes LTE em Conectividade Dual**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

UFPA/ITEC/PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
BELÉM - PARÁ - Brasil

2015

Dedico esta dissertação à minha família.

# **Agradecimentos**

Agradeço a todos que estiveram presentes, mesmo que em pensamento, nesta reta final e, especialmente, agradeço aqueles que puderam somar à realização deste trabalho.

Ivanês Lian Costa Araújo

*Não é na ciência que está a felicidade, mas na aquisição  
da ciência.*

*Edgar Allan Poe.*

# Resumo

Este trabalho realiza um minucioso estudo dos ganhos da conectividade dual em redes Long Term Evolution (LTE) e propõe um algoritmo de “*sleep mode*” que potencializa a eficiência da rede neste contexto. Dentre os algoritmos de “*sleep mode*” em conectividade dual da literatura, nenhum realiza abordagem envolvendo a capacidade do “*backhaul*” das “*small cells*” para a decisão da ativação das mesmas. A carência de um processo de “*sleep mode*” que possa abranger o “*backhaul*” pode resultar em gargalos na rede, maior latência e perda de pacotes. Dessa forma, o algoritmo proposto lança luz a um aspecto relevante na conjuntura de redes LTE, além de quantificar os benefícios advindos não apenas do uso do algoritmo, mas da conectividade dual em si. Para a análise destes benefícios, o estudo foi elaborado a partir de diversas simulações feitas no “*software*” Riverbed Modeler, embasadas em parâmetros do 3rd Generation Partnership Project (3GPP) e artigos atuais da área. Os resultados das simulações atestam que menores níveis de atraso podem ser alcançados com a conectividade dual, e ainda potencializados com o uso do algoritmo proposto, que contribui para o uso mais eficiente dos recursos da rede também do ponto de vista energético. Além destes ganhos, são analisados resultados em relação ao tráfego no “*backhaul*” tanto das “*small cells*” quanto do núcleo da rede. O conjunto destes resultados aponta diversas vantagens do uso de conectividade dual e do algoritmo proposto neste trabalho, em redes LTE .

# Abstract

This work presents the analysis of the benefits of dual connectivity in Long Term Evolution (LTE) networks, and proposes a sleep mode algorithm in order to increase even more the network efficiency. Among the sleep mode algorithms for dual connectivity in literature, none makes an approach regarding the small cells backhaul capacity for the activation decision of these small cells. The lack of an appropriate sleep mode process that takes backhaul issues into consideration can lead to network bottlenecks, greater latency and packet drops. For this reason, the algorithm highlights relevant aspects in LTE networks, and quantifies the benefits obtained not only by the use of the algorithm but also by the use of the dual connectivity itself. To accomplish this goal, several simulations were performed with the software Riverbed Modeler, based on 3rd Generation Partnership Project (3GPP) parameters and papers from this area. The simulation results show that lower delay levels can be achieved with the use of dual connectivity, and even lower results can be obtained with the use of the proposed algorithm, which also contributes to a more energy efficient usage of network resources. Furthermore, results regarding backhaul traffic in the core network and among small cells are also analyzed. The results, in general, show several advantages of dual connectivity and the proposed algorithm in LTE networks.

# Lista de Figuras

1.1	Adesão de usuários móveis por região (em bilhões). . . . .	1
2.1	Visão geral da arquitetura LTE. . . . .	6
2.2	Principais elementos da EPC. . . . .	7
2.3	Pilha de protocolos LTE na rede de acesso. . . . .	8
2.4	“Handover” em LTE. . . . .	9
2.5	Utilização de “small cells” residenciais, adaptada de [17]. . . . .	10
2.6	Topologias de “small cells” urbanas, adaptadas de [18]. . . . .	11
2.7	Implantação de small cells rurais. . . . .	12
2.8	Despesas operacionais em redes móveis, baseadas no mercado europeu. . . . .	14
2.9	Gastos energéticos de uma operadora. . . . .	15
3.1	Alternativas de arquitetura do plano de controle, adaptada de [26]. . . . .	18
3.2	Opções de arquitetura para o plano de usuário, adaptadas de [26]. . . . .	19
3.3	Alternativa 1A, extraída de [26]. . . . .	20
3.4	Alternativa 2A, extraída de [26]. . . . .	21
3.5	Alternativa 2C, extraída de [26]. . . . .	21
3.6	Alternativa 2D, extraída de [26]. . . . .	22
3.7	Alternativa 3A, extraída de [26]. . . . .	23
3.8	Alternativa 3C, extraída de [26]. . . . .	23
3.9	Alternativa 3D, extraída de [26]. . . . .	24
3.10	“Backhaul” com roteador entre MeNB e SeNB. . . . .	25
3.11	“Backhaul” considerando MeNB como roteador para a SeNB. . . . .	26
3.12	Fluxograma proposto para ativação das SeNBs. . . . .	28
3.13	Fluxograma proposto para desativação das SeNBs. . . . .	29
4.1	Características de LTE no simulador. . . . .	31
4.2	Módulos e ferramentas de programação no simulador. . . . .	32
4.3	Visão geral dos cenários. . . . .	33
4.4	Média do tráfego no núcleo da rede. . . . .	36
4.5	Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário A. . . . .	37
4.6	Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário B. . . . .	38
4.7	Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário C. . . . .	39
4.8	Média do atraso fim-a-fim dos usuários na rede. . . . .	40
4.9	Energia por bit para cada cenário e condição de carga. . . . .	40

# Lista de Tabelas

2.1	Condições de “ <i>handover</i> ” . . . . .	8
4.1	Principais diferenças entre os cenários. . . . .	33
4.2	Número de usuários distribuídos por taxa média de transmissão e velocidade. . . . .	34

# Lista de Siglas

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ARQ	Automatic Repeat Request
C2POWER	Cognitive Radio and Cooperative Strategies for Power Saving
EARTH	Energy-Aware Radio and Network Technologies
eNB	evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
HeNB	Home eNB
HSS	Home Subscriber Server
LOS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MeNB	Master eNB
MIMO	Multiple Input Multiple Output MME
Mobility Management Entity	
NLOS	Non Line-of-Sight
Opnet	Optimized Network Engineering Tool
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
RLC	Radio Link Control
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RSRP	Reference Symbol Received Power
SCFDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SeNB	Secondary eNB
S-GW	Serving Gateway
Wimax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

# Sumário

<b>Dedicatória</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>1</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>2</b>
<b>Sumário</b>	<b>4</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Definição do Problema . . . . .	1
1.2 Objetivos e Métodos . . . . .	2
1.3 Estado da Arte e Contribuição do Trabalho . . . . .	2
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	3
<b>2 Conceitos Básicos</b>	<b>5</b>
2.1 Redes LTE . . . . .	5
2.1.1 Arquitetura . . . . .	5
2.1.2 Pilha de Protocolos . . . . .	7
2.1.3 Handover . . . . .	7
2.1.4 Outros Aspectos Relevantes . . . . .	9
2.2 Small Cells . . . . .	10
2.2.1 Small Cells Residenciais . . . . .	10
2.2.2 Small Cells Urbanas . . . . .	11
2.2.3 Small Cells Rurais . . . . .	12
2.2.4 Implantação no Brasil . . . . .	13
2.2.5 Vantagens e Desafios . . . . .	13
2.3 Eficiência Energética em Redes Móveis . . . . .	14
2.3.1 Avaliação da Eficiência Energética . . . . .	15

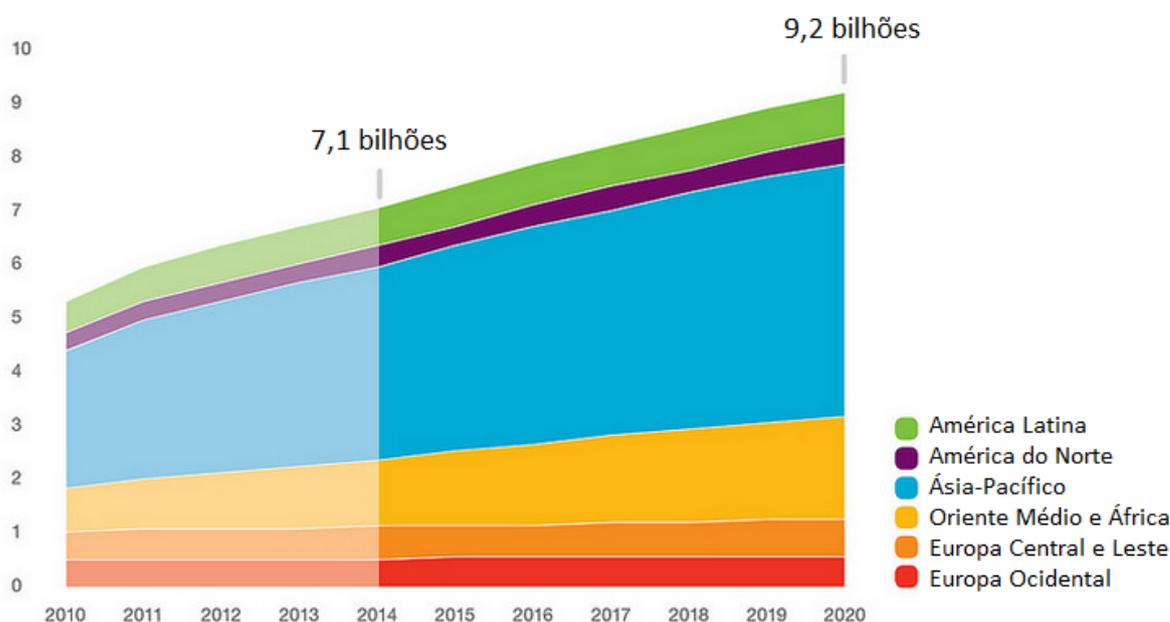
	5
2.3.2 Principais Aspectos de “ <i>Sleep Mode</i> ” . . . . .	15
<b>3 Conectividade Dual e Algoritmo de “<i>Sleep Mode</i>”</b>	<b>17</b>
3.1 Conectividade Dual . . . . .	17
3.1.1 Arquitetura do Plano de Controle . . . . .	17
3.1.2 Arquitetura do Plano de Usuário . . . . .	18
3.1.3 Configurações de “ <i>backhaul</i> ” . . . . .	25
3.2 Algoritmo de “ <i>Sleep Mode</i> ” . . . . .	25
3.2.1 Premissas do Algoritmo Proposto . . . . .	26
3.2.2 Fluxograma de Ativação das SeNBs . . . . .	26
3.2.3 Fluxograma de Desativação das SeNBs . . . . .	27
<b>4 Simulações e Resultados</b>	<b>30</b>
4.1 Riverbed Modeler . . . . .	30
4.1.1 Ambiente do Simulador . . . . .	30
4.2 Definição das Simulações . . . . .	32
4.2.1 Visão Geral dos Cenários . . . . .	32
4.2.2 Especificações dos Cenários . . . . .	33
4.2.3 Número e Velocidade dos Usuários . . . . .	34
4.2.4 Modelos de Consumo de Energia Adotados . . . . .	34
4.2.5 Cálculo de Energia por Bit . . . . .	35
4.3 Resultados . . . . .	35
4.3.1 Tráfego na Rede . . . . .	36
4.3.2 Atraso e Energia por Bit . . . . .	38
<b>5 Conclusão</b>	<b>41</b>
5.1 Trabalhos futuros . . . . .	41
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>43</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Definição do Problema

O tráfego de dados móveis no primeiro trimestre de 2015 foi 55% maior que no primeiro trimestre de 2014. Até 2020, é esperado que 70% da população mundial tenha um “*smartphone*” e que ocorra a adesão de aproximadamente 9,2 bilhões de usuários móveis [1], como mostrado na Figura 1.1 em uma separação por regiões.



**Figura 1.1:** Adesão de usuários móveis por região (em bilhões).

A crescente adesão de usuários móveis nas redes também aumenta as expectativas de tráfego para os próximos anos, o que impulsiona a busca por soluções que aprimorem a capacidade das redes atuais. No entanto, além do aumento de tráfego, os custos relacionados às redes móveis tendem a aumentar conjuntamente, gerando um difícil equacionamento entre melhoramento de capacidade da rede e custos relacionados a este melhoramento.

Para aumento de capacidade das redes, a conectividade dual, que consiste da conexão de um usuário com duas estações rádio base, é uma solução cogitada e em definição pelo 3GPP. Para redução de custos, diversos algoritmos aproveitam os momentos ociosos das estações rádio base para reduzir o seu consumo de energia (“*sleep mode*”), uma vez que as estações rádio base podem representar até 80% dos gastos das operadores de redes móveis [2]. Este trabalho portanto, visa analisar os benefícios resultantes da conectividade dual em redes móveis de tecnologia LTE e propõe um algoritmo de “*sleep mode*” para estações rádio base de baixa potência (“*small cells*”), a fim de prover uso adequado dos recursos rede.

## 1.2 Objetivos e Métodos

A partir da problemática descrita na Seção 1.1, este trabalho foca nas implicações de conectividade dual em redes LTE e propõe um algoritmo de “*sleep mode*” para “*small cells*” com os seguintes objetivos:

- Avaliação do atraso nas aplicações do usuário, contrastando casos com e sem conectividade dual.
- Visão geral das implicações do algoritmo proposto no atraso das aplicações na rede.
- Constatação dos ganhos em eficiência energética advindos do algoritmo.
- Análise de tráfego no “*backhaul*” do núcleo da rede e no “*backhaul*” entre estações rádio base.

Os objetivos expostos acima foram atingidos a partir de extensas simulações realizadas no “*software*” Riverbed Modeler, considerando parâmetros apropriados para o contexto de conectividade dual em LTE bem como padrões adequados de consumo de energia para “*small cells*”.

## 1.3 Estado da Arte e Contribuição do Trabalho

Diversos esquemas de algoritmo de descanso para redes LTE estão presentes na literatura como [3], [4], [5] e [6]. Também estão presentes na literatura diversos artigos ponderando sobre aspectos da conectividade dual [7], [8], [9]. E outros consideram o uso dos algoritmos de “*sleep mode*” em caso de conectividade dual como [10], [11] e [12], onde o principal desafio é a escolha adequada das “*small cells*” para a conexão no plano de usuário, uma vez que o plano de controle continua ligado à “*macro cell*”.

Para a realização desta conexão entre os usuários e as “*small cells*”, geralmente é preciso que o usuário realize medições dos sinais de referência das “*small cells*” próximas, a fim de que a “*macro cell*” possa decidir por conectar ou não um usuário a uma “*small cell*”. No entanto, considerando que algumas “*small cells*” podem estar em “*sleep mode*”, as mesmas não poderão emitir seus sinais de referência. Esta problemática é abordada em [10], onde uma base de dados geográficos, ativa na “*macro cell*”, é sugerida a fim de levar em conta as “*small cells*” em “*sleep mode*” na decisão do estabelecimento de conexão dos usuários. Desta forma, as “*small cells*” cells geograficamente próximas do usuário são computadas para a decisão de conexão do plano de usuário, juntamente com informações de medições de qualidade do sinal

de outros usuários que já estiveram conectados à estas “*small cells*”, permitindo que a conexão no plano de usuário seja decidida independente de “*small cells*” em “*sleep mode*”.

Em [11] a decisão de estabelecer uma conexão do usuário com uma “*small cell*” é tomada se a redução no consumo de energia da “*macro cell*” for maior que o incremento no consumo de energia advindo da ativação da “*small cell*” em “*sleep mode*”, ou se os ganhos na qualidade de serviço do usuário forem maiores com a ativação da “*small cell*”. Para avaliar o algoritmo de “*sleep mode*” concebido, foram realizadas simulações levando em conta tanto o consumo de energia das “*small cells*” quanto do “*backhaul*” envolvido nesta transmissão.

É sugerido, em [12], que o usuário se conecte com uma “*small cell*” apenas se possuir uma alta demanda de tráfego, e se for um usuário de baixa mobilidade, de forma a evitar grandes quantidades de sinais de controle gerados a partir da frequente troca de “*small cell*” pelo usuário de alta mobilidade. Assume-se que a “*macro cell*” pode atender apropriadamente usuários com baixa demanda de tráfego, além de que a conexão entre o usuário e a “*small cell*” termina assim que sua demanda de tráfego é atendida.

Dentre os esquemas de algoritmo expostos, nenhum considera a capacidade do “*backhaul*” das “*small cells*” para atender os usuários conectados a ela, o que pode ocasionar problemas em implantações de redes, uma vez que vários usuários poderiam se conectar à mesma “*small cell*” sem a possibilidade de serem atendidos por esta, seja devido a sua capacidade na rede de acesso ou limitações de “*backhaul*”. Neste trabalho, o algoritmo proposto é baseado tanto na mobilidade do usuário quanto na capacidade do “*backhaul*” das “*small cells*” para atender novos usuários, a fim de minimizar problemas de capacidade e prover o uso eficiente das “*small cells*”.

As contribuições deste trabalho portanto, abrangem a análise aprofundada da conectividade dual em LTE e o desenvolvimento de um algoritmo de “*sleep mode*” que possa gerenciar a ativação e desativação de “*small cells*” em situação de conectividade dual e prover o uso eficiente da rede tanto em relação à quantidade de tráfego e atraso, quanto ao consumo energético.

## 1.4 Organização do Trabalho

O trabalho se divide entre conceitos teóricos necessários para o entendimento dos resultados, bem como a esquematização e execução das simulações, seguida da análise dos resultados e conclusão. Estas etapas estão divididas da seguinte forma:

- Capítulo 1: Aborda aspectos gerais que motivam e delimitam o escopo deste trabalho em simulações envolvendo redes LTE em conectividade dual com o uso do algoritmo proposto.
- Capítulo 2: Descreve os conceitos básicos de LTE necessários para as simulações. Aprofunda os conceitos de “*small cells*” ressaltando seu uso e suas implicações nas redes móveis. Expõe o contexto que estimula a eficiência energética em redes móveis e elenca os principais aspectos dos algoritmos de “*sleep mode*”.
- Capítulo 3: Realiza um apanhado das estratégias definidas até agora em conectividade dual quanto à sua arquitetura e “*backhaul*” e apresenta o algoritmo proposto.
- Capítulo 4: Descreve as definições utilizadas nos cenários simulados e expõe os resultados obtidos nas simulações e analisa seu impacto na eficiência energética das redes LTE bem como na experiência do usuário na rede.

- Capítulo 5: Ressalta as conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos.

# Capítulo 2

## Conceitos Básicos

Neste capítulo, a arquitetura LTE é apresentada de forma sucinta, bem como sua pilha de protocolos. Posteriormente, o “*handover*” é detalhado e é feita uma breve discussão sobre outros aspectos relevantes em LTE. Em seguida, as “*small cells*” são descritas quanto ao seu uso em ambientes residenciais, urbanos e rurais. E são detalhadas importantes características de “*small cells*” relativas à sua implantação no Brasil, bem como vantagens e desafios de seu uso. Por fim, a relevância da eficiência energética em redes móveis é ressaltada e os principais aspectos de “*sleep mode*” são evidenciados.

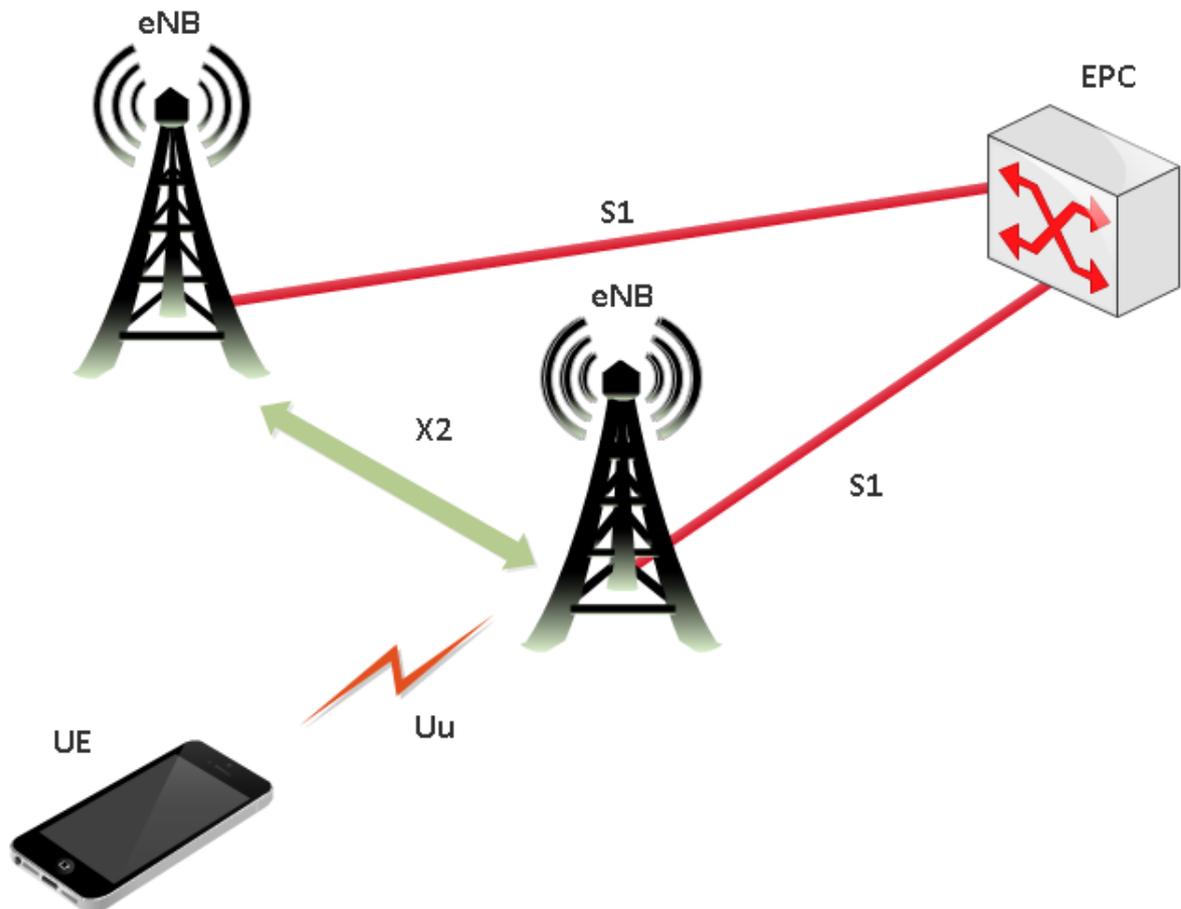
### 2.1 Redes LTE

A tecnologia de redes móveis LTE é a sucessora da tecnologia Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), representando uma evolução tanto na rede de acesso como no núcleo da rede. As demandas por taxas de transmissão mais altas, maior qualidade de serviço e redução de custos impulsionaram a criação desta tecnologia, que tem seus padrões desenvolvidos pelo 3GPP. O lançamento do oitavo conjunto de padronizações do 3GPP de LTE foi congelado em dezembro de 2008 e serviu de base para a primeira leva de equipamentos possuidores da tecnologia [13]. O décimo conjunto de padrões definidos pelo 3GPP trouxe melhorias como multiponto coordenado e redes auto otimizadas, o que deu o nome de “*LTE-Advanced*” a esta nova versão de LTE. Os lançamentos atuais de padrões, que se encontram no número doze, abordam diversos temas que são considerados principais em futuras demandas das redes móveis, como conectividade dual, que será abordada no Capítulo 3.

#### 2.1.1 Arquitetura

A arquitetura LTE pode ser definida como na Figura 2.1, composta basicamente do usuário, também chamado de User Equipment (UE), uma evolved Node B (eNB) e a Evolved Packet Core (EPC) como são chamadas, em LTE, as estações rádio base e o núcleo da rede, respectivamente. A interface Uu concerne à interface de rádio entre o usuário e a eNB. A interface S1 é referente à conexão entre a eNB e a EPC. E a interface X2 concerne à conexão entre duas eNBs, o que não necessariamente significa possuir uma conexão física entre as ambas, podendo ter seu tráfego roteado pela própria EPC. Todas as funções desta interface podem ser realizadas

pela S1. No entanto, estas funções podem ser realizadas de forma mais rápida pela interface X2 [14], que é utilizada para funções relacionadas à interferência e “handover”.

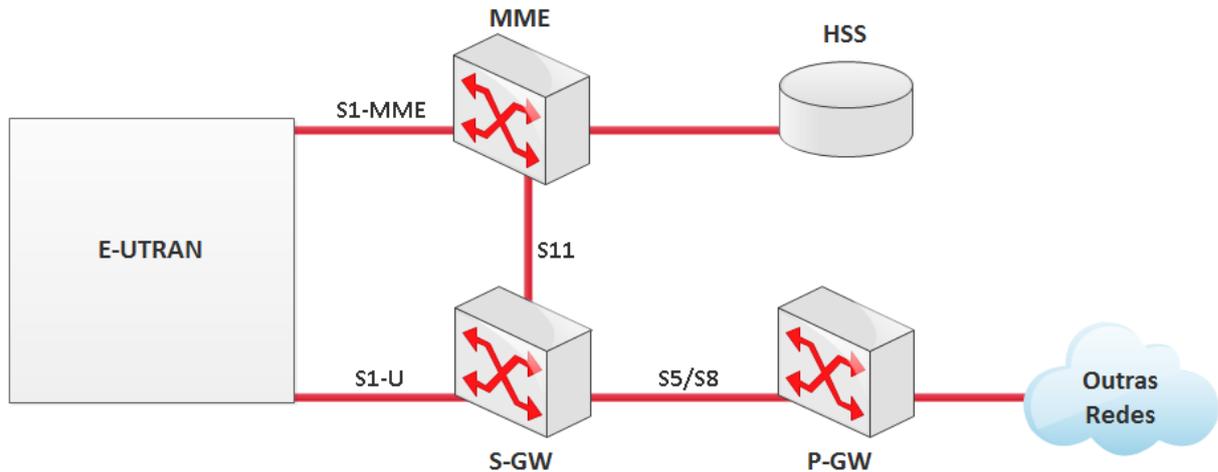


**Figura 2.1:** Visão geral da arquitetura LTE.

A EPC, geralmente definida resumidamente como um único elemento na rede, é constituída de diversos componentes, dentre os quais os principais estão representados na Figura 2.2. Estes elementos estão conectados à Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), que corresponde à rede de acesso das redes LTE, nomeadamente, as eNBs.

O componente Mobility Management Entity (MME) controla as operações de alto nível do usuário, através de mensagens de controle acerca de situações como segurança e gerenciamento. Além disso, também é responsável pelo controle dos outros elementos da rede. Já o Home Subscriber Server (HSS), corresponde à base central de dados dos usuários da rede. Outro importante elemento é o Serving Gateway (S-GW) que age como roteador de dados entre a eNB e o Packet Data Network (PDN) Gateway. Este é responsável pela troca de dados da rede com dispositivos externos e outras redes.

Além dos elementos apresentados na Figura 2.2, esta possui diversas conexões representadas por diferentes nomes, de forma a indicar os elementos que estão sendo conectados, como a S11 conecta MME e S-GW e a S6a conecta MME e HSS. Desta forma, a conexão S1-U, é a presente entre a eNB e o S-GW, e é essencial para o tráfego de dados do usuário, bem como as conexões S5, S8 e SGi. A Conexão S1-MME, está presente entre a eNB e a MME, o que a torna relevante para os sinais de controle.



**Figura 2.2:** Principais elementos da EPC.

### 2.1.2 Pilha de Protocolos

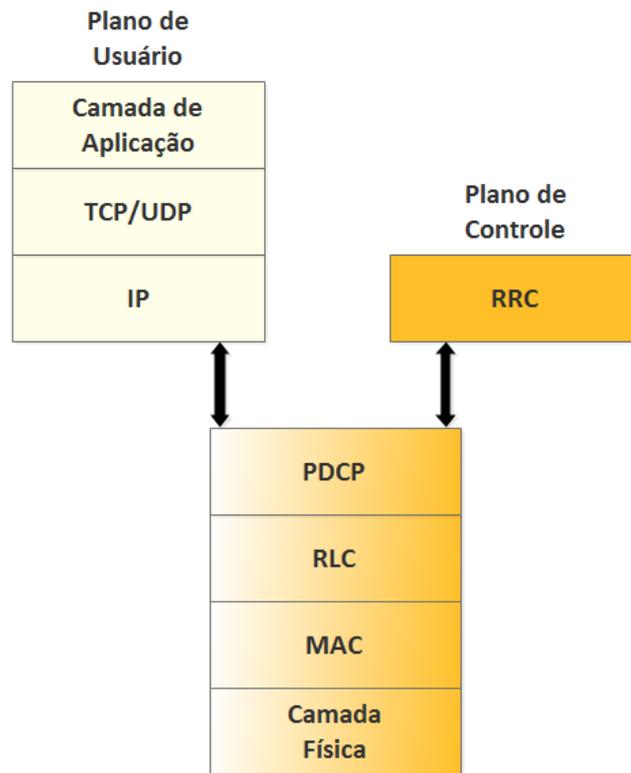
A pilha de protocolos LTE na rede de acesso, no plano de usuário e controle, pode ser definida pela Figura 2.3.

O plano de usuário representa a pilha de protocolos utilizada para o tráfego de dados, enquanto o plano de controle representa a pilha de protocolos utilizada para o tráfego de mensagens de controle trocadas entre o usuário e a eNB. É citada abaixo uma breve explicação dos protocolos principais das redes LTE, além de uma breve descrição da camada física:

- Packet Data Convergence Protocol (PDCP) - Protocolo responsável pela compressão de cabeçalhos TCP/UDP e IP, a partir do protocolo Robust Header Compression (ROHC). Também realiza criptografia dos dados tanto no plano de usuário quanto de controle. Verifica a integridade dos dados do plano de controle e gerencia o número de sequência presente nos pacotes PDCP. Assegura entrega dos pacotes em caso de “*handover*”.
- Radio Link Control (RLC) - Responsável pela concatenação e segmentação de pacotes RLC. Detecção e correção de erros através de protocolos como Automatic Repeat Request (ARQ).
- Radio Resource Control (RRC) - Protocolo que processa as funções de ativação e desativação da conexão do usuário com a rede, bem como outras funções de controle necessárias entre o usuário e a eNB.
- Camada Física - Incorpora técnicas como múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), e usa Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) para transmissões de “*downlink*” e Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SCFDMA) para transmissões no “*uplink*”

### 2.1.3 Handover

O “*handover*” é a operação realizada pela rede LTE quando um usuário deixa de estar conectado a uma certa eNB para se conectar a outra eNB vizinha. Esta operação constitui uma



**Figura 2.3:** Pilha de protocolos LTE na rede de acesso.

série de etapas, descritas de forma resumida na Figura 2.4.

O usuário realiza medições relacionadas à potência e qualidade do sinal recebido, como Reference Symbol Received Power (RSRP), que mede a potência do sinal recebido a partir de sinais de referência na rede. A partir destas medições, realizadas em relação ao sinal recebido da eNB atual e das eNBs vizinhas, estas informações são enviadas pelo usuário à sua eNB atual. Esta, por sua vez, avaliará com base num limiar se o “*handover*” deve ser iniciado ou não, de acordo com condições como as mostradas na Tabela 2.1, adaptada de [15].

**Tabela 2.1:** Condições de “*handover*”.

Evento	Condição
E1	eNB atual abaixo do limiar
E2	eNB vizinha está melhor que a eNB atual, com uma diferença pré-definida
E3	eNB vizinha está melhor que a eNB atual
E4	eNB atual abaixo do limiar e eNB vizinha está melhor que a eNB atual

Dadas estas condições, se o “*handover*” for iniciado, a eNB atual enviará uma mensagem de requisição de “*handover*” para a eNB alvo, que responderá com uma confirmação de

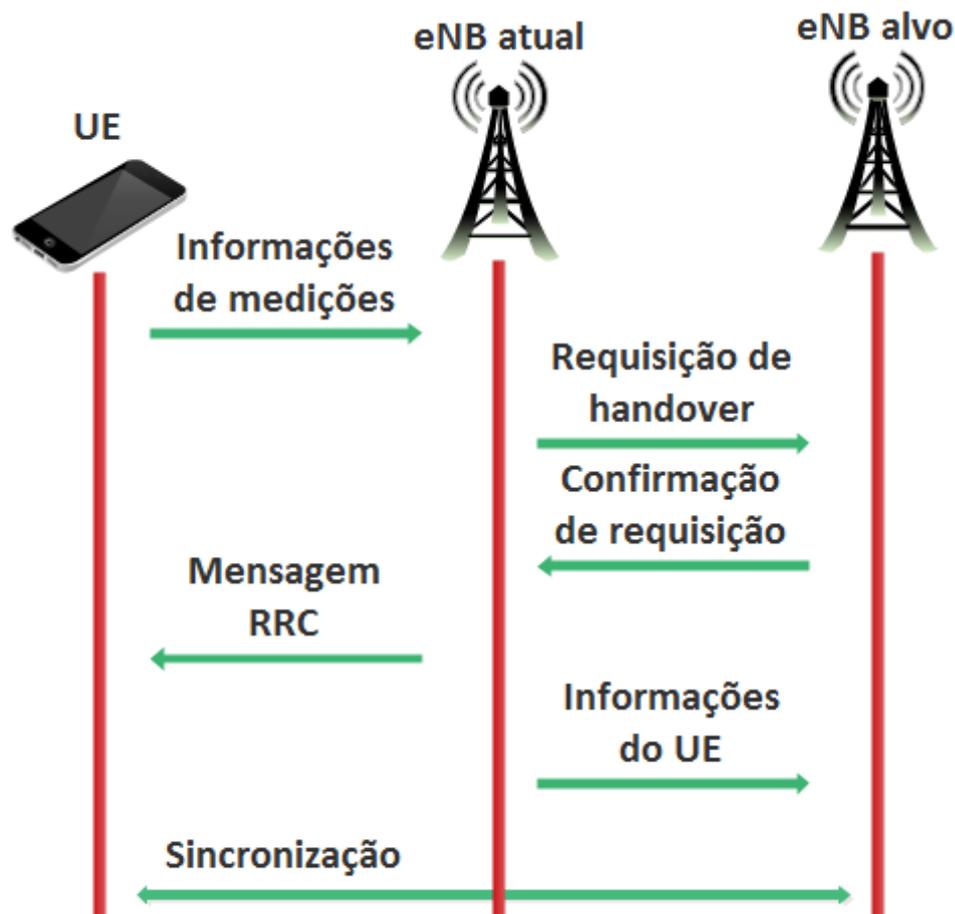


Figura 2.4: “Handover” em LTE.

requisição de “handover” contendo informações do protocolo RRC destinadas ao usuário. Estas informações são entregues ao usuário pela eNB atual que, em seguida, envia informações referentes ao número de sequência da protocolo PDCP do usuário, bem como eventuais pacotes de dados do usuário para a eNB alvo. O usuário troca então uma série de mensagens com a eNB alvo, condensadas na Figura 2.4 como sincronização, e enfim se conecta à eNB alvo.

#### 2.1.4 Outros Aspectos Relevantes

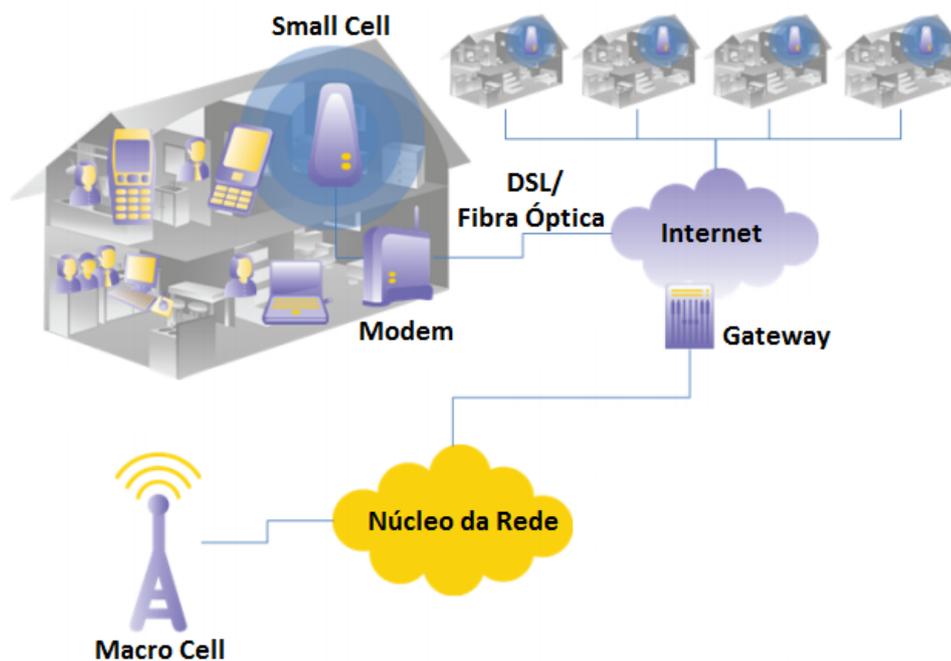
Os assuntos descritos nesta Seção são as bases da tecnologia LTE, definida a partir dos padrões do 3GPP. No entanto, existem outras abordagens em constante pesquisa que visam melhorar as redes LTE, como eficiência energética em redes móveis, redes heterogêneas e conectividade dual. Além disso, todos estes temas abrangem também “small cells”, que são importantes elementos para prover maior cobertura e capacidade. No contexto de LTE, uma “small cell” ou Home eNB (HeNB), como definida pelo 3GPP, é uma eNB de menor porte em termos de dimensões e potência. As “small cells” serão abordadas na Seção 2.2 de uma maneira geral.

## 2.2 Small Cells

O termo “*small cells*” abrange pontos de acesso de baixa potência de transmissão, operando tanto em espectro licenciado quanto não licenciado [16]. “*Small cells*” costumam ter uma área de cobertura entre algumas dezenas a centenas de metros e possuem tanto aplicações residenciais quanto urbanas e rurais.

### 2.2.1 Small Cells Residenciais

Com o intuito de prover maior cobertura e capacidade em ambientes residenciais ou pequenos escritórios, as “*small cells*” designadas a estes fins são tipicamente chamadas de residenciais [17]. Normalmente são desenvolvidas para aplicações onde se pode considerar necessário o uso de uma única “*small cell*”, com seu “*backhaul*” provido pela estrutura de Internet já existente no ambiente onde for instalada. Em alguns casos a operadora de telefonia é a mesma provedora do serviço de Internet, o que possibilita que a operadora possa dar maiores garantias quanto à qualidade do serviço oferecido ao usuário, uma vez que não haverá limitações desconhecidas na infraestrutura de “*backhaul*”. O esquema da Figura 2.5 representa um possível caso de utilização de “*small cells*” residenciais.



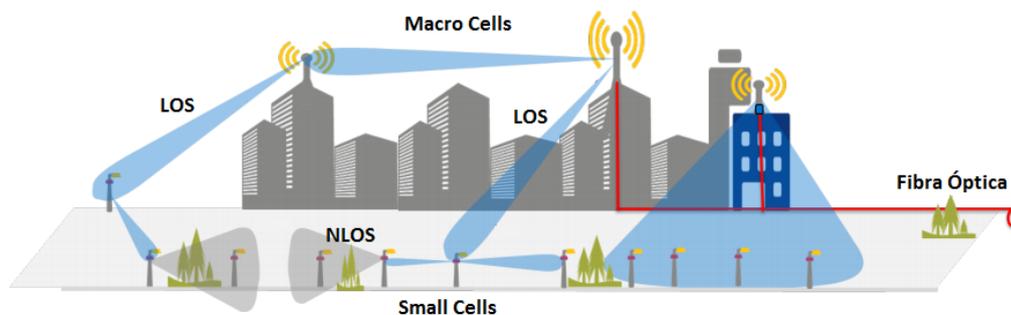
**Figura 2.5:** Utilização de “*small cells*” residenciais, adaptada de [17].

No esquema da Figura 2.5, diversas “*small cells*” são utilizadas em residências, possuindo “*backhaul*” atendido pela rede de Internet já instalada nestas residências, e um “*gateway*” que liga estas “*small cells*” ao núcleo da rede de telefonia. Uma das funções do “*gateway*” é de reduzir o volume de carga no núcleo da rede da operadora, sendo responsável por algumas funções que seriam antes realizadas no núcleo da rede, como operações de “*handover*” entre “*small cells*” e “*macro cells*” que podem ocorrer constantemente uma vez que a cobertura das “*small cells*” se restringe à residência do seu usuário.

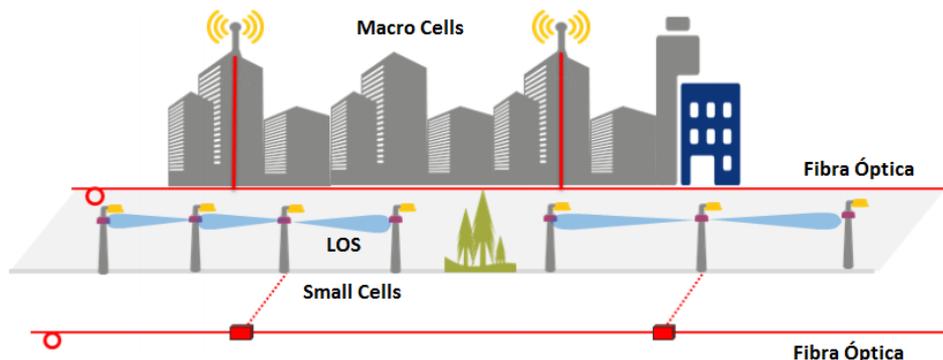
## 2.2.2 Small Cells Urbanas

Usualmente são chamadas de “*small cells*” empresariais, aquelas que têm seu uso voltado para locais como aeroportos, parques temáticos, metrô e ruas movimentadas [18]. A empresa de telefonia americana AT&T, por exemplo, possui grande estrutura de redes heterogêneas na “*Disney Parks and Resort*”, onde têm implantadas mais de 350 “*small cells*”. No entanto, diferente de aplicações residenciais onde geralmente a infraestrutura legada de Internet pode ser utilizada como “*backhaul*”, nas “*small cells*” urbanas o quesito “*backhaul*” é considerado pelas operadoras de telefonia como o maior desafio para a implantação deste tipo de “*small cell*” [ref]. A escolha do “*backhaul*” adequado dentre as várias opções cabeadas e sem fio existentes é complexa, no entanto, de forma a ilustrar possíveis escolhas cabeadas e sem fio em diferentes topologias, a Figura 2.6 apresenta dois esquemas de “*backhaul*” envolvendo “*small cells*” urbanas.

Topologia 1



Topologia 2

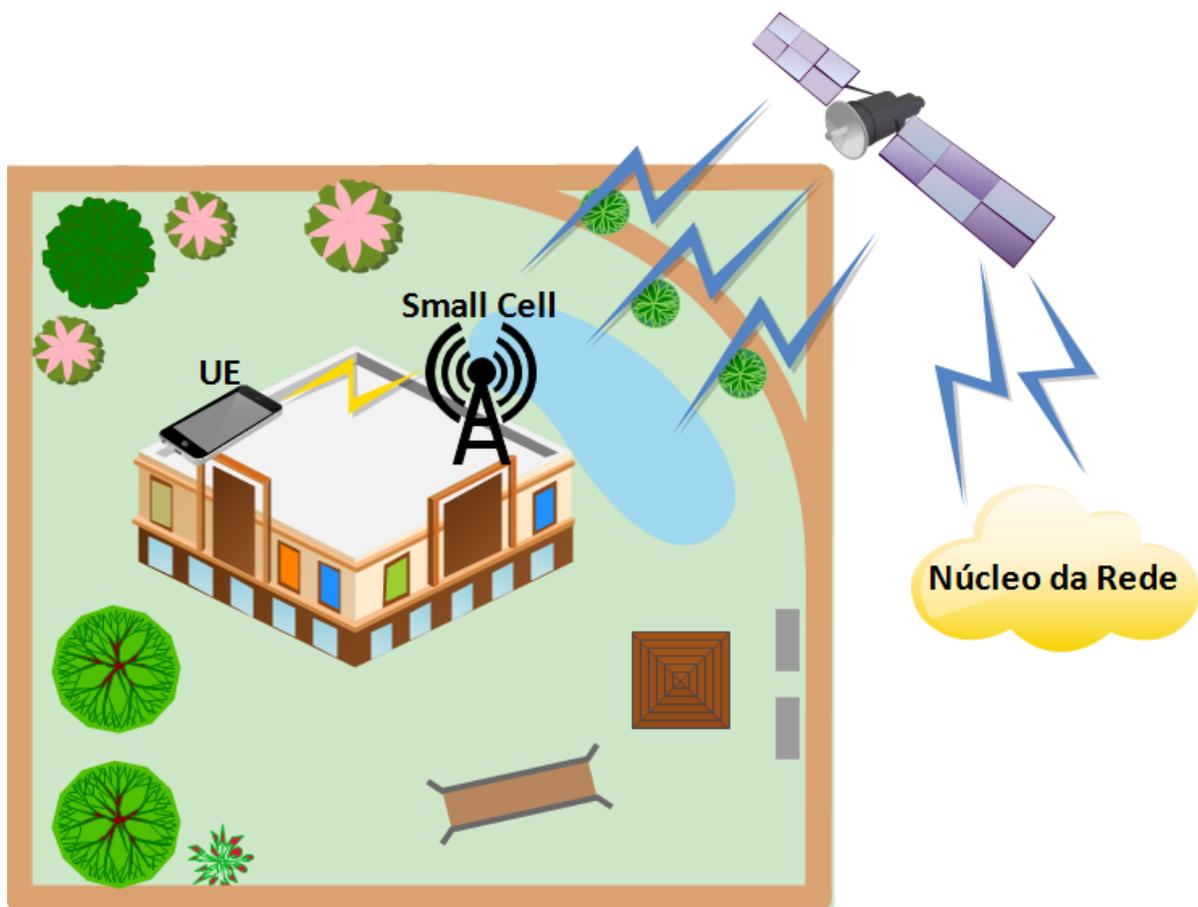


**Figura 2.6:** Topologias de “*small cells*” urbanas, adaptadas de [18].

A Topologia 1 considera que o “*backhaul*” de “*small cells*” é atendido tanto por outras “*small cells*” quanto por “*macro cells*” atendidas por cabos de fibra óptica, em situações de transmissão sem linha de visada (NLOS) e com linha de visada (LOS). A Topologia 2 considera “*backhaul*” independente entre “*small cells*” e “*macro cells*”, onde apenas algumas “*small cells*” são atendidas por fibras e, por sua vez, atendem outras “*small cells*” a partir da rede sem fio.

### 2.2.3 Small Cells Rurais

As “*small cells*” implantadas em zonas afastadas de grandes centros urbanos ou em áreas remotas são chamadas de rurais [19]. Devido ao menor número de usuários nestas áreas, as operadoras podem ter um retorno econômico menor da implantação de sua infraestrutura de telefonia em comparação a grandes centros urbanos, resultando no fato de que muitas destas zonas comumente estão nos limites de cobertura das redes de telefonia, ou não possuem cobertura alguma. No entanto, de forma a tornar a implantação em áreas rurais mais rentável, as operadoras buscam soluções para reduzir seus custos de implantação, como o uso de fontes alternativas de energia para alimentação energética das “*small cells*” ou o compartilhamento da infraestrutura telefônica por mais de uma operadora. Este último método tem sido bastante encorajado no Brasil, através de esforços regulamentários da Anatel, bem como em outros países como a França, onde a operadora Orange, por exemplo, já compartilha 40% dos elementos passivos de sua rede rural [20]. Na Figura 2.7, um possível caso de implantação de “*small cells*” em áreas rurais é apresentado.



**Figura 2.7:** Implantação de small cells rurais.

As “*small cells*” esquematizadas na Figura 2.7 são ligadas ao núcleo da rede através da sua conexão por satélite. Este tipo de “*backhaul*” é uma das principais soluções utilizada pelas operadoras para implantação de redes de telefonia em áreas remotas, onde nenhuma outra infraestrutura existe. Porém, esta solução pode apresentar, além de limitações de capacidade em relação a outras soluções de “*backhaul*”, implicações em grande latência para os usuários das “*small cells*” rurais.

## 2.2.4 Implantação no Brasil

Em junho de 2011, as “*small cells*” de tecnologia 3G superaram numericamente as “*macro cells*” da mesma tecnologia. Em outubro de 2012, o número total de “*small cells*”, independente da tecnologia, já era de 6 milhões contra 5,9 milhões de “*macro cells*”. Porém, no Brasil, a difusão das “*small cells*” continua branda. Em novembro de 2013, foi acordado pela Câmara dos Deputados que não haveria taxa de operação a ser paga pelas empresas de telefonia no uso de estações rádio base com potência de operação menor do que 1W [21]. Sem esta medida, seria economicamente inviável investir em “*small cells*”, que possuem cobertura e capacidade inferiores às “*macro cells*”, pagando taxas de operação semelhantes às taxas cobradas pelas “*macro cells*”. A medida adotada pela Anatel, portanto, deveria impulsionar a difusão de “*small cells*” pelo Brasil. No entanto, existe uma grande variedade de “*small cells*” com potências maiores que 1W que, portanto, continuavam economicamente desvantajosas devido à taxa de fiscalização (Fistel) sobre elas. Apenas em dezembro de 2014, a isenção do pagamento do Fistel foi estendida para estações rádio base de até 5W, e foi reduzida para aparelhos com potências entre 5W e 10W [22].

Apesar das questões de licenciamento que permeiam a implantação de “*small cells*” no Brasil, empresas de telefonia tem investido cada vez mais nas “*small cells*”. A empresa de telefonia com a estratégia mais definida e pública é a TIM que, em 2014, assinou parceria com a rede de postos Ipiranga para implantação de “*small cells*”. A empresa de telefonia TIM pretende instalar mil “*small cells*” no ano de 2015, e fechar o ano de 2017 com 3,5 mil equipamentos. Já a telefônica Claro, tem planos de oferecer cobertura nos metrô do Rio de Janeiro com “*small cells*”. A Oi, por sua vez, afirma já possuir lotes de “*small cells*” 3G e 4G. A Vivo, no entanto, apesar de já ter realizado testes com “*small cells*”, afirmou em 2014 que não focaria em redes heterogêneas [23].

## 2.2.5 Vantagens e Desafios

Devido às suas características de implantação e operação diferenciadas em relação às “*macro cells*”, as “*small cells*” possuem diversas vantagens, como:

- Devido a sua dimensões de operação reduzidas, as “*small cells*” podem prover cobertura em locais antes inacessíveis ou eliminar zonas de sombra na cobertura de “*macro cells*”.
- Sua potência de transmissão, também reduzida, permite utilização de frequências mais altas que, por sua grande atenuação em grandes distâncias, são mais bem empregadas em coberturas menores, permitindo um melhor aproveitamento do espectro de frequência.
- Como a distância de transmissão e recepção é bem menor no caso de “*small cells*”, a qualidade do “*link*” do usuário é potencialmente melhor, resultando em melhor capacidade.

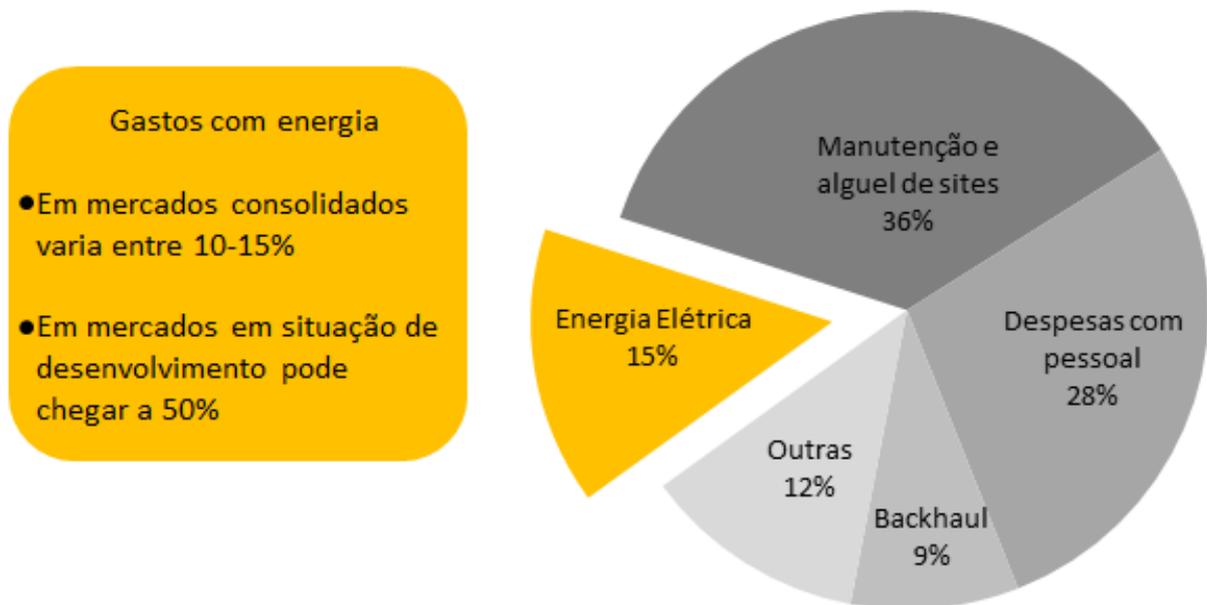
Apesar das inúmera vantagens, a implantação e operação de “*small cells*” ainda apresenta diversos desafios como:

- Um dos principais fatores que torna desafiante o uso de “*small cells*” é o “*backhaul*”. São muitas escolhas que podem ser tomadas dentre opções cabeadas e sem fio. Porém, nem sempre é evidente qual é a melhor solução em termos de custo-benefício.

- Devido a sua pequena cobertura, em comparação às “*macro cells*”, usuários em mobilidade podem realizar constantes trocas de conexão entre as “*small cells*”. Além disso, mesmo num contexto de baixa mobilidade, é possível que o usuário realize trocas de sua conexão entre “*small cell*” e “*macro cell*”. Todas estas operações de troca de conexão necessitam de sinais de controle que trafegam pela rede, aumentando consideravelmente a carga na mesma. Em contextos de densa implantação de “*small cells*”, estas cargas extras na rede podem ser ainda mais constantes.
- Este mesmo contexto de densa implantação de “*small cells*” exige um maior esforço de gerenciamento da rede, bem como de possíveis interferências entre “*small cells*”, ou entre estas e a “*macro cell*”. Em aplicações residenciais, por exemplo, considera-se que o usuário pode instalar a “*small cell*” em qualquer local de sua casa, o que pode causar interferências que devem ser mitigadas através do adequado gerenciamento da rede.

## 2.3 Eficiência Energética em Redes Móveis

Cerca de 2% a 6% do consumo de energia no mundo é relativo ao setor da indústria de tecnologia da informação e comunicação [24], sendo uma parte significativa deste consumo específica do setor de redes móveis que, tende a aumentar juntamente com a crescente demanda por serviços e expectativas de tráfego para os próximos anos como mostrado no Capítulo 1, aumentando também a emissão de  $CO_2$ . A significância do consumo energético nas despesas de uma operadora é mostrada na Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Despesas operacionais em redes móveis, baseadas no mercado europeu.

A energia elétrica, como mostrado na Figura 2.8, representa de 10% a 15% das despesas operacionais das redes móveis, podendo chegar a 50% dos gastos em mercados em situação de desenvolvimento [24]. Neste contexto de grande consumo energético, onde algumas das maiores operadoras do setor de redes móveis já relataram de 15% a 30% de aumento do uso de

energia nos últimos anos [2], são necessárias tecnologias cada vez mais eficientes do ponto de vista energético. Diversos projetos de pesquisa têm como principal foco o estudo de eficiência energética em redes móveis como o projeto EARTH (Energy-Aware Radio and Network Technologies) e o projeto C2POWER (Cognitive Radio and Cooperative Strategies for Power Saving). De modo geral, estes esforços buscam novas técnicas para melhor aproveitar a energia consumida em redes móveis e diminuir a emissão de  $CO_2$  no setor.

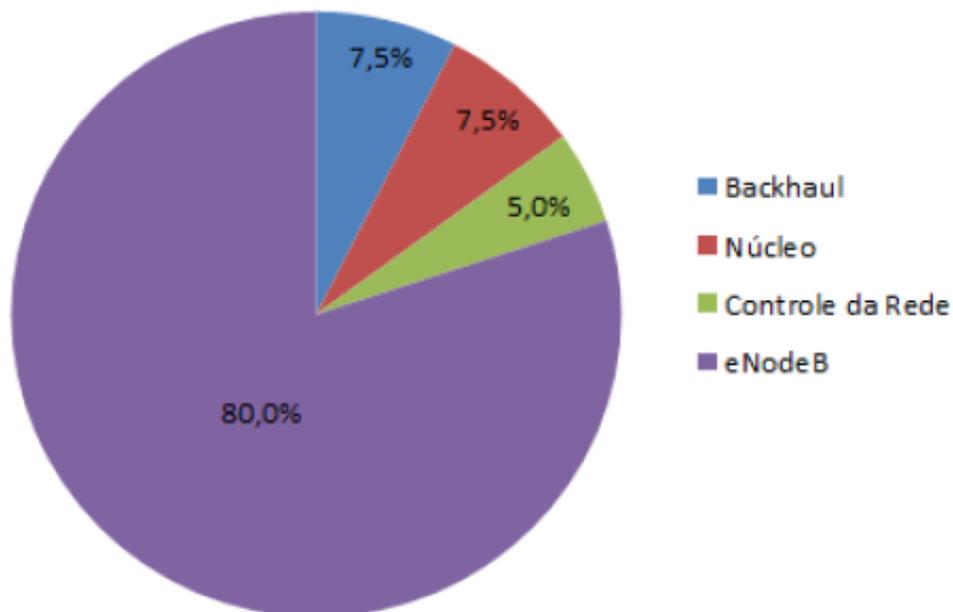
### 2.3.1 Avaliação da Eficiência Energética

Para avaliar a eficácia das técnicas de eficiência energética em redes móveis, diversas métricas são utilizadas. A mais adequada para o escopo deste trabalho é a de energia por bit  $E_b$ , em joules por bit, definida pela Equação, extraída de [24]:

$$E_b = \frac{E}{R} \quad (2.1)$$

### 2.3.2 Principais Aspectos de “Sleep Mode”

Dentre as técnicas existentes de redução do consumo de energia em redes móveis, os algoritmos de “sleep mode” buscam aproveitar os momentos ociosos das estações rádio base para reduzir o seu consumo de energia. Esta técnica tem se tornado a principal abordagem de redução no consumo de energia [25], uma vez que seu foco são as estações rádio base, que podem representar até 80% dos gastos energéticos de uma operadora [2], como mostrado na Figura 2.9.



**Figura 2.9:** Gastos energéticos de uma operadora.

Devido ao alto gasto energético associado às estações rádio base, técnicas que possam tornar o seu uso mais eficiente como o “sleep mode”, impactam significativamente nas despesas

de uma operadora, além de resultar em redução na emissão de  $CO_2$ . Apesar das vantagens advindas desta técnica, o desligamento parcial dos dispositivos de uma estação rádio base também significa que a mesma não estará mais disponível para os usuários na rede, e precisa ter sua área de cobertura atendida por outras estações. Estas outras estações nem sempre poderão atender a mesma área com a mesma qualidade de capacidade. É importante, portanto, haver um balanço entre a eficiência energética obtida a partir do “*sleep mode*”, e a qualidade de serviço do usuário.

# Capítulo 3

## Conectividade Dual e Algoritmo de “*Sleep Mode*”

Este capítulo aborda as principais arquiteturas propostas pelo 3GPP para a conectividade dual em redes LTE, abrangendo a pilha de protocolos, divisão do tráfego entre “*macro cell*” e “*small cells*” e “*backhaul*”. Em seguida, é apresentado o algoritmo proposto por este trabalho para ativação e desativação de “*small cells*” no contexto de conectividade dual.

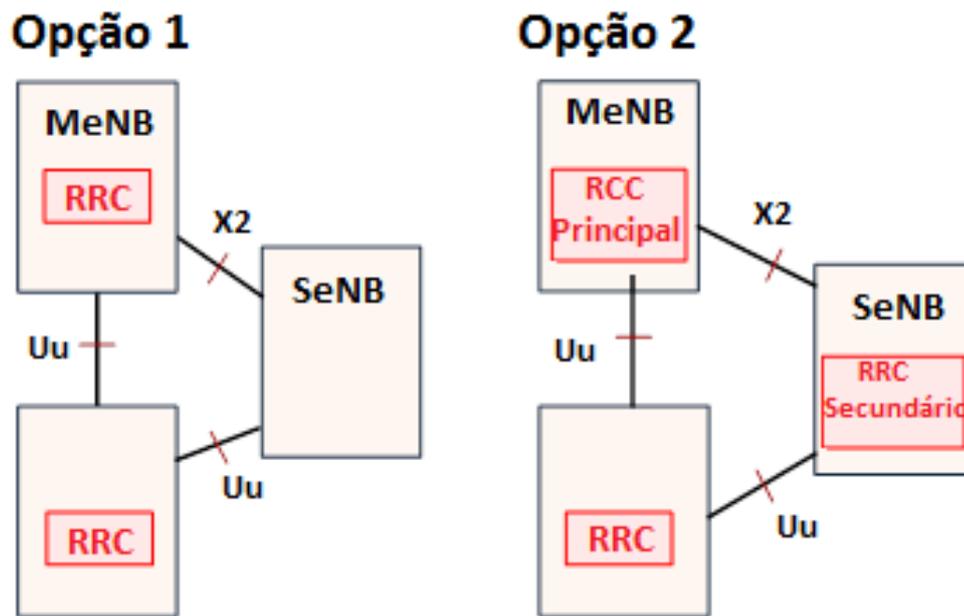
### 3.1 Conectividade Dual

“*Small cells*” são consideradas como a principal tecnologia capaz de atender as continuamente crescentes taxas de demanda de tráfego [27]. No entanto, em cenários de redes heterogêneas, dificuldades surgem quanto à robustez da conexão do usuário, devido aos constantes “*handovers*” entre “*small cells*” ou entre estas e a “*macro cell*”, gerando também maior carga de sinais de controle no núcleo da rede. Além disso, é possível que a conexão de “*uplink*” do usuário seja mais bem atendida pela “*macro cell*” enquanto a conexão de “*downlink*” seja melhor atendida pela “*small cell*” e vice-versa. Questões como estas, que surgem a partir de cenários de redes heterogêneas, estimulam soluções como a conectividade dual, definida pelo 3GPP para a tecnologia LTE [26]. A premissa básica da conectividade dual é a capacidade de um usuário se conectar a uma “*macro cell*” e uma “*small cell*” simultaneamente, de forma a aumentar a vazão do usuário, prover melhor balanceamento do tráfego na rede e aumentar a robustez do usuário durante mobilidade.

#### 3.1.1 Arquitetura do Plano de Controle

Na conectividade dual, como definida pelo 3GPP, existe a “*Master eNB*” (MeNB), geralmente a “*macro cell*”, e a “*Secondary eNB*” (SeNB), geralmente a “*small cell*”. Neste contexto, existem mudanças a serem consideradas na arquitetura LTE. A Figura 3.1 mostra as duas possíveis arquiteturas LTE para o plano de controle no caso de conectividade dual.

Na opção 1 existe apenas uma conexão S1-MME por usuário, realizada pela MeNB, que também é responsável pela conexão RRC do usuário. Esta conexão RRC permanece gerida



**Figura 3.1:** Alternativas de arquitetura do plano de controle, adaptada de [26].

pela MeNB enquanto o usuário estiver na área de cobertura da “macro cell”. Este esquema foi desenvolvido a fim de eliminar grandes quantidades de “handover” e reduzir, portanto, os sinais de controle no núcleo da rede. No entanto, é cogitada também a opção 2, onde a SeNB é capaz de realizar alguns processamentos da camada RRC, de acordo com troca de mensagens com a MeNB, que mantém o processamento principal da conexão RRC. Para a realização deste trabalho, a opção 1 é adotada por ser mais simples e causar menos impacto na pilha padrão de protocolos LTE.

### 3.1.2 Arquitetura do Plano de Usuário

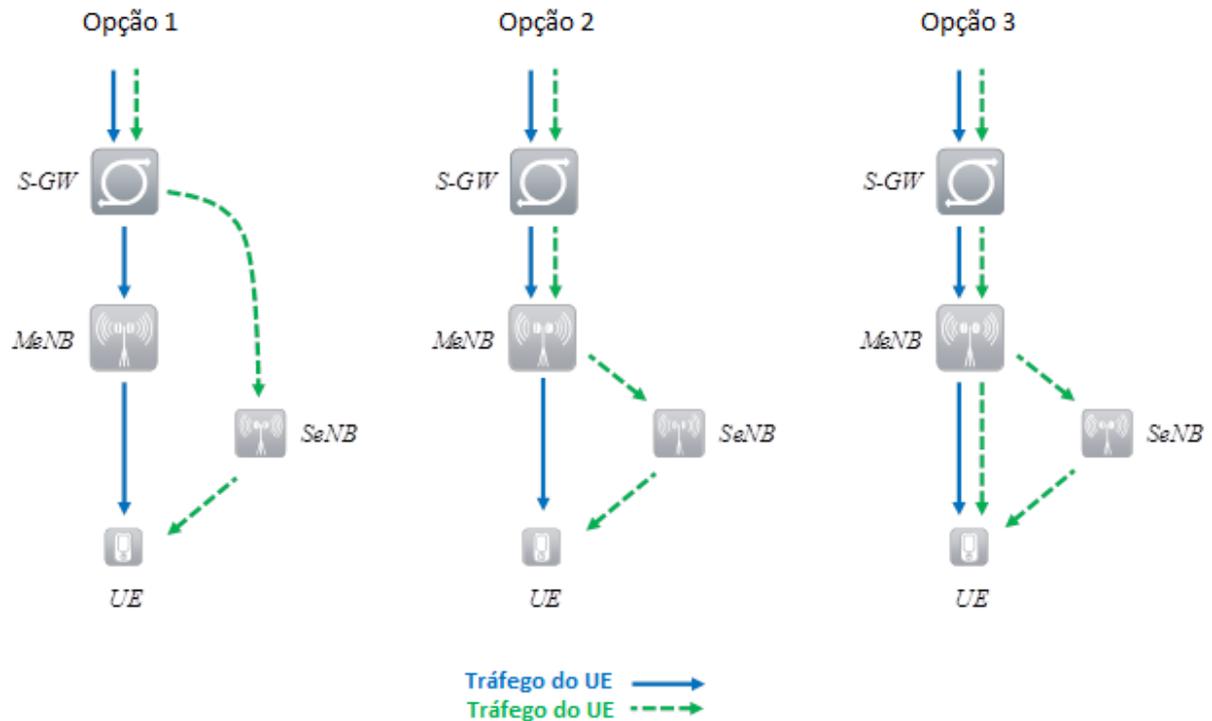
Em relação à divisão de tráfego num cenário de conectividade dual, três opções de arquitetura para o plano de usuário são consideradas [26]:

- Opção 1 – A conexão S1-U termina na SeNB.
- Opção 2 – A conexão S1-U termina na MeNB, e não há divisão de “bearer” entre MeNB e SeNB.
- Opção 3 – A conexão S1-U termina na MeNB e há divisão de “bearer” entre MeNB e SeNB.

A Figura 3.2 descreve as opções listadas acima para a transmissão no “downlink”.

Em relação à arquitetura de protocolo, quatro alternativas são definidas:

- A. PDCPs independentes – Considera-se que cada “bearer” é definido pelo atual padrão de pilha de protocolos para o plano de usuário.
- B. Master-Slave PDCPs – Neste caso, assume-se que a conexão S1-U termina na MeNB, com parte do processamento da camada PDCP sendo realizado na MeNB.



**Figura 3.2:** Opções de arquitetura para o plano de usuário, adaptadas de [26].

- C. RLCs independentes – É assumido que a conexão S1-U termina na MeNB, com o processamento da camada PDCP sendo realizado na MeNB.
- D. Master-Slave RLCs – Considera-se que a conexão S1-U termina na MeNB, e a mesma é responsável pelo processamento da camada PDCP e parte da camada RLC. Na SeNB, é realizado os processamentos da camada RLC que exigem respostas de baixo atraso como retransmissão de pacotes.

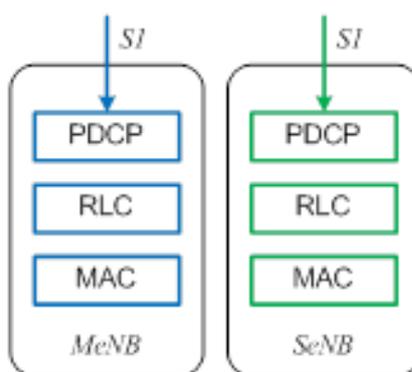
A partir das opções descritas acima, diversas alternativas finais de arquitetura são possíveis. A escolhida para este trabalho é a alternativa 2A, uma vez que a mesma não provoca mudanças na pilha padrão de protocolos LTE, além de não apresentar divisão de tráfego entre SeNB e MeNB, tornando o seu uso mais simples. A alternativa 2A, bem como as demais possíveis, estão descritas nos tópicos subsequentes e detalhadas considerando benefícios e inconvenientes de cada arquitetura. As únicas configurações não listadas são as que envolvem a alternativa B de arquitetura de protocolo, por ainda haverem pendências nas definições de quanto MeNB e SeNB processariam do protocolo PDCP [26].

### 3.1.2.1 Alternativa 1A

A conexão S1-U termina na SeNB e PDCPs são independentes, como mostrado na Figura 3.3.

Os benefícios esperados desta alternativa são:

- MeNB não precisa armazenar nem rotear o tráfego da SeNB.



**Figura 3.3:** Alternativa 1A, extraída de [26].

- Os requisitos do “backhaul” entre MeNB e SeNB são mais flexíveis.
- Baixo impacto no processamento dos protocolos PDCCP/RLC.
- Possibilidade de confinamento de tráfego local na SeNB.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

- Conexão S1-U é necessária para a SeNB.
- Confinamento de tráfego entre MeNB e SeNB precisa ser feito na MME.
- Impactos em segurança por haver criptografia de dados tanto na MeNB quanto na SeNB.
- É necessário re-estabelecimento do processamento do PDCCP em casos de “handover”.
- Não é possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.

### 3.1.2.2 Alternativa 2A

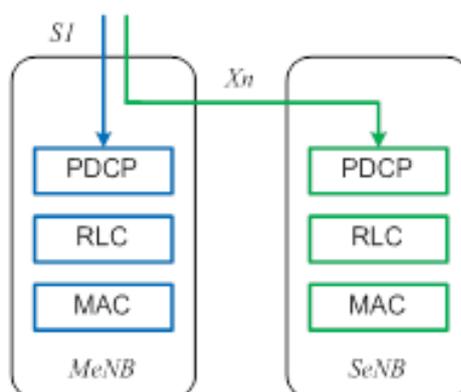
A conexão S1-U termina na MeNB, sem divisão de “bearer” na MeNB e PDCCP independente na SeNB, como mostrado na Figura 3.4.

Os benefícios esperados desta alternativa são:

- Não há conexão S1-U para a SeNB.
- Baixo impacto no processamento dos protocolos PDCCP/RLC.
- Não é necessário armazenar o tráfego destinado à SeNB.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

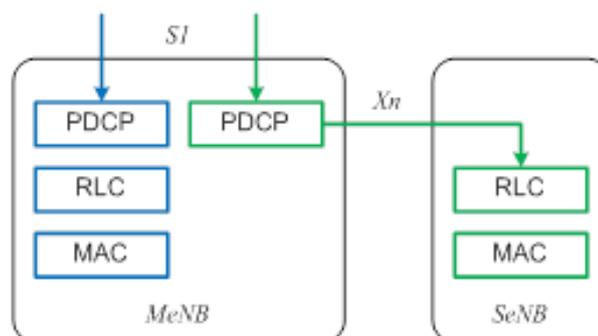
- É necessário que a MeNB faça o roteamento do tráfego da SeNB.
- Não é possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.
- É necessário re-estabelecimento do processamento do PDCCP em casos de “handover”.
- Impactos em segurança por haver criptografia de dados tanto na MeNB quanto na SeNB.



**Figura 3.4:** Alternativa 2A, extraída de [26].

### 3.1.2.3 Alternativa 2C

A conexão S1-U termina na MeNB, sem divisão de “bearer” na MeNB e RLC independente na SeNB, como mostrado na Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Alternativa 2C, extraída de [26].

Os benefícios esperados desta alternativa são:

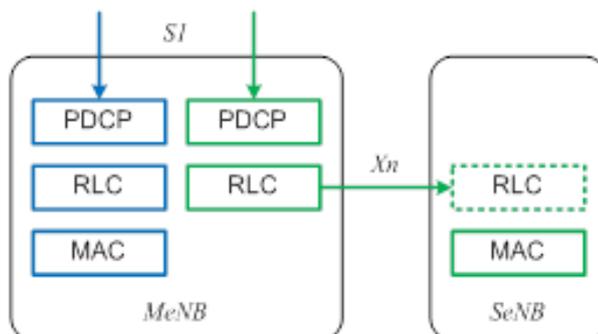
- Não há conexão S1-U para a SeNB.
- Simplifica as operações da MeNB, uma vez que a mesma não precisa mais realizar o processamento da camada RLC.
- Sem impactos de segurança por haver criptografia de dados apenas na MeNB.
- Mudança da conexão do usuário entre SeNBs não requer troca de mensagens entre as SeNBs.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

- É necessário rotear, processar e armazenar o tráfego na MeNB no nível da camada PDCP.
- Sem suporte para confinamento de tráfego local na SeNB já que o processamento da camada PDCP é feito somente na MeNB.
- Não é possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.

### 3.1.2.4 Alternativa 2D

A conexão S1-U termina na MeNB, sem divisão de “bearer” na MeNB e master-slave RLCs, como mostrado na Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Alternativa 2D, extraída de [26].

Os benefícios esperados desta alternativa são:

- Não há conexão S1-U para SeNB.
- Sem impactos de segurança por haver criptografia de dados apenas na MeNB.
- Perda de pacotes entre MeNB e SeNB podem ser resolvidas a partir do pedido automático de repetição presente no RLC.
- Mudança da conexão do usuário entre SeNBs não requiere troca de mensagens entre as SeNBs.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

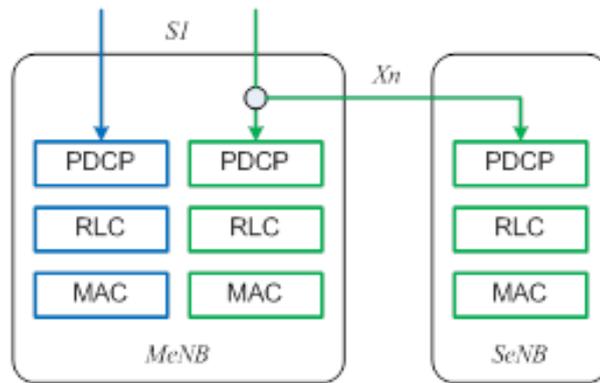
- É necessário rotear, processar e armazenar o tráfego na MeNB no nível da camada PDCP.
- A latência no “backhaul” impacta nas retransmissões realizadas no protocolo RLC.
- Sem suporte para confinamento de tráfego local na SeNB já que o processamento da camada PDCP e parte da camada RLC é feito somente na MeNB.
- Não é possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.

### 3.1.2.5 Alternativa 3A

S1-U termina na MeNB, divisão de “bearer” na MeNB e PDCPs independentes, como mostrado na Figura 3.7.

Os benefícios esperados desta alternativa são:

- MeNB não precisa armazenar o tráfego da SeNB.
- Os requisitos do “backhaul” entre MeNB e SeNB são mais flexíveis.
- Baixo impacto nas camadas PDCP/RLC.



**Figura 3.7:** Alternativa 3A, extraída de [26].

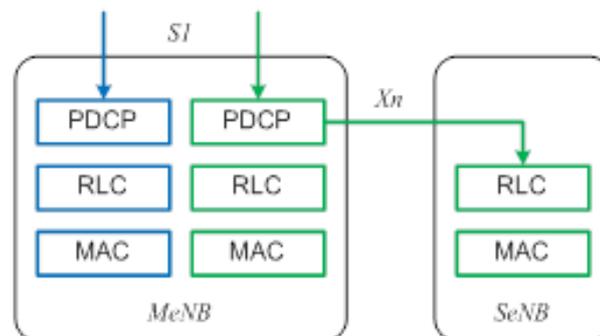
- É possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

- Conexão S1-U é necessária para a SeNB.
- A MeNB precisa rotear o tráfego destinado à SeNB
- Necessária nova camada acima do PDCP para ordenação de pacotes, uma vez que uma única aplicação pode ter seu tráfego transmitido por MeNB e SeNB simultaneamente.
- Impactos em segurança por haver criptografia de dados tanto na MeNB quanto na SeNB.

### 3.1.2.6 Alternativa 3C

A conexão S1-U termina na MeNB, divisão de “bearer” na MeNB e RLC independente na SeNB, como mostrado na Figura 3.8.



**Figura 3.8:** Alternativa 3C, extraída de [26].

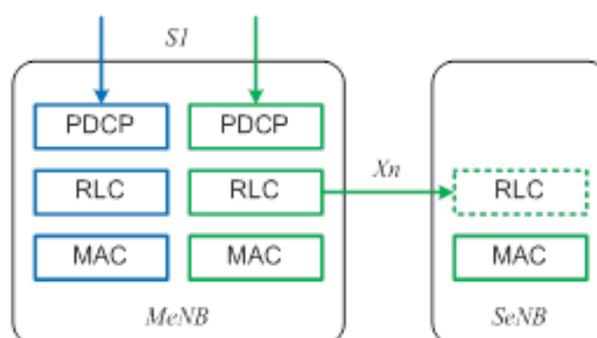
Os benefícios esperados desta alternativa são:

- Não há conexão S1-U para SeNB.

- Handover entre SeNBs não requiere re-estabelecimento do processamento do protocolo PDCP.
  - É possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.
  - Sem impactos de segurança por haver criptografia de dados apenas na MeNB.
- Os inconvenientes esperados desta alternativa são:
- É necessário rotear, processar e armazenar o tráfego na MeNB.
  - Sem suporte para confinamento de tráfego local na SeNB já que o processamento da camada PDCP é feito somente na MeNB.

### 3.1.2.7 Alternativa 3D

A conexão S1-U termina na MeNB, divisão de “bearer” na MeNB e master-slave RLCs, como mostrado na Figura 3.9.



**Figura 3.9:** Alternativa 3D, extraída de [26].

Os benefícios esperados desta alternativa são:

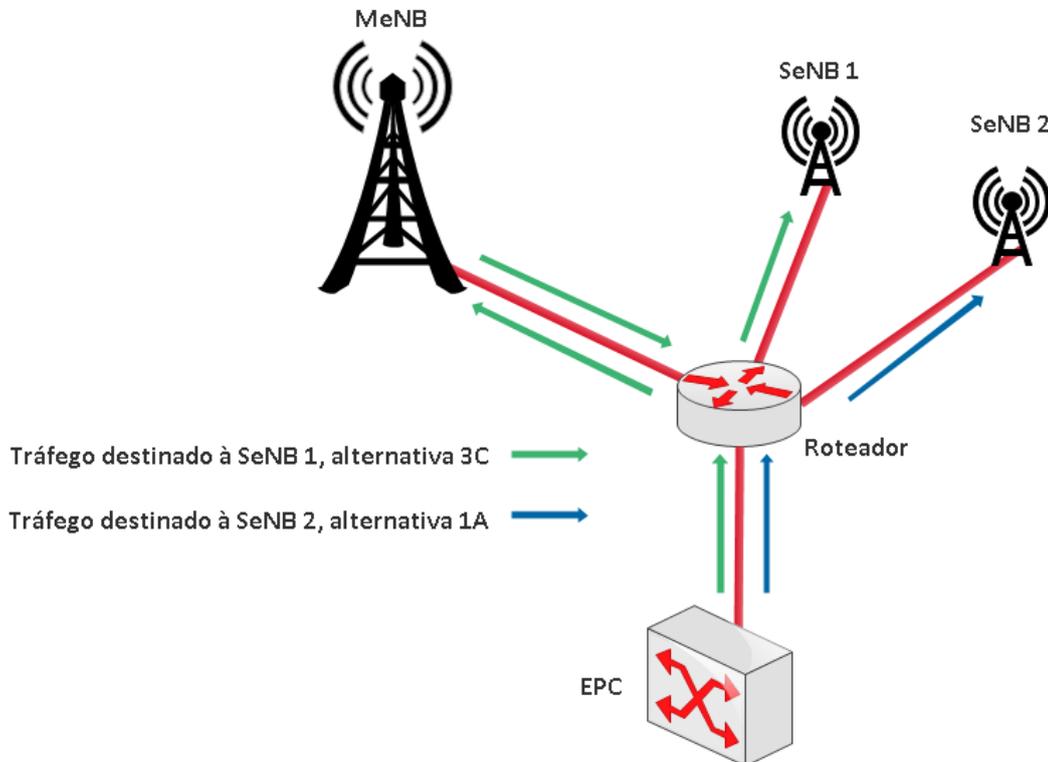
- Não há conexão S1-U para SeNB.
- Handover entre SeNBs não requiere re-estabelecimento do processamento do protocolo PDCP.
- Sem impactos de segurança por haver criptografia de dados apenas na MeNB.
- É possível dividir o tráfego do usuário entre MeNB e SeNB.
- Perda de pacotes entre MeNB e SeNB podem ser resolvidas a partir do pedido automático de repetição presente no RLC.

Os inconvenientes esperados desta alternativa são:

- É necessário rotear, processar e armazenar o tráfego na MeNB.
- Sem suporte para confinamento de tráfego local na SeNB já que o processamento da camada PDCP é feito somente na MeNB.
- A latência no “backhaul” impacta nas retransmissões realizadas no protocolo RLC.

### 3.1.3 Configurações de “backhaul”

Uma típica configuração de “backhaul” é possuir um roteador como ponto de agregação entre MeNB e SeNBs como mostrado na Figura 3.10.



**Figura 3.10:** “Backhaul” com roteador entre MeNB e SeNB.

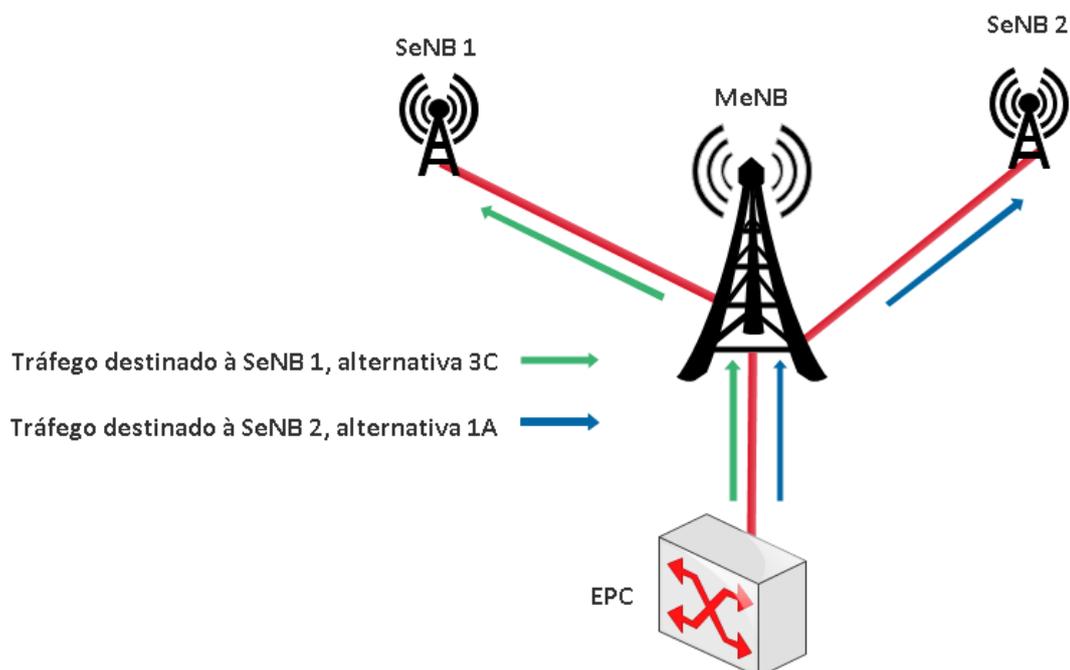
Este esquema permite que o backhaul das SeNBs não impacte no da MeNB e vice-versa, o que é uma opção favorável para a arquitetura 1A, do plano de usuário. No entanto, para a arquitetura 3C, do plano de usuário, o esquema da Figura 3.10 implica em roteamentos extras entre MeNB e o roteador, como mostrado em verde.

Outro esquema possível é o da Figura 3.11, onde a MeNB é responsável pelo roteamento dos pacotes destinados às SeNBs, o que não impacta negativamente a arquitetura 3C.

Outra consideração importante a respeito do “backhaul” é que para todos os casos de realização de conectividade dual, adota-se “backhaul” não ideal, a fim de abranger os casos mais críticos de implantação de redes. O “backhaul” ideal é caracterizado por conexão de fibra óptica, com latência de menos de 2,5 microssegundos, sem contar com o atraso de propagação no cabo. Já o não ideal, é caracterizado para várias tecnologias, com latências da ordem de microssegundos [28].

## 3.2 Algoritmo de “Sleep Mode”

O algoritmo de “sleep mode” é a principal contribuição deste trabalho e é concebido a partir das definições de conectividade dual apresentadas neste capítulo, definindo os momentos de ativação e desativação de SeNBs na rede. Como exposto no Capítulo 1, os demais algoritmos



**Figura 3.11:** “Backhaul” considerando MeNB como roteador para a SeNB.

presentes na literatura não levam em conta a possível limitação de capacidade nas SeNBs para a decisão de estabelecimento de uma conexão no plano de usuário, o que pode levar à possíveis perdas de pacotes indesejadas e aumento de atraso na rede. O algoritmo proposto neste trabalho é dividido entre o fluxograma de ativação das SeNBs e desativação das mesmas. No entanto, antes de abordar seu funcionamento em si, é preciso esclarecer as premissas utilizadas para a formulação do algoritmo.

### 3.2.1 Premissas do Algoritmo Proposto

Há várias formas de estimar a posição e velocidade do usuário como “Assisted-GPS” ou “Observed Time Difference of Arrival” [32]. Partindo disto, as estimativas são consideradas ideais de forma que a MeNB possa se basear nestes parâmetros para a realização do algoritmo.

Outro fator importante para o funcionamento do algoritmo é o uso de sinais de referência. Estes sinais são comumente utilizados em situações de “handover” como descrito no Capítulo 2. O uso dos mesmos é possível porque é assumido que a potência consumida pela “small cell” em “sleep mode” é suficiente para a transmissão periódica de sinais de referência.

### 3.2.2 Fluxograma de Ativação das SeNBs

A Figura 3.12 mostra o fluxograma de ativação das SeNBs, explicitando a velocidade dos usuários e sinais de referência, que são dados coletados a partir das premissas adotadas no trabalho. Nesta seção também são explicadas detalhadamente as principais etapas de funcionamento do algoritmo:

- Velocidade do usuário maior que limiar? - Usuários abaixo de um limiar de velocidade

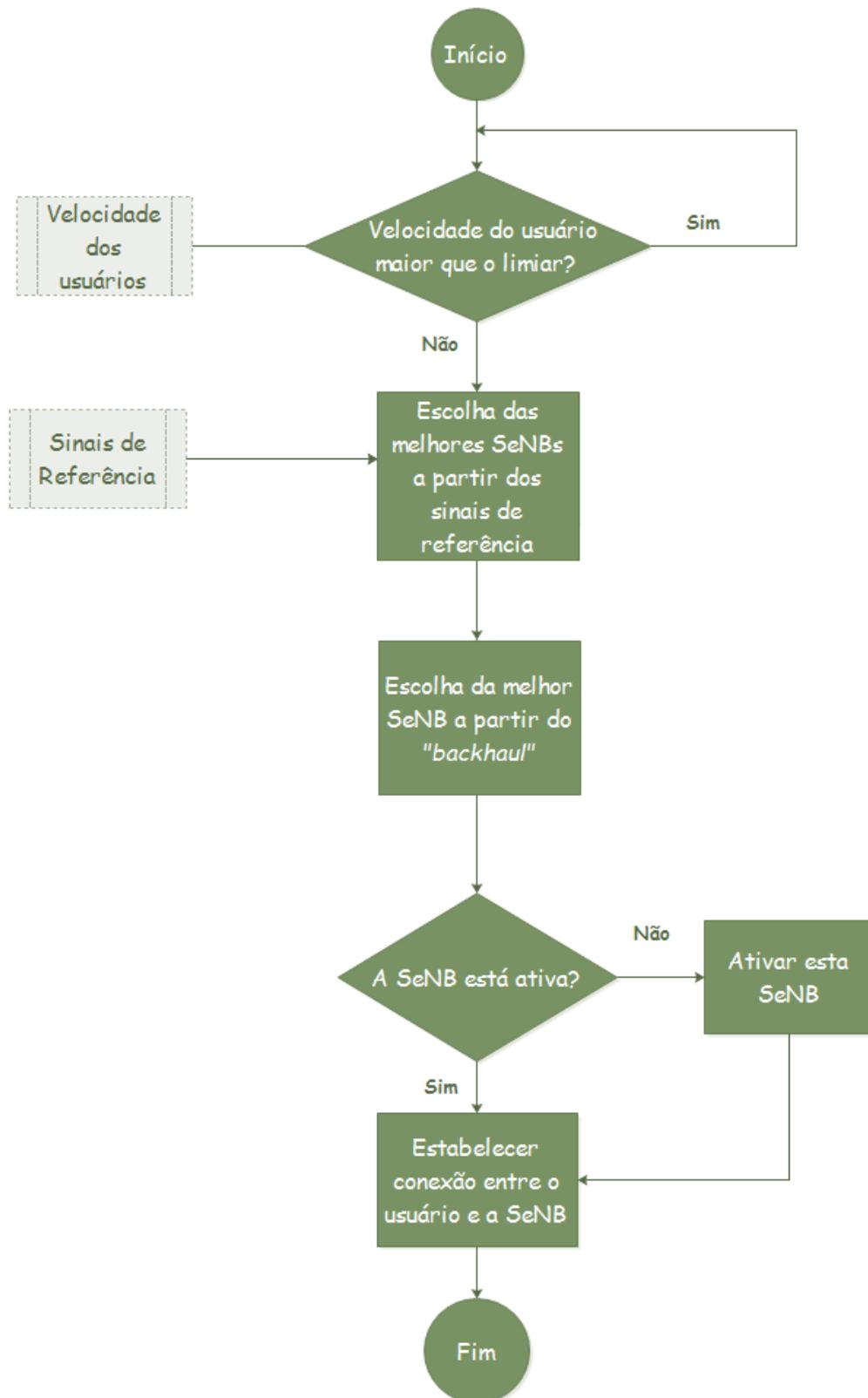
regulável estão aptos a se conectar à uma SeNB. Esta limitação se justifica pelo fato de que usuários com alta mobilidade possivelmente não poderão ser atendidos pela cobertura de uma SeNB por muito tempo, acionando a ativação e desativação de várias SeNBs em um curto período de tempo, resultando em excessivas trocas de mensagens de controle e desperdício de energia da rede.

- Escolha das melhores SeNBs a partir dos sinais de referência - A decisão pelas melhores SeNBs para atender a demanda de tráfego do usuário é feita a partir dos sinais de referência como usualmente realizado em situações de “*handover*” como descrito no Capítulo 2. Ressalta-se, no entanto, que os sinais de referência são utilizados apenas para ajudar na decisão de transmitir ou não o tráfego do usuário através de uma SeNBs, mas não são usados para “*handover*” entre SeNBs, uma vez que o plano de controle permanece conectado à MeNB.
- Escolha da melhor SeNB a partir do “*backhaul*” - A escolha da SeNB que efetivamente atenderá a demanda é feita considerando a SeNB com menor tráfego no “*backhaul*”, para que nenhuma SeNB fique sobrecarregada.
- A SeNB está ativa? - No início da conexão entre o usuário e a SeNB, esta é ativada, caso ainda não tenha sido ativada até agora.

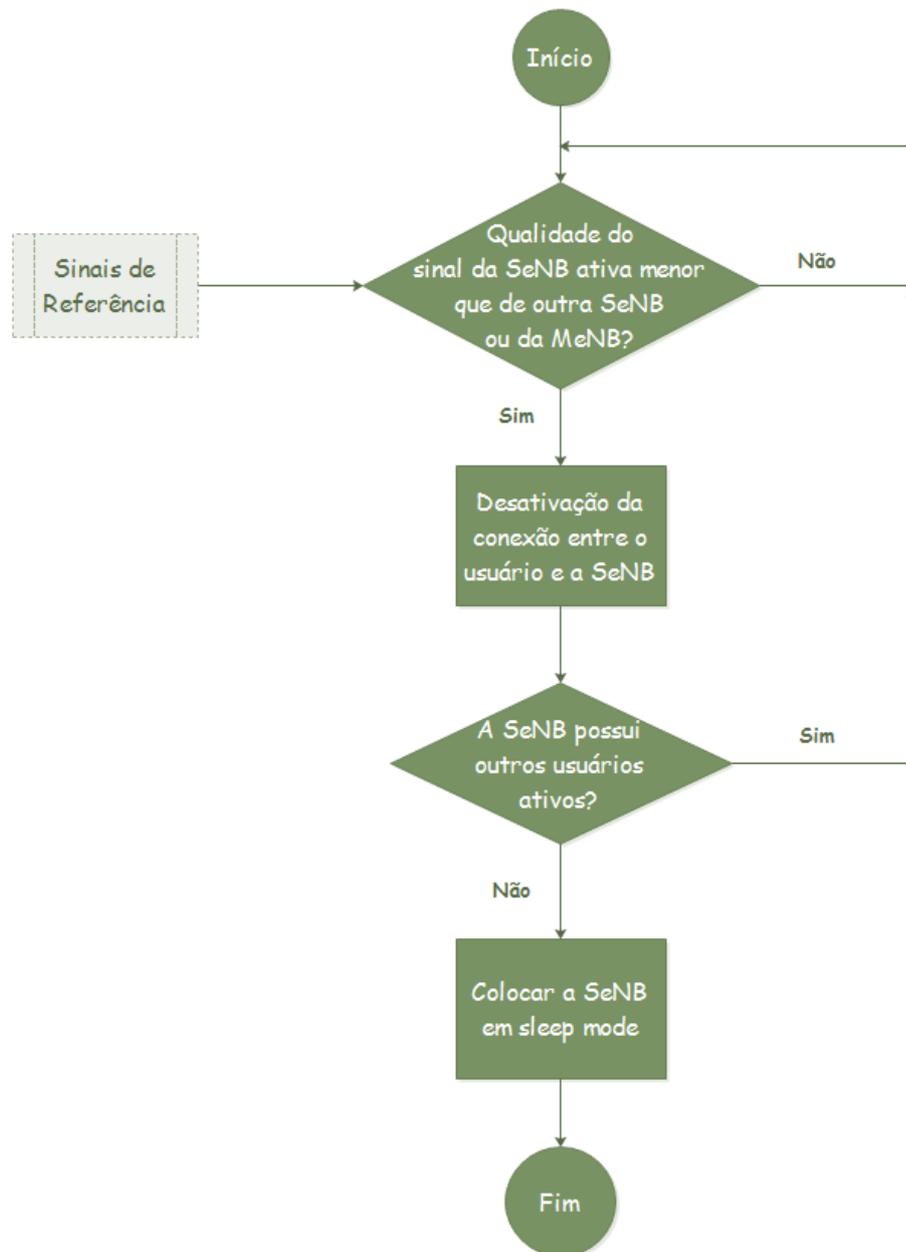
### 3.2.3 Fluxograma de Desativação das SeNBs

A Figura 3.13 mostra o fluxograma de desativação das SeNBs, explicitando os sinais de referência, que são dados coletados a partir das premissas adotadas no trabalho. Como no fluxograma de ativação das SeNBs, as principais etapas são detalhadamente explicadas:

- Qualidade do sinal da SeNB ativa menor que de outra SeNB ou da MeNB? - Para a desativação das SeNBs, assume-se que se a qualidade do sinal entre o usuário e a sua SeNB ativa for menor que a qualidade do sinal entre o usuário e outra SeNB ou a própria MeNB, a conexão entre o usuário e a SeNB é encerrada
- A SeNB possui outros usuários ativos? - Se não houverem outros usuários conectados a SeNB, ela é colocada em “*sleep mode*”.



**Figura 3.12:** Fluxograma proposto para ativação das SeNBs.



**Figura 3.13:** Fluxograma proposto para desativação das SeNBs.

# Capítulo 4

## Simulações e Resultados

Este capítulo evidencia os motivos que levaram à escolha do “*software*” Riverbed Modeler para as simulações deste trabalho, expondo características gerais do simulador. Também são condensadas as principais características utilizadas nas simulações e os resultados obtidos a partir destas são discutidos considerando os benefícios da conectividade dual e do algoritmo proposto.

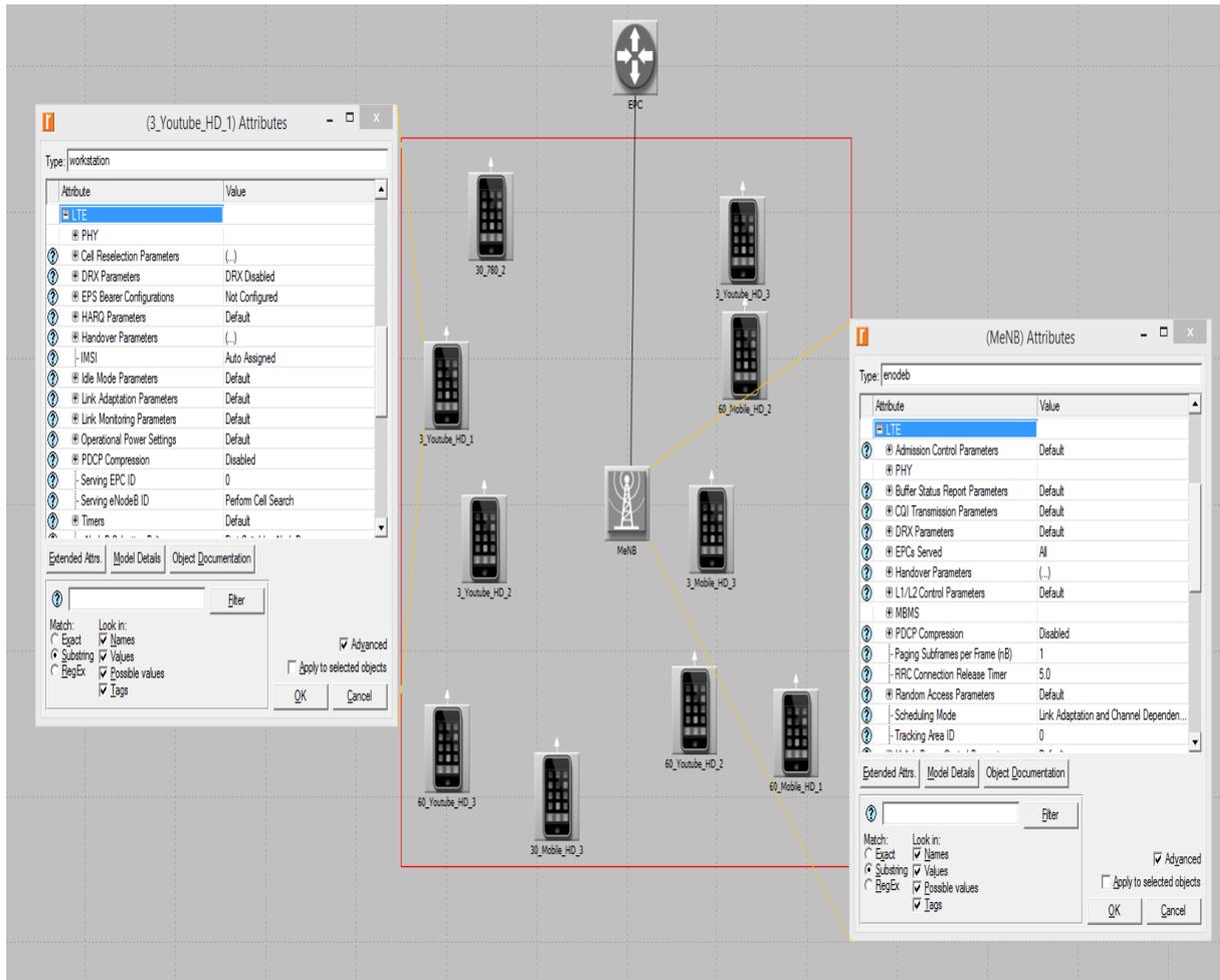
### 4.1 Riverbed Modeler

O Optimized Network Engineering Tool (OPNET) é um simulador de evento discreto voltado para simulações de redes em geral. Atualmente faz parte da empresa de tecnologia da informação Riverbed, e teve seu nome alterado para Riverbed Modeler [29]. O “*software*” possui um módulo chamado Riverbed Modeler, pelo qual é possível realizar simulações de diversas tecnologias como Worldwide Interoperability for Microwave Access (Wimax), LTE, Wi-Fi, dentre outras opções cabeadas e sem fio, além do suporte a uma grande quantidade de protocolos. Os pontos fortes do simulador são sua gama de tecnologias disponíveis, alto nível de detalhamento nas simulações e sua interface gráfica amigável. O Riverbed Modeler é um “*software*” comercial e possui suporte para ensino e pesquisa, sendo um dos simuladores mais utilizados em publicações, dentre os simuladores comerciais [30], [31]. Portanto, sua escolha deu-se devido a seu nível de detalhamento e extenso uso tanto no meio industrial quanto acadêmico.

#### 4.1.1 Ambiente do Simulador

O Riverbed Modeler possui interface gráfica amigável e diversas especificações para redes LTE. A Figura 4.1 mostra uma possível configuração de redes, onde todos os principais elementos de LTE estão presentes, bem como alguns dos parâmetros do simulador, que incluem características de toda a pilha de protocolos LTE.

Além das funções descritas na Figura 4.1, o Riverbed Modeler permite a customização dos seus módulos padrões em vários níveis, como mostrado na Figura 4.2. Através da customização de módulos, foi possível a alteração dos módulos padrões de LTE disponíveis no simulador para adaptá-los à conectividade dual que, por ser um tema bastante recente, ainda não possui



**Figura 4.1:** Características de LTE no simulador.

implementação comercial.

Neste trabalho foi feita programação nos módulos de LTE do Riverbed Modeler para inclusão das seguintes características:

- Alteração do padrão de conexão entre o usuário e a eNB para implementação da conexão no plano de controle sempre entre o usuário e a MeNB.
- Criação de novos módulos que permitissem a comunicação entre MeNB e SeNB, além da definição de troca de pacotes e estabelecimento da conexão no plano de usuário entre a SeNB e o usuário.
- Alteração do uso dos sinais de referência para adaptação ao algoritmo de “*sleep mode*”.
- Programação do algoritmo em si para definição do processo de “*sleep mode*”.
- Formulação de novas características de consumo de energia no simulador, para mensuração adequada do consumo energético das SeNBs.

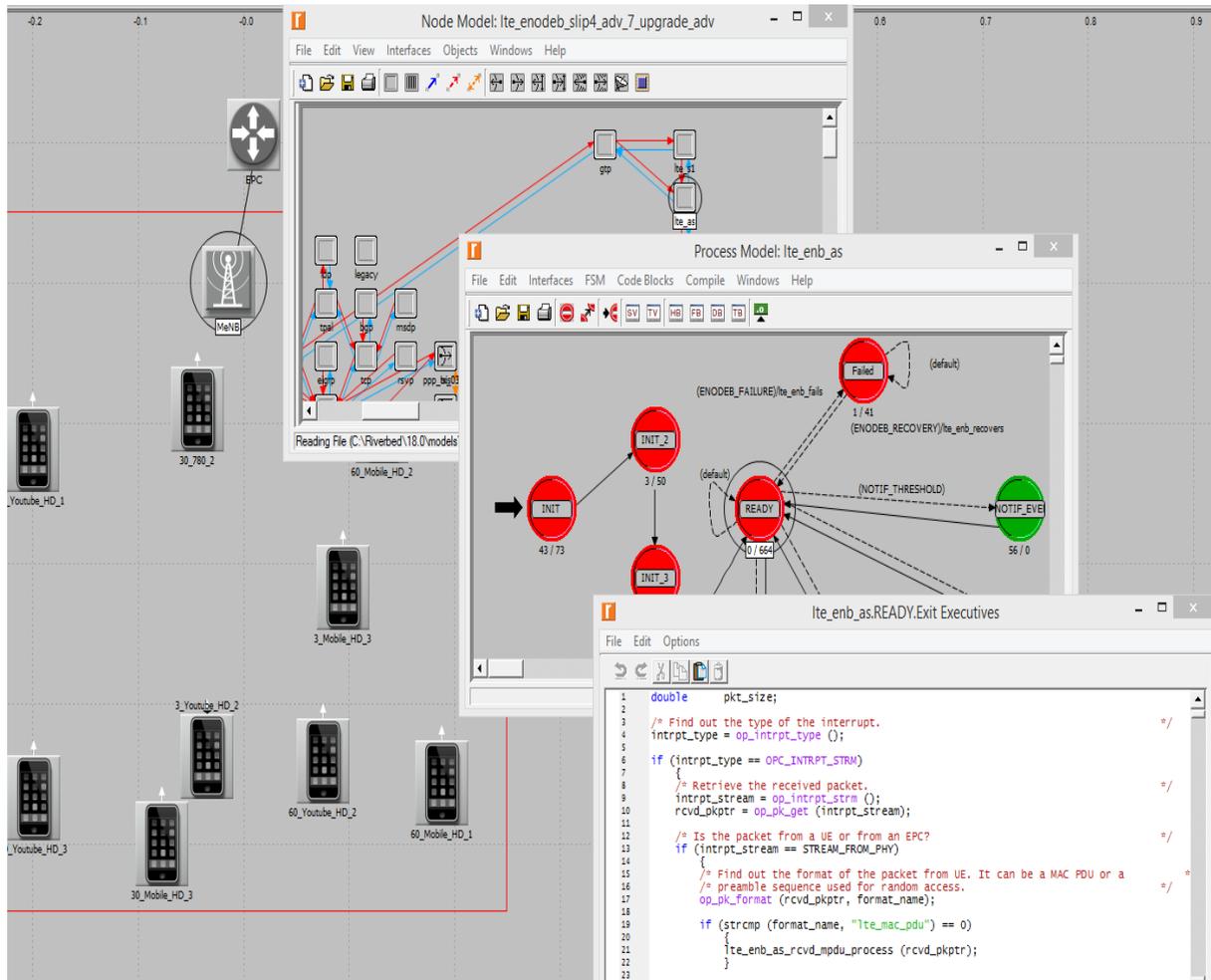


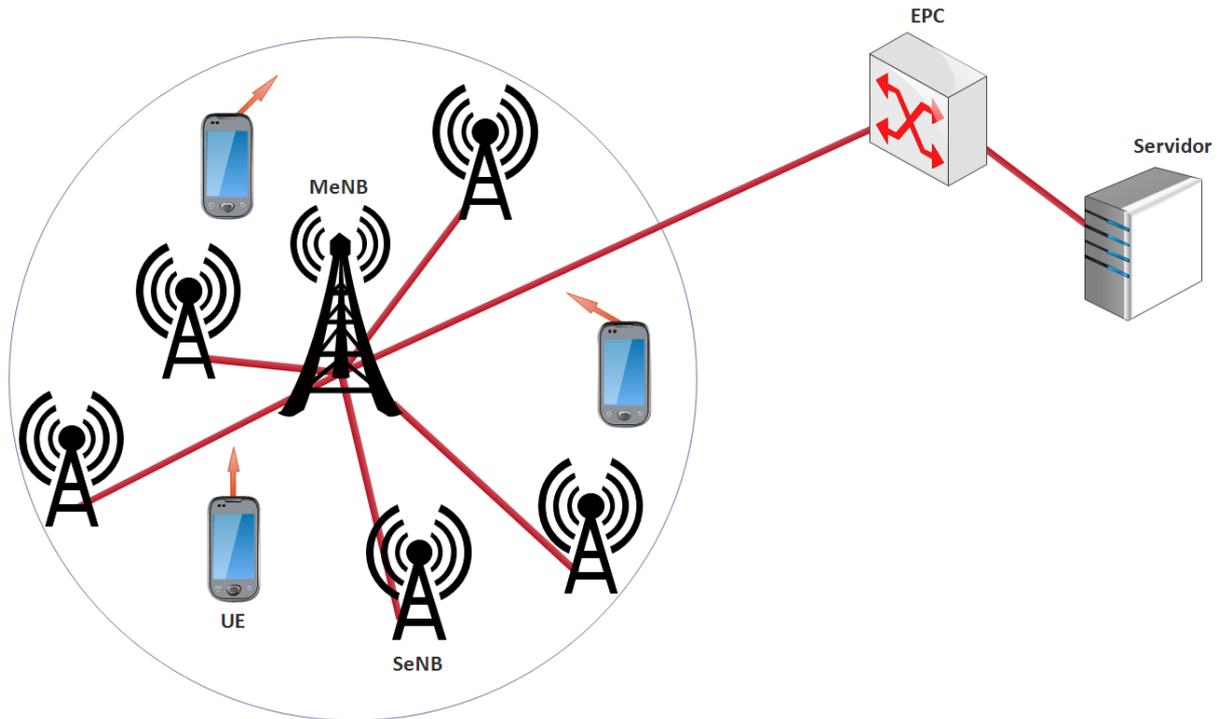
Figura 4.2: Módulos e ferramentas de programação no simulador.

## 4.2 Definição das Simulações

### 4.2.1 Visão Geral dos Cenários

Após a escolha do simulador, os cenários elaborados são obtidos a partir da premissa básica da Figura 4.3.

É considerada uma “macro cell” (MeNB), que é ligada por fibra óptica a oito “small cells” (SeNB) distribuídas randomicamente dentro de sua área de cobertura. A rede de acesso é considerada ideal e o “backhaul” entre SeNBs e a MeNB é assumido não ideal, com latência fixa de 2 ms, o que é compatível com as especificações do 3GPP para “backhaul” não ideal [28]. São definidos também usuários distribuídos aleatoriamente na área de cobertura da MeNB, com mobilidade e tráfego descritos nas Subseções seguintes. As aplicações realizadas são requisitadas ao servidor da Figura 4.3 conectado à rede LTE pela EPC.



**Figura 4.3:** Visão geral dos cenários.

## 4.2.2 Especificações dos Cenários

As simulações são divididas em três cenários A, B e C, nos moldes descritos na visão geral dos cenários. Cada cenário é diferenciado conforme os dados da Tabela 4.1, explicitando o uso de conectividade dual e/ou o uso do algoritmo de “*sleep mode*” proposto neste trabalho. A conectividade dual utilizada no trabalho é modelada conforme os moldes da alternativa 2A, descrita no Capítulo 3.

**Tabela 4.1:** Principais diferenças entre os cenários.

Cenário	Conectividade Dual	Algoritmo
A	Não	Não
B	Sim	Não
C	Sim	Sim

Além das especificações da Tabela 4.1, foram adotados diferentes perfis de transmissão de vídeo como padrão de tráfego para os usuários na rede, com taxas variáveis importadas de vídeos reais para o Riverbed Modeler. A escolha se deve pelo fato de que a aplicação de vídeo é um dos principais tráfegos requisitados nas redes móveis atualmente, e tende a ser a aplicação de maior demanda nos próximos anos [1].

### 4.2.3 Número e Velocidade dos Usuários

As taxas de vídeo utilizadas enquadram-se, em média, às taxas de 0,32 Mbps, 0,74 Mbps ou 1,6 Mbps. A partir de simulações iniciais com estas taxas médias de vídeo, o número de usuários na rede foi escolhido de forma a utilizar a capacidade máxima da MeNB, considerada 75 Mbps, o que é compatível com uma eNB operando com uma banda de 10 MHz [14]. Adicionalmente, foi definida uma variante com outro número de usuários, considerando que a carga na rede é o dobro da capacidade adotada. Esta variante foi inserida a fim de testar a rede em situação de estresse, aproveitando mais a capacidade das SeNBs, que também é considerada de 75 Mbps. As duas vertentes de número de usuários na rede são chamadas de 100% de carga e 200% de carga, de acordo com taxas de pico de 75 Mbps e 150 Mbps, respectivamente. Dessa forma, cada cenário A, B e C é simulado com o número de usuários de acordo com 100% de carga e 200% de carga.

Com a definição do número de usuários, estes são distribuídos igualmente nas velocidades de 3 km/h, 30 km/h e 60 km/h, para que o impacto da mobilidade nas simulações possa ser avaliado com base em diferentes perfis. A distribuição dos usuários é resumida na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Número de usuários distribuídos por taxa média de transmissão e velocidade.

Taxa de transmissão	0,32 Mbps	0,74 Mbps	1,6 Mbps
100% de carga	4 usuários a 3 km/h	5 usuários a 3 km/h	3 usuários a 3 km/h
	4 usuários a 30 km/h	5 usuários a 30 km/h	3 usuários a 30 km/h
	4 usuários a 60 km/h	5 usuários a 60 km/h	3 usuários a 60 km/h
200% de carga	8 usuários a 3 km/h	7 usuários a 30 km/h	6 usuários a 3 km/h
	8 usuários a 30 km/h	7 usuários a 30 km/h	6 usuários a 30 km/h
	8 usuários a 60 km/h	7 usuários a 60 km/h	6 usuários a 60 km/h

### 4.2.4 Modelos de Consumo de Energia Adotados

A fim de avaliar a eficiência do algoritmo de “*sleep mode*” do ponto de vista energético, modelos de consumo energético foram adotados para a SeNB e o “*backhaul*” entre esta e a MeNB. O consumo de energia da MeNB e do “*backhaul*” entre esta e a EPC não é computado uma vez que o algoritmo não visa melhorar a performance energética destes equipamentos. O modelo  $P_n$  representa o consumo da SeNB  $n$  e é dado pela seguinte Equação, extraída de [24]:

$$P_n = N_a(P_{max}l\Delta_p + P_0) \quad (4.1)$$

onde  $N_a$  é número de antenas na estação rádio base,  $P_{max}$  é a sua máxima potência de transmissão,  $l$  varia no intervalo de  $[0, 1]$  representando a carga na estação rádio base, relativa à sua máxima capacidade,  $\Delta_p$  é o fator que evidencia o quanto a potência de transmissão influencia no consumo final da estação rádio base e  $P_0$  é a quantidade de energia consumida quando  $l = 0$ .

A partir da Equação 4.1, a potência da SeNB, quando ativa na rede, é dada pelos valores 2, 6,8 W, 4 e 0,13 W para os parâmetros  $N_{trx}$ ,  $P_0$ ,  $\Delta_p$  e  $P_{max}$  respectivamente, que são valores condizentes com “*small cells*” [24]. Em modo de descanso, não há carga na estação rádio base, o que resulta em  $l = 0$  e  $P_0$  reduzido para 4,3 W.

O modelo de consumo energético  $P_b$  adotado para o “*backhaul*” entre MeNB e SeNB é dado pelo consumo de energia de um comutador. Este equipamento é considerado integrado à MeNB, que realiza o papel de comutação entre os pacotes das SeNBs e a EPC.  $P_b$  possui dois fatores principais: um consumo de energia dependente da carga  $A_{gswitch}$  no comutador e outro relativo ao seu funcionamento básico independente da carga [33]. O parâmetro que pesa a relevância de cada fator no consumo  $P_b$  é  $\alpha$ , definido no intervalo  $[0, 1]$ , como mostrado na seguinte Equação, baseada em [34]:

$$P_b = \alpha P_{bmax} + (1 - \alpha) \frac{A_{gswitch}}{A_{gmax}} P_{bmax} \quad (4.2)$$

onde  $P_{bmax}$  representa a máxima potência no comutador quando todas as suas interfaces estão em uso, enquanto  $A_{gmax}$  é a máxima quantidade de tráfego que o comutador comporta. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $A_{gmax}$  e  $P_{bmax}$  são adotados como 0,8, 600 Mbps e 300 W, respectivamente [8].

#### 4.2.5 Cálculo de Energia por Bit

Para o cálculo de energia por bit, como definido na Equação 2.1, são calculadas  $E$  e  $R$ .  $E$  é calculada com base no consumo  $P_n$  de todas as SeNBs e no consumo do “*backhaul*”  $P_b$ , como mostrado na Equação seguinte:

$$E = \int_0^T \left( \sum_{n=1}^{n_{máx}} P_n + P_b \right) dt \quad (4.3)$$

onde  $T$  representa o tempo total em que as aplicações de vídeo estão ativas na rede e  $n_{máx}$  representa o número máximo de “*small cells*” na rede. Para o cálculo de  $R$  é considerado o tráfego  $R_n$  transmitido por cada SeNB, como mostrado na Equação seguinte:

$$R = \int_0^T \left( \sum_{n=1}^{n_{máx}} R_n \right) dt \quad (4.4)$$

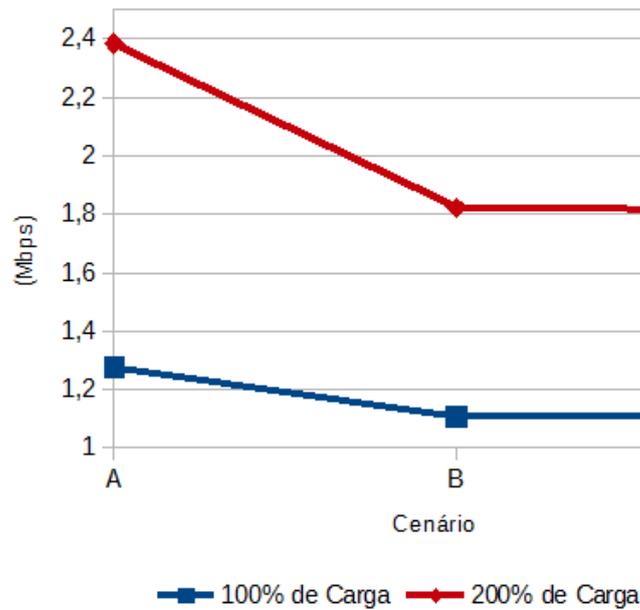
onde  $T$  representa o tempo total em que as aplicações de vídeo estão ativas na rede e  $n_{máx}$  representa o número máximo de “*small cells*” na rede. A partir de  $E$  e  $R$  é obtida a energia por bit  $E_b$  resultante no sistema.

### 4.3 Resultados

Os resultados obtidos são discutidos quanto aos ganhos do uso de conectividade dual e do algoritmo proposto neste trabalho e divididos em relação à tráfego na rede, atraso e energia por bit.

### 4.3.1 Tráfego na Rede

A fim de evidenciar o impacto da conectividade dual em LTE e do algoritmo de “*sleep mode*”, são avaliados gráficos de tráfego de “*backhaul*” tanto no núcleo da rede como entre as SeNBs e a MeNB. A Figura 4.4 mostra a média do tráfego no “*uplink*” entre a EPC e a MeNB, que representa essencialmente pacotes de controle trocados entre MeNB e EPC ou entre SeNB e EPC, uma vez que o tráfego definido nos cenários concentra-se no “*downlink*”.

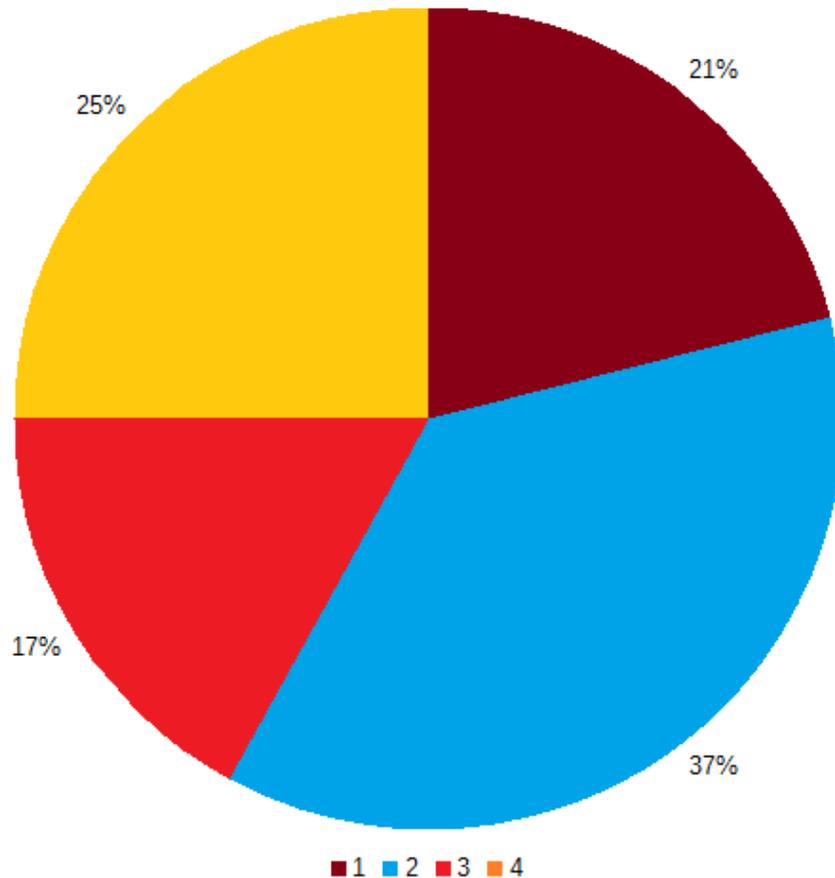


**Figura 4.4:** Média do tráfego no núcleo da rede.

Os valores da Figura 4.4 indicam que a quantidade de tráfego no núcleo da rede é menor quando se usa a conectividade dual, presente nos cenários B e C, já que não ocorrem “*handovers*” neste modo, poupando troca de mensagens extras entre a EPC e as estações rádio base. O algoritmo desenvolvido neste trabalho não impacta significativamente neste resultado, uma vez que sua proposta não abrange soluções para o núcleo da rede. Constata-se também menor tráfego no caso de cenários com 100% de carga, pois com o menor número de usuários, a quantidade de “*handovers*” e demais mensagens de controle no núcleo da rede é naturalmente menor. Também são menores os ganhos advindos da conectividade dual em caso de 100% de carga, que são em torno de 15%, enquanto no caso de 200% de carga os ganhos são aproximadamente de 25%. Como a conectividade dual é concebida como solução para redes ultra densas, quanto maior o número de usuários, maior o ganho resultante na rede. Além disso, o tráfego de 2,4 Mbps no núcleo da rede, em caso de 200% de carga, é resultante de um sistema de uma MeNB ligada a oito SeNBs, mas a EPC pode estar ligada a vários arranjos como este, que podem impactar ainda mais na utilização do “*backhaul*” no núcleo da rede.

Outro resultado importante é a quantidade aproximada de tráfego no “*backhaul*” entre SeNB e MeNB, para cada um dos cenários A, B e C, obtido a partir da média entre os casos de 100% e 200% de carga. A Figura 4.5 representa a porcentagem do tráfego total, entre SeNBs e MeNBs, transmitido por cada SeNB no cenário A. Apesar de serem oito SeNBs, algumas não estão indicadas por terem tido uma parcela de tráfego correspondente a menos de 1% do total. Esta divisão desbalanceada do tráfego é ocasionada por falhas de “*handover*” que acabam impedindo que o usuário se conecte com algumas SeNBs, além de que a distribuição dos usuários

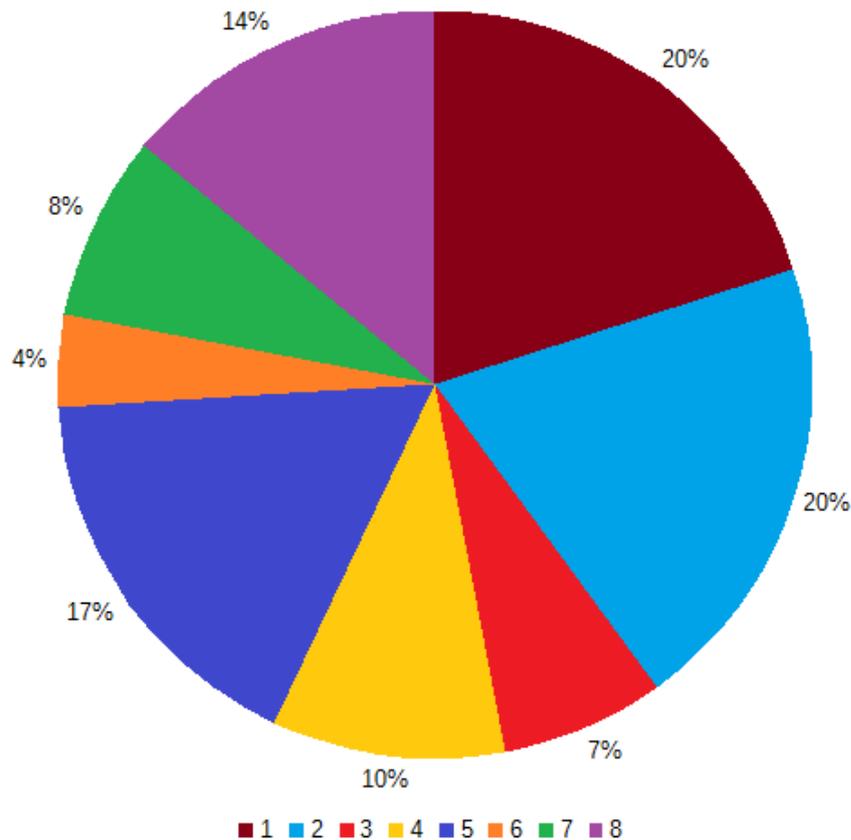
e SeNBs, por ser aleatória, não necessariamente favorecerá a transmissão balanceada do tráfego de “backhaul”. Esta conjuntura agrava os desníveis entre a quantidade de tráfego transmitido em cada SeNB, resultando em maior taxa de transmissão para apenas quatro SeNBs do sistema. Isto torna SeNBs vizinhas ociosas além de possivelmente sobrecarregar o “backhaul” de outras SeNBs, potencializando perda de pacotes e latência na rede.



**Figura 4.5:** Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário A.

Na Figura 4.6, é mostrada a porcentagem do tráfego total, entre SeNBs e MeNBs, transmitido por cada SeNB no cenário B. Neste cenário, já que não há “handover” e, conseqüentemente, as falhas do mesmo não interferem na transmissão de tráfego, uma melhor distribuição de carga ocorre entre as SeNBs. No entanto, ainda existem grandes desníveis entre as cargas presentes em cada “backhaul”.

Na Figura 4.7, é mostrada a porcentagem do tráfego total, entre SeNBs e MeNBs, transmitido por cada SeNB no cenário C. Neste cenário, a presença do algoritmo proporciona um balanço muito superior entre as cargas presentes em cada “backhaul”. Em comparação à Figura 4.6, é possível notar que, em geral, SeNBs que detinham uma maior parcela de tráfego tiveram esta parcela reduzida, enquanto SeNBs que detinham uma menor parcela de tráfego tiveram esta parcela ampliada. Considerando uma situação onde todas as SeNBs possuem um “backhaul” representando 12,5% do tráfego total, o erro quadrático médio para o cenário B é em torno de 27,75%, enquanto o erro quadrático médio para o cenário C é de aproximadamente 7,5%. Este erro poderia ser reduzido ainda mais dependendo do número de SeNBs e suas posições na rede. Esta melhor distribuição de cargas na rede permite o uso eficiente das SeNBs além de reduzir



**Figura 4.6:** Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário B.

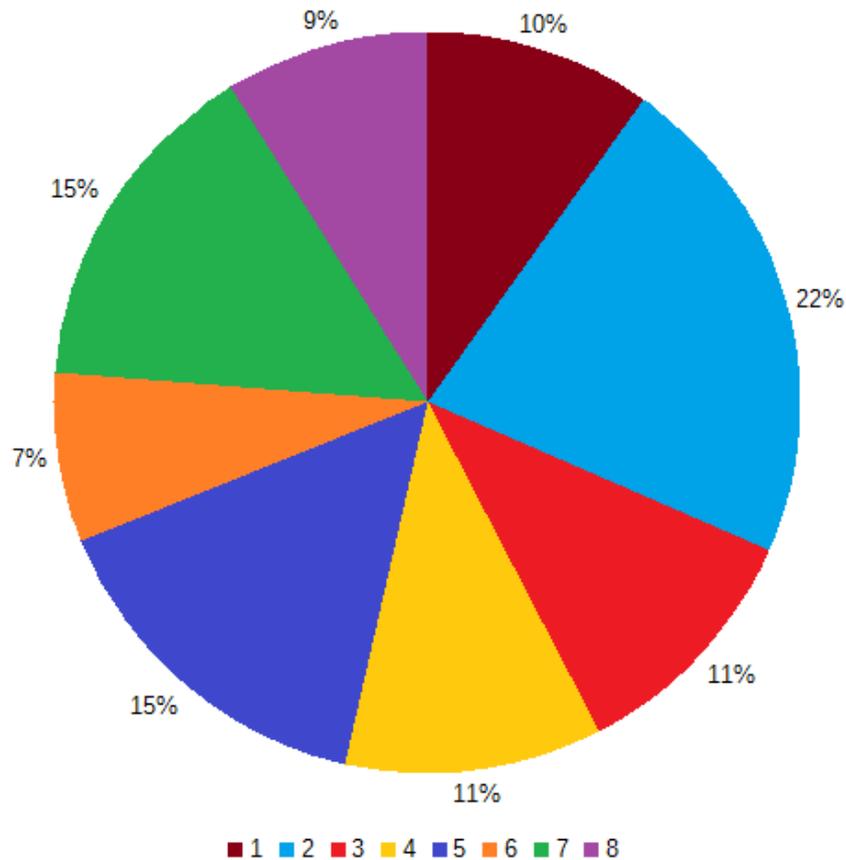
latência e perda de pacotes indesejadas enquanto recursos da rede podem estar ociosos.

### 4.3.2 Atraso e Energia por Bit

A conectividade dual e o algoritmo proposto também são avaliados quanto ao atraso das aplicações realizadas pelos usuários e a energia por bit média do sistema em cada cenário. Na Figura 4.8, é avaliada a média do atraso fim-a-fim dos usuários em suas aplicações na rede.

Os resultados da Figura 4.8 apontam que o atraso na rede é muito maior sem a conectividade dual, devido aos constantes “*handovers*” e falhas dos mesmos, acarretando também em um maior atraso para o caso de 200% de carga na rede, onde o maior número de usuários acarreta um maior número de “*handovers*”. O atraso pode ser reduzido nos casos de conectividade dual, onde o plano de controle permanece ligado à MeNB, e ainda que haja transmissão dos dados do plano de usuário por diferentes SeNBs, há menos atraso envolvido do que se for considerado o caso do cenário A. Também devido à conectividade dual, o atraso nas redes pode ser ligeiramente maior no caso com 100% de carga como evidenciado no cenário B e C. Isto se deve ao fato de que os benefícios da conectividade dual, como também apontado na Figura 4.4, são potencializados com o aumento de carga na rede. Outro ponto relevante da Figura 4.8 são os valores de atraso obtidos no cenário C, que são menores que todos os valores médios obtidos nos cenários A e B, ratificando a eficiência do algoritmo proposto neste trabalho para a diminuição de atrasos e melhor desempenho da rede.

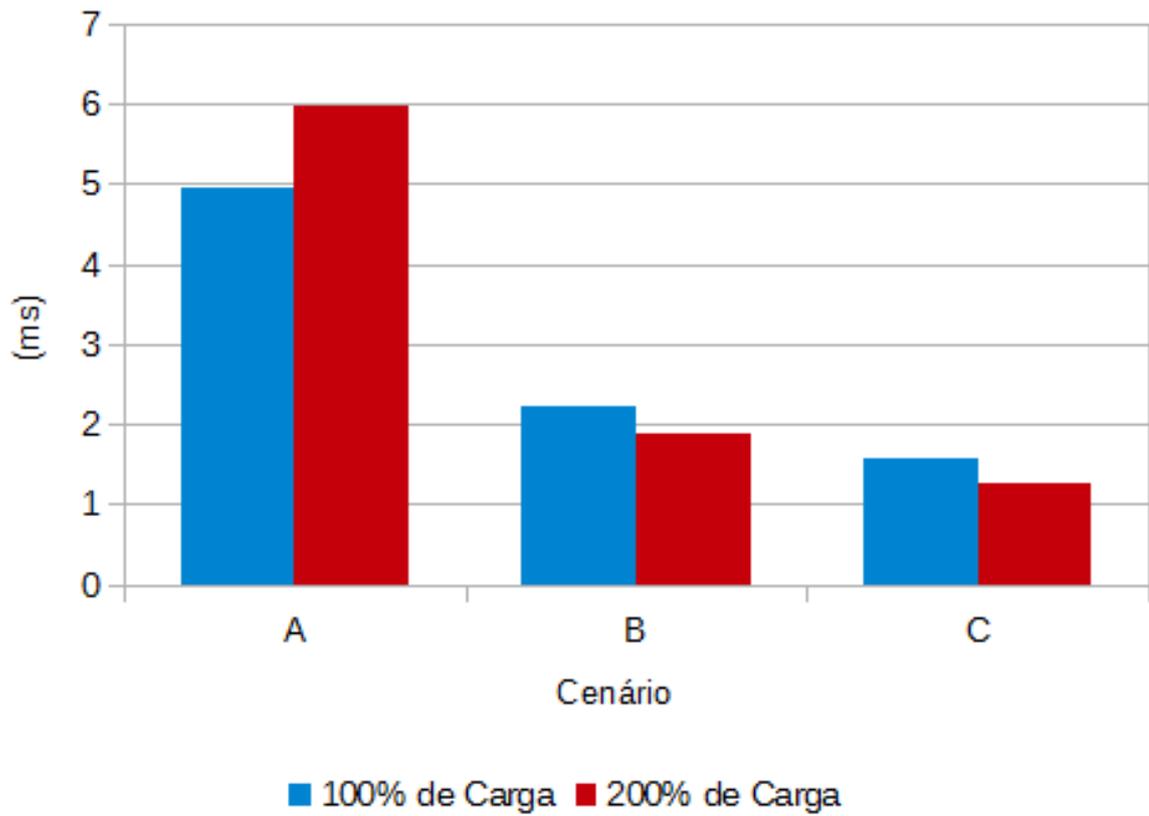
Para avaliar os impactos energéticos entre os diferentes cenários simulados, resultados de



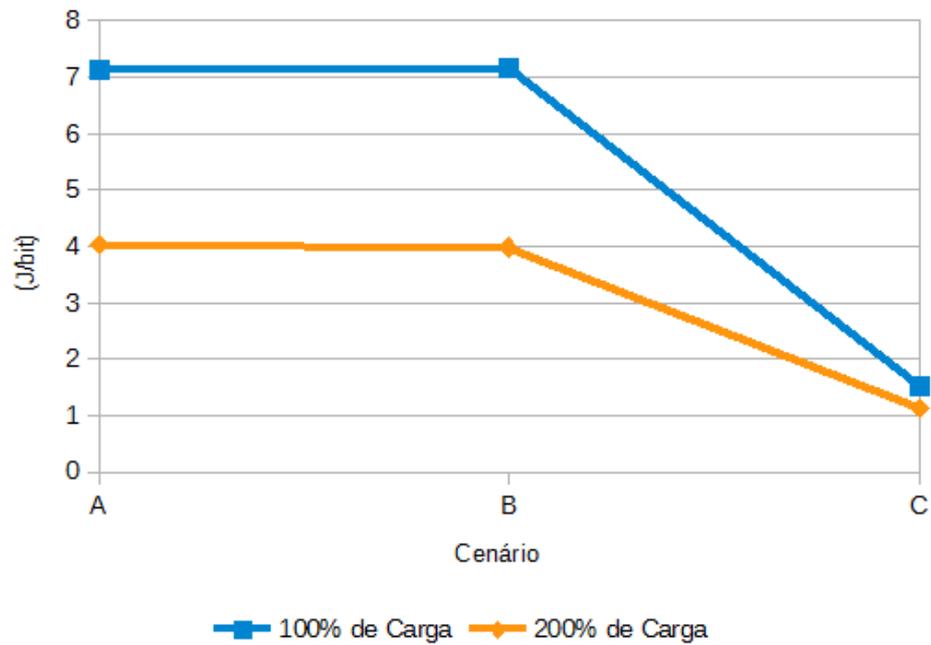
**Figura 4.7:** Tráfego no backhaul entre SeNB e MeNB para as SeNBs de 1 a 8, no cenário C.

energia média por bit, em joules por bit, são expostos na Figura 4.9.

É possível inferir da Figura 4.9 que mais energia é gasta para o envio de bits no caso de 100% de carga. Isto se deve ao fato de que a capacidade das SeNBs é menos explorada neste caso, resultando num dispêndio desnecessário de energia. Devido a este dispêndio, o algoritmo permite reduzir em até 80% o consumo de energia na rede para o caso de 100% de carga. Já no caso de 200% de carga, a redução no consumo é de aproximadamente 70%, uma vez que como há mais carga na rede, os momentos ociosos das SeNBs, nos quais estas poderiam entrar em “*sleep mode*”, são menores. Esta economia de energia 10% menor, no entanto, é compensada pelo maior tráfego na rede, resultando em valores similares de energia por bit para os casos de 100% e 200% de carga no cenário C. Observa-se também, pelos valores nos cenários A e B, que a conectividade dual não impacta significativamente na eficiência energética da rede.



**Figura 4.8:** Média do atraso fim-a-fim dos usuários na rede.



**Figura 4.9:** Energia por bit para cada cenário e condição de carga.

# Capítulo 5

## Conclusão

Este trabalho analisou o impacto da conectividade dual em redes LTE e propôs um algoritmo de “*sleep mode*” neste contexto. As conclusões foram obtidas a partir da avaliação de extensas simulações envolvendo diversas especificações pertinentes ao contexto de redes LTE e conectividade dual.

Constatou-se, nas simulações realizadas, que a conectividade dual é essencial na redução do atraso no tráfego em redes LTE, e reduz a carga presente no núcleo da rede, impactando não só na experiência do usuário mas também na utilização da rede de uma forma geral.

Em relação ao algoritmo proposto, os resultados atestaram sua eficiência tanto do ponto de vista energético, com reduções no consumo de energia que podem chegar a 80%, quanto na experiência do usuário na rede em relação ao atraso. Os resultados também apontaram que a carga no “*backhaul*” é melhor distribuída com o uso do algoritmo de “*sleep mode*”, diminuindo a probabilidade de possíveis gargalos na rede e equilibrando o uso das SeNBs no contexto de conectividade dual. O conjunto, portanto, destes resultados demonstrou que o algoritmo proporciona um uso eficiente de SeNBs em conectividade dual e benefícios à infra-estrutura da rede. Num contexto de crescente demanda por soluções mais eficientes do ponto de vista energético, o algoritmo se destaca por acarretar grande redução do consumo de energia das SeNBs, tornando seu uso mais atraente na densificação de redes LTE.

Além de sua função em LTE, o algoritmo possui resultados que também são desejáveis nas futuras redes de quinta geração (5G), onde a latência máxima para muitas aplicações é menor que 5 ms [35], favorecendo o uso de soluções como a proposta neste trabalho, que proporciona uma menor latência e maior eficiência energética.

Dessa forma, conclui-se que a conectividade dual e o algoritmo de “*sleep mode*” proposto contribuem decisivamente para o uso otimizado dos recursos da rede, e se destacam como soluções que colaboram não apenas para a eficiência da tecnologia LTE, mas também se sobressaem como características relevantes para as futuras redes 5G.

### 5.1 Trabalhos futuros

Dentro do escopo deste trabalho, diversas continuidades podem ser aplicadas como as listadas abaixo:

- Considerar um número maior de SeNBs na área de uma MeNB a fim de avaliar o impacto do número crescente de SeNBs nas simulações do algoritmo proposto.

- Estudar os limites dos ganhos da conectividade dual em contextos de maior carga na rede, traçando perfis de melhor desempenho em relação à quantidade de carga no cenário.
- Avaliar diferentes aspectos de "backhaul" definidos pelo 3GPP, de forma a propor cenários com maiores restrições no "backhaul" e investigar o desempenho do algoritmo nestas condições.
- Realizar simulações envolvendo as outras arquiteturas de conectividade dual propostas pelo 3GPP a fim de comparar as arquiteturas em diversos cenários.
- Expandir as simulações para a realização de cenários 5G, considerando maiores taxas de tráfego e requisitos mais estritos em relação à latência na rede.

# Referências Bibliográficas

- [1] Ericsson Mobility Report, <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-june-2015.pdf>. Acessado em: Julho de 2015.
- [2] Nokia Solutions and Networks, “Technology Vision 2020 Flatten Network Energy Consumption”, 2015.
- [3] En, T.; Zhiwen, P.; Xiaohu, Y.; Yu, W., “A Low Complexity Energy Efficiency Optimization Algorithm Based on Optimal Switching-off eNB Selection in LTE Networks” *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. 2014.
- [4] Dini, P.; Miozzo, M.; Bui, N.; Baldo, N., “A Model to Analyze the Energy Savings of Base Station Sleep Mode in LTE HetNets” *IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*. 2013.
- [5] Ali, A.; Elayoubi, S., “Design and performance evaluation of site sleep mode in LTE mobile networks” *International Teletraffic Congress*. 2014.
- [6] Turyagyenda, C.; Al-Begain, K.; Albeiruti, N., “A Novel Sleep Mode Operation for Energy Efficient LTE Cellular Networks: A sum product algorithm implementation” *International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies*. 2013.
- [7] Zakrzewska, A.; López-Pérez, D.; Kuceray, S.; Claussen, H., “Dual Connectivity in LTE HetNets with Split Control- and User-Plane” *Workshop - Broadband Wireless Access*. 2013.
- [8] Jha, S.; Sivanesan, K.; Vannithamby, R.; Koc, A., “Dual Connectivity in LTE Small Cell Networks” *Globecom 2014: Workshop - Heterogeneous and Small Cell Networks*. 2014.
- [9] Barbera, S.; Gimenez, L.; Sánchez, L.; Pedersen, K.; Michaelsen, P., “Mobility Sensitivity Analysis for LTE-Advanced HetNet Deployments with Dual Connectivity”. 2015.
- [10] Ternon, E.; Agyapong, P.; Hu, L.; Dekorsy, A., “Database-aided Energy Savings in Next Generation Dual Connectivity Heterogeneous Networks” *Mobile and Wireless Networks*. 2014.

- [11] Prasad, A.; Maeder, A., “Energy Saving Enhancement for LTE-Advanced Heterogeneous Networks with Dual Connectivity” *Vehicular Technology Conference*. 2014.
- [12] Zhang, S.; Gong, J.; Sheng Zhou, S.; Niu, Z., “How Many Small Cells Can Be Turned off via Vertical Offloading under a Separation Architecture?” *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015.
- [13] 3GPP, <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. Acessado em: Julho de 2015.
- [14] Cox, C., “An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications.” ed.1, 2012.
- [15] Assyadzily, M.; Suhartomo, A.; Silitonga, A., “Evaluation of X2-Handover Performance Based on RSRP Measurement with Friis Path Loss Using Network Simulator version 3 (NS-3)” *International Conference on Information and Communication Technology*. 2014.
- [16] Small Cell Forum, <http://www.smallcellforum.org/about/about-small-cells/small-cell-definition/>. Acessado em: Julho de 2015.
- [17] Small Cell Forum, “Home: Overview”. versão 101.05.03, 2014.
- [18] Small Cell Forum, “Urban Small Cells: Overview”. versão 104.05.01, 2014.
- [19] Small Cell Forum, “Case Studies: Rural & Remote”. versão 151.05.1.02, 2014.
- [20] Orange, “Orange Fast Facts - Networks”. 2013.
- [21] Cordeiro, L., “Quase um ano depois da regulamentação, adoção de femtocells ainda patina”. Teletime, 2014. <http://convergecom.com.br/teletime/09/09/2014/quase-um-ano-depois-da-regulamentacao-adocao-de-femtocells-ainda-patina/>. Acessado em: Julho de 2015.
- [22] Posseti, H., “Dilma sanciona lei que isenta as smallcells do recolhimento do Fistel”, 2015. <http://convergecom.com.br/teletime/20/01/2015/dilma-sanciona-lei-que-isenta-as-smallcells-do-recolhimento-do-fistel-2/>. Acessado em: Julho de 2015.
- [23] Amaral, B., “Redes heterogêneas demoram a sair do papel”, 2015. <http://convergecom.com.br/teletime/15/05/2015/redes-heterogeneas-demoram-a-sair-do-papel/>. Acessado em: Julho de 2015.
- [24] Hossain, E.; BHARGAVA, V. K.; FETTWEIS G. P., “Green Radio Communication Networks”. *Cambridge: University Press*, 2012.
- [25] Alsharif, M.; Nordin, R.; Ismail, M., “Survey of Green Radio Communications Networks: Techniques and Recent Advances”. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013.
- [26] 3GPP TR 36.842, “Study on Small Cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN; Higher layer aspects.” versão 12.0.0, 2013.

- [27] Wireless World Research Forum, “LTE Small Cell Enhancement by Dual Connectivity.” *The WWRF Outlook Visions and research directions for the Wireless World*, vol.15, 2014.
- [28] 3GPP TR 36.932, “Scenarios and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN.” versão 12.1.0, 2013.
- [29] Riverbed, <http://www.riverbed.com>. Acessado em: Julho de 2015.
- [30] Sarkar, N. I.; Halim, S., “A Review of Simulation of Telecommunication Networks: Simulators, Classification, Comparison, Methodologies, and Recommendations”. *JSAT*, 2011.
- [31] Owczarek, P.; Zwierzykowski, P., “Review of Simulators for Wireless Mesh Networks”. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2014.
- [32] 3GPP TS 36.355, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE Positioning Protocol (LPP).” versão 11.3.0, 2013.
- [33] Tombaz, S.; Monti, P.; Wang, K.; Vastberg, A.; Forzati, M.; Zander, D., “Impact of Backhauling Power Consumption on the Deployment of Heterogeneous Mobile Networks”. *Globecom*, 2011.
- [34] Tombaz, S.; Sungi, K.; Zander, D., “Impact of Densification on Energy Efficiency in Wireless Access Networks”. *Globecom Workshops*, 2012.
- [35] Osseiran, A.; Boccardi, F.; Braun, V.; Kusume, K.; Marsch, P.; Maternia, M.; Queseth, O.; Schellmann, M.; Schotten, H.; Taoka, H.; Tullberg, H.; Uusitalo, M.; Timus, B.; Fallgren, M., “Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project”. *IEEE Communications Magazine*, 2014.