



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Francisco Klebert Ferreira Santos

**Medição, Avaliação e Otimização da Técnica DRX em
operador móvel LTE**



Universidade Federal de Pernambuco
posgraduacao@cin.ufpe.br
www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

Recife
2016

Francisco Klebert Ferreira Santos

**Medição, Avaliação e Otimização da Técnica
DRX em operador móvel LTE**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: *Prof. Kelvin Lopes Dias*

Co-orientador: *Prof. Eduardo de Melo Vasconcelos*

Recife
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

S237m Santos, Francisco Klebert Ferreira
Medição, avaliação e otimização da técnica DRX e operador móvel LTE / Victor Francisco Klebert Ferreira Santos. – 2016.
71 f.: il., fig., tab.

Orientador: Kelvin Lopes Dias.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2016.
Inclui referências.

1. Ciência da computação. 2. Redes móveis. I. Dias, Kelvin Lopes (orientador). II. Título.

004 CDD (23. ed.) UFPE- MEI 2019-007

Francisco Klebert Ferreira Santos

Medição, Avaliação e Otimização da Técnica DRX em operador móvel LTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre Profissional em 11 de fevereiro de 2016.

Aprovado em: 11/02/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Augusto Suruagy Monteiro
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Andson Marreiros Balieiro
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que na minha intimidade, ousou chamar de Pai.

A meus pais, Francisco Oliveira e Graci Ferreira, meu eterno agradecimento.

A meus irmãos, pela força e confiança em minha perseverança. A Lina, pela ajuda e compreensão durante a minha ausência devido aos estudos.

Ao Professor Kelvin Lopes Dias, pelo incentivo e motivação depositada em mim, dando-me direcionamento e tranquilidade para o desenvolvimento da pesquisa. Ao meu co-orientador Professor Eduardo de Melo Vasconcelos pelo o apoio e dicas para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao amigo Marcos Graciano, que conheci durante a pesquisa, pela imensa ajuda no entendimento dos testes e medições do presente trabalho.

Aos meus amigos do Mestrado, especialmente a Antonio Carlos Barros, pela força e apoio em todos momentos.

Aos meus colegas de trabalho, em particular a Izabel Pauline, Manoel Rodrigues e Fernando Sales, pela imensa ajuda durante os testes. A André Rolin e Frederico Sarcinelli pela liberação para cursar o mestrado e dando-me total tranquilidade no decorrer do curso. Foi bom poder contar com todos vocês!

A todos os meus colegas e amigos, pela ajuda e compreensão da minha ausência.

A todos, os meus agradecimentos.

“Resplandecente é a Sabedoria, e sua beleza é inalterável: os que a amam descobrem-na facilmente. Os que a procuram encontram-na. Ela antecipa-se aos que a desejam. Quem, para possuí-la, levanta-se de madrugada, não terá trabalho, porque a encontrará sentada à sua porta. “

Livro da Sabedoria 6:12-14

RESUMO

As redes celulares 3G/LTE (Terceira Geração/*Long Term Evolution*) possibilitaram um aumento significativo da taxa de transmissão de dados, bem como, redução da latência no acesso e transferência de conteúdo. Por outro lado, o uso contínuo e as novas aplicações demandantes de largura de banda, resultam na redução do tempo de vida da bateria dos equipamentos do usuário (UE). Técnicas como DRX (*Discontinuous Reception*) que consideram diferentes estados do RRC (*Radio Resource Control*) na rede LTE têm sido empregadas pelas operadoras a fim de economizar a energia da bateria do UE. Contudo, há uma carência de trabalhos na literatura abordando a análise da técnica DRX em um ambiente de rede real. Diante do atual cenário do comportamento do usuário e da rede, o presente trabalho se propõe a avaliar a técnica DRX em uma rede comercial de tecnologia LTE em relação à eficiência energética (Mbps/W). Nos testes, foi utilizado um software do operador móvel para geração de tráfego e coleta das medidas de desempenho da rede a partir do UE conectado a um site LTE eNB (eNodeB) na cidade do Recife, sendo avaliadas as métricas *round-trip time* (RTT), *one way delay* (OWD) e vazão TCP/UDP. Ajustes de configuração no eNB foram realizados ao variar os principais parâmetros DRX, tais como temporizador de inatividade, *on duration* e ciclo DRX a fim de reduzir a latência, promover a economia de bateria do UE e observar seus impactos na rede. Os resultados refletiram que para algumas configurações há economia de até 63% na redução do consumo de energia da bateria do UE, porém o ganho na eficiência refletiu em um maior atraso da rede. Ao ajustar os temporizadores de inatividade DRX e *on duration* foi alcançada uma economia de energia da bateria entre 26% e 50%, reduzindo o atraso da rede a cerca de 9ms, estes resultados evidenciam a aplicabilidade e a eficácia da abordagem proposta.

Palavras-chave: LTE. DRX *Cycle*. Consumo de Energia. Análise de desempenho. Análise de sensibilidade.

ABSTRACT

3G / LTE (Third Generation / Long Term Evolution) cellular networks enabled a significant increase in data transmission rate as well as, reduced latency in the access and content transfer. On the other hand, the continuous use and new bandwidth hungry applications, result in reduced battery life time of user's equipment (UE). Techniques such as DRX (Discontinuous Reception) which consider different states of the RRC (Radio Resource Control) in the LTE network have been used by operators in order to save the battery power from UE. However, there is a lack of studies in the literature addressing the analysis of the DRX technique in a real network environment. Considering the current scenario of user and network behaviors, the present study was the first to evaluate the DRX technique in a real LTE technology network in relation to energy efficiency (Mbps/W). In tests, it was used a mobile operator software for traffic generation and collection of performance measurements from the UE connected to a LTE eNB (eNodeB) site in the city of Recife, evaluating round-trip time (RTT), jitter and TCP / UDP flow. The study also includes a sensitivity analysis of the DRX parameters to evaluate their influence on energy efficiency. Subsequently, configuration settings were carried out in the eNB varying the main DRX parameters such as inactivity time, on duration and DRX cycle in order to reduce latency, promoting the economy of UE battery and saving and observe its impact on the network. The results reflected that for some configurations there are savings of up to 63% in the reduction of energy consumption of the UE battery power. However the gain in efficiency reflected in a higher network delay. Adjusting the DRX inactivity timer, it was achieved a saving of 26% to 50% of battery power, reducing the network delay to around 9ms. These results demonstrate the applicability and effectiveness of the proposed approach.

Keywords: LTE. DRX Cycle. Power Consumption. Performance analysis. sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Previsão do número de assinantes anuais no mundo por tecnologia móvel (2015-2020). Estimado 8.5 bilhões de conexões LTE em 2020	15
Figura 2.1 Evolução do desenvolvimento UMTS/3GPP.....	21
Figura 2.2 Arquitetura LTE.....	23
Figura 2.3 Arquitetura E-UTRAN	24
Figura 2.4 Arquitetura EPC.....	26
Figura 2.5 eNBs interconectadas via interface X2 e comunicação para o core da rede via interface S1.....	27
Figura 2.6 Mecanismo RRC no LTE	28
Figura 3.1 Representação de um ciclo DRX.....	33
Figura 3.2 Um cenário típico do mecanismo DRX no LTE	37
Figura 5.1 Arquitetura do NetMetric incluindo seus três módulos e o fluxo de comunicação entre os mesmos	45
Figura 5.2 Estrutura do mecanismo de medição do UE na rede do operador	47
Figura 5.3 Medição da energia consumida pelo UE	49
Figura 5.4 Foto do site LTE da operadora localizado na cidade do Recife	50
Figura 5.5 Predição do site LTE localizado na cidade do Recife.....	51
Figura 5.6 Taxa de dados alcançada para aplicações no <i>Uplink</i> (a) UDP (b)TCP	54
Figura 5.7 Taxa de dados alcançada para aplicações no <i>Downlink</i> (a) - UDP (b) TCP	56
Figura 5.8 Atraso RTT para o <i>uplink</i> e <i>downlink</i> devido atuação do DRX na rede do operador móvel.....	58
Figura 5.9 Atraso OWD no sentido <i>Downlink</i>	59
Figura 5.10 Atraso OWD no sentido <i>Uplink</i>	59
Figura 5.11 Percentual da descarga da bateria	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Parâmetros DRX – 3GPP	51
Tabela 5.2 - Configuração dos parâmetros DRX e valores utilizados nos testes	52
Tabela 5.3- Consumo de energia do UE em função do atraso	62

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP	Third Generation Partnership Project
AAS	Active Antenna System
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AUC	Authentication Center Agência
CA	Carrier Aggregation
CQI	Channel Quality Indication
DL	Downlink
DRX	Discontiuous Reception
EIR	Equipment Identity Register
eNB	enhanced Node B
eNodeB	enhanced Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPDCCH	Enhanced Physical Downlink Control Channel
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Network Access
FDD	Frequency Division Duplex
GPRS	General Packet Radio Services
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol – User
HARQ	Híbrido Automatic Repeat reQuest
HeNB	Home - enhanced Node B
HetNet	Heterogeneous Network
HLR	Home Location Register
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol Secure
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-A	International Mobile Telecommunications-Advanced
IP	Internet Protocol
LIPA	Local IP Access
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple input, multiple output
MME	Mobility Management Entity
MTC	Machine Type Communications
NAS	Non Access Stratum
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCC	Policy and Charging Control
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDN	Packet Data Network
P-GW	Gateway Packet Data Network
ProSe	Proximity Services
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
RNL	Radio Network Layer
RRC	Radio Resource Control
RTT	Round-Trip Time
S – GW	Serving Gateway
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SFN	System Frame Number
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SON	Self Organizing Networks
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TNL	Transport Network Layer
TTI	Transmission Time Interval
UAMA	<i>Unified Active Measurement Architecture</i>
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRA	Radio Access Universal Terrestre
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
X2AP	X2 Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Problema	17
1.3	Objetivos.....	18
1.4	Metodologia.....	18
1.5	Estrutura da Dissertação	19
2	TECNOLOGIAS LTE/ LTE ADVANCED	20
2.1	Fundamentos LTE	20
2.2	Arquitetura LTE	22
2.2.1	<i>E-UTRAN</i>	24
2.2.2	<i>EPC</i>	25
2.2.3	<i>Enhanced Base Stations</i>	27
2.2.4	<i>Máquina de Estado RRC</i>	28
2.2.5	<i>LTE ADVANCED</i>	29
2.3	Considerações finais.....	30
3	DISCONTINUOUS RECEPTION - DRX	32
3.1	Funcionalidade DRX	32
3.2	Parametrização DRX	33
3.3	Procedimento DRX	35
3.4	Mecanismo DRX no LTE	36
3.5	Considerações finais.....	38
4	TRABALHOS RELACIONADOS	39
5	AMBIENTE/ CENÁRIO DE TESTES E ANÁLISE DE DADOS	44
5.1	Software de medição	44
5.2	Coleta dos dados.....	45
5.3	Sequência para procedimento dos testes.....	46
5.4	Consumo de potência dos dispositivos.....	47
5.5	Ambiente do estudo.....	48
5.6	Parametrização e configuração do DRX.....	50
5.7	Resultados Obtidos.....	51
5.7.1	<i>Avaliação da Taxa de dados</i>	51
5.7.2	<i>Avaliação do Atraso</i>	55
5.7.3	<i>Avaliação do Consumo de Energia</i>	58
5.8	Considerações Finais.....	63
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	64
6.1	Contribuições.....	65
6.2	Trabalhos Futuros.....	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

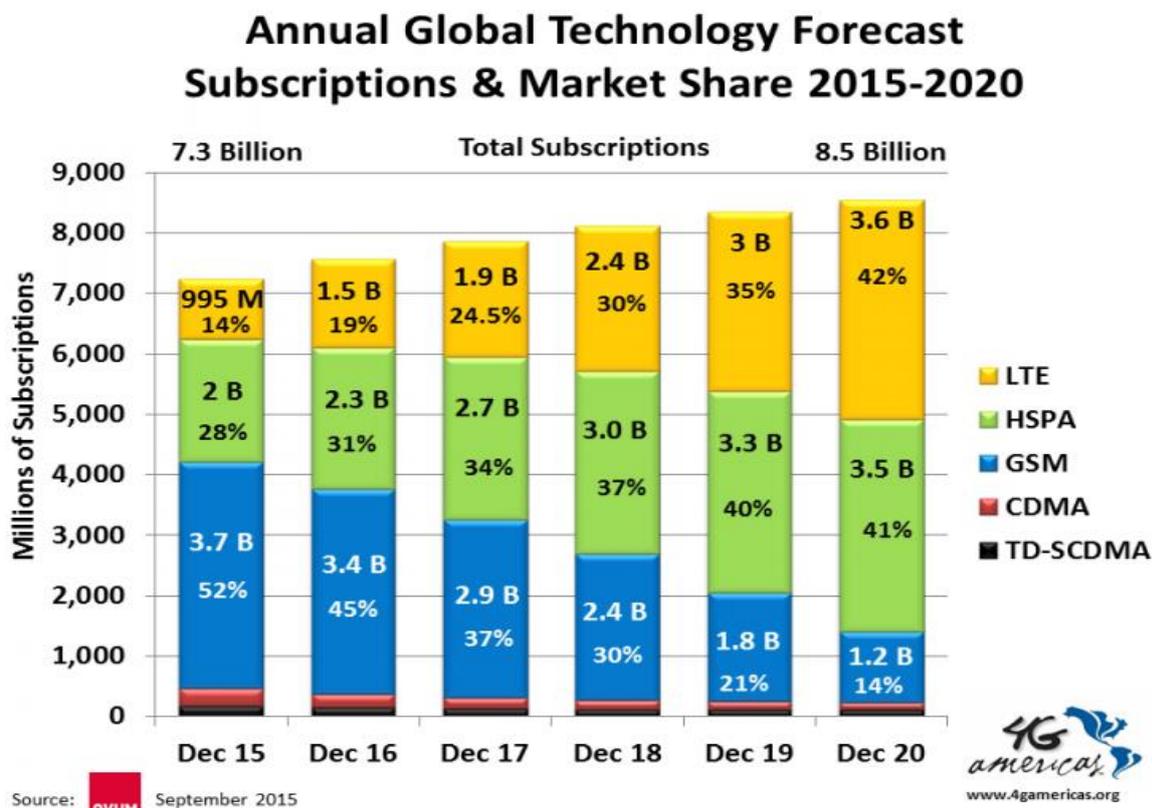
Este capítulo está organizado da seguinte forma: Na seção 1.1 fundamentamos a motivação pela escolha da técnica DRX e da tecnologia LTE. Em seguida, na seção 1.2 é caracterizado o problema. Na seção 1.3 apresentamos os objetivos da dissertação. Na seção 1.4 é descrita a metodologia para obtenção dos objetivos do trabalho. Na seção 1.5 é apresentada a estrutura da dissertação.

1.1 Motivação

Nos últimos anos, foi observado que os sistemas de comunicações móveis apresentaram um crescimento espontâneo em termos de capacidade, disponibilidade de conteúdo e números de usuários. Ilustrando melhor essa expansão, somente no mês de outubro de 2015, o Brasil alcançou um número de 273,79 milhões de linhas ativas na telefonia móvel, com índice de distribuição de linhas telefônicas numa região, definido pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) como teledensidade de 133,64 acessos para cada grupo de 100 habitantes (ANATEL, 2015). Ainda segundo a Anatel, o Brasil terminou outubro de 2015 com 185,6 milhões de celulares com acesso banda larga móvel, sendo 20,4 milhões de acessos via terminais LTE (*Long Term Evolution*), o que representou um recorde em adições líquidas de 2,2 milhões de novos acessos impulsionando o crescimento da banda larga móvel. Em termos globais, entre junho de 2014 a junho de 2015, foi registrado um aumento do número de assinantes móveis na rede LTE, saindo de 314 milhões para 441 milhões de novas assinaturas e crescimento de 141% no mundo inteiro. A tecnologia LTE atualmente é comercializada através de 425 redes em 145 países (4G AMÉRICAS, 2015).

A Figura 1.1 ilustra a previsão do número de assinantes anuais no mundo em 2015-2020 por tecnologia móvel, ficando em evidência o alcance estimado em 8,5 bilhões de conexões LTE em 2020.

Figura 1.1. Previsão do número de assinantes anuais no mundo por tecnologia móvel (2015-2020)¹. Estimado 8.5 bilhões de conexões LTE em 2020.



Fonte: (4G AMÉRICAS, 2015).

A evolução e o crescimento da capacidade das redes sem fio motivaram mudanças no comportamento do usuário, no modo do acesso à Internet e no consumo dos serviços disponibilizados pela rede, tais como: redes sociais, *streaming* de vídeo, vídeo conferência e outras aplicações. Os dispositivos móveis, por exemplo, os smartphones, evoluíram bastante nos últimos anos, passando de simples dispositivos voltados para serviços de voz para uma geração de dispositivos sofisticados que oferecem alto desempenho em processamento e diversas funcionalidades como acesso à internet, mapas, geolocalização, sensores e outras opções (FODDIS *et. al*, 2015).

As tecnologias celulares atuais, como o LTE, alcançam altas taxas na transmissão de dados e um menor atraso da rede. Elas adotam tecnologias sofisticadas como

¹ Dados 4G Américas, acessado em 01/01/16 na página:
<http://www.4gamericas.org/en/resources/statistics/statistics-global/>

modulação de alta ordem, como 64-Modulação de Amplitude em Quadratura (64-QAM), codificação avançada, técnicas de múltiplas antenas (MIMO *Multiple Input – Multiple Output*), Acesso Múltiplo por Divisão Espacial (SDMA), entre outras (3GPP, 2010a; FODDIS et al., 2015; HUANG et al., 2013) atendendo as expectativas dos usuários em termos de capacidade e velocidade. No entanto, os novos dispositivos móveis estão equipados com circuitos complexos que descarregam, rapidamente, a bateria dos equipamentos e limitam a experiência do usuário. Para enfrentar esse problema, a tecnologia LTE adota diferentes mecanismos para conservar a energia da bateria. Dentre eles, a técnica DRX - *Discontinuous Reception*, que permite ao UE desligar a maior parte dos seus circuitos receptores, quando não há dados para serem transmitidos/recebidos a fim de economizar energia (HUANG et al., 2013; BONTU; ILLIDGE, 2009).

Avaliando o exposto cenário, podemos atentar para os seguintes problemas: a evolução das baterias e o consumo excessivo de energia dos dispositivos móveis. O primeiro refere-se ao fato de que as baterias não evoluíram no mesmo ritmo que os demais componentes dos dispositivos que elas alimentam. Estudos apontam que em 2020 o mercado irá demandar 195 GWh de energia, enquanto que as baterias atuais estariam fornecendo 50 GWh de energia (KERNEL.ORG, 2013). O segundo problema é a grande quantidade de energia requerida pela conexão móvel. Para um melhor gerenciamento dos recursos de rádio e uma otimização da vida útil da bateria dos dispositivos móveis nas redes padronizadas pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), foi indicada a implementação do mecanismo RRC (*Radio Resource Control*) nas redes de terceira geração 3G/UMTS. No entanto, na segunda geração, 2G, mecanismos semelhantes foram definidos para uma melhor eficiência dos recursos de rádio na rede sem fio, sendo introduzido o *General Packet Radio Service* (GPRS) na *release 97* do 3GPP (BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2009; BARBUZZI, et al., 2012). Na rede 3G/LTE, introduzido no *release 8* do 3GPP, o RRC foi simplificado, sendo os estados *RRC_IDLE* e *RRC_CONNECTED* (3GPP, 2013a, 2015c).

Atualmente, com o crescimento e adoção da tecnologia 3G/LTE pelas operadoras no Brasil e no mundo, fortalecida pela proliferação dos *smartphones* e pela diversidade de aplicações demandantes de largura de banda instaladas em tais dispositivos, fica evidente a necessidade de prolongar a autonomia da bateria dos dispositivos móveis e

melhorar a experiência do usuário em termos de mobilidade, conexão e qualidade de serviço. Uma vez que é crescente o uso de dispositivos e aplicações diversas na rede móvel, principalmente LTE, este trabalho apresenta uma alternativa para reduzir o consumo de energia da bateria do UE na rede LTE de um operador móvel comercial através da otimização da configuração dos parâmetros DRX procurando minimizar o atraso adicional da rede imposto pela técnica DRX.

1.2 Problema

As redes 3GPP evoluíram em termos de capacidade e velocidade na transferência de dados. Porém, consomem rapidamente a bateria dos dispositivos e, a um curto prazo, não há perspectiva de solução eficaz para resolver esse problema. A técnica DRX na rede LTE reduz o consumo de bateria dos dispositivos ao adicionar um maior atraso da rede.

Estudos propostos na literatura abordam ambientes simulados de rede LTE e buscam ajustar valores dos parâmetros DRX para otimizar economia de energia e reduzir o atraso adicional da rede. Verificam-se em tais estudos que a maioria utiliza valores que seriam impraticáveis em uma rede comercial, o que não refletiria o resultado esperado da técnica e ocasionariam novos problemas, tais como: aumento de sinalização e do número de tentativas de conexão RRC na rede, além de maior consumo de energia no UE.

Na literatura, alguns trabalhos apontam também para o ajuste do DRX com base no tipo de aplicação ou tráfego, por exemplo, VoIP, acesso *web*, rede sociais ou *background*. No entanto, isto é válido apenas para ambiente simulado, pois em uma rede comercial, há diferentes aplicações de vários usuários conectados ao eNB em execução simultaneamente.

Nossa problemática versa sobre a avaliação da técnica DRX em uma rede comercial através de ajustes dos parâmetros DRX para prolongar o tempo de vida da bateria do UE ao custo de um maior atraso da rede.

1.3 Objetivos

Visto que a baixa autonomia da bateria dos dispositivos móveis afeta a disponibilidade de novas funcionalidades/serviços e limita a experiência do usuário na rede 3G/LTE, este trabalho objetiva avaliar a técnica DRX em um operador móvel LTE na cidade do Recife, evidenciando que ajustes na configuração dos parâmetros DRX podem conduzir a diminuição no consumo de energia da bateria do dispositivo móvel ao custo de um atraso adicional mínimo no desempenho da rede. Nessa dissertação, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- 1- Realizar um levantamento sobre os parâmetros DRX, cenários e estudos da literatura que visem ajustar de maneira eficiente a configuração da rede LTE para reduzir o consumo de energia da bateria do UE.
- 2- Realizar experimentos, avaliando diversas parametrizações, visando a compreensão do comportamento da técnica DRX em um ambiente de rede real LTE.
- 3- Apresentar e avaliar uma configuração da parametrização DRX para rede LTE que proporcione baixo consumo de energia do UE ao custo de um atraso adicional mínimo em um ambiente de rede real LTE.

1.4 Metodologia

Para obtenção dos objetivos especificados foram realizadas as etapas de levantamento da bibliografia para estudos das especificações da tecnologia LTE e da técnica de ciclo DRX, bem como trabalhos relacionados à técnica DRX. Na sequência, foi gerado um conjunto de configurações DRX a ser inserido e ajustado no site eNB escolhido pela operadora dentro da cidade do Recife.

O passo seguinte foi a escolha do software do operador móvel para realização das medições ativas da rede a partir de dois UEs conectados ao site eNB, sendo avaliadas as métricas *round-trip time* (RTT), *jitter*, *One Way Delay* (OWD) e vazão TCP/UDP. O software de medição contempla duas entidades denominadas de gerente e agente. O

gerente é o servidor da aplicação. É ele que programa as medições e dispara uma rajada de dados com base no perfil definido para a medição. O agente, que é o UE, sendo o elemento de referência na medição, recebe as rajadas e retorna uma outra semelhante ao gerente permitindo assim uma medição do link no sentido reverso.

Após a conclusão desses passos, a metodologia segue dividida em duas partes: coleta e análise dos dados. No Capítulo 5 são abordadas mais informações acerca de cada uma das partes e no apêndice A, sobre os dados das medições.

1.5 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma visão geral da tecnologia LTE/LTE-*Advanced* em termos de evolução, característica e arquitetura. No Capítulo 3, descreve-se a técnica DRX, enfatizando sua funcionalidade e procedimento. O Capítulo 4 traz uma breve discussão sobre os trabalhos relacionados à técnica DRX, enfatizando ajustes na configuração dos parâmetros DRX e medidas de desempenho.

O capítulo 5 relata sobre a análise dos dados e os resultados do trabalho. Esse capítulo também destaca a parametrização e ajustes na configuração DRX bem como os resultados obtidos. O capítulo 6 expõe as conclusões do presente trabalho.

2 TECNOLOGIAS LTE/LTE ADVANCED

Este capítulo versa sobre os fundamentos da tecnologia LTE. Na Seção 2.1, um resumo sobre a origem do LTE, seus requisitos e características. Na Seção 2.2, é apresentada a arquitetura do sistema, onde são descritas suas funcionalidades. Enfatiza também as arquiteturas *E-UTRAN* (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*), *core EPC* (*Evolved Packet Core*) e as *eNodeB* (*Enhanced Base Stations*). Apresenta a máquina de estado RRC no LTE. Apresenta a definição e as especificações do *LTE-Advanced* (*LTE-A*) e a Seção 2.3 são realizadas as considerações finais.

2.1 Origem do LTE

O Sistema LTE é a evolução das redes móveis da terceira geração do padrão 3GPP, apoiada em uma estrutura de comunicação caracterizada por excelentes requisitos de desempenho. Trata-se de uma rede de banda larga móvel que valoriza fatores como, velocidade de acesso, baixa latência, baixo consumo de energia e compatibilidade com tecnologias anteriores (3GPP, 2013b).

A tecnologia é também denominada de E-UTRAN, que teve início a partir do estudo do 3GPP em 2004, com o objetivo de aprimorar meios para atingir grandes avanços nos serviços fornecidos e na redução de custos. Com base nesses estudos, o 3GPP determinou um conjunto de metas e requisitos para a evolução desta tecnologia (3GPP, 2013b). Em 2008, com a criação dos requisitos de quarta geração (*IMT-Advanced: International Mobile Telecommunications - Advanced*) pela União Internacional de Telecomunicações, divisão de Rádio (ITU-R), o 3GPP direcionou os estudos para a criação do LTE, que buscava atingir as características e especificações propostas para a rede 4G. As primeiras implementações do LTE começaram no final de 2009. A Figura 2.1 apresenta um resumo da evolução das especificações UMTS/3GPP.

Figura 2.1 Evolução do desenvolvimento UMTS/3GPP

Release	Stage 3: Core specs complete	Main feature of Release
Rel-99	March 2000	UMTS 3.84 Mcps (WCDMA FDD & TDD)
Rel-4	March 2001	1.28Mcps TDD (aka TD-SCDMA)
Rel-5	June 2002	HSDPA
Rel-6	March 2005	HSUPA (E-DCH)
Rel-7	Dec 2007	HSPA+ (64QAM DL, MIMO, 16QAM UL). LTE & SAE Feasibility Study, Edge Evolution
Rel-8	Dec 2008	LTE Work item - OFDMA air interface SAE Work item - New IP core network UMTS Femtocells, Dual Carrier HSDPA
Rel-9	Dec 2009	Multi-standard Radio (MSR), Dual Carrier HSUPA, DUAL Band HSDPA, SON, LTE Femtocells (HeNB) LTE-Advanced feasibility study
Rel-10	March 2011	LTE-Advanced (4G) work item, CoMP Study Four carrier HSDPA
Rel-11	Sept 2012	CoMP, eDL MIMO, eCA, MIMO OTA, HSUPA TxD & 64QAM MIMO, HSDPA 8C & 4x4 MIMO, MB MSR
Rel-12	March 2015	Mission-Critical Press-to-Talk (MC-PTT), Small cells and Network densification, D2D, LTE TDD-FDD joint operation including Carrier Aggregation, Security Assurance Methodology (SECAM)
Rel-13	March 2016	LTE in unlicensed spectrum. Enhancements for LTE in MTC, D2D and carrier aggregation. Enhanced multi-user transmission techniques. Indoor positioning and SC-PTM.
Rel-14	Completion by June 2017	LTE in unlicensed spectrum. Enhancements for LTE in MTC, D2D and carrier aggregation. Enhanced multi-user transmission techniques. Indoor positioning and SC-PTM.

Fonte: adaptado de (AGILENT, 2013a, 2013b; 3GPP, 2015b; 3GPP, 2016).

Alguns requisitos de desempenho estão presentes desde as primeiras discussões sobre o LTE, como:

- Elevada eficiência espectral.
- Capacidade de fornecer altas taxas de transmissão ao usuário.
- Baixo tempo de latência.
- Flexibilidade na frequência e largura de banda.
- Reduzido consumo de energia do lado do terminal móvel.
- Arquitetura simplificada.

Baseadas nos requisitos expostos sobre o LTE, as seguintes características foram definidas:

- Taxa de dados de 300 Mbps no sentido da Estação Rádio Base para o dispositivo móvel (o qual chamaremos de *downlink* - DL) e de 75Mbps no sentido dispositivo móvel para a estação rádio base (denominada de *uplink* - UL).
- Esquemas de transmissão: DL: OFDMA7 (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*); UL: SC-FDMA8 (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*).
- Largura de banda de canal variável (em MHz): 1,4; 3; 5; 10; 15 e 20.
- Esquemas de modulação: QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM, 64QAM.
- Redução do tempo de latência para menos que 10ms.
- Modos de Acesso Duplex: Por divisão de Frequência (FDD) e por Divisão de Tempo (TDD).
- Possibilidade de múltiplas antenas: (MIMO).

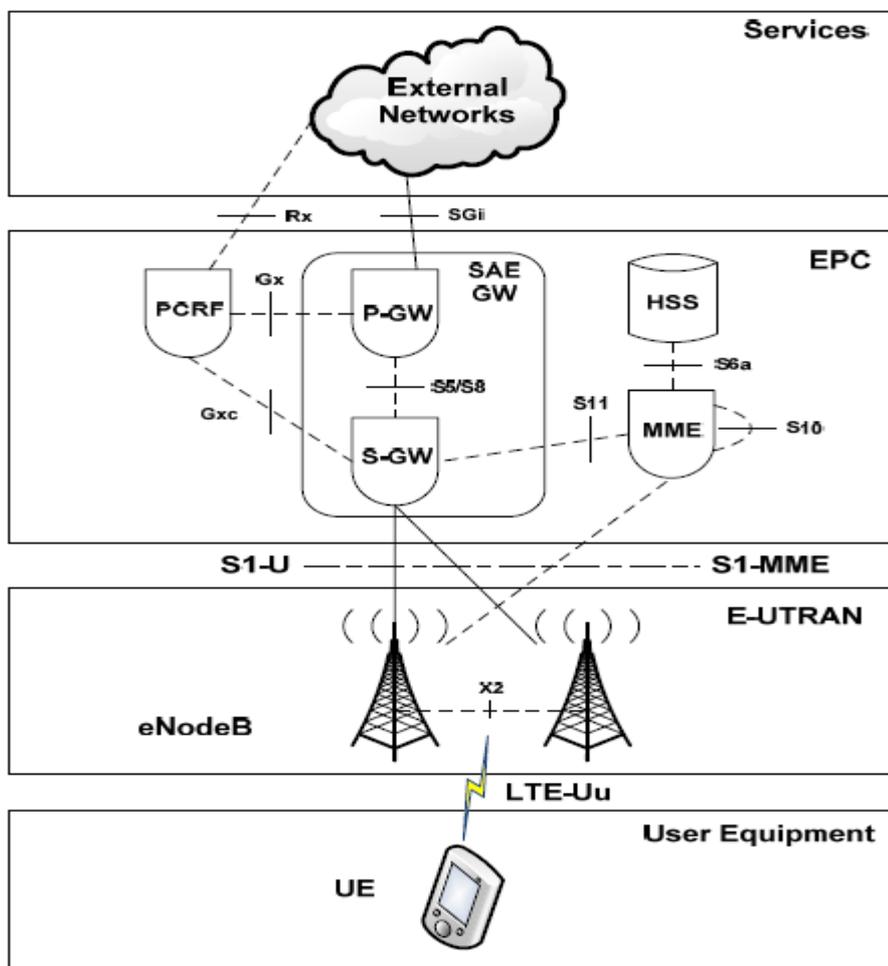
2.2 Arquitetura LTE

Basicamente, a arquitetura LTE é uma evolução da tecnologia GSM/WCDMA (*Global System for Mobile Communications/Wideband Code Division Multiple Access*), que é uma tecnologia de rede que leva ao CDMA de Banda Larga, também denominado de UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) (SESIA et al., 2011). O sistema LTE possui uma arquitetura de rede móvel totalmente baseada no padrão IP o que permite interação com outras tecnologias de comunicação baseadas no protocolo IP.

A arquitetura LTE foi projetada para suportar, de forma eficiente, vários tipos de serviços, em especial orientados a pacotes como, por exemplo, VoIP. A arquitetura LTE está dividida, segundo (ALI-YAHIYA, 2011), em quatro principais domínios de alto nível:

UE (*User Equipment*), E-UTRAN (*Evolved UTRAN*), EPC (*Evolved Packet Core*) e Services, conforme ilustra a Figura 2.2.

Figura 2.2 Arquitetura LTE.



Fonte: (ALI-YAHIYA, 2011).

Além da divisão em domínios, a arquitetura é dividida em dois planos, que determinam a pilha de protocolos da arquitetura LTE: plano do usuário, que possui a camada física, camada MAC, RLC (*Radio Link Control*) e PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) e o plano de controle, que contém a RRC (*Radio Resource Control*) que é adicionada às camadas do plano do usuário (3GPP, 2013b).

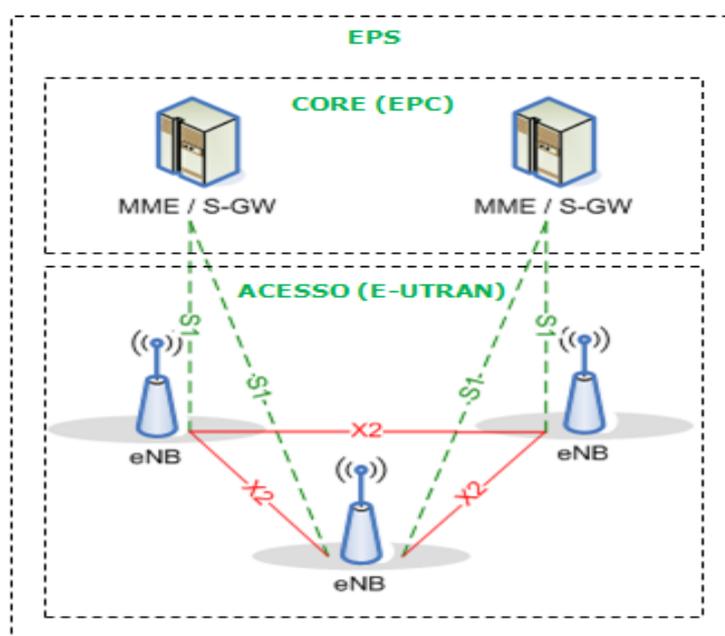
O projeto LTE, focado no desenho de uma nova arquitetura para rede de acesso e interface aérea, evidencia uma evolução do acesso via rádio representado pelo E-UTRAN

(*Evolved Universal Terrestrial Network Access*). Complementar ao projeto LTE, temos a evolução dos aspectos não rádio, denominados de Evolução da Arquitetura de Sistema, o programa SAE (*System Architecture Evolution*). O SAE está incluído no núcleo da rede, que é chamada de EPC (*Evolved Packet Core*). Mais tarde, estes dois projetos foram unificados em uma frente única de trabalho e formaram o EPS (*Evolved Packet System*), cuja função é prover a conectividade do usuário móvel com a Internet (3GPP, 2010b). A Figura 2.3 mostra os principais componentes de uma rede LTE (Core e Acesso).

2.2.1 – E-UTRAN

Em contraste com redes 2G e 3G definidas pelo 3GPP, o LTE pode ser simplesmente dividido em uma rede portadora baseada em IP e em uma rede de habilitação de serviços. A primeira pode ser dividida em E-UTRAN (*Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network*) e EPC (*Evolved Packet Core*), onde o suporte ao fornecimento de serviços encontra-se no IMS (*IP Multimedia Subsystem*). A seguir é descrita a arquitetura E-UTRAN conforme Figura 2.3.

Figura 2.3 Arquitetura E-UTRAN.



Fonte: (3GPP, 2010b).

A E-UTRAN consiste em conjunto de eNBs ligadas ao EPC através da interface S1. Um eNB pode suportar o modo FDD, o modo TDD ou operação em modo dual. A interface lógica X2 interliga duas eNBs e, assim, suporta tanto o plano de controle quanto o plano de usuário. Ela também estende a interface lógica S1 quando dois ou mais eNBs estão entre o UE e o EPC. O protocolo X2AP (*X2 Application Protocol*) do plano de controle utiliza SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*), e o plano de usuário utiliza os serviços de GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol – User*) e UDP (*User Datagram Protocol*). A interface S1 interliga um eNB ao EPC, proporcionando um ponto de interligação entre a E-UTRAN e o EPC. A arquitetura E-UTRAN está entre a camada de rede de rádio (RNL) e uma camada de rede de transporte (TNL). Sendo que os nós e as interfaces lógicas E-UTRAN são definidas como parte da camada de rede de rádio. Para cada interface E-UTRAN (S1, X2) o protocolo de camada de rede de transporte relacionado e sua funcionalidade é especificada. A camada de rede de transporte fornece serviços para o transporte do plano do usuário e sinalização.

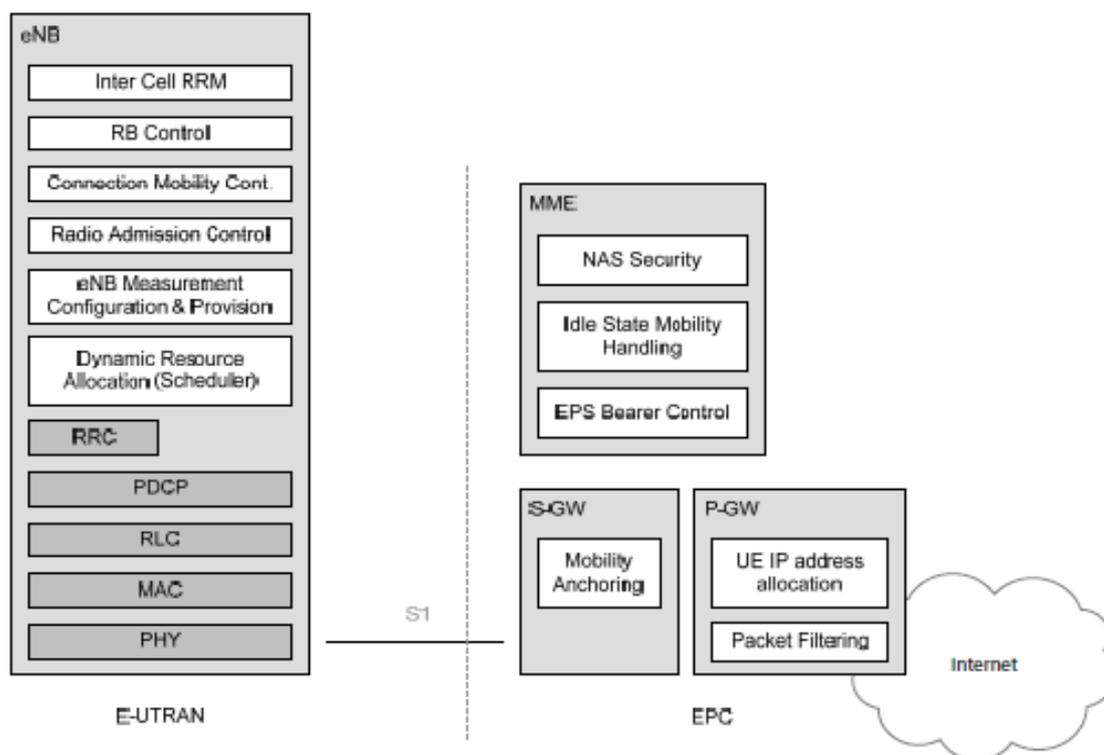
2.2.2 – EPC

O *Evolved Packet Core* (EPC) serve para integrar redes que usam o protocolo TCP/IP, transformando-o numa ferramenta essencial para a comunicação com diferentes tipos de redes, podendo ser fixas ou móveis. A Figura 2.4 ilustra a arquitetura fundamental EPC e assim identifica as principais interfaces que existem entre os elementos de rede. É importante salientar, também, que existem interfaces adicionais que ligam o EPC com o IMS e arquiteturas legadas 3GPP/Não-3GPP.

A arquitetura EPC contempla os principais elementos da rede que desempenham as principais funções do sistema e são definidos como:

- MME (*Mobility Management Entity*): é o principal elemento de controle no EPC e lida com a sinalização em relação com a mobilidade e segurança para o acesso E-UTRAN.

Figura 2.4 Arquitetura EPC.



Fonte: (3GPP, 2010b).

- S-GW (*Serving Gateway*): Responsável pelo roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G/3G utilizando a interface S4. Ele gerencia e armazena informações do dispositivo móvel como parâmetros de serviços IP suportados e rede, como também informações sobre o roteamento interno dos pacotes.
- P-GW (*Packet Data Network Gateway*): é o roteador de borda entre o EPC e redes externas. Responsável por alocar endereços IP para os dispositivos para que eles possam se comunicar com outros dispositivos localizados em redes externas.
- PCRF (*Policy and Charging Resource Function*): é o elemento de rede responsável pelo PCC – Política e Controle e Cobrança. Provê a QoS (*Quality of Service*) adequada para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados fornecendo informações para o PG-W e SG-W, caso necessário.

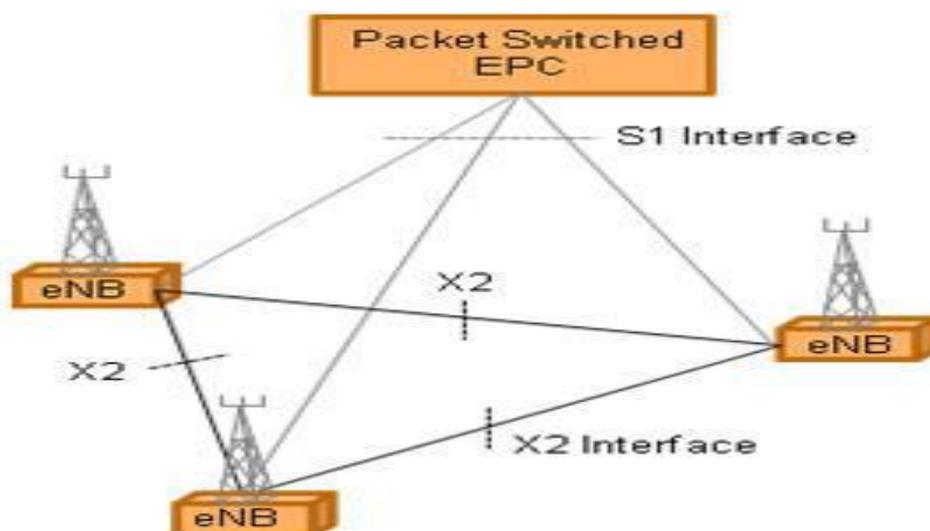
- HSS (*Home Subscriber Server*): banco de dados de registro do usuário. Executa de fato, funções equivalentes às do HLR (*Home Location Register*), AuC (*Authentication Center*) e EIR (*Equipment Identity Register*) definidos nas releases anteriores.

Serviços: provê a interligação do LTE com outras redes.

2.2.3 Enhanced Base Stations

A arquitetura LTE difere das demais tecnologias anteriores. Um exemplo disso é a estação rádio base que, na nova rede, foi chamada de eNodeB (*Enhanced NodeB*). Na rede LTE, não existe a figura de um elemento controlador centralizado como a RNC (*Radio Network Controller*) na rede 3G/UMTS, sendo que as eNBs são interconectadas via interface X2 e a comunicação para a rede *core* é realizada pela interface S1. A eNB passou a executar as tarefas de processamento antes realizadas pela RNC na rede 3G/UMTS, realizando o *handover* e o controle de tráfego na interface aérea assegurando QoS (*Quality of Service*) para os serviços oferecidos (3GPP, 2015a).

Figura 2.5 eNBs interconectadas via interface X2 e comunicação para o *core* da rede via interface S1.



Fonte: (3GPP, 2015a)

A razão para a distribuição da inteligência entre as eNBs na rede LTE é para acelerar o estabelecimento da conexão do UE com a rede e reduzir o tempo necessário

para um *handover*. Para um usuário final, o tempo de inicializar uma conexão para uma sessão de dados em tempo real é, em muitos casos crucial, especialmente em jogos *on-line*. O tempo para um *handover* é essencial para serviços em tempo real, nos quais as chamadas dos usuários finais tendem a serem encerradas caso o tempo para o *handover* seja longo (3GPP, 2015a).

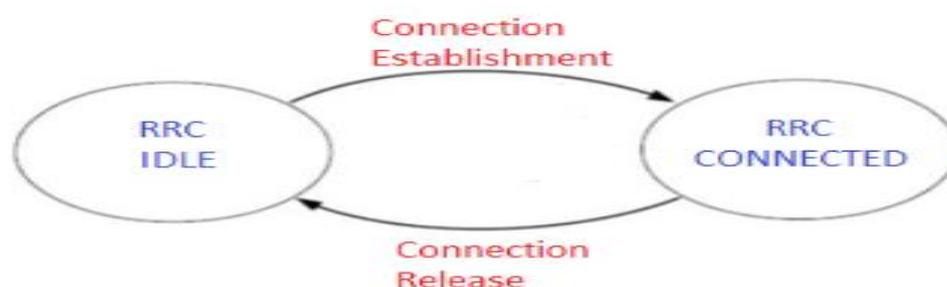
2.2.4 Máquina de Estado - RRC

Em redes celulares, o RRC refere-se a um bloco funcional que essencialmente controla a parte inferior da pilha de protocolos, composto por, o controle de *link* de rádio, controle de acesso ao meio e a camada física. O RRC funciona como uma máquina de estados sendo usado para inicializar conexões, reservar recursos, estabelecer/manter a conectividade e encerrar a conexão liberando todos os recursos de rádios compartilhados entre os usuários e a rede (3GPP, 2013a; BARBUZZI, et al., 2012).

O RRC foi especificado inicialmente no ambiente das redes 3G/UMTS. No entanto, a tecnologia GPRS, que utiliza um mecanismo semelhante ao RRC, foi implantada já na rede 2G para prover comutação de pacotes aos usuários e, assim, melhorar o gerenciamento dos recursos de rádio na rede (BALASUBRAMANIAN et al., 2009).

No LTE, o RRC foi simplificado e foram mantidos os dois estados: RRC_IDLE e RRC_CONNECTED conforme ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 Mecanismo RRC no LTE.



Fonte: (3GPP, 2013a).

Na rede 3G/LTE, foi adotado um método através de uma modificação na máquina de estado RRC que permite que o UE desligue seu circuito receptor nos momentos em que não haja dados para serem transmitidos/recebidos da rede e, assim, economizar energia. Esse método ficou conhecido como *Discontinuous Reception* (DRX) (BARBUZZI, et al., 2012). O Capítulo 3 trará um melhor entendimento sobre o DRX enfatizando sua característica e funcionalidade.

2.2.5 LTE ADVANCED

LTE – *Advanced* é a próxima versão do LTE que visa atender e exceder aos requisitos do IMT – *Advanced* com base nas *releases* 10 e além do 3GPP para ser o verdadeiro 4G LTE. O LTE-*Advanced*, foi padronizado pelo 3GPP a fim de ser a solução que atenda o cenário sobre as futuras tecnologias de banda larga móvel em termos de ampliação da capacidade no volume de tráfego de dados, mobilidade e uma maior eficiência do espectro disponível.

Seguem abaixo os principais requisitos especificados pela ITU para atendimento ao 4G LTE.

- O aumento da taxa de dados de pico, DL 3 Gbps, UL 1,5 Gbps.
- Maior eficiência espectral, alcançando 30 bps / Hz.
- Aumento do número de assinantes ativos simultaneamente.
- Melhor desempenho nas bordas de célula, por exemplo, para DL 2x2 MIMO pelo menos 2,40 bps / Hz / célula.

O Relatório Técnico (TR) 36.913 do 3GPP² resume os requisitos para um maior avanço do LTE E-UTRA (interface aérea) e do E-UTRAN (rede de interface aérea).

² Disponível em www.3gpp.org (3GPP, 2015b)

Em setembro de 2012 o 3GPP começou a trabalhar no Rel-13 (3GPP, 2013b). As principais características e serviços detalhados no Rel-13 incluem:

- *Elevação Beamforming / Full-Dimension MIMO.*
- *Carrier Aggregation* (Melhorias).
- Melhorias no LTE para MTC (*Machine-Type Communications*).
- Melhorias para D2D.
- Técnicas de transmissão multiusuário melhoradas.
- Posicionamento *Indoor*
- Ponto-a-Multiponto de única célula (SC-PTM).

Em setembro de 2014 o 3GPP iniciou os trabalhos na Rel-14 (3GPP, 2016). A maioria de seus recursos RAN são destinados para melhoria da eficiência, requisitos de desempenho ou otimização da rede LTE. As principais características da Rel-14 incluem:

- Melhoria no FD-MIMO para LTE WI.
- Melhoria na Capacidade de *Uplink* para LTE WI.
- Comutação Baseada em Portadora SRS para LTE WI.
- Técnica de redução de latência L2 para LTE WI.
- Melhoria de mobilidade em LTE WI.
- Estudos sobre a entrega de serviços baseados em contexto.
- Melhorias EMBMS em LTE WI.

2.3 Considerações Finais

Este capítulo descreveu os fundamentos da tecnologia LTE. Foi enfatizada a origem da tecnologia LTE, seus requisitos e suas principais características. Em seguida, foi abordada a arquitetura do LTE e suas funcionalidades. Na sequência, os principais componentes de uma rede LTE (Core e Acesso) foram apresentados. Em seguida, foi descrito que o RRC funciona como uma máquina de estado responsável pela inicialização

e liberação dos recursos de rádio compartilhados entre os usuários e a rede. Na rede LTE o RRC foi simplificado, permanecendo os dois estados: RRC_IDLE e RRC_CONNECTED. Por último, o Capítulo descreve sobre o LTE - *Advanced* apresentando a definição, requisitos e suas especificações.

No próximo capítulo, será apresentada a técnica *Discontinuous Reception* – DRX, foco deste trabalho, onde será abordado o mecanismo DRX na rede LTE, os parâmetros para economia da bateria do UE e sua funcionalidade.

3 DISCONTINUOUS RECEPTION - DRX

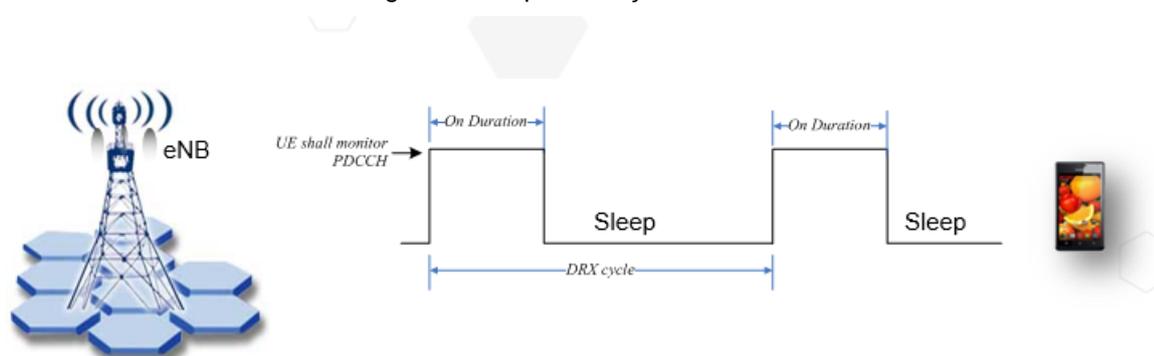
Este capítulo traz, na seção 3.1, a funcionalidade do mecanismo DRX. Na seção 3.2 será abordada a parametrização DRX para otimizar a economia da bateria do UE. A seção 3.3 é apresentado o procedimento DRX. A seção 3.4 traz o mecanismo DRX na rede LTE e na seção 3.5 são apresentadas as considerações finais do presente capítulo.

3.1 Funcionalidade DRX

Discontinuous Reception (DRX) é um método para conservar a energia da bateria do dispositivo móvel na rede LTE, especificado pelo 3GPP, que permite que o UE monitore a rede periodicamente para identificar mensagens PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) sobre o canal compartilhado alocado para ele. Durante a operação do DRX, o UE entra no modo ativo, conhecido como período “*ON duration*”, momento este apto para transmitir e receber mensagens da rede e, em outro instante, o UE vai para o período “*sleep*”, momento que desliga seus circuitos receptores reduzindo consideravelmente o consumo de energia da bateria (3GPP, 2014). A alternância dos períodos *ON / sleep* e os demais parâmetros DRX, que serão discutidos mais adiante neste trabalho, são decididos pela rede e são fornecidos aos dispositivos móveis no instante em que são registrados na rede.

O ciclo DRX corresponde a uma repetição do período *ON duration* seguido pelo período *sleep*. O 3GPP especificou dois tipos de ciclo DRX, sendo o DRX longo e o DRX curto (3GPP, 2014). O ciclo DRX é um termo genérico e pode representar tanto o ciclo longo quanto o curto. O comprimento de um ciclo DRX é definido pela combinação de um período *ON* seguido do período *sleep*. A Figura 3.1 representa o ciclo DRX.

Figura 3.1 Representação de um ciclo DRX.



Fonte: (Huawei, 2013).

Na Figura 3.1, o período *ON duration* do UE, representa o intervalo total de tempo, em milissegundos, quando o UE está ativo. Neste período, ocorre a transmissão de dados no *downlink*. O período *sleep* representa o tempo, também em milissegundos, que o UE não ouve a rede e não há transmissão de dados nesse período ocasionando maior economia de energia. Quando o DRX é habilitado, é incluído um tempo para o *On duration*, momento em que UE está monitorando continuamente as mensagens no PDCCH condicionado pelo temporizador de inatividade do DRX.

O funcionamento do mecanismo DRX é realizado por vários temporizadores. Enquanto alguns destes temporizadores são periódicos, outros são não-periódicos e acionados apenas mediante determinadas condições. A seguir, na seção 3.2, será descrita a parametrização dos temporizadores DRX conforme especificado em 3GPP (2014).

3.2 Parametrização DRX

Os parâmetros relacionados ao DRX são configurados pelo RRC e atribuídos ao UE quando o mesmo se conecta à rede. Neste instante, o UE monitora a atividade das mensagens PDCCH no canal *downlink* a fim de economizar energia da bateria. O DRX é configurado por parâmetros/temporizadores, tais como temporizador *ON duration*, temporizador de inatividade DRX e o ciclo DRX longo, sendo opcionais o temporizador de ciclo DRX curto e o ciclo DRX curto (3GPP, 2014).

Uma vez que várias aplicações têm diferentes sensibilidades a atraso, os parâmetros DRX escolhidos pelo RRC tomam como base a qualidade de serviço para cada aplicação. A seguir é descrita a definição dos parâmetros do ciclo DRX conforme 3GPP (2014).

- *DRX inactivity timer* (T_1): Indica o tempo em número de subquadros consecutivos para esperar antes de ativar o DRX. Este temporizador é zerado e inicializado imediatamente após a recepção bem sucedida de mensagens PDCCH (alocação de banda ou recurso concedido). Quando o temporizador expirar ao atingir o valor determinado para a portadora de rádio, o UE inicia o modo DRX.
- *Short DRX Cycle* ($T_{p,s}$): É o primeiro ciclo DRX a ser seguido após ativado o ciclo DRX. Ciclos DRX curtos prováveis são 2^n , $n = 1, \dots, 9$ e $5 \cdot 2^n$, $n = 1, \dots, 6$ em termos de subquadros ou milissegundos.
- *DRX Short Cycle Timer* (N_s): É expresso em números de ciclos DRX curtos. Este parâmetro indica o número de ciclo DRX inicial a ser seguido de um ciclo DRX curto antes da transição para o ciclo DRX longo (ou seja, quantos ciclos DRX são esperados para que o UE passe para o estágio DRX longo).
- *Long DRX Cycle* ($T_{p,L}$): É o ciclo DRX a ser seguido após N_s ciclos DRX (temporizador de ciclo DRX curto). O ciclo DRX definido deve ser cíclico no que deve ser da forma 2^n ou $5 \cdot 2^n$ para inteiro n . Os ciclos DRX longos permitidos são 2^n , $n=5, \dots, 11$ e $5 \cdot 2^n$, $n=1, \dots, 9$ em termos de subquadros ou milissegundos.
- *ON duration timer* (T_{ON}): É o número de quadros sobre os quais a UE deve ler o canal de controle no *downlink* (DL) de cada ciclo de DRX antes de entrar no modo de economia de energia. T_{ON} é inferior a $T_{p,L}$ e $T_{p,s}$. Os valores permitidos para T_{ON} em número de subquadros (ou milissegundos) são 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 200.
- *DRX offset* (T_{offset}): É utilizado para se obter o número de subquadros de partida para o ciclo de DRX, T_p , em subquadros, com relação a 10.240 subquadros ou milissegundos. Isto é, DRX é ativado de início com o quadro que satisfaz a condição $(SFN * 10 + n) \% T_p = T_{offset}$, onde T_p é igual para $T_{p,s}$ e $T_{p,L}$ para os ciclos DRX curto e longo, respectivamente. SFN e n representam a estrutura de quadro de rádio e número subquadros, respectivamente ($0 \leq SFN \leq 1023$ e $0 \leq n \leq 9$). Quando a condição descrita pela equação acima for cumprida, o UE “escuta” os

subquadros atuais e os seguintes $T_{ON} - 1$ subquadros para PDCCH, e, em seguida, permite que o modo desligamento para o próximo subquadro $T_p - T_{ON}$.

- *Retransmission Timer (T_R)*: Indica o máximo número de subquadros que o UE deve esperar antes de desligar os circuitos se uma retransmissão de dados for esperada a partir da eNB. Isto é, quando retransmissões são esperadas, T_{ON} é estendido.

A seguir, na seção 3.3, é definido o procedimento do mecanismo DRX conforme especificado em 3GPP (2014).

3.3 Procedimento DRX

Quando o ciclo DRX é configurado, o UE deve seguir o procedimento abaixo para cada TTI:

- Sempre que inicia um novo ciclo DRX, o *On Duration* é inicializado.
- Se uma atribuição no DL foi configurada para este TTI, inicie o temporizador HARQ RTT.
- Se o temporizador *On Duration* ou o temporizador de inatividade DRX ou o temporizador de retransmissão estiver em execução; ou
- Se uma concessão UL para uma retransmissão pode ocorrer:
 - UE deverá monitorar o PDCCH;
- Se o PDCCH for decodificado com sucesso:
- Se o PDCCH indicar uma transmissão DL:
 - Inicie o temporizador HARQ RTT.
- Se o temporizador *On Duration* ou temporizador de inatividade DRX estiver em execução e o PDCCH indica uma nova transmissão:
 - Inicia ou reinicia o temporizador de inatividade.

- Se o temporizador de inatividade DRX expira neste TTI:
 - Inicia o temporizador de ciclo DRX curto se configurado;
 - Use o ciclo DRX curto se configurado se não, use o ciclo DRX longo.
- Se o temporizador do ciclo DRX curto ou o temporizador *On Duration* expira neste TTI:
 - Use o ciclo DRX longo.
- Se o temporizador HARQ RTT expira neste TTI:
 - UE deve iniciar ou reiniciar o temporizador de DRX de retransmissão.

Independentemente do UE monitorar ou não o PDCCH, o UE recebe e transmite HARQ quando o retorno é esperado (3GPP, 2014).

3.4 Mecanismo DRX no LTE

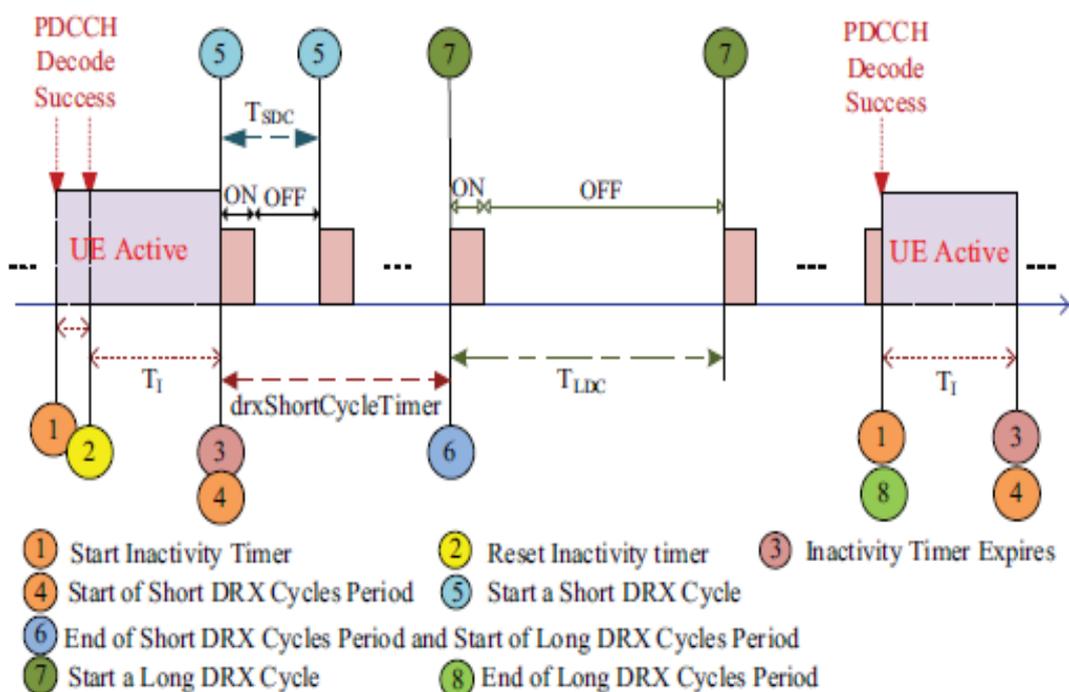
No LTE, o modo DRX pode ser ativado em ambos os estados *RRC_IDLE* e *RRC_CONNECTED*. No *RRC_IDLE*, o UE está registrado na rede com o *evolved packet system* (EPS), *mobility management* (MME), mas não possui uma sessão ativa. Neste estado, o UE pode ser procurado para tráfego no *downlink*, como também, o UE pode iniciar um tráfego no *uplink* requisitando uma conexão RRC com a eNB (BONTU; ILLIDGE, 2009).

O modo DRX no *RRC_CONNECTED* é inicializado durante períodos ociosos da rede quando há processo de chegada de pacotes. Quando não há novos pacotes para serem transmitidos ou recebidos, o eNB/UE dar início ao modo DRX (BONTU; ILLIDGE, 2009). No entanto, a funcionalidade e configuração dos parâmetros DRX são diferentes nestes estados. Uma vez que as transmissões de dados ocorrem principalmente no

estado conectado, o presente trabalho está direcionado para o mecanismo DRX no estado conectado.

A Figura 3.2 descreve a funcionalidade do mecanismo DRX no estado RRC_CONNECTED. Para simplificar, o estado *RRC_IDLE* não será evidenciado na Figura. O RRC controla o mecanismo DRX no UE com base na configuração dos temporizadores: Temporizador *On Duration* (T_{ON}), Temporizador de Inatividade DRX (T_I), Ciclo DRX Longo (T_{LDC}), *drxStartOffset* e, opcionalmente, o temporizador de ciclo DRX curto e o ciclo DRX curto (T_{SDC}) (3GPP, 2013a). Os temporizadores evidenciados na Figura 3.2 correspondem aos parâmetros DRX descritos no presente trabalho.

Figura 3.2 Um cenário típico do mecanismo DRX no LTE.



Fonte: (JHA et al., 2012).

Avaliando a Figura 3.2, temos: Quando T_I está em execução, o UE monitora continuamente o PDCCH para um possível agendamento de uma transmissão DL para o UE. Após receber indicação de transmissão DL, o T_I é reinicializado, verificado na atividade 2 da figura. Após expirar o T_I , na atividade 3, o UE entra no ciclo DRX iniciando o T_{SDC} , como evidenciado na atividade 4, e o temporizador de ciclo DRX curto, na

atividade 5, caso o ciclo DRX curto esteja configurado. O ciclo DRX curto T_{SDC} é repetido até o temporizador de ciclo DRX curto expirar o que finalmente ocasiona o ciclo DRX longo T_{LDC} , conforme atividade 6. Se o ciclo DRX curto não estiver configurado, o T_{LDC} inicializa logo após a expiração de T_I . Após o término de T_I , o ciclo de DRX (curto ou longo) pode não inicializar imediatamente. O $drxStartOffset$ determina o próximo *subframe* onde o ciclo DRX terá início, após a expiração de T_I , tal como descrito em (3GPP, 2013a). Durante cada ciclo de DRX, sendo curto ou longo, o UE monitora mensagens no PDCCH para um período T_{ON} e permanece “dormindo” durante o resto do ciclo. Note que a duração de T_{ON} é igual para o comprimento dos ciclos DRX curtos e longos. Indicação da transmissão DL durante T_{ON} termina a operação de DRX e começa T_I . Do mesmo modo, a chegada de pacotes de dados da camada superior para transmissão UL durante T_{ON} termina o ciclo de DRX e começa a T_I (JHA et al., 2012; 3GPP, 2013a).

3.5 Considerações Finais

Este capítulo descreveu o DRX, especificado pelo 3GPP, e que permite conservar a energia da bateria do dispositivo móvel na rede LTE. Foi apresentada a funcionalidade do DRX e sua parametrização. Foi enfatizado que os parâmetros relacionados ao DRX são configurados pela máquina de estado RRC e atribuídos ao UE quando o mesmo se conecta à rede. Em seguida, foi abordado o procedimento DRX e as atividades que o UE deve seguir para cada TTI. Por último, o Capítulo descreve o mecanismo DRX e traz que, na rede LTE, o modo DRX pode ser ativado em ambos os estados *RRC_IDLE* e *RRC_CONNECTED*. Foi apresentado na Fig. 3.2 um cenário típico do mecanismo DRX no LTE. O Capítulo a seguir apresenta alguns trabalhos presentes na literatura que abordam o problema do consumo de energia dos dispositivos móveis na rede 3G/LTE.

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são trazidos alguns trabalhos presentes na literatura que abordam a problemática do consumo de energia dos dispositivos nas redes móveis 3G/LTE. Para enfrentar esse problema, a LTE adotou o mecanismo conhecido como DRX para reduzir o consumo de energia do UE ao inserir um atraso adicional da rede. Alguns desses trabalhos serão apresentados a seguir.

Segundo Zhou et al. (2008) o mecanismo DRX é apresentado como um processo semi-Markoviano, utilizando um modelo analítico para estudar os efeitos dos parâmetros DRX sobre o desempenho, no qual evidencia uma troca entre economia de energia e atraso *Wake UP* (acordar) no UE. Na oportunidade foi realizada uma comparação do desempenho entre os parâmetros DRX do UMTS e do LTE onde ficou evidenciado um melhor desempenho na economia de energia do LTE, além de um maior atraso no tempo de *Wake UP*. Foi realizada também uma comparação entre os resultados do modelo analítico adotado e os experimentos de simulação. O trabalho focou na eficiência do mecanismo DRX LTE com ajustes dos ciclos DRX e na observância dos efeitos em relação ao desempenho da economia de energia e atraso do UE. No mesmo ano Kolding et al. (2008) investigou diferentes algoritmos para otimizar o equilíbrio entre a taxa de transferência do usuário e economia de energia ao variar a configuração dos parâmetros DRX com base no tráfego *WEB*. O trabalho mostrou que foi alcançada uma melhoria na redução de 95% do consumo de energia do UE, com uma perda moderada e aceitável de 10 a 20% da taxa de transferência experimentada.

De acordo com Bontu e Illidge (2009) os métodos de economia de energia nos estados RRC_IDLE, RRC_CONNECTED são apresentados e os critérios para seleção do modo DRX são definidos para diferentes aplicações com sensibilidade variáveis ao atraso. Resultados analíticos e de simulação são apresentados para mostrar economia de energia ao variar os valores dos parâmetros DRX para observação dos seus efeitos no desempenho da economia de energia em relação ao atraso do pacote na rede.

Wigard et al. (2009) traz uma comparação entre cenários com ciclo DRX longo e cenários com ambos os ciclos, longo e curto, em termos de taxa de transferência e economia de energia. Em Wang et al. (2012) é realizada uma análise do atraso e o consumo de energia do DRX em diferentes estados e utiliza modelo analítico para descrever transições do UE entre os ciclos DRX curto e longo.

Em Jha et al. (2012) é proposto um algoritmo para seleção eficiente da parametrização DRX para garantir uma troca balanceada entre energia e atraso, sendo avaliado seus impactos na rede. Foram investigados os efeitos do armazenamento de pacotes no desempenho do atraso nas aplicações durante atuação do DRX. O experimento foi realizado em ambiente de simulação OPNET³ e direcionou para o uso dos parâmetros de temporizador de inatividade (I-Timer), comprimento do ciclo DRX (long/short) e *ON Duration* (T_{ON}) fixo. O trabalho enfatizou a funcionalidade DRX somente no modo conectado, pois, é nesse estado que ocorrem as sessões de transmissão de dados.

Em 2013, foi proposto em Koc et al. (2013) o mecanismo DRX como um processo semi-Markoviano e é utilizado um modelo analítico para estimar economia de energia alcançada e o atraso com base no tráfego ativo do UE ocasionado pela operação do DRX. O modelo é validado usando resultados de simulação obtidos a partir do simulador OPNET. Um esquema de troca entre economia de energia e atraso é formulado com base nos requisitos de atraso no tráfego ativo e nas preferências do operador para economia de energia. Os resultados evidenciaram que o esquema de troca é eficiente e mantém equilíbrio do desempenho. Eles mostram também que ciclos DRX mais curtos reduzem a latência para o tráfego ativo.

Em Wang et al. (2013a) é apresentada uma análise quantitativa de economia de energia conseguida através da combinação dos ciclos DRX curtos e longos sendo variados os valores dos parâmetros DRX e avaliados seus impactos em termos de economia de energia do UE. A análise do consumo de energia do UE é realizada em diferentes estados com utilização dos parâmetros DRX *On Duration Timer*, *Short DRX*

³ Disponível em www.opnet.com/ (OPNET, 2016)

Cycle, Long DRX Cycle e Short DRX cycle Timer. O *Inactivity Timer* não foi utilizado no experimento para facilitar a análise. No mesmo ano WANG et al. (2013b) apresenta uma análise detalhada do atraso e do consumo de energia do mecanismo DRX com base nas especificações do LTE. Enfatiza o consumo de energia em diferentes estados e transições e compara os resultados encontrados na análise teórica com os resultados da simulação (atraso e consumo de energia). Foi assumido o padrão de chegada de pacotes de Poisson e modelo Markoviano para descrever a transição do UE entre os ciclos DRX curto e longo. O *Inactivity Timer* não foi utilizado para facilitar a análise.

O trabalho de Mads et. al. (2013) traz um modelo de energia para *smartphones* LTE e apresentado para avaliar o tempo de vida da bateria dos usuários na rede LTE. O modelo baseia-se em medições empíricas usando três *smartphones* LTE. Todas as medições realizadas foram em ambiente de teste controlado, no qual cada UE foi colocado em uma gaiola de *Faraday* para garantir uma proteção e que os mesmos ficassem livres de interferência das estações de rádio base (ERB) dos laboratórios vizinhos. Os UEs utilizavam baterias fictícias e estavam conectados por um emulador eNodeB, modelo Anritsu 8820C, de acordo com as diretrizes de medições de testes de vida da bateria do GSMA TS09⁴. O trabalho apresentou uma comparação dos resultados das medidas de energia e desempenho da rede entre o subsistema celular e outros componentes do *smartphone*, o que mostrou que a conexão LTE pode contribuir com até metade do consumo total de energia do UE.

Koc et al. (2014) apresenta um mecanismo DRX como um processo semi-Markoviano e é avaliada a economia de energia e a latência da rede ocasionada pela atuação do DRX para o tráfego móvel e *background*. O modelo é validado usando resultados de simulação obtidos a partir do simulador OPNET. Um esquema de troca é formulado para manter o equilíbrio entre os parâmetros de desempenho de economia de energia e requisitos de latência para o tráfego. Os resultados demonstraram que o esquema de troca é eficiente mantendo equilíbrio do desempenho e mostra também que ciclos DRX mais curtos reduzem a latência para o tráfego ativo, enquanto que temporizadores de inatividade mais curtos são desejáveis para o tráfego no *background*

⁴ Disponível em http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/TS.09_v8.0.pdf (GSMA, 2016)

para melhorar a economia de energia. Além disso, é proposto um mecanismo para mudança da configuração DRX com base no tráfego do UE conforme procedimento adotado no 3GPP - Release 11.

Em Varma et al. (2014) são propostos dois algoritmos para ajuste dinâmico dos parâmetros DRX a fim de reduzir o consumo de energia e o atraso adicional ocasionado pela atuação do DRX. Os algoritmos usam informação de QoS e qualidade do canal (CQI) para ajustar os parâmetros DRX. O algoritmo DBT (*Delay Based Timers*) utiliza como referência a informação de atraso do pacote e o outro algoritmo, chamado de CDBT (CQI – *Delay Based Timers*), considera o atraso do pacote e a informação da qualidade do canal. O experimento foi realizado através dos simuladores ns-3⁵ e simulador de rede LTE-EPC (LENA)⁶. O foco do trabalho foi na seleção dos parâmetros DRX com base nos resultados da simulação e avaliados nas aplicações VoIP, *Streaming* de vídeo e dados em rajada. Os parâmetros DRX utilizados foram: DRX Long, ON duration e temporizador de inatividade (I-Timer). O DRX short não foi utilizado para simplificação dos testes.

Em relação aos trabalhos expostos, observa-se uma limitação comum entre eles que é a utilização de ambientes simulados ou modelagem analítica, tornando-se improvável capturar o perfil dos padrões de tráfego do ambiente de uma rede LTE em produção ao utilizar uma distribuição estatística com alguns parâmetros. O trabalho de Mads et. al. (2013) enfatiza ser o primeiro estudo empírico a investigar o impacto da configuração DRX na rede LTE. No experimento foram utilizados três *smartphones* reais para realização das medidas de desempenho, colocados em um local protegido e livres de interferência (gaiola de *Faraday*) das ERBs dos laboratórios vizinhos, porém os UEs estavam conectados a um emulador de eNB não refletindo a realidade de uma rede em produção.

⁵ Informações do simulador ns-3 está disponível em <https://www.nsnam.org/docs/release/3.14/tutorial-pt-br/singlehtml/index.html> (NS3, 2016)

⁶ Informações do simulador LENA está disponível em <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/> (LENA, 2016)

O presente trabalho difere dos demais e tem como principal contribuição avaliar a técnica DRX em um operador móvel LTE em produção. Outro ponto importante, observado com esse trabalho, é que foi possível medir e otimizar os parâmetros DRX em um site eNB e evidenciar a redução de até 63% do consumo de energia da bateria dos UEs devido à atuação do DRX.

5 AMBIENTE/CENÁRIO DE TESTES E ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo apresenta o ambiente/cenário dos testes bem como a análise dos dados capturados através do sistema de monitoramento da rede do operador móvel. Na seção 5.1 é apresentado o software utilizado nas medições do presente trabalho. A seção 5.2 é sumarizada a parametrização DRX baseada nas especificações do 3GPP como também a configuração DRX utilizada nos testes. Em seguida, na seção 5.3 são apresentados os resultados obtidos em termos de desempenho da rede, tais como taxa de dados e atraso da rede. Além disso, é apresentada a avaliação do consumo de energia do UE motivada pela atuação do DRX.

5.1 Software de medição

O software utilizado nas medições foi o NetMetric, cedido pelo operador móvel, para realização dos testes no presente trabalho. Trata-se de uma ferramenta de medição de redes IP que tenta alinhar as vantagens do monitoramento ativo de redes com um controle racional da intrusão de tráfego que ela provoca. É uma ferramenta aplicável a terminais de redes IP sobre qualquer meio físico, permitindo que estes estabeleçam medição entre si independente da topologia disposta (PETRY, 2013).

A arquitetura do NetMetric é apresentada na Figura 5.1, sendo composta por três grandes módulos de software com funções distintas e complementares entre si: o agente, ativamente responsável pelas medições, o refletor, que auxilia a obtenção de indicadores primários de rede com recursos especializados, e o *Manager of Managers* (MoM), a interface centralizada de gerenciamento do sistema (LAUTENSCHLÄGER et al., 2016).

Figura 5.1 Arquitetura do NetMetric incluindo seus três módulos e o fluxo de comunicação entre os mesmos.

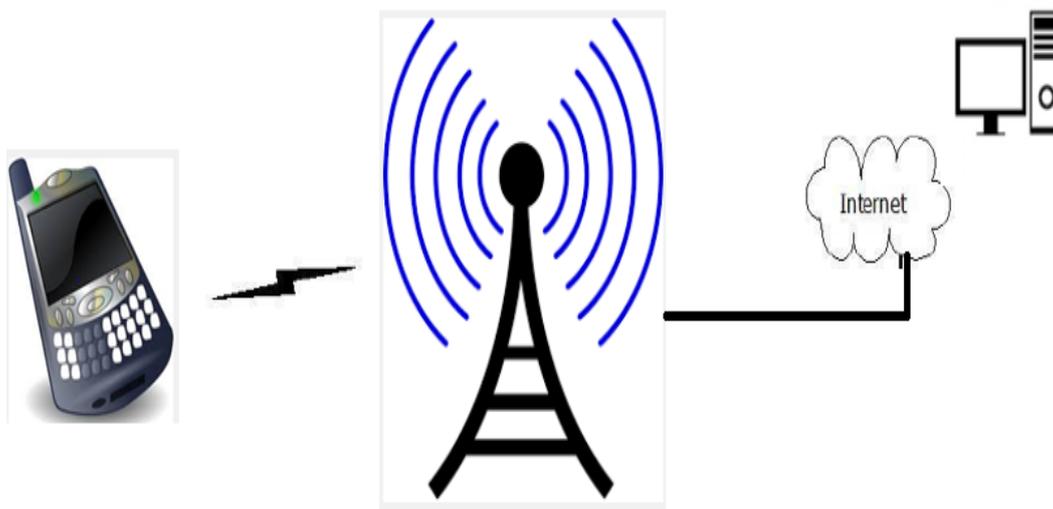


Fonte: (LAUTENSCHLÄGER et al., 2016).

5.2 Coleta dos Dados

Os dados para o presente trabalho foram extraídos a partir do servidor do NetMetric através do módulo MoM, que faz o gerenciamento dos agentes (UE) na rede, e proporciona a visualização dos resultados gerados a partir do UE. Para a realização dos testes na rede, foi configurada uma agenda de testes onde foram definidas as métricas que seriam utilizadas, a periodicidade e o horário das medições que serão realizadas. As métricas adotadas na agenda de testes do UE contemplavam a vazão TCP/UDP, RTT e OWD. O período adotado para as medições era a cada 30 minutos e totalizava 48 medidas diárias. A Figura 5.2 apresenta a estrutura do mecanismo de medição para coleta dos dados a partir do UE conectado ao site eNB.

Figura 5.2 Estrutura do mecanismo de medição do UE na rede do operador.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Na Figura 5.2, temos o servidor de aplicação que utiliza o NetMetric. O UE, que é o módulo agente no NetMetric e que injeta o tráfego para a rede. O UE está conectado à rede através do site eNB que possui a técnica DRX instalada. Foram instalados cinco tipos de configurações DRX no site eNB, além da configuração sem DRX para operação normal do *site* na rede do operador. Ao todo, foram 30 dias de medições ativas na rede.

5.3 Sequência para procedimento dos testes

A seguir é apresentada a sequência para procedimento dos testes na rede do operador móvel para análise da técnica DRX.

- Ativar/Desativar a técnica DRX no site eNB;
- UE com a bateria carregada a 100% para início dos testes;
- UE com o software instalado para realização das coletas dos dados;
- Software de monitoramento do operador móvel sendo executado para medidas de desempenho e coleta dos dados.

5.4 Consumo de potência do dispositivo

O sistema de medição de desempenho do operador móvel apresenta o consumo da bateria do UE em termos percentuais. Para obtenção destes valores em unidade de consumo Wh, foram realizadas trinta medidas de consumo para estimar a média consumida pelo UE em um período de 12 horas.

Testes de descarga da bateria

- Duração de cada amostra: 12 horas
- Modelo do UE: Motorola MotoG3
- Site LTE sem a técnica DRX instalada.

O procedimento dos testes realizados para estimar a potência consumida no UE é apresentado da seguinte forma:

- Bateria do UE 100% carregada no início do teste e registro do percentual final em cada amostra pelo sistema de medição. Em paralelo, é registrado o consumo em KWh durante os mesmos períodos pelo medidor de energia.
- Cálculo estatístico referente ao consumo médio para cada um dos experimentos de descarga da bateria.

A Figura 5.3 apresenta o aparelho utilizado para medir energia consumida pelo UE no período de 12 horas.

Figura 5.3 Medição da energia consumida pelo UE.

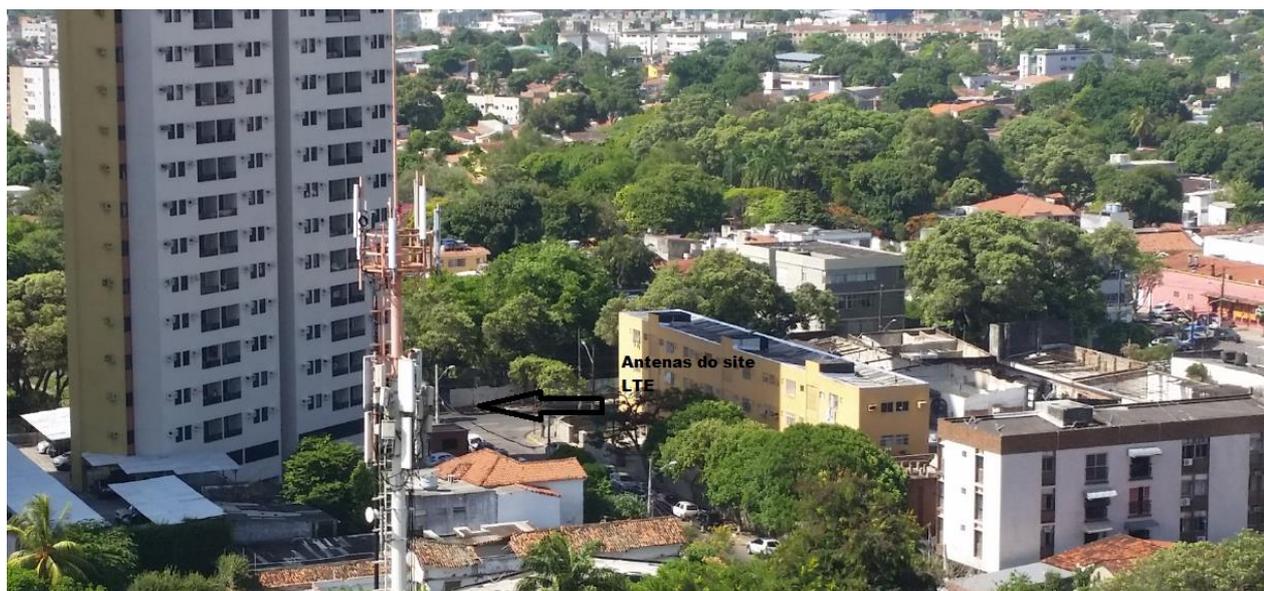


Fonte: (Elaborada pelo autor).

5.5 Ambiente do estudo

Os testes da rede LTE do operador foram realizados na cidade do Recife e a técnica ciclo DRX foi inserida na configuração do site LTE. A região onde os testes ocorreram é uma área residencial e a escolha do site foi indicada pelo operador móvel. A Figura 5.4 apresenta o site LTE do operador na cidade do Recife.

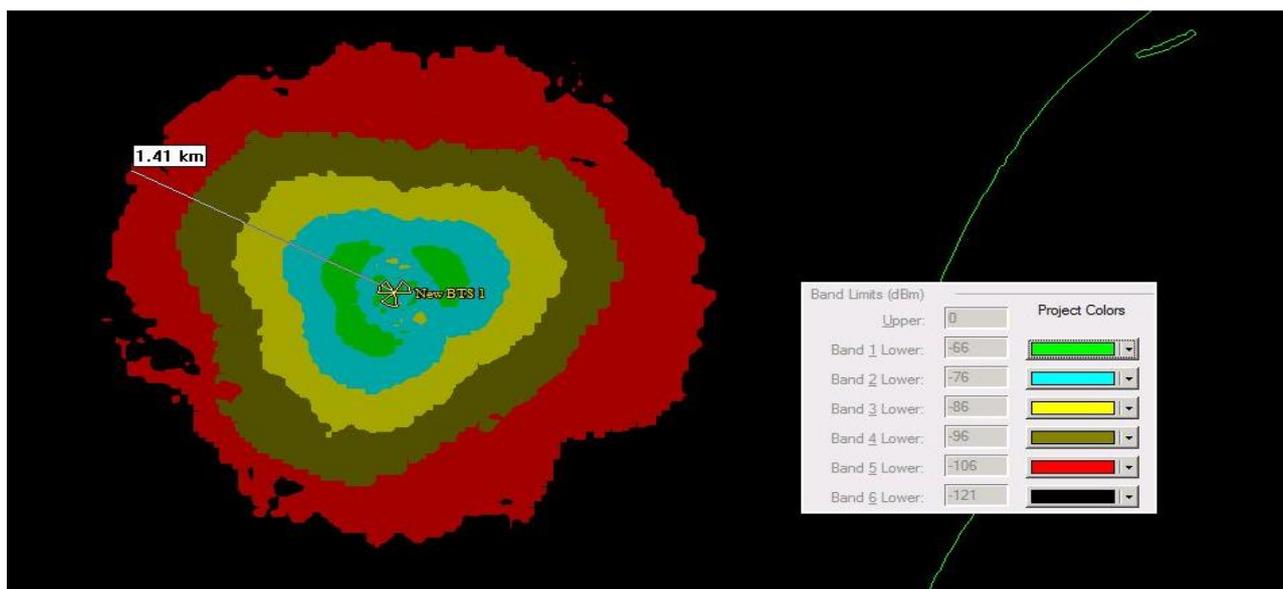
Figura 5.4 Foto do site LTE da operadora localizado na cidade do Recife.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

A Figura 5.5 apresenta o estudo de predição individual do site LTE avaliado, evidenciando as medidas de níveis de sinais sobre a área de cobertura do site e designada por cores. As cores verde e vermelho, respectivamente, representam os sinais de maior e menor intensidade na área coberta pelo site. A extensão do raio de cobertura do site LTE é aproximadamente 1,41km. O UE avaliado encontra-se com nível de sinal presente na área verde.

Figura 5.5 Predição do site LTE localizado na cidade do Recife.



Fonte: (Imagem da tela do software do sistema de predição da operadora).

5.6 Parametrização e Configuração do DRX

Abaixo, nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente, são apresentados os parâmetros DRX conforme padronização 3GPP (3GPP, 2014) e o conjunto de configuração dos parâmetros DRX utilizados bem como seus valores definidos e executados nos testes para obtenção de vazão, atraso da rede e economia de energia dos dispositivos móveis.

Tabela 5.1 Parâmetros DRX – 3GPP.

Temporizador de Inatividade DRX (ms) - InactivityTimer	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 300, 500, 750, 1280, 1920, 2560.
Ciclo DRX Curto (ms) - ShortDRX	10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 128, 160, 256, 320, 512, 640.
Temporizador de Ciclo DRX Curto (ms) - ShortDRX-Timer	1 a 16.
Ciclo DRX Longo (ms) - LongDRX	8, 10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 128, 160, 256, 320, 512, 640, 1024, 1280, 2048, 2560.
ON Duration (ms) - On-Timer	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200.

Os valores dos respectivos parâmetros DRX contidos na tabela 5.1 são definidos pelo 3GPP conforme Wang et al. (2013) e 3GPP (2014) e explicados no Capítulo 3 do presente trabalho. A Tabela 5.2 apresenta as configurações dos parâmetros DRX com seus respectivos valores definidos com base na parametrização do DRX do 3GPP conforme apresentada na Tabela 5.1. À pedido do operador, as configurações DRX adotariam um padrão para se chegar a uma configuração que priorizasse economia de energia e uma outra mais direcionada para uma melhor taxa de dados, ou um meio termo para ambos. Assim, baseada na Tabela 5.1, os valores menores dos parâmetros LongDRX, ON-Timer e ShortDRX conforme configuração 1 foi direcionada, a princípio, para uma melhor vazão e as demais configurações 2 a 5 direcionadas para economia de energia do UE, pois foram adotados valores maiores dos parâmetros mencionados anteriormente, além de uma variação nos valores dos temporizadores InactivityTime e LongDRX. O parâmetro ShortDRX_Timer foi ajustado com valor 1 em todas as configurações. A configuração do SEM DRX serviu como *baseline* para comparação das configurações DRX uma vez que a técnica fica desabilitada no eNB avaliado, tendo seus campos DRX todos com valor 0.

Tabela 5.2 Configuração dos parâmetros DRX e valores utilizados nos testes.

Configuração\Parâmetros	InactivityTimer	LongDRX	ON-Timer	ShortDRX	ShortDRX_Timer
1	80(ms)	40(ms)	2(ms)	20(ms)	1
2	100(ms)	320(ms)	10(ms)	80(ms)	1
3	60(ms)	320(ms)	10(ms)	80(ms)	1
4	100(ms)	640(ms)	10(ms)	80(ms)	1
5	60(ms)	640(ms)	10(ms)	80(ms)	1
SEM DRX	0	0	0	0	0

5.7 Resultados obtidos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em termos de desempenho da rede como também é sumarizada a avaliação do consumo de energia do UE devido à atuação do DRX.

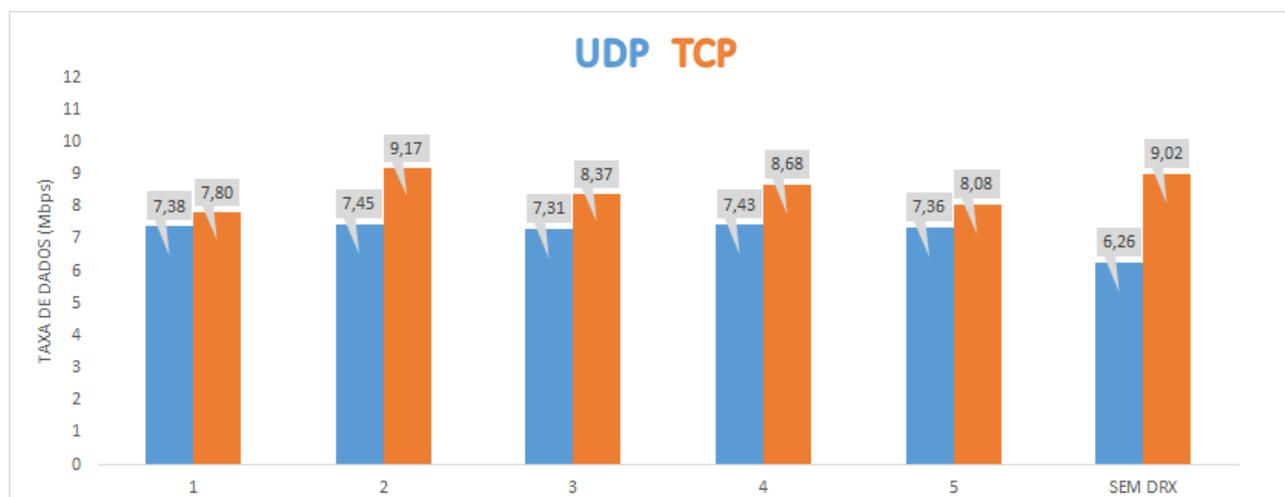
5.7.1 Avaliação da Taxa de dados

Apresentamos nesta seção os resultados para a métrica da taxa de dados ou vazão TCP/UDP, constituindo umas das mais importantes medidas na análise de desempenho de redes. Importante avaliar os protocolos TCP e UDP por se tratar de testes em ambientes reais. O protocolo TCP é complexo e envolve a conexão, controle de fluxo, atraso, bem como garante a entrega confiável dos dados. Ele realiza um controle de congestionamento aumentando e diminuindo a taxa de transmissão quando detecta perda de pacotes ou atraso. Devemos levar em consideração essa característica do TCP pois as medições foram realizadas em rede real. Ao contrário do TCP, o UDP é um protocolo simples. É um serviço não orientado a conexão, não confiável na transferência de dados e não inclui mecanismo de controle de congestionamento (KUROSE; ROSS, 2010).

A Figura 5.6 apresenta as taxas de dados alcançadas, em Mbps, pelos conjuntos de configurações DRX apresentados na Tabela 5.2. A configuração da eNB SEM DRX serviu como *baseline* para comparar a taxa de dados com as demais configurações durante os testes realizados. A rede comercial do operador é configurada sem DRX e a

técnica foi inserida na rede apenas para análise da eficiência e sustentação do presente trabalho.

Figura 5.6 Taxa de dados alcançada para aplicações no *Uplink* UDP e TCP.



Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas da taxa de dados fornecidas pelo software de medição).

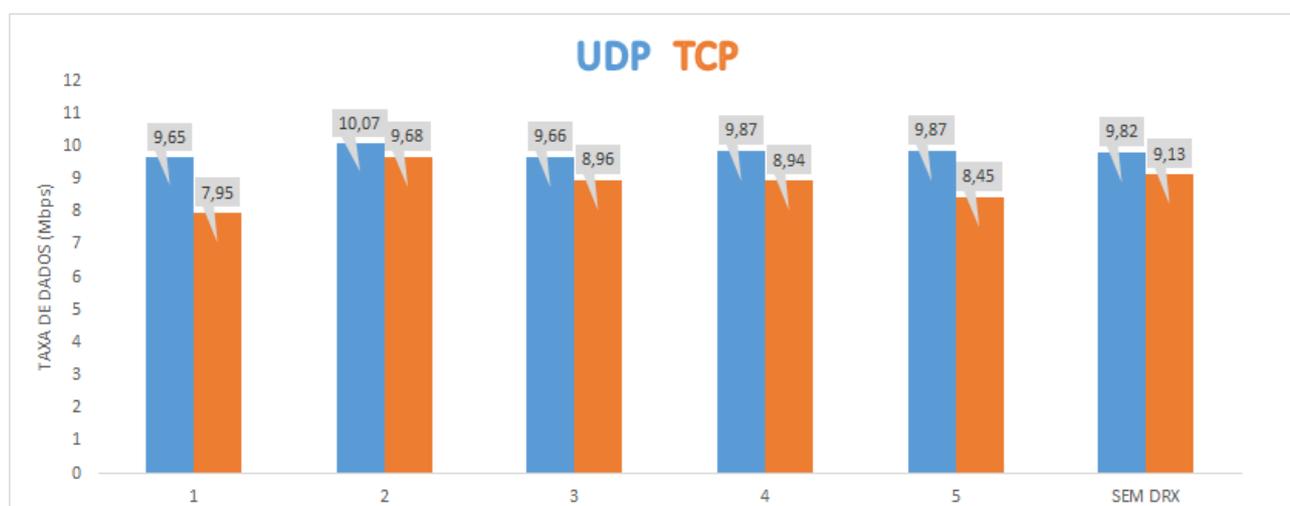
Conforme apresentada na Figura 5.6, a configuração 2 apresentou melhor desempenho em termos de taxa de dados no sentido *Uplink* para aplicações que utilizam os protocolos da camada de transporte UDP/TCP em comparação às demais configurações e, inclusive, apresentou melhor desempenho que a configuração do site eNB SEM DRX. Em contrapartida, a configuração 1 adotada a princípio para conseguir melhor vazão, foi uma das que obtiveram menor taxa de dados. Nessa configuração, observou-se o tempo reduzido que o UE permaneceu no estado ativo da rede, evidenciado nos valores dos parâmetros InactivityTimer e ON-Timer, cujo valores foram fixados em 80ms e 2ms, respectivamente. A configuração SEM DRX obteve menor volume na taxa de dados durante os testes para o sentido *Uplink* quando utilizadas aplicações com o protocolo de transporte UDP, porém foi a que obteve a segunda melhor vazão ao utilizar aplicações com o protocolo TCP.

Ao analisar as configurações 2 e 3, verificou-se a influência do InactivityTimer do DRX, onde o parâmetro foi ajustado em 100ms e 60ms, respectivamente. Ou seja, o UE na configuração 3 irá transitar para o modo ShortDRX de forma mais rápida caso não detecte novas mensagens no *Uplink*. Em contrapartida, o UE na configuração 2

permaneceu por um tempo maior no estado ativo da rede, o que influenciou no seu melhor desempenho em termos da vazão alcançada da rede. Ao comparar as configurações 4 e 5, observou-se novamente a influência do InactivityTimer do DRX. Essa comparação evidenciou uma melhor taxa de dados para a configuração 4, devido ao maior valor do InactivityTimer, ajustado a 100ms. Este mesmo parâmetro na configuração 5 foi ajustado ao valor de 60ms. Ou seja, o UE na configuração 4 permaneceu um maior tempo no modo ativo da rede, o que ocasionou o melhor desempenho em termos de vazão UDP/TCP. A influência do parâmetro ciclo LongDRX foi percebida na comparação das configurações 2 e 4, onde os valores foram ajustados em 320ms e 640ms, respectivamente. Os demais parâmetros DRX foram ajustados com valores iguais. Assim, o menor tempo que o UE passou no estado de dormência da rede influenciou na vazão alcançada pela configuração 2.

Conforme apresentada na Figura 5.7, a configuração 2 experimentou a melhor taxa de dados no sentido *downlink* para aplicações que utilizam os protocolos da camada de transporte UDP/TCP em comparação às demais configurações DRX e, inclusive, apresentou melhor desempenho que a configuração SEM DRX. Nos testes, vale ressaltar que em todas medições no *downlink*, a vazão UDP foi superior à vazão TCP, isto está relacionado às características dos protocolos mencionadas anteriormente.

Figura 5.7 Taxa de dados alcançada para aplicações no *Downlink* UDP e TCP.



Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas da taxa de dados fornecidas pelo software de medição).

A configuração 1 obteve a menor vazão de dados nos testes, onde todos os valores do DRX foram reduzidos em relação às demais configurações. Nessa configuração, verificou-se a influência dos temporizadores InactivityTimer e ON-Timer, que tiveram seus valores ajustados em 80ms e 2ms, respectivamente. Observou-se nessa configuração que o menor tempo que o UE permaneceu no estado ativo da rede influenciou no desempenho da vazão alcançada. Ao comparar com a configuração 2, que obteve a melhor taxa de dados, verificou-se que ocorreu uma redução no tempo que o UE permanecerá aguardando para ativar o DRX e, neste caso, a chegada de uma nova mensagem PDCCH irá zerar e reiniciar o InactivityTimer. Na análise, com o maior valor do InactivityTimer na configuração 2, o UE ficou mais tempo no modo ativo, em outras palavras, “ouvindo” a rede por um tempo prolongado para detecção de novas mensagens PDCCH no *downlink*, o que influenciou na maior taxa de dados conseguida nos testes.

Foi observado nas configurações 4 e 5 que ao variar o valor do InactivityTimer para 100ms e 60s respectivamente, não ocorreu mudança significativa na taxa de dados. Os demais valores para essas configurações foram mantidos iguais, porém o valor adotado para o LongDRX foi ajustado para 640ms. Para avaliar a influência do LongDRX nos testes, comparamos as configurações 2 e 4, onde o valor desse parâmetro foi reduzido a 320ms na configuração 2. O UE na configuração 4 permaneceu mais tempo no período de “sono profundo” (*deep sleep*) que o UE na configuração 2, o que acarretou um maior atraso na rede e diminuindo a taxa de dados conseguida pelo UE.

Foi verificado que a configuração 2 experimentou o melhor desempenho em termos da taxa de dados no sentido *uplink/downlink* para aplicações que utilizam os protocolos UDP/TCP, quando comparadas às demais configurações DRX. Essa configuração apresentou um melhor desempenho em termos de vazão da rede em relação à configuração sem DRX, tornando-se uma excelente opção para sua implementação na rede do operador.

Até o momento, nossa discussão focalizou a taxa de dados da rede alcançada através de ajustes dos parâmetros e análise do comportamento da técnica DRX em um ambiente de rede comercial. Foi verificado que ao ajustar prudentemente a

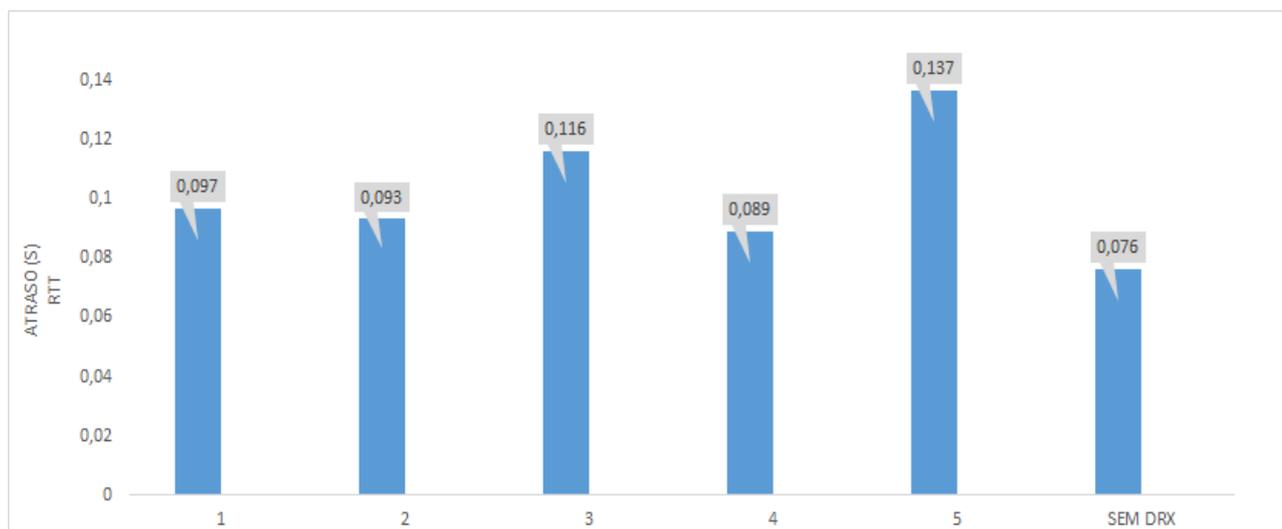
parametrização DRX, melhores resultados em termos de taxa de dados são alcançados pela atuação do mecanismo DRX e evidenciados nesta seção. Os atrasos da rede percebidos durante os testes decorrentes da atuação da técnica DRX foram avaliados e estão contidos na próxima seção do presente trabalho.

5.7.2 Avaliação do Atraso

A atuação do mecanismo DRX introduz sensível atraso da rede e nesta seção duas importantes métricas relacionadas ao atraso foram avaliadas. A primeira, é o RTT (*Round Trip Time*), que é o tempo entre um pacote ir da origem até o destino e retornar. O atraso de ida e volta é um importante parâmetro para determinar a vazão alcançada nas redes. A segunda métrica é o OWD (*One Way Delay*), sendo o atraso medido em apenas um sentido e é relacionado ao tempo do pacote ir da origem ao destino especificado. Existem inúmeros fatores para estimar esta métrica, sendo um deles a falta de sincronização entre os relógios envolvidos na origem e destino. Logo, não pode ser entendido que o atraso medido no OWD seja o medido no RRT e dividido por dois.

Basicamente, as análises dos parâmetros da seção anterior são repetidas aqui para avaliar o atraso da rede conforme parâmetros da Tabela 5.2. A Figura 5.8 apresenta o atraso RTT incorrido pela atuação do DRX na rede do operador comercial. É evidenciado que o site eNB sem DRX apresentou o menor atraso da rede, sendo esperado este resultado, uma vez que a técnica introduz atraso. O maior atraso percebido pela atuação do DRX foi na configuração 5, e o menor atraso foi notado para a configuração 4.

Figura 5.8 Atraso RTT para o *uplink* e *downlink* devido atuação do DRX na rede do operador móvel.



Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas da métrica RTT fornecidas pelo software de medição).

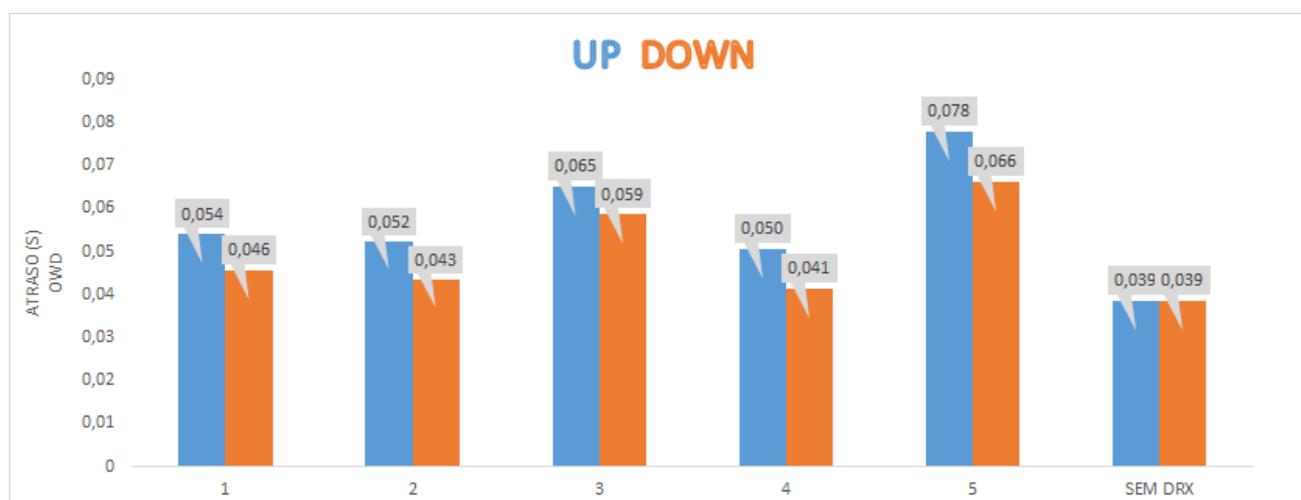
Ao avaliar essas configurações, nota-se a influência do InactivityTimer na configuração 5 que foi ajustado para 60ms, enquanto que o mesmo temporizador na configuração 4 foi fixado com o valor maior, 100ms. Ou seja, o UE na configuração 4 permaneceu mais tempo no estado ativo aguardando a chegada de novas mensagens PDCCH no canal *downlink* até transitar para o modo ShortDRX. E, caso o UE detecte uma nova mensagem no canal *downlink*, o InactivityTimer do DRX é zerado, é reinicializada uma nova contagem do tempo de 100ms e, caso não ocorra uma nova mensagem neste intervalo de tempo, o InactivityTimer irá expirar e o UE inicia o modo DRX. Vale enfatizar que, a configuração 4 que apresentou o menor atraso, foi a que experimentou segunda maior taxa de dados em aplicações UDP e a quarta maior em aplicações TCP.

Ao avaliar as configurações 3 e 5, verificou-se a princípio a influência do LongDRX no atraso RTT. Foi observado que ao ajustar um valor maior no LongDRX igual a 640ms na configuração 5 e fixados todos os outros valores dos parâmetros DRX em relação à configuração 3, ocasionou um maior atraso da rede conforme visto na Figura 5.8. No entanto, ao compararmos as configurações 2 e 4, o atraso da rede não ocorreu como era esperado e percebido nas configurações 3 e 5. Foram ajustados os parâmetros InactivityTimer elevando a 100ms nas duas configurações, além de alterado o valor do

LongDRX para 640ms na configuração 4 e mantidos todos os outros valores iguais dos parâmetros. Notou-se que a ação do InactivityTimer com o valor ajustado em 100ms nas configurações 2 e 4 reduziu o atraso da rede imposto pelo valor do LongDRX na configuração 5 conforme mostrado na Figura 5.8. Logo, verificou-se que apenas aumentar o valor do ciclo DRX longo forçando o UE a permanecer por um tempo maior no período de dormência, não implica em um maior atraso da rede.

A métrica OWD correspondente ao atraso em um sentido foi avaliada conforme apresentada na Figura 5.9 para *uplink* e *downlink*, respectivamente. A configuração DRX introduziu maior atraso OWD para o *uplink* em comparação ao *downlink*. A configuração SEM DRX não sofreu alteração nos valores de atraso da rede tanto no *uplink* quanto no *downlink*. Foi percebida que a configuração 5 apresentou maior atraso e a configuração 4 experimentou menor atraso OWD em comparação a todas configurações nos sentidos avaliados. Ao analisarmos as configurações 4 e 5, percebemos a influência do InactivityTimer que foi ajustado para 100ms e 60ms, respectivamente. Essas configurações foram as mesmas que apresentaram maior e menor atraso RTT conforme apresentada na Figura 5.8.

Figura 5.9 Atraso OWD para o *uplink* e *downlink*.



Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas da métrica OWD fornecidas pelo software de medição).

A influência do InactivityTimer novamente foi percebida na comparação das configurações 2 e 3, onde os valores foram ajustados em 100ms e 60ms,

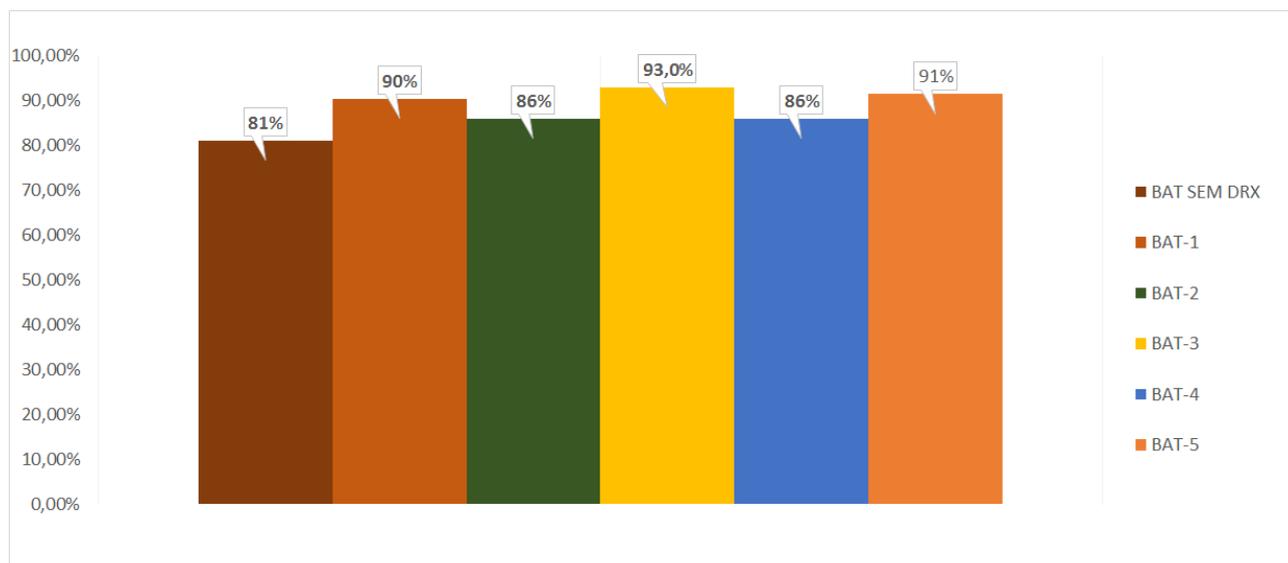
respectivamente. Os demais parâmetros DRX foram configurados com valores iguais. Percebeu-se que o UE na configuração 2 permaneceu por um maior tempo aguardando a chegada de novas mensagens PDCCH antes de transitar para o próximo ciclo DRX curto e, conseqüentemente, reduziu o atraso da rede imposto pelo mecanismo DRX. Ao comparar as configurações 2 e 4, notou-se que a ação do parâmetro InactivityTimer com o valor ajustado em 100ms nessas configurações, influenciou na redução do atraso da rede inserido pelo valor do LongDRX que foi ajustado para 640ms na configuração 4 conforme mostrado na Figura 5.9.

5.7.3 Avaliação do Consumo de Energia

Aqui, apresentamos o consumo de energia da bateria do UE durante testes realizados para diferentes configurações dos parâmetros DRX na rede do operador. As análises dos parâmetros DRX da seção anterior são repetidos aqui para avaliar a economia de energia da bateria do UE em função do atraso da rede conforme parâmetros da Tabela 5.2. A Figura 5.10 compara a economia da bateria do UE nas diferentes configurações DRX e, na Tabela 5.3, resumizamos o resultado do consumo de energia do UE em função do atraso da rede. Nessa tabela são apresentados os resultados da descarga da bateria do UE, o atraso incorrido pela atuação do DRX, bem como a comparação do atraso RTT e o consumo da bateria do UE nas configurações DRX em função da configuração da eNB sem DRX.

A Figura 5.10 apresenta o valor do percentual final dos testes das medidas da descarga da bateria do UE contemplando as diferentes configurações do site eNB com e sem DRX. O teste iniciava com a bateria carregada a 100% da carga total e ao término era verificada o percentual do consumo da mesma. Entretanto, o *software* de medição de desempenho do operador contém um campo que indica o percentual da bateria do UE durante os testes.

Figura 5.10 Percentual de descarga da bateria.



Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas do percentual da bateria do UE fornecidas pelo software de medição).

A Figura 5.10 enfatiza que a descarga da bateria do UE na configuração sem DRX apresentou o maior percentual de consumo, totalizando 19% e chegando ao término do teste com 81% da carga da bateria. A configuração 1 apresentou o percentual de 90% ao final do teste, sendo consumido 10% da energia da bateria. Importante frisar que essa configuração obteve o terceiro menor consumo de bateria e é devido aos ajustes nos valores dos temporizadores de *InactivityTimer*, 80ms, e do *On duration*, 2ms. Estes temporizadores influenciam diretamente na economia de bateria do UE, sendo que o temporizador de inatividade, ao expirar, inicia o ciclo DRX e, o *On duration* reduzido na configuração 1, diminuiu o tempo que o UE fica ativo na rede apto para transmissão e recepção de dados e ao expirá-lo, o UE vai para o modo *sleep* e consome menos energia.

As configurações 2 e 4, apresentaram percentuais iguais de consumo de bateria, refletindo ao final do teste o valor aproximado de 86% da carga, ou seja 14% de descarga da bateria. Vale ressaltar que a configuração 2 obteve a melhor taxa na transferência de dados e a segunda menor variação do atraso da rede. No entanto, a configuração 4 refletiu a terceira pior vazão e o menor atraso da rede, porém observa-se nessas configurações a influência do temporizador de inatividade DRX. Sendo que, a diferença das configurações dos parâmetros DRX, é o ajuste feito no DRX longo da configuração 4 para 640ms, enquanto que na configuração 2 é igual a 320ms. Nestas configurações, o

valor do temporizador de inatividade é igual a 100ms, refletindo que quanto maior for o valor da configuração DRX longo, forçando o UE a permanecer no período *sleep*, isso não irá refletir em economia de energia da bateria.

A configuração 3 apresentou a maior economia de energia conseguida nos experimentos, ficando ao término dos testes com percentual de 93% de carga da bateria, ou seja, consumiu apenas 7%. Nesse resultado, percebeu-se novamente a influência do temporizador de inatividade DRX, uma vez que o valor foi ajustado de 100ms para 60ms, fazendo com que o UE permaneça menor tempo no período ativo da rede, forçando o mesmo para transitar para o ciclo DRX curto ou longo e, assim, economizar energia. Essa configuração experimentou o segundo maior atraso da rede. No entanto, apresentou a segunda e a quarta menor taxa de transferência de dados no *downlink* TCP e UDP, respectivamente.

A configuração 5 apresentou a segunda maior economia de energia, ficando ao término dos testes com o percentual de 91% de carga da bateria e consumo igual 9%. Essa configuração experimentou o maior atraso da rede e apresentou a quarta menor taxa de dados no *downlink* TCP. Em relação à taxa de dados no *downlink* UDP, essa configuração apresentou a segunda melhor vazão. Notou-se na configuração 5 que o aumento do atraso da rede imposto pelo LongDRX não refletiu no percentual de economia de energia da bateria em relação à configuração 3.

A Tabela 5.3 apresenta o consumo de energia do UE em função do atraso da rede. A tabela contém o resumo dos valores dos níveis de carga da bateria no início e término dos testes, o percentual da descarga da bateria e o RTT médio sofrido pelo UE devido à configuração DRX. Os campos %RTT/SEM DRX e %BATERIA/SEM DRX representam o percentual do atraso RTT e o consumo da bateria em relação à configuração sem DRX. O campo POTÊNCIA CONSUMIDA - Wh representa a potência consumida pelo UE expressa em Wh (Watt hora) durante atuação do DRX. Os valores da configuração sem DRX relacionados à descarga da bateria e RTT médio foram utilizados como referência para que fossem calculados esses percentuais das demais configurações DRX da rede. E, assim, evidenciar o percentual de atraso e eficiência da bateria devido à atuação do DRX.

Tabela 5.3 Consumo de energia do UE em função do atraso.

BAT SEM DRX	RTT SEM DRX	BAT-1	RTT-1	BAT-2	RTT-2	BAT-3	RTT-3	BAT-4	RTT-4	BAT-5	RTT-5	
100%	0,074	100%	0,095	100%	0,088	100%	0,114	100%	0,086	100%	0,138	NÍVEL BATERIA/INÍCIO
81%	0,077	90%	0,092	86%	0,089	93%	0,108	86%	0,09	91%	0,144	NÍVEL BATERIA/TÉRMINO
19%		10%		14%		7%		14%		9%		DESCARGA DA BATERIA
	0,075		0,091		0,087		0,112		0,088		0,139	RTT MÉDIO
	0%		22%		16%		49%		18%		85%	% RTT/SEM DRX
0%		-50%		-26%		-63%		-26%		-55%		% BATERIA/SEM DRX
6,802Wh		3,58Wh		5,012Wh		2,506Wh		5,012Wh		3,222Wh		POTÊNCIA CONSUMIDA-Wh

Fonte: (Elaborado pelo autor a partir dos resultados das medidas do percentual da bateria do UE e RTT fornecidas pelo software de medição).

Ao avaliar a Tabela 5.3, verificou-se que a configuração 1 apresentou um atraso da rede devido à atuação do DRX de 0,091s, sendo o valor correspondente a 22% maior em relação ao atraso sem DRX, que foi de 0,075s. No entanto, ocorreu uma economia de energia da bateria na ordem de 50% em relação à configuração sem DRX conforme mostrado no campo % BATERIA/SEM DRX. A configuração 2, apresentou um atraso médio de 0,087s, acarretando uma lentidão na rede de 16% em relação à configuração sem DRX e uma eficiência da bateria na ordem de 26%. A configuração 3 apresentou um atraso médio de 0,112s, ocasionando uma lentidão na rede de 49% quando comparada a configuração sem DRX. O atraso percebido na rede ocasionou uma eficiência significativa da bateria de 63% em relação à economia conseguida sem atuação do DRX. A configuração 4 apresentou 0,088s de atraso na rede, sendo 18% mais lenta, porém, 26% mais eficiente que a bateria sem DRX. A configuração 5 apresentou o maior atraso percebido na rede, cujo valor foi de 0,139s, sendo um atraso 85% maior quando comparado à configuração sem a técnica DRX. O atraso percebido na rede proporcionou uma maior eficiência da bateria alcançando 55% a mais que a economia conseguida sem atuação do DRX.

A Tabela 5.3 apresenta também a potência consumida no UE durante os testes de medições e evidenciou que há uma diminuição do consumo da potência ao adotar a técnica DRX na rede LTE. A potência consumida no UE sem a configuração DRX,

alcançou o valor de 6,802Wh, sendo a maior em relação à todas configurações DRX testadas. O menor valor de potência consumida pelo UE foi conseguido na configuração 3, cujo valor foi 2,506Wh. Essa configuração foi a que apresentou a maior eficiência na economia de energia da bateria, onde a mesma demonstrou ser mais eficiente 63% em relação à rede sem DRX. Este resultado enfatiza a influência do temporizador de inatividade DRX, uma vez que o valor foi ajustado de 100ms para 60ms, forçando com que o UE permaneça menor tempo no período ativo da rede, induzindo o mesmo para transitar para o ciclo DRX, caso configurado, a fim de economizar energia.

As configurações 2 e 4 alcançaram valores iguais de potência consumida, sendo 5,012Wh de consumo. Essas configurações apresentaram os maiores valores de consumo de potência do UE durante os testes. Ao analisar tais configurações, verificou-se a influência do temporizador de inatividade do DRX. Em ambas configurações, o valor desse temporizador foi ajustado em 100ms, induzindo ao UE permanecer por um maior tempo no modo ativo da rede e apto para receber mensagens PDCCH no canal *downlink*. O valor do LongDRX foi ajustado para as configurações 2 e 4, cujos valores foram 640ms e 320ms. Embora ajustado um maior valor para o LongDRX na configuração 4, forçando o UE a permanecer um maior tempo no período de dormência da rede, o atraso não refletiu na diminuição do consumo da potência devido ao valor configurado no temporizador de inatividade.

Ao analisar as configurações 4 e 5, notou-se novamente a influência do temporizador de inatividade, onde o mesmo foi ajustado em 100ms e 60ms, respectivamente. O menor valor desse temporizador na configuração 4, forçou ao UE permanecer um menor tempo no estado ativo da rede e transitar de forma mais para o ciclo DRX curto, acarretando um maior atraso da rede. Este atraso proporcionou uma redução da potência consumida pelo UE devido ao valor ajustado no temporizador de inatividade.

5.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o ambiente/cenário dos testes utilizados para realização das medidas na rede LTE. Além disso, evidenciou a análise dos dados coletados através do sistema de monitoramento da rede do operador móvel, bem como apresentou o software utilizado nas medições ativas da rede. Verificou-se ainda a parametrização DRX com base nas especificações do 3GPP, assim como a configuração DRX utilizada nos testes. Este capítulo trouxe os resultados obtidos em termos de desempenho da rede, tais com vazão UDP/TCP, atraso e percentual de economia de energia motivado pela atuação do DRX. O capítulo mostrou que, ao ajustar prudentemente os parâmetros DRX, melhores resultados em termos de taxa de dados são alcançados pela atuação do mecanismo DRX. Neste capítulo o atraso da rede foi enfatizado e, que ao ajustar os parâmetros DRX de maneira eficiente conduz para redução do atraso adicional imposto pelo mecanismo DRX.

Neste capítulo foi apresentado o consumo de energia da bateria do UE durante testes realizados para diferentes configurações dos parâmetros DRX na rede do operador conforme apresentado na Figura 5.10. O resultado do consumo de energia em função do atraso da rede e a potência consumida pelo UE foi apresentado na Tabela 5.3. Esta Tabela apresentou que para algumas configurações DRX há uma economia de até 63% na redução do consumo da energia da bateria do UE, porém ao custo de um atraso adicional da rede. Após novos ajustes na configuração dos temporizadores DRX, principalmente o InactivityTimer, foi alcançada uma economia de energia da bateria entre 26% a 50%, reduzindo o atraso da rede a cerca de 9ms.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A evolução das redes sem fio 3GPP, em termos de capacidade e velocidade na transferência de dados, proporcionou o crescimento espetacular do uso dos smartphones na rede e mudou a maneira de como o usuário acessa a Internet, consumo de conteúdo e serviços. A rede 3G/LTE fornece altas taxas de dados na rede móvel, porém ocasionou o problema do consumo rápido da bateria dos dispositivos móveis e, em curto tempo, não há perspectiva de solução eficiente para resolver esse problema. Vale ressaltar que atualmente a experiência do usuário da rede LTE é limitada pela baixa autonomia da bateria dos dispositivos. Para contornar este problema, a rede LTE adotou a técnica conhecida como DRX que permite que o UE desligue seu circuito receptor no momento de ausência de dados transmitidos/recebidos na rede a fim de economizar energia da bateria ao custo de um maior atraso da rede.

Com este trabalho, foi possível avaliar a técnica DRX em uma rede comercial de um operador móvel LTE na cidade do Recife. Além disso, foi possível ajustar e otimizar os valores de configuração dos parâmetros DRX na rede em produção. Durante os testes e ajustes da rede, foi possível conseguir entre 26% a 63% de economia de energia da bateria do UE ao custo de um atraso adicional da rede. Para testes na rede, o operador móvel indicou as configurações 1 e 2. A primeira, direcionada para maior vazão da rede e, a segunda, para uma maior economia da bateria, porém resultados inesperados aconteceram. A configuração 2 apresentou a maior taxa de dados no sentido *downlink* para aplicações que utilizam os protocolos UDP/TCP em comparação às configurações DRX e, inclusive, obteve um melhor desempenho que a configuração SEM DRX. No entanto, a configuração 1 experimentou a menor taxa de dados nos testes. Nessa configuração, observou-se influência dos temporizadores *InactivityTimer* e *ON-Timer*, que tiveram seus valores ajustados em 80ms e 2ms, respectivamente. Estes valores forçaram ao UE permanecer menor tempo no estado ativo da rede, o que influenciou no desempenho da taxa de dados alcançada.

Os valores maiores dos respectivos parâmetros adotados na configuração 2, permitiu que o UE ficasse por um tempo maior no estado ativo da rede para detectar

mensagens PDCCH no *downlink*, o que proporcionou em uma maior taxa de dados durante os testes. Ao avaliar o atraso da rede para as configurações 1 e 2, verificou-se que a primeira configuração apresentou um atraso da rede de 0,091s, cujo valor correspondeu a 22% maior em relação ao atraso sem a técnica DRX, que foi de 0,075s. No entanto, foi conseguida uma melhor eficiência na economia de energia da bateria na ordem de 50% em relação à configuração sem DRX conforme evidenciada na Tabela 5.3. A configuração 2 apresentou um menor atraso médio de 0,087s, atrasando a rede 16% em relação à configuração sem DRX e uma economia da bateria na ordem de 26%. A maior economia de energia conseguida foi na configuração 3, atrasando a 49%, e alcançando uma eficiência significativa da bateria de 63% quando comparada à economia conseguida sem a técnica DRX.

O presente trabalho evidenciou o potencial da técnica DRX através de medições ativas na rede do operador e demonstrou que, com ajustes eficientes, uma maior autonomia da bateria do UE é alcançada. Este trabalho proporcionou um maior entendimento da técnica DRX em uma rede em produção e poderá fornecer subsídios para a área de planejamento de rede do operador para tomada de decisão para implementação da técnica DRX em toda a rede.

6.1 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho foi a oportunidade de medir, avaliar e otimizar a técnica DRX em uma rede 3G/LTE em operação comercial. Alcançar a redução do consumo de energia do UE na ordem de 63% em relação à configuração do eNB sem a técnica DRX. Além disso, com o maior conhecimento sobre a técnica, a área de planejamento de rede do operador terá subsídios suficientes para implementação da técnica em toda a rede. Vale ressaltar que, trabalhos que abordam a técnica DRX em rede comercial são escassos na literatura e, portanto, o presente trabalho servirá como importante fonte de pesquisa.

6.2 Trabalhos Futuros

O presente trabalho mostrou que a técnica DRX é um método eficaz para conservar a energia da bateria do dispositivo móvel na rede LTE. No entanto, melhores resultados são alcançados quando os parâmetros DRX são ajustados de maneira eficiente. Visando o desenvolvimento do presente trabalho e da técnica DRX, relaciono abaixo alguns pontos que vislumbramos ser objetos de futuras pesquisas.

- Avaliar a técnica DRX no operador LTE comercial em uma área de tráfego ativo e como maior números de usuários utilizando as métricas utilizados no presente trabalho;
- Realizar uma análise de sensibilidade entre os parâmetros DRX para determinar a influência entre os mesmos uma vez que é conflitante a troca entre economia de energia e atraso;
- Realizar uma análise de sensibilidade entre os parâmetros DRX para determinar a influência entre os mesmos sobre a eficiência energética;
- Avaliar a carga de processamento e aumento de sinalização RRC na rede LTE devido à atuação do DRX;
- Ajustar dinamicamente a parametrização DRX com base no nível de bateria do UE em uma rede real;
- Avaliar e otimizar o temporizador de inatividade do RRC na rede LTE do operador para uma melhor economia de energia da bateria do UE sem sobrecarregar a rede.

REFERÊNCIAS

(3GPP, 2010a) 3GPP. **TS 36.300**: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network; Overall description. 3rd Generation Partnership Project. 2010a. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36300.htm>>. Acesso em: 02 jan. 2016.

(3GPP, 2010b) 3GPP. **LTE Radio Layer 2, RRC and Radio Access Network Architecture**. 2010b. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Informations/presentations_2010/2010_06_India/3GPP20LTE20Radio20layer202.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2015.

(3GPP, 2011) 3GPP. **TS 36.321**: E-UTRA Medium Access Control (MAC) Protocol Specification. [S.l.: s.n.], 2011.

(3GPP, 2013a) 3GPP. **TS 36.331**: Radio Resource Control (RRC); Protocol specification. 3rd Generation Partnership Project, Release 13, v 13.4.0, 2013a. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36331.htm>>. Acesso em: 26 dez. 2016.

(3GPP, 2013b) 3GPP. **TS 36.104**: Base Station (BS) radio transmission and reception, v12.2.0. 3rd Generation Partnership Project, 2013b. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36104.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

(3GPP, 2014) 3GPP. **TS 36.321**: Medium Access Control (MAC) protocol specification. 3rd Generation Partnership Project, Release 12, v12.2.1, 2014. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36321.htm>>. Acesso em: 20 out. 2015.

(3GPP, 2015a) 3GPP. **LTE – 3GPP**. 2015a. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

(3GPP, 2015b) 3GPP. **TR 36.913**: Technical Specification Group Radio Access Network; requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced). Release 13, 2015b. Disponível em: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.913/

(3GPP, 2015c) 3GPP: **Evolved Universal Terrestrial Radio and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)**: radio interface protocol aspects. Release 7, 2015c. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--R2.htm?Itemid=307>>.

(3GPP, 2016) 3GPP. **Overview of 3GPP**. Release 14 v.0.1 (2014-09), 2016. Disponível em: <http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/>. Acesso em: 04 abr. 2016.

(4G AMÉRICAS, 2015) 4G AMÉRICAS. **2T2015**: mais de 750 milhões de conexões globais para LTE. 2015. Disponível em: <<http://www.4gamericas.org/pt-br/newsroom/releases-da-4g-americas/2t2015-mais-de-750-milhoes-de-conexoes-globais-para-lte/>>. Acesso em: 01 jan. 2016.

(ANATEL, 2015) AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Em outubro, Brasil soma 273,79 milhões de acessos móveis**. 2015. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/institucional/index.php/noticias/839-em-outubro-brasil-soma-273-79-milhoes-de-acessos-moveis>>. Acesso em: 28 dez. 2015.

(AGILENT, 2009) AGILENT. **3GPP long term evolution**: system overview, product development, and test challenges application note. 2009. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

(AGILENT, 2013a) AGILENT. 2013a. Disponível em: <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/AI./26Mar2013LTE_Webcast.pdf>

(AGILENT, 2013b) AGILENT TECHNOLOGIES. **LTE and the evolution to 4G wireless**: design and measurement challenges. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

(ALI-YAHIYA, 2011) ALI-YAHIYA, T. Understanding LTE and its performance. [S.l.]: Spring, 2011.

(BALASUBRAMANIAN et al., 2009) BALASUBRAMANIAN, N.; BALASUBRAMANIAN, A.; VENKATARAMANI, A. Energy consumption in mobile phones: a measurement study and implications for network applications. In: ACM SIGCOMM CONFERENCE ON INTERNET MEASUREMENT CONFERENCE, 9., 2009, New York. **Proceedings**...New York: ACM, 2009. p. 280-293.

(BARBUZZI et al., 2012) BARBUZZI, Antonio et al. 3GPP radio resource control in practice. **Wireless Communications**, [S.l.], v.19, n.6, p. 76-83, 2012.

(BESSA, 2012) BESSA, I. **Relatório Google sobre o uso de Smartphones no Brasil**. 2012. Disponível em:<<http://www.slideshare.net/ivilabessa/relatorio-google-sobre-uso-de-smartphone-nobrasil-maio2012>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

(BONTU; ILLIDGE, 2009) BONTU, C. S; ILLIDGE, E. Mechanism for power saving in LTE. **IEEE Communications Magazine**, v.47, n.6, p. 48-55, 2009.

(ETSI, 2016) ETSI. 2016. Disponível em: <<http://www.etsi.org/technologies-clusters>>. Acesso em 18 fev. 2016.

(FODDIS *et al.*, 2015) FODDIS, G. *et al.* LTE traffic analysis for signalling load and energy consumption trade-off in mobile networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), 2015. [**Trabalho apresentado**]. [S.l.]: IEEE, 2015.

(HOLMA, 2009) HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE for UMTS**: OFDMA and SC-FDMA based radio access. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

(GSMA, 2016) GSMA. **TS09**: battery life measurement and current consumption technique version 8.0. 2016. Disponível em: <http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/TS.09_v8.0.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2016.

(HUANG *et al.*, 2013) HUANG, J. *et al.* A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE SYSTEMS, APPLICATIONS, AND SERVICES, 10., 2013. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2013. p. 225 -238.

(HUAWEI, 2013) HUAWEI. **eRAN 3.0 DRX deployment introduction**. 2013. Disponível em: <www.huawei.com>. Acesso em: 01 fev. 2014.

(JHA *et al.*, 2012) JHA, S.C.; KOC, A.T.; VANNITHAMBY, R. Optimization of discontinuous reception (DRX) for mobile Internet applications over LTE. In: VTC- FALL, 2012. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1-5.

(LAUTENSCHLÄGER *et al.*, 2016) LAUTENSCHLÄGER *et al.* NetMetric: uma plataforma para medição ativa de desempenho em redes IP de larga escala. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS MULTIMÍDIA E WEB (v. 2): Workshops e Sessão de Pôsteres, 22., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016.

(LENA, 2016) LENA. **Lab Facilities**: CTTC. 2016. Disponível em:<<http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>>. Acesso em: 26 dez. 2015.

(KERNEL.ORG, 2013) KERNEL.ORG. **Documentação sobre o CPUFreq**. 2013. Disponível em:< <https://www.kernel.org/doc/Documentation/cpu-freq/>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

(KOC *et al.*, 2013) KOC, A. T.; JHA, S. C.; VANNITHAMBY, R. Optimizing DRX configuration to improve battery power saving and latency of active mobile applications over LTE-A network. In: IEEE WCNC,13., Shanghai, China. **Proceedings...** Shangai: IEEE, 2013. p. 1-5.

(KOC et al.,2014) KOC, S. A; VANNITHAMBY, R.; TORLAK, M. Device power saving and latency optimization in LTE-A networks through DRX configuration. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, [S.l.], v. 13, n. 5, p. 2614- 2625, 2014.

(KOLDING et al., 2008) KOLDING, T.; WIGARD, J.; DALSGAARD, L. Balancing power saving and single user experience with discontinuous reception in LTE. In: ISWCS, 2008. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008.

(KUROSE; ROSS, 2010) KUROSE, F. J.; ROSS, K. H. **Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down**. 5. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2010.

(MADS et al., 2013) MADS et al. Empirical LTE smartphone power model with DRX operation for system level simulations. In: VTC - FALL, 78., 2013. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2013.

(OPNET, 2016) OPNET TECHNOLOGIES. **Network Simulator**. Disponível em: <www.opnet.com/>. Acesso em: 20 fev. 2016.

(PETRY, 2013) Petry, Debora Todt. **Avaliação de ferramentas de monitoramento ativo de redes**. 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/86285>. Acesso em: 10 nov. 2015

(SESIA et al., 2011) SESIA, S.; TOUFIK, I.; BACKER, M. **LTE - the UMTS long term evolution: from theory to practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2011.

(VARMA et al., 2014) VARMA, R. S. et al. Dynamic DRX algorithms for reduced energy consumption and delay in LTE Networks. **Wireless Days (WD) IFIP**, [S.l.], 2014.

(WANG et al., 2012) WANG, H. et al. Accurate analysis of delay and power consumption of LTE DRX mechanism with a combination of short and long cycles. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WIRELESS PERSONAL MULTIMEDIA COMMUNICATIONS (WPMC), 15., 2012. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p. 384-388.

(WANG et al., 2013a) WANG H. et al. **Power saving by LTE DRX mechanism using a mixture of short and long cycles**. [S.l.: s.n.], 2013a.

(WANG et al., 2013b) WANG H. et al **Accurate analysis of delay and power consumption of LTE DRX mechanism with a combination of short and long cycles**. [S.l.: s.n.], 2013b.

(WIGARD et al., 2009) WIGARD, J. et al. On the user performance of LTE UE power savings schemes with discontinuous reception in LTE. In: ICC WORKSHOPS, 2009. **[Trabalho apresentado]**. [S.l.: s.n.], 2009.

(ZHOU et al., 2008) ZHOU, L. et al. Performance analysis of power saving mechanism with adjustable DRX Cycles in 3GPP LTE. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2008. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008.