

# ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE REDES LTE EM APLICAÇÕES DE SMART GRID.

Joanna Carolina Manjarres Meneses

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Mauricio Aredes

José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro Março de 2016

# ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE REDES LTE EM APLICAÇÕES DE SMART GRID.

#### Joanna Carolina Manjarres Meneses

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:	
	Prof. Mauricio Aredes, Dr.
	Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.
	1 foi. Jose Perfeira de Rezende, Dr.
	Prof. Rosa Maria Meri Leão, Dr.
	Prof. Antonio Augusto de Aragão Rocha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL MARÇO DE 2016 Meneses, Joanna Carolina Manjarres

Estudo de Viabilidade do Uso de Redes LTE em Aplicações de Smart Grid./Joanna Carolina Manjarres Meneses. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 67 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Mauricio Aredes

José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 62 – 67.

1. Smart Grid. 2. Sistemas de comunicação celular LTE. 3. Coexistência de tráfegos diferentes em LTE. I. Aredes, Mauricio *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, saúde, família, amigos e também pelas oportunidades.

Agradeço aos professores Mauricio Aredes e José Rezende pela oportunidade dada ao trabalhar com vocês e pelo conhecimento que compartilharam comigo durante o processo. Obrigada pelo tempo dedicado e pela amizade, pois fizeram com que a minha estada na universidade fosse maravilhosa.

Agradeço aos meus pais por todo apoio, carinho e amor. Apesar da distância, sempre estiveram comigo, como também minha irmã, meus avôs, tias e familiares.

Agradeço ao meu esposo Jorge pelo amor, apoio e compreensão, que diariamente contribuiu para me tornar uma profissional melhor, esposa e mãe. Sarita, minha filha, você me faz cada dia mais forte. Agradeço de coração por sua compreensão, principalmente por todos aqueles dias de trabalho nos quais você me acompanhou.

Agradeço às equipes LEMT e LAND, pela amizade e pelo carinho, pelas contribuições e conversas, onde me senti realmente parte de uma grande família. Carlos, Raphael, Gaspare, Jefferson, Veríssimo, Carol, Giulio, José, Alexandre, Filipe, Juliano, Karol, Bruno, Pedro, Elisa, Eduardo, Tessa, Fernanda, Leonardo, Evandro, Renato e todos aqueles que conheci durante boa parte desta fase da minha vida. Aos meus amigos colombianos, pelo apoio e apreço, especialmente, a Karen pois você me fez crescer pessoal e profissionalmente durante este processo. Muito obrigada pelos cafezinhos, conversas e sobretudo pela amizade.

Agradeço finalmente ao Governo Federal Brasileiro, especialmente à CAPES, pelo apoio econômico com a bolsa de estudo durante os anos do mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE REDES LTE EM APLICAÇÕES DE SMART GRID.

#### Joanna Carolina Manjarres Meneses

#### Março/2016

Orientadores: Mauricio Aredes

José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

Atualmente, existe uma tendência mundial no uso racional da energia elétrica, devido aos tipos de geração elétrica convencional que não estão abastecendo a crescente demanda. Neste contexto, diferentes tipos de geração de energia alternativa têm surgido com o intuito de satisfazer 100% da demanda. No entanto, a integração entre estes novos tipos de geração de energia com a rede elétrica convencional ainda é objeto de estudo, evidenciando a necessidade de uma comunicação que permita a sua integração.

A Smart Grid tem emergido como uma solução para este cenário, já que provê uma conexão bidirecional de potência e de informação, porém necessitando de uma infraestrutura de comunicação para adquirir dados ao longo da rede elétrica. Portanto, este trabalho apresenta um estudo de viabilidade da coleta de dados da Infraestrutura de Medição Avançada AMI e dados da automação DA na rede de distribuição elétrica da Smart Grid, através de uma rede de comunicações de Quarta geração LTE, que permita acrescentar os dados que trafegam nas redes atuais de LTE, e dando lugar à coexistência de tráfegos de dados com diferentes requisitos. Neste estudo, foram implementados no simulador de redes NS-3 dados reais fornecidos por uma operadora de comunicações da Colômbia. Os resultados da simulação mostraram que a rede LTE permite a coexistência de dois tipos de comunicação: M2M e H2H, atribuindo uma correta qualidade de serviço QoS para cada aplicação e apropriados escalonadores de pacotes fornecidos pelo padrão 3GPP.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

# FEASIBILITY STUDY OF LTE NETWORKS IN SMART GRID APPLICATIONS.

Joanna Carolina Manjarres Meneses

#### March/2016

Advisors: Mauricio Aredes

José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

Currently, there is a global trend in the rational use of electricity, due to the problem that conventional power generation is not keeping up with growing demand. In this context, different types of alternative power generation have emerged in order to meet a demand of 100%. However, the integration of these types of power generation with the conventional power grid is still an object of study, highlighting the need for a communication system that allows their integration.

The Smart Grid has emerged as a solution for this scenario, as it provides a bidirectional connection of electric power and information, but this means that a communication infrastructure to acquire data along the grid has to be built. Therefore, this work presents a feasibility study of the collection of Smart Grid data, such as Advanced Metering Infrastructure AMI and automation data DA in the electrical distribution network, through an LTE communication network. This study focuses on the coexistence between this new information and the data that travels on the current LTE networks.

This study was implemented in the NS-3 network simulator and actual data was provided by a communications operator in Colombia. The simulation results showed that LTE network enables the coexistence of two types of M2M and H2H communication by assigning a proper quality of service for each application and suitable scheduler.

vi

# Sumário

Li	sta d	le Figura	$\mathbf{s}$	ix
Li	sta d	le Tabela	us	xi
$\mathbf{Li}$	sta d	le Abrevi	iaturas	xii
1	Intr	odução		1
2	Rev	visão Bib	liográfica	5
	2.1	Smart G	rid	. 5
	2.2	Comunic	ações M2M	. 16
	2.3	LTE		. 20
		2.3.1 A	rquitetura da rede LTE	. 21
		2.3.2 G	destão de seções	. 25
		2.3.3 E	scalonadores de Pacotes	. 30
3	Me	todologia	do estudo de caso	35
	3.1	Motivaçã	áo	. 35
	3.2	Objetivo	geral	. 36
		3.2.1 O	Objetivos Específicos	. 36
	3.3	Apresent	ação do estudo de caso	. 36
		3.3.1 U	suários M2M do Cenário proposto	. 38
		3.3.2 U	suários H2H do Cenário proposto	. 42
		3.3.3 F	erramenta de Simulação	. 42
		3.3.4 D	Definição do cenário no Simulador	. 43
4	Res	ultados e	e Discussões	50
	4.1	Parâmetr	ros fixos nos cenários	. 50
	4.2	Cenário	1. Uma aplicação por nó	. 53
	4.3	Cenário 2	2. Duas Aplicações por Usuário	. 55
5	Cor	ıclusões		61

# Lista de Figuras

2.1	Rede Elétrica Convencional. Tomada da agência de entrega de eletri-	
	cidade e confiabilidade da energia do Departamento de Energia dos	
	EUA	5
2.2	Consumo final energético, por fonte no setor residencial. Tomada de $\left[1\right]$	6
2.3	Desenho de uma Smart Grid. Tomada de [2]	7
2.4	Modelo conceitual da $Smart\ Grid$ segundo a NIST, retirada de [3]	8
2.5	Divisão da Smart Grid	10
2.6	Subsistema de Informação de leitura e medição	10
2.7	Medidor Inteligente	11
2.8	Tecnologias de comunicação propostas na arquitetura da Smart Grid.	12
2.9	Tecnologias de comunicação nas diferentes áreas da $\mathit{Smart}\ \mathit{Grid}.$	13
2.10	Cenário 1 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368	17
2.11	Cenário 2 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368	17
2.12	Cenário 3 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368	17
2.13	Arquitetura das comunicações M2M proposta pela ETSI, tomada de	
	[4]	18
2.14	Arquitetura de LTE	21
2.15	Mecanismos de transferência de informação na interface de rádio Uu.	22
2.16	Bearers entre entidades da rede LTE. Adaptada de [5]	24
2.17	Serviço de conetividade IP da rede LTE. Tomada de $[6]$	26
2.18	EPS Bearer Default e EPS Bearer Dedicate. Adaptada de [5]	27
2.19	Parâmetros QoS em LTE. Adaptado de [6]	28
2.20	Grade Tempo-Frequência em LTE. Tomada de [7]	30
2.21	Grade Tempo-Frequência em LTE. Tomada de [8]	31
2.22	Classificação dos Escalonadores	33
3.1	Cenário Proposto.	37
3.2	Localização Yumbo	37
3.3	Drive Test. Área de cobertura da célula para o cenário	39
3.4	Área de cobertura da célula por bairros em Yumbo	40
3.5	Modelo do LTE no simulador. Tomado de [9]	43

3.6	Arquitetura da rede proposta com concentradores AMI	44
4.1	Arquitetura implementada no Simulador	51
4.2	Aplicações instaladas nos UEs, no simulador	52
4.3	Representação do cenário proposto no simulador	52
4.4	Métricas de avaliação das aplicações H2H Cenário 1. a) Latência na	
	aplicação de voz. b) Vazão na aplicação ftp	55
4.5	Métricas de avaliação das aplicações H2H Cenário 2. a) Comporta-	
	mento da latência na aplicação de Voz. b) Comportamento da vazão	
	na aplicação ftp	57
4.6	Comparação entre os escalonadores no ponto "crítico". a) Retardo	
	médio da aplicação de voz. b) Vazão da aplicação ftp. c) Retardo na	
	aplicação DA d) Retardo na aplicação AMI	58
4.7	Comportamento dos escalonadores PF e RR, em função dos usuários	
	ativos H2H e M2M. a) Retardo na aplicação de voz. b) Vazão na	
	aplicação FTP	59
4.8	Avaliação da influencia do tráfego de Smart Grid, sobre o tráfego	
	H2H, com o escalonador Round Robin (RR)	60

## Lista de Tabelas

1.1	Classes de Serviços propostas em $[10]$ para as aplicações de $Smart\ Grid.$	3
2.1	Requerimentos de Comunicação	12
2.2	Classificação dos dispositivos M2M. Adaptada de 2.2	19
2.3	Valores de QCI padronizados. Adaptada de [6]	29
3.1	Divisão das Zonas do Município de Yumbo	38
3.2	Divisão do Município de Yumbo	38
3.3	Resumo dos Parâmetros do Cenário	45
3.4	Características dos <i>codecs</i> G.711 e G.729	47
3.5	Parâmetros da aplicação voip	48
3.6	Requisitos de Qualidade de serviço para VOIP	48
3.7	Requisitos de Qualidade de serviço para AMI	48
4.1	Resumo dos Parâmetros Gerais das simulações.	53
4.2	Relações em percentagens das aplicações instaldas nos nós para o	
	cenário 1	54
4.3	Classes de serviço das aplicações H2H	56
4.4	Relações em percentagens das aplicações instaldas nos nós para o	
	cenário 2	56
4.5	Classes de serviço das aplicações Smart Grid	57

### Lista de Abreviaturas

3GPP 3rd Generation Partnership Project, p. 1, 5, 20

AMI Advanced Metering Infrastructure, p. 1, 5, 6, 9, 36

APN Access Point Name, p. 25

ARP Allocation and Retention Priority, p. 25

BER Bit Error Rate, p. 32

BET Blind Equal Throughput, p. 32

BSR Buffers Status Report, p. 32

BS Base Station, p. 9

CO2 Dióxido de Carbono, p. 1

CQA Channel and QoS-aware, p. 32

CQI Channel Quality Indication, p. 29, 32

DA Dados da Automação na rede de distribuição de uma Smart

Grid, p. 1, 5, 6, 9, 36

DMS Distribution Management Systems, p. 9

E-UTRAN Evolved Universal Terrestrial Access Network, p. 20, 21

EMS System for Energy Management, p. 9

EPC Evolved Packet Core, p. 20, 21

EPE Empresa de Pesquisa Energética, p. 5

EPS Bearrer Portador de Serviço dedicado, p. 1

ESSA Eletrificadora de Santander S.A, p. 40

ETSI European Telecommunications Standards Institute, p. 5, 16

FDD Frequency Division Duplex, p. 20 GBR. Guaranteed Bit Rate, p. 1, 25 H2HHuman to Human Communication, p. 1, 16, 35, 36 H2MHuman to Machine Communication, p. 35 HSS Home Subscriber Server, p. 21 HVAC High Voltage Alternative Current, p. 16 IoF Internet of Things, p. 35 LTE Long Term Evolution, p. 1, 5, 6, 9, 20, 36 M2MMachine to Machine Communication, p. 1, 16, 35 MIMO Multiple In Multiple Out, p. 20 MME Mobility Management Entity, p. 1, 21 MTC Machine Type Communication, p. 16 MT Maximum Throughput, p. 32 NIST National Institute of Standards and Technology, p. 5 NS-3Network Simulator, p. 5, 6 **OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access, p. 20, 29 ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 5 P-GW PDN Gateway, p. 1, 21 PDN Packet Data Network, p. 21, 25 PF Proportional Fair, p. 32 **PHEV** plug-in hybrid vehicle, p. 5 PLMN public land mobile network, p. 16 PMI Precoder Matrix Indication, p. 29, 32 **PMU** Pashorial Measuremente Unit, p. 9

Priority Set, p. 32

**PSS** 

QCI QoS Class Identifier, p. 1, 25

QoS Qualidade de Serviço, p. 1, 5

QoS Quality of Service, p. 9, 25

RAN Radio Access Network, p. 20

RI Rank Indication, p. 29, 31

RR Round Robin, p. 32

S-GW Serving Gateway, p. 1, 21

SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access, p. 20

SR Scheduling Request, p. 32

TBR Bit Rate Target, p. 32

TDD Time Division Duplex, p. 20

TFT Traffic Flow Template, p. 25

TTA Throughput to Average, p. 32

TTI Transmission Time Interval, p. 29

UE End User, p. 21

WMN Wireless Mesh Network, p. 9

eNB evolved NodeB, p. 1, 21

## Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, existe uma tendência mundial no uso racional da energia elétrica, devido a que os convencionais tipos de geração elétrica, como as grandes usinas hidrelétricas e as usinas termoelétricas, a gás natural, carvão, óleo diesel, óleo combustível ou nuclear, pois além de não serem suficientes para o abastecimento da demanda da energia, geram impactos ambientais negativos. A geração elétrica convencional produz aproximadamente 30% do  $(CO_2)$  do mundo [11].

Neste contexto, tipos alternativos de geração de energia têm sido amplamente estudados nos últimos anos. Energias limpas, com baixo ou nenhum índice de geração de poluição ambiental e facilmente instaladas em áreas de difícil acesso para a rede elétrica convencional estão sendo incorporadas, gradualmente, com o objetivo de satisfazer 100% da demanda energética [12] [13] [14]. As principais fontes de energia alternativa estão baseadas nos recursos renováveis, tais como: o potencial hidráulico, a energia maremotriz, das ondas e biomassa, as centrais eólicas, as centrais solares, a energia geotérmica e a energia geotérmica.

A integração de novos tipos de geração de energia alternativa com a rede elétrica convencional cria um cenário que evidencia a necessidade de uma comunicação que permita tal integração e interligação entre a geração de energia distribuída e a rede elétrica. No entanto, a integração das energias alternativas com a rede elétrica convencional ainda é objeto de estudo.

A Smart Grid caracteriza-se por permitir a conexão bidirecional da potência e do fluxo de informação, bem como pela interação dos consumidores com a rede, facilitando a troca de informação oferecida tanto pelo operador da rede quanto pelo consumidor. A implementação da Smart Grid permite a geração de estratégias para a redução da demanda, além da possibilidade de gerar energia elétrica localmente por parte dos consumidores, introduzindo o conceito de "prosumidor" (produtor e

consumidor ao mesmo tempo).

No entanto, a *Smart Grid* precisa de uma infraestrutura de comunicação adequada para coletar os dados gerados pelos consumidores e monitorar os equipamentos envolvidos na rede, otimizando os recursos e oferecer maior qualidade de energia.

Atualmente, existem diversas tecnologias que permitem a operação da infraestrutura de comunicação de uma *Smart Grid*, dentre elas estão as tecnologias cabeadas, tais como: a fibra ótica, os sistemas de comunicação por linhas de potência (PLC) e linhas de cobre, além das tecnologias sem fio, tais como: redes *wifi, zigbee*, redes operando em faixas de 900 MHz, *wimax mesh*, comunicações por satélite, comunicação por micro-ondas, comunicações celulares 3G e HSPA.

Em 2004, foi inaugurado o processo de padronização de uma moderna tecnologia de comunicação celular, a Long Term Evolution LTE, proposta pelo grupo de padronização 3rd Generation Partnership Project 3GPP, com o objetivo de alcançar uma alta eficiência espectral, introduzindo o esquema de acesso ao rádio OFDMA no downlink e SCFDMA no uplink. A LTE visa alcançar velocidades de 100 Mbps no enlace de descida e 50 Mbps no enlace de subida. Esta tecnologia foi, inicialmente, projetada para atingir os requerimentos de comunicação entre pessoas H2H, porém, devido ao seu alto desempenho, a tecnologia LTE é considerada como uma ótima alternativa para a infraestrutura de comunicação máquina-a-máquina M2M da Smart Grid.

Diferentes estudos apresentados na literatura consideram as redes de comunicação LTE como uma possível solução as redes de comunicação da *Smart Grid*.

Em [15], Ferrari et al. apresentam duas propostas para o uso da tecnologia LTE com aplicações de Smart Grid. A primeira opção é usar uma infraestrutura pública de LTE e a segunda é usar uma infraestrutura privada. Uma infra-estrutura privada do LTE seria configurada e usada exclusivamente para interconetar dispositivos da Smart Grid e neste caso os recursos de LTE oferecem o melhor desempenho disponível para atender as aplicações de Smart Grid. No entanto, esta é uma custosa solução. Pelo contrário, usando uma infra-estrutura pública de LTE, os custos de instalação diminuem, mas o desempenho da comunicação pode ser afetada pelo outro tráfego que se encontra na rede.

Em [16], Awad *et al.* propõem adicionar capacidades de Qualidade de Serviço QoS no *core* da rede LTE para suportar aplicações com baixos requerimentos de latência. Neste trabalho incluiu-se a implementação de um portador de serviço dedicado EPS Bearrer.

Du et al. em [10] apresentam requerimentos de comunicação de aplicações da Smart Grid e propõem o uso de classes de serviço determinadas pela 3GPP para aplicações da Smart Grid. São consideradas as aplicações de automação na rede de distribuição, energia distribuída, controle de carga, medidor inteligente e monitoramento online. Na Tabela 1.1 são mostrados os Identificadores de Classes de Qualidade de Serviço QCI atribuídos a cada aplicação e finalmente é discutida uma otimização na arquitetura da rede, simplificando as funcionalidades de entidades como a MME, S-GW e P-GW e a interface de comunicação X2 entre as estações Base eNB, pois a distribuição dos dispositivos da Smart Grid é relativamente estável.

Tabela 1.1: Classes de Serviços propostas em [10] para as aplicações de Smart Grid.

Aplicação	Prioridade	QCI	Tipo de Recurso	Latência
Automação na rede de distribuição	1	5	Não GBR	100 ms
Energia Distribuída	5	4	GBR	$300~\mathrm{ms}$
Medidor Inteligente	8	6	Não GBR	$300~\mathrm{ms}$
Monitoramento Online	8	8	Não GBR	$300~\mathrm{ms}$

No trabalho apresentado em [17], por Yaacoub *et al.*, é proposto um método para reduzir a carga de sinalização entre os medidores inteligentes da *Smart Grid* e a estação base eNB.

Em [18], [19], [20] e [21], são apresentados diferentes tipos de escalonamentos no enlace de subida, com o intuito de avaliar a influência do tráfego M2M sobre o tráfego H2H e o desempenho de QoS tanto das aplicações H2H quanto das aplicações M2M. Nestes trabalhos são caracterizadas aplicações voIP, FTP e vídeo para representar o tráfego H2H.

Diante dos trabalhos pesquisados, é visto que torna-se necessário um algoritmo de escalonamento que atenda aos serviços em tempo real de forma eficiente, assim como determinar uma aplicação M2M específica para alcançar uma otimização dos recursos oferecidos pela tecnologia LTE, definindo as métricas para uma correta avaliação, como também considerar dados reais e ter uma aproximação do comportamento de uma rede LTE frente aos diferentes tipos de tráfego.

O presente trabalho estuda a viabilidade da coexistência do tráfego de dados atuais, em uma rede celular LTE, com a comunicação entre os consumidores da *Smart Grid* e o centro de operação. No tráfego de dados atuais, são consideradas as aplicações de voz e FTP e no tráfego de dados da *Smart Grid* são considerados os dados gerados pela automação na rede de distribuição DA e pela infraestrutura de medição avançada AMI. Esta avaliação foi realizada com a ferramenta de simulação *Network Simulator* NS-3 usando dados reais fornecidos por uma operadora na Colômbia.

Esta dissertação contém 5 capítulos, sendo organizados da seguinte forma: o presente Capítulo mostra a parte introdutória do trabalho. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos conceitos *Smart Grid*, comunicação Máquina-a-Máquina (M2M) e LTE. O Capítulo 3 mostra a motivação do estudo, os objetivos, tanto geral quanto específicos, e o desenvolvimento da metodologia para avaliação do estudo. No Capítulo 4 são descritos os procedimentos realizados para a análise da viabilidade das aplicações de *Smart Grid* fazendo uso de redes LTE. As conclusões gerais deste trabalho estão apresentadas no Capítulo 5.

## Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conceitos da *Smart Grid*, das comunicações máquina a máquina e da tecnologia de comunicação celular LTE. São descritas as características e vantagens da *Smart Grid* frente às redes elétricas convencionais, e a classificação técnica da *Smart Grid* em três grandes sistemas proposta por Fang *et al.* [22]. Em relação às comunicações M2M são mostradas as definições da *3rd Generation Partnership Project* 3GPP, bem como a arquitetura da rede proposta pelo Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações ETSI para a padronização destas comunicações. Finalmente, na seção de tecnologia de comunicação celular LTE, é apresentado o modelo de QoS, bem como o funcionamento dos escalonadores de pacotes.

#### 2.1 Smart Grid

As redes elétricas convencionais são caraterizadas por prover um fluxo unidirecional de potência das plantas geradoras até os consumidores e possuem um sistema de inteligência maior concentrado em locais centrais e, parcialmente em subestações, onde as cargas são totalmente passivas, como é mostrado na Figura 2.1.

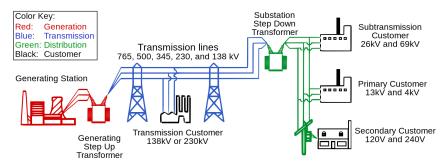


Figura 2.1: Rede Elétrica Convencional. Tomada da agência de entrega de eletricidade e confiabilidade da energia do Departamento de Energia dos EUA

A crescente demanda do consumo de energia, as limitações dos recursos naturais, o impacto ambiental, a falta de uma infraestrutura, que permita a coexistência da rede elétrica convencional com fontes alternativas de energias renováveis, e a integração de veículos elétricos híbridos PHEV, impedem a satisfação das crescentes necessidades dos consumidores no futuro. O estudo do consumo energético do Brasil entre os anos 2013-2050, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética EPE [1], mostra uma tendência de crescimento na demanda energética por fonte de energia, como energia elétrica, Gás Liquefeito de Petróleo GLP, gás natural, lenha e carvão vegetal, como é observado na Figura 2.2.

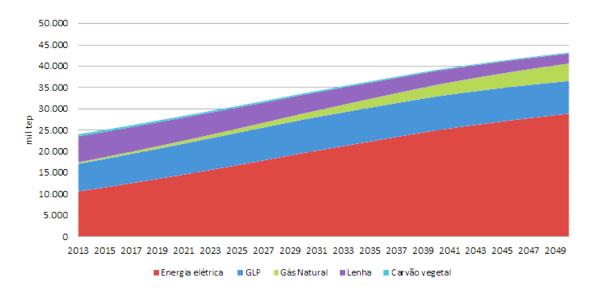


Figura 2.2: Consumo final energético, por fonte no setor residencial. Tomada de [1]

Como consequência da crescente demanda de energia no Brasil e a carência de restruturação da rede elétrica convencional para suprir as necessidades atuais, têm sido evidenciados apagões que afetam uma grande quantidade de pessoas, como, por exemplo, o apagão acontecido em Janeiro de 2015, que de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro ONS [23] determinou uma redução na transmissão de energia em estados do sul, sudeste e centro-oeste, por um período de duas horas, com consequências no transporte público e no trânsito em cidades interioranas e em capitais.

Neste contexto, surge o conceito *Smart Grid*, definido pelo *National Institute* of *Standards and Technology* NIST [3], como a modernização da infraestrutura da rede de energia elétrica. Ela se carateriza por ter um fluxo bidirecional de eletricidade e informação, criando uma rede elétrica automatizada, como está representado na Figura 2.3.

A Smart Grid permite monitorar cada elemento das centrais elétricas e clien-

tes, bem como suas preferências individuais, com o objetivo de melhorar a eficiência e a confiabilidade através do controle automatizado de conversores de alta potência, moderna infraestrutura de comunicações, e técnicas contemporâneas de gestão de energia baseadas na otimização da demanda, de energia e de disponibilidade da rede [24]. Em outras palavras, a *Smart Grid* é uma rede de redes, interligadas com diversos "proprietários" e formas de gerenciamento, para fornecer serviços fim-a-fim entre partes interessadas e entre dispositivos eletrônicos inteligentes [3].



Figura 2.3: Desenho de uma *Smart Grid*. Tomada de [2]

As vantagens de implementar uma *Smart Grid* são a confiabilidade, a qualidade da energia, a segurança e os benefícios de segurança cibernética, a eficiência energética, a eficiência ambiental e de conservação e a eficiência financeira. Todos os agentes envolvidos na rede elétrica são beneficiados com o novo conceito de *Smart Grid*.

Os consumidores podem equilibrar seu consumo de energia com aplicações de consumo em tempo real, além de ter a possibilidade de se tornarem geradores de energia e aproveitar menores preços em horários de picos. As concessionárias podem fornecer energia mais confiável e gerenciar seus custos com maior eficiência. Para a sociedade, as vantagems serão refletidas em energia mais confiável para consumidores sensíveis à falta de energia e redução no impacto ambiental, como a redução da emissão de carbono, por conta da inclusão de energias renováveis, bem como de um aumento na eficiência e suporte PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle).

O NIST fornece um modelo conceitual para uma *Smart Grid*, mostrado na Figura 2.4, planejado com o objetivo de se tornar uma base para o desenvolvimento de novas propostas de arquiteturas e tecnologias. O modelo divide a *Smart Grid* 

em sete domínios: geração, transmissão, distribuição, consumidores, provedores de serviços, operadores e mercados. Cada um é composto por um ou mais agentes da *Smart Grid*, que incluem dispositivos, sistemas, ou programas que tomam decisões e trocam informações necessárias para a realização de aplicações. O modelo também identifica interfaces entre domínios, agentes e aplicações nas quais as informações devem ser trocadas, e para as quais são necessários padrões de interoperabilidade [3] [25] [26].

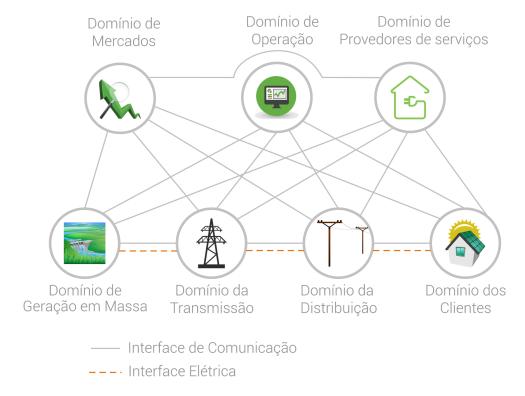


Figura 2.4: Modelo conceitual da Smart Grid segundo a NIST, retirada de [3]

- O domínio da Geração em massa tem como agentes as centrais geradoras de eletricidade de grande porte e pelos centros de armazenamento de energia.
   Esse domínio troca dados com o domínio de operação e com o domínio do mercado.
- No domínio da Transmissão encontram-se como agentes as transmissoras de energía em alta tensão e longas distâncias. Este domínio comunica-se com o domínio da operação e o de mercado.
- No domínio da Distribuição encontram-se as empresas distribuidoras de energia para os clientes consumidores. Esse domínio troca informação com o domínio da operação, o domínio dos clientes e do mercado.
- O domínio dos Clientes é composto pelos usuários finais da eletricidade atualmente divididos em três grupos, residenciais, comerciais e industriais. Estes

agentes da *Smart Grid* podem gerar, armazenar e gerenciar o uso da eletricidade.

- Os agentes pertencentes ao domínio de provedores de serviços são as organizações que prestam serviços aos consumidores. O domínio de provedores se comunica com os consumidores para faturamento, operações de resposta à demanda, para conhecer informações do estado da rede elétrica que se comunica com o domínio de mercado e de operação.
- No domínio de operação, os agentes são os centros de controle da gestão da energia EMS e sistemas de gestão de distribuição DMS, a fim de coletar dados para garantir o controle e a operação eficiente do sistema.
- Os agentes no domínio dos mercados trocam preços e equilibram a oferta e demanda dos sistemas de potência. A comunicação entre o domínio de mercado e os domínios que fornecem energia é essencial, já que uma eficiente produção de energia deve corresponder ao consumo, e é dependente dos mercados.

Fang Xi et al. [22] descreve tecnicamente a Smart Grid como um conjunto de três sistemas principais: o sistema de proteção inteligente, o sistema de gestão inteligente e o sistema de infraestrutura inteligente. Eles apresentam vantagens quando comparados com a rede convencional devido à uma avançada infraestrutura e arquitetura proposta para a Smart Grid. Na Figura 2.5 são apresentados, em detalhe, os sistemas e subsistemas que compõem a Smart Grid.

- O sistema de proteção inteligente fornece análises da rede, proteção de falha, serviços de segurança e de proteção de prividacidade com altos níveis de confiabilidade devido a uma gestão periódica e atualizada da informação.
- O sitema de gestão inteligente provê serviços avançados de gestão e controle da eficiência energética, oferta e demanda, e controle de emissões.
- O sistema de infraestrutura inteligente é a infraestrutura base da *Smart Grid*, composta por três tipos de infraestruturas. A infraestrutura de energia inteligente, responsável pela geração de eletricidade, transmissão e consumo. A infraestrutura de informação inteligente, responsável pela informação de medição avançada, monitoramento e gestão no contexto da *Smart Grid*. E a infraestrutura de comunicação inteligente, responsável pela conectividade de comunicação e transmissão entre os sistemas, dispositivos e aplicações no contexto da *Smart Grid*.

O subsistema de informação inteligente é composto pelas informações da leitura dos medidores (Smart Metering) e pelos dados do monitoramento inteligente e medição,

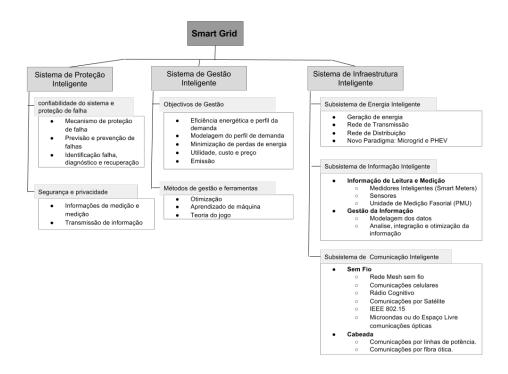


Figura 2.5: Divisão da Smart Grid

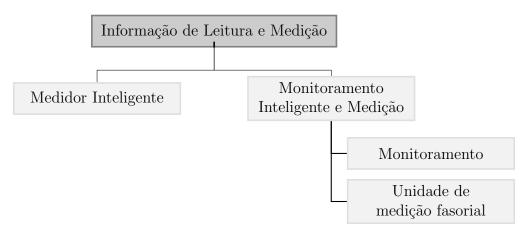


Figura 2.6: Subsistema de Informação de leitura e medição.

como é mostrado no esquema da Figura 2.6.

O Medidor inteligente (Smart Meter) é o mecanismo usado para coletar as informações dos clientes. Os medidores inteligentes geralmente são medidores elétricos que registram o consumo de energia em intervalos de tempo [27]. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de uma rede de área local, composta por equipamentos eletrônicos residenciais, que se comunicam com o medidor inteligente através de um canal de comunicação.



Figura 2.7: Medidor Inteligente

A infraestrutura de Medição Avançada AMI proporciona comunicações bidirecionais entre o medidor inteligente e o sistema central de gestão de informação. Os dados coletados pelo medidor e os dados do estado do medidor são enviados para o sistema central de gestão de informação, através de uma rede segura de comunicação, que permite operações de gerenciamento da demanda em tempo real e sob demanda.

Os medidores inteligentes também podem ser usados como sensores em toda a rede de distribuição, de maneira que as concessionárias possam detectar falhas e enviar notificações de interrupção e restauração eficientemente, permitindo um melhor planejamento, operação e rápida resposta a interrupções da rede, fornecendo energia mais confiável para os consumidores. Adicionalmente, as concessionárias informam periodicamente aos clientes sobre o status da rede elétrica, por exemplo, causas de interrupções, tempos de recuperação e avisos de segurança pública [28].

Por outro lado, o monitoramento inteligente, mostrado no esquema da Figura 2.6, permite conhecer o estado da rede de distribuição para a detecção de falhas mecânicas em redes de energia, tais como falhas de condutores, pontos quentes, e condições mecânicas extremas, com o objetivo de diagnosticar falhas temporais, bem como permanentes, determinando medidas de controle adequadas que podem ser tomadas de forma automática e / ou sugeridas para os operadores do sistema [22]. Os dados do monitoramento inteligente são compreendidos no conceito de dados de automação na rede de distribuição DA e descrevem altas exigências em termos de Qualidade de Serviço QoS na comunicação, como requisitos de segurança, condições ambientais extremas, latência e confiabilidade.

Na tabela 2.1 encontram-se os requerimentos de comunicação das aplicações AMI e DA, os quais poderiam ajudar na determinação da escolha da tecnologia de acesso à rede.

Tabela 2.1: Requerimentos de Comunicação.

Aplicação	Frequência	Latência	Tipo de Transmissão	Tipo de Classe
AMI	Baixa	Alta	Baseada em evento ou Periódica	Melhor Esforço
DA	Alta	Baixa	Baseada em evento ou Periódica	Tempo Real

O subsistema de comunicação inteligente da *Smart Grid*, mostrado no esquema da Figura 2.5, é o responsável pela conectividade da comunicação e transmissão de informação. Fan Xi *et al.* [22], apresenta diferentes tecnologias sem fio e cabeadas para a comunicação da *Smart Grid*, segundo o esquema mostrado na Figura 2.8. As tecnologias sem fio possuem algumas vantagens em comparação com as tecnologias cabeadas, como rápida implementação, menor custo de instalação, maior flexibilidade, variedade de topologias para aplicações específicas, mobilidade, entre outras. No entanto, são mais sensíveis à interferência, levando a uma alta taxa de erro, e são mais suscetíveis a interceptores não desejados, podendo interferir em outros equipamentos, como, por exemplo, os utilizados em hospitais.

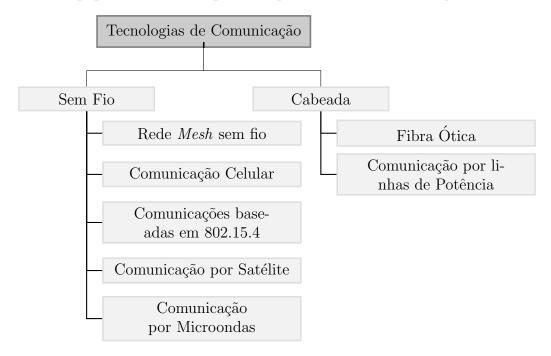


Figura 2.8: Tecnologias de comunicação propostas na arquitetura da *Smart Grid*.

É importante identificar as principais características das tecnologias de comunicação, propostas no esquema da Figura 2.8, para determinar a correta

implementação na arquitetura da *Smart Grid*. Na Figura 2.9, encontra-se uma representação do alto nível da arquitetura de comunicação da *Smart Grid* com as propostas das diferentes tecnologias.

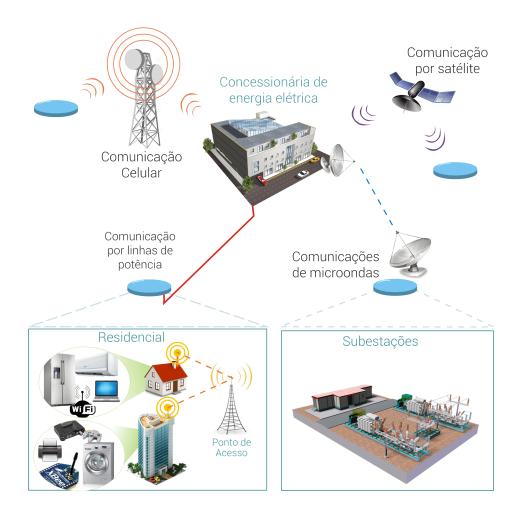


Figura 2.9: Tecnologias de comunicação nas diferentes áreas da Smart Grid.

Em relação às tecnologias de comunicação sem fio, as redes em malha sem fio, ou WMN do inglês Wireless Mesh Network, são redes constituídas por nós de rádio transmissores organizados em uma topologia de rede em malha. Algumas das características do WMN são confiabilidade, conectividade automática da rede, ampla cobertura e alta taxa de dados [29]. Uma das tecnologias que implementa este tipo de rede é o WIMAX Mesh, tecnologia considerada no plano da Smart Grid para coleta de dados dos medidores, sensores e unidades de medição fasorial PMU, bem como para a comunicação dos dados com os sistemas de controle [30] [31].

Por outro lado, os sitemas de comunicação celular estão compostos por células, que formam uma rede de rádio distribuída em grandes áreas. Cada célula possui no mínimo uma antena transmissora e uma receptora, e sua localização fixa é conhecida

como estação base BS do inglês *Base Station*. Diversos estudos a identificam como uma opção interessante para implementar na *Smart Grid*. Hung *et al.* [32] propõe uma comunicação entre nós sensores/relé, utilizando a rede celular para reduzir atrasos e custos de transmissão [31].

As comunicações sem fio baseadas em 802.15.4 são compostas por três tipos de tecnologias recomendadas pelo NIST, para uso na *Smart Grid*: Zigbee, wirellesHART e ISA110,11a [3]. A tecnologia Zigbee é usada no domínio da rede local do cliente da *Smart Grid*, o wireless HART, que está definido para às redes de dispositivos de campo operando na banda 2.4 GHz e a ISA 100.11a para aplicações de redes de sensores sem fio na *Smart Grid*, como subestações ou plantas geradoras [22].

As comunicações por satélite surgem para o controle e monitoramento remoto em cenários que não possuem infraestrutura de comunicação, como subestações remotas e plantas geradoras de energia afastadas [29]. No entanto, possuem uma latência maior quando comparadas com tecnologias terrestres, além de apresentar uma maior probabilidade de sofrer degradações no desempenho do sistema, causadas pelas características do canal, as quais variam de acordo com as condições meterológicas e por efeitos de desvanecimento [33].

A tecnologia de comunicação por microondas tem sido amplamente utilizada para comunicações ponto a ponto. Donegan et al. [34] destacam que 50% das estações base móveis no mundo são conectadas usando tecnologias microondas ponto a ponto. Esta tecnologia caracteriza-se pela facilidade na implementação e pelo baixo custo. Na comunicação por microondas, a transmissão de dados é feita em altas frequências, e é suscetível a fenômenos eletrônicos, magnéticos e atmosféricos. Portanto, é interessante nas redes de backhaul da Smart Grid, especialmente em áreas rurais [22].

A rede de comunicação cabeada é composta pela rede de fibra ótica e pela rede de comunicação por linhas de potência, como é apresentada no esquema da Figura 2.8. As comunicações por fibra ótica proporcionam altas taxas de transmissão com baixa atenuação, é imune a interferências eletromagnéticas, possue facilidade na instalação, mas é uma tecnologia de custo ainda elevado, para as futuras *Smart Grid* é considerada nas redes de informação nos *backbones* [29].

A tecnologia de comunicação por linhas de potência PLC utiliza a rede da energia elétrica para transmissão de dados e suporta altas taxas de transmissão em uma faixa de frequência entre 1.7 MHz e 30 MHZ. Qualquer ponto de energia

é um potencial ponto de interferência, já que outros equipamentos que utilizam radiofrequências podem interferir, além de ruídos gerados por fontes chaveadas e motores. Contudo, qualquer ponto de energia é um potencial ponto de rede. Adicionalmente, os transformadores ao longo da rede elétrica produzem atenuação aos sinais de altas frequências dificultando longas áreas de cobertura. O PLC é a única tecnologia cabeada que tem custo de implantação comparável com tecnologias sem fio, já que utiliza uma infraestrutura disponível.

Rieken et al. [35] propõem o PLC de banda estreita, que além de ser uma boa opção para a infraestrutura de medição inteligente em redes de distribuição de baixa tensão (perto das casas), permite as comunicações dos circuitos elétricos com a rede elétrica, sem precisar de mais equipamentos, e fornece transferência de dados dos controladores da *Smart Grid* para redes domésticas e vice-versa em banda larga [30] [31].

Devido à importância do subsistema de informação inteligente para uma eficiente gestão da demanda e oferta de energia elétrica é fundamental estudar tanto a infraestrutura de medição avançada para a coleta de dados gerados pelos medidores inteligentes, quanto o monitoramento inteligente de dispositivos ao longo da rede de distribuição na *Smart Grid*, para uma eficaz resposta a possíveis falhas nas redes de distribuição.

Considerando que tanto a infraestrutura de medição avançada, quanto o monitoramento inteligente devem se comunicar com o centro de operações, surge a necessidade de implementar um tipo de comunicação máquina a máquina para potencializar os recursos da comunicação da *Smart Grid*, além de incorporar o susbsistema de comunicação para transmitir os dados coletados pelo sistema de informação com o centro de controle de operações. Neste contexto, a rede celular de quarta geração (LTE) é uma nova tecnologia que permite a transmissão dos dados com maior eficiência, tornando-se uma adequada alternativa para estabelecer esta comunicação.

### 2.2 Comunicações M2M

Nos últimos tempos, é notável o crescimento dos dispositivos conectados à Internet como: telefones celulares, computadores, laptops, TVs, luzes, aparelhos eletrônicos, equipamentos médicos, máquinas industriais, entre outros. Emerson e Bob [36] estimam que para o ano 2020 haverá cerca de 50 bilhões de dispositivos conectados à Internet e uma grande parte deles serão dispositivos baseados em comunicação entre máquinas M2M.

As comunicações M2M (Máquina a Máquina) fazem referência à comunicação entre dispositivos com capacidades computacionais semelhantes, com pouca ou nenhuma intervenção humana, através de redes cabeadas ou sem fio. Normalmente, estes dispositivos são sensores que permitem capturar eventos, por exemplo, temperatura, umidade, pressão, etc, bem como atuadores que executem alguma ação partindo de dados recebidos da rede. Os dados podem ser transmitidos tanto para uma aplicação que os avalie e transforme em informações úteis, quanto para outros dispositivos como atuadores da rede, sem precisar da avaliação feita pelas aplicações.

Algumas aplicações da comunicação M2M podem ser encontradas no controle de trânsito de grandes cidades, automação de estações de tratamento de água, saúde, monitoramento e controle de aparelhos em casas, empresas e indústrias, monitoramento ambiental, aplicações militares, sistemas de grande porte HVAC e Smart Grids.

Atualmente, as principais redes de comunicações estão orientadas às comunicações entre pessoas H2H, mas elas possuem grandes diferenças com as comunicações M2M, entre as quais encontram-se a estacionária ou baixa mobilidade dos nós, a grande densidade de dispositivos em uma área determinada, o baixo consumo de potência, o maior uso do enlace de subida (uplink), em comparação com o enlace de descida (downlink), o volume de tráfego que pode variar de poucos bytes até vários kbytes e as infrequentes transmissões de dados (bursts) em períodos de tempo relativamente longos. Estes períodos podem ser determinísticos com valores fixos que variam de poucos segundos até várias horas ou podem ser definidos por uma distribuição exponencial com média de poucos segundos até várias horas. A diferença entre as comunicações H2H e M2M evidencia a necessidade de potencializar as redes de comunicações atuais para suportar as comunicações M2M eficientemente.

Em conformidade com a especificação técnica das comunicações M2M, dada pela 3GPP [37], que caracteriza as definições para este tipo de comunicações, as

comunicações M2M são definidas como comunicações tipo máquina MTC, composta pelas entidades MTC Server, MTC Device, MTC User e MTC Group.

O MTC Device é o dispositivo equipado com uma comunicação tipo máquina, que se comunica através de uma PLMN com um MTC Server ou outros MTC Devices. O MTC Server é a entidade que possui uma interface para ser acessada pelo MTC User. O servidor se comunica com os MTC Devices através da PLMN. Um MTC Group é um grupo de MTC Devices que compartilham os mesmos recursos. A 3GPP determina que os MTC Devices podem ser agrupados segundo as características MTC, as políticas e ao endereçamento, e estabelece os cenários de comunicação, apresentados nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12.



Figura 2.10: Cenário 1 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368



Figura 2.11: Cenário 2 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368



Figura 2.12: Cenário 3 da Comunicação M2M. Adaptada da 3GPP TS 22.368

Na Figura 2.10, observa-se a comunicação dos dispositivos com o servidor lo-

calizado dentro do domínio do operador. Na Figura 2.11, mostra-se a comunicação dos dispositivos com o servidor localizado fora do domínio do operador, e a Figura 2.12 apresenta a comunicação dos nós MTC com outros em domínios diferentes sem MTC Servers intermediários.

O Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações ETSI em [4] propõe uma arquitetura de alto nível para comunicações M2M como se apresenta na Figura 2.13.

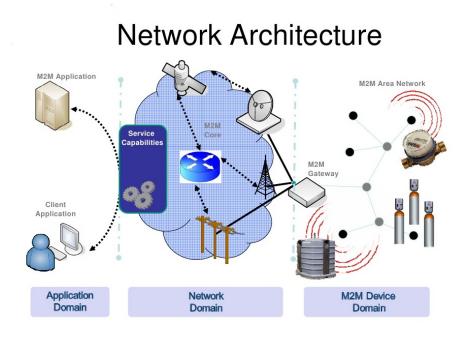


Figura 2.13: Arquitetura das comunicações M2M proposta pela ETSI, tomada de [4]

Esta arquitetura encontra-se dividida em três domínios: o domínio dos dispositivos, das redes e das aplicações. O domínio dos dispositivos normalmente é composto por uma rede de comunicação, dispositivos *Gateway* M2M, e dispositivos M2M com capacidades limitadas como sensores e atuadores que usam protocolos de comunicação, como por exemplo, ZigBee, Bluetooth, banda ultra-larga (*Ultra-wideband* - UWB), etc. Em alguns cenários os dispositivos precisam de um *gateway* para atuar como *proxy* entre eles e o domínio da rede; os dispositivos M2M com maior capacidade de computação (inteligentes) podem-se comunicar diretamente com o domínio da rede.

O domínio da rede é constituído pelas redes de acesso, pelo *core* e por um conjunto de capacidades de serviço chamado *Network Service Capability Layer* (NSCL). Entretanto, o domíno da aplicação inclui as aplicações de rede M2M que

fazem uso do NSCL para prover serviços dependentes das aplicações, bem como a análise de dados. O domínio da aplicação também inclui aplicações para o cliente como a interface para os usuários finais.

Devido às comunicações M2M atingirem muitas aplicações, cada uma delas com características e funções específicas dos dispositivos que requerem uma apropriada tecnologia rede de comunicação, Jaewoo Kim et. al. [38] propõem uma classificação dos nós segundo as capacidades de hardware e tipo de aplicação vinculada, apresentada na Tabela 2.2. Observa-se uma subdivisão de características e funções, onde na subdivisão funções o símbolo "O" representa que aquele dispositivo requer a função, o símbolo "X" representa que não requer e o  $\Delta$  refere-se à possibilidade de requerer a função dependendo da aplicação específica.

Tabela 2.2: Classificação dos dispositivos M2M. Adaptada de 2.2

		Baixo Nível	Médio Nível	Alto Nível
Serviços das Aplicações		Proteção	Redes Domésticas, Gestão de Ativos,	Militar Bio/Medical
		Ambiental	Automação Industrial	·
	Densidade	Alto	Média	Baixo
	Complexidade	Baixo	Médio	Alto
	Eficiência energética	Alto	Médio	Baixo
	Custo	Baixo	Médio	Alto
Características	escalabilidade	Alto	Médio	Baixo
	IP	Não-IP	IP	IP
	Mobilidade	Baixa,	Baixa	Mobilidade
	Modifidade	Quase Estática	Mobilidade	Mobilidade
	contagem de saltos	Alto	Médio	Baixo
	Inteligência	Baixo	Médio	Alto
	Agregação de dados	О	Δ	X
	configuração automática	O	O	O
	Economia de energia	О	O	O
Funções	Localização	X	$\Delta$	O
Funções	Suporte de QoS	X	$\Delta$	O
	TCP/IP	X	$\Delta$	O
	Controle de potência	X	$\Delta$	O
	Controle de tráfego	X	$\Delta$	O

#### 2.3 LTE

A tecnologia Long Term Evolution (LTE) é um padrão de redes de comunicação móveis, desenvolvido para fornecer conectividade entre os usuários e as redes de pacotes externas. O LTE é baseado em uma arquitetura de rede totalmente voltada para o Protocolo IP, portanto, para suportar somente serviços de comutação de pacotes, embora o termo LTE inclua a evolução do acesso de rádio através do Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN), e o core da rede EPC.

O processo de padronização do LTE foi inaugurado no workshop na cidade de Toronto em novembro de 2004, onde começou com a proposta de evoluir a Rede de Acceso de Rádio RAN do sistema móvel da tecnologia 3G, proposta desenvolvida pela 3GPP, mas aberta a todas as organizações interessadas, membros e não membros da 3GPP.

A tecnologia LTE foi projetada para manter a compatibilidade com as suas tecnologias antecessoras, o GSM e o HSPA, e um dos objetivos estabelecidos pelos grupos de trabalho foi simplificar a arquitetura do sistema para diminuir atrasos tanto no estabelecimento de conexão, quanto na latência de transmissão. Alguns desses objetivos são:

- aumento das taxas de dados dos usuários, alcançando velocidades de transmissão pico de 100 Mbps no enlace descendente e 50 Mbps no enlace ascendente,
- latência no plano de usuário inferior a 10 ms na rede de acesso,
- largura de banda escalável, (entre 1.4 MHz e 20 MHz),
- mobilidade ininterrupta, incluindo as diferentes tecnologias de acesso de rádio, interoperabilidade com sistemas 3G e sistemas não-3GPP, e
- consumo de energia razoável para o terminal móvel.

Em 2006, foram inclusos o protocolo de rádio, a arquitetura de rádio, a arquitetura da rede e aspectos de rádio frequência da camada física no grupo de trabalho TR 25.912, entre os quais se encontram:

- o OFDMA como o esquema de acesso ao radio no downlink e SC-FDMA (Single-carrier FDMA) no uplink,
- o suporte de escalonadores de pacotes tanto no domínio frequencial, quanto no domino temporal.

- a simplificação e descentralização da arquitetura de acesso à rede E-UTRAN.

Com o objetivo de alcançar uma alta eficiência espectral, o LTE integra avançadas técnicas de antena, tais como MIMO, em combinação com o tipo de modulação mais elevado 64-QAM, e uma abordagem multiportadora para acesso múltiplo, no caso do *Downlink* foi escolhido o OFDMA e para o *Uplink* o SC-FDMA. O LTE pode ser implementado nos modos FDD e TDD.

#### 2.3.1 Arquitetura da rede LTE

Em LTE, a arquitetura de rede é composta pela rede de acesso E-UTRAN e pelo core da rede EPC. Estes componentes são projetados para suportar todo tipo de serviço de telecomunicações, usando mecanismos de comutação de pacotes entre os equipamentos de usuários UE e as redes de pacotes externas PDN, tais como plataformas IMS e/ou outras redes como a internet. Na Figura 2.14 apresenta-se a arquitetura de uma rede LTE.

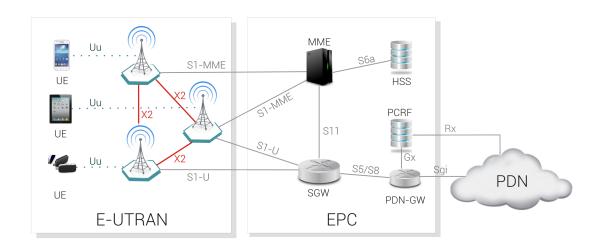


Figura 2.14: Arquitetura de LTE.

A rede de acesso E-UTRAN é composta por uma única entidade de rede, denominada eNB do inglês, constituindo a estação base (BS). O eNB integra todas as funcionalidades da rede de acesso, gestiona os recursos de rádio, inclui funções de controle de admissão dos serviços portadores de rádio, executa controle da mobilidade (realização de handover), possui funcionalidades de escalonamento (alocação de recursos dinâmica tanto no uplink, quanto no downlink), assim como controle de interferência entre estações bases e funções de encaminhamento de tráfego.

Como é mostrado na Figura 2.14, o eNB proporciona conectividade entre os equipamentos de usuários (UEs) e o core da rede (EPC). O eNB se comunica com os UEs através da interface de rádio Uu, permitindo a transferência de informação pelo canal de rádio entre eles.

A interface de rádio Uu suporta três tipos de mecanismos de transferência da informação no canal de rádio: a difusão da sinalização de controle, o envío de pacotes IP e a transferência de sinalização de controle dedicada entre um UE e o eNB. Na Figura 2.15 são apresentados os mecanismos de transferência de informação através da interface de rádio Uu.

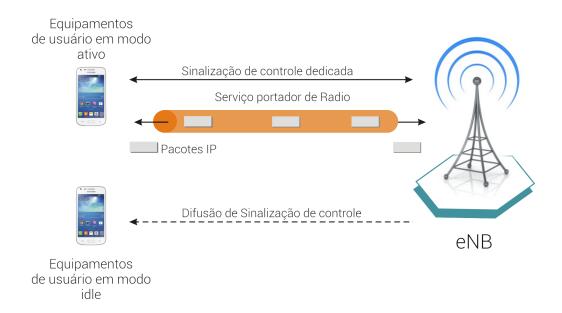


Figura 2.15: Mecanismos de transferência de informação na interface de rádio Uu.

O mecanismo de difusão da sinalização de controle na área de cobertura da célula permite aos UEs detectar a presença do eNB e conhecer os parâmetros básicos de operação, bem como forçar o estabelecimento de conexão a um UE, que não tenha conexão de controle estabelecida (função paging), permitindo executar a funcionalidade de gestão de localização dos equipamentos de usuários na rede em estado idle.

O mecanismo de transferência de pacotes IP, entre o eNB e o UE, através do canal de rádio, é conhecido formalmente como serviço portador de rádio (Radio Bearer), e é projetado para suportar especificamente pacotes IP, otimizando o envio de pacotes implementando a compressão de cabeçalhos IP nos serviços portadores de rádio.

O estabelecimento de uma conexão de controle dedicada entre o eNB e um UE é muito importante para uma eficiente gestão dos serviços portadores de rádio, permite o estabelecimento, a modificação e a liberação dos serviços portadores, bem como na gestão da sinalização com o core da rede e na gestão do mecanismo de handover.

O mecanismo *handover* permite manter ativa a conexão de controle e serviços portadores de rádio que o usuário esteja utilizando quando exista uma troca de célula.

A conexão de controle é suportada pelo protocolo Radio Resource Control (RRC), e os terminais que mantenham a conexão RRC com o E-UTRAN são conhecidos como usuários em modo ativo, e ao contrário, são conhecidos como usuários em modo *idle*.

O eNB mantém um contexto de cada UE conectado, neste contexto o eNB armazena a informação necessária para manter os serviços ativos da E-UTRAN, como por exemplo, o estado do equipamento de usuário, os serviços portadores ativos, a informação de segurança e as capacidades do equipamento. Todos os protocolos necessários para gestão da interface e troca de dados se implementam na eNB.

A interface S1 permite comunicar a eNB como a rede troncal, proporcionando à rede EPC os mecanismos necessários para gestionar o acesso aos equipamentos móveis através da E-UTRAN. A interface é dividida em duas interfaces diferentes, a S1-MME e a interface S1-U.

A interface S1-MME dá suporte ao plano de controle e comunica o eNB com a entidade (Mobility Management Entity) MME. Um dos procedimentos que permite esta interface é o estabelecimento, a modificação e a liberação de recursos dos serviços portadores tanto da interface de rádio quanto da interface S1 (S1Bearer). A concatenação do serviço portador de rádio e do serviço S1 constitui o serviço portador completo oferecido pela E-UTRAN, conhecido como E-UTRAN (Radio Access Bearer). O estabelecimento destes serviços é feito pela entidade MME. Na Figura 2.16 é apresentado os Bearers entre as diferentes entidades da rede LTE.

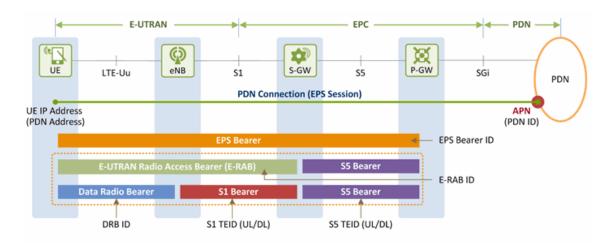


Figura 2.16: Bearers entre entidades da rede LTE. Adaptada de [5].

Outro procedimento acontece quando não existe uma interface X2 estabelecida entre eNBs, e é decidido pela E-UTRAN que um terminal deva mudar de célula, a interface S1-MME e a entidade MME são usadas no procedimento de handover, estabelecendo um novo contexto no eNB destino, associado ao terminal com toda a informação relativa à configuração dos serviços portadores que já tinha estabelecidos.

A interface S1-U dá suporte ao plano de usuário, comunica a eNB com a entidade Serving Gateway S-GW, na transferência de dados dos usuários, e no serviço de transferência através da interface S1-U, conhecido como serviço portador S1 (S1 bearer).

O core da rede tem sido projetado para oferecer um serviço de conectividade IP, otimizando a arquitetura da rede para aproveitar as capacidades oferecidas pela rede de acesso. As entidades que conformam o núcleo da rede troncal EPC são: MME, S-GW Serving Gateway, P-GW, e HSS Home Subscriber Server. Estas entidades permitem uma conetividade entre os equipamentos de usuários conetados à rede de acesso e as redes externas conectadas à rede troncal EPC. As entidades com funções asociadas ao plano de usuário são S-GW, P-GW, enquanto a MME é encarregada das funções e da sinalização no plano de controle.

A entidade MME é o elemento principal no plano de controle, que gestiona o acesso dos terminais através de E-UTRAN. Ela mantém um contexto de dados do usuário, por exemplo, identificadores de usuário, serviços portadores ativos, dados de localização na rede, entre outros, e esta informação é obtida da entidade HSS através da interface S6a. Cada usuário possui uma entidade MME, mas ela pode ir mudando de acordo com a mobilidade do usuário.

O MME controla as funções de transferência no plano de usuário, através da interface S11 com a entidade S-GW. O MME gestiona os serviços dos portadores EPS e a mobilidade dos usuários em modo *idle*. Ela também fornece sinalização para dar suporte na mobilidade dos usuários entre a rede LTE e outras redes 3GPP. Todas estas funcionalidades são suportadas através dos protocolos NAS, os quais provêm a comunicação entre os equipamentos dos usuários e o EPC.

A entidade S-GW atua como roteador de borda entre as redes de acesso e o core da rede no plano de usuário, e uma de suas funções é o encaminhamento do tráfego, tanto no *uplink* quanto no *downlink*, sendo responsável pelo armazenamento de dados temporal, enquanto o usuário "recupera" o plano de usuário perdido durante o estado *idle* com a entidade MME. O S-GW fornece um ponto de apoio à rede troncal no processo de *handover* entre eNBs, tanto da rede LTE quanto com outras redes de acesso da 3GPP.

A entidade P-GW fornece conectividade entre a rede LTE e as redes de pacotes externas PDN, quando um usuário é registrado na rede LTE, é atribuindo no mínimo uma entidade P-GW. Esta entidade aplica as regras de uso da rede e de controle de tarifação aos serviços estabelecidos, aloca endereços IP IPv4 ou IPv6 aos terminais.

A entidade HSS é a base de dados principal na rede LTE, armazena tanto informação permanente dos usuários como condições do contrato, quanto informação temporal que muda de acordo com a operação da rede, por exemplo, a localização do usuário na rede. Esta base de dados é consultada e modificada por entidades encarregadas de fornecer serviços de conectividade.

## 2.3.2 Gestão de seções

A tecnologia LTE fornece o serviço de conectividade IP entre os equipamentos de usuários e uma rede IP externa, como por exemplo, serviços-ims, internet, rede-corporativa, etc, estas redes em LTE são conhecidas como PDN Packet Data Networks e são identificadas com uma etiqueta chamada APN Access Point Name composta por um identificador da operadora da rede LTE e um identificador específico da rede externa.

A rede LTE ao determinar o qateway ou os qateways P-GW que vão partici-

par da conexão PDN, usa o parâmetro APN para seleciona-los. É possível que um equipamento de usuário estabeleça conexão com múltiplos PDNs ao mesmo tempo, através da mesma ou de várias P-GW. Na Figura 2.17, é apresentado o serviço de conectividade IP oferecido pela rede LTE.

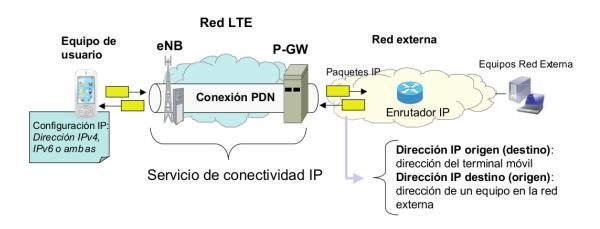


Figura 2.17: Serviço de conetividade IP da rede LTE. Tomada de [6]

A conectividade IP da rede LTE suporta QoS e adapta-se às necessidades de transmissão de aplicações específicas. O gerenciamento da qualidade do serviço é executado através do serviço portador de sistema de pacotes evoluído EPS Bearer do inglês Evolved Packet System Bearer. Este serviço tem parâmetros associados de QoS e filtros de pacotes chamados TFT (Traffic Flow Template), que selecionam um grupo de pacotes para receber as preferências de acordo com os parâmetros de QoS.

Ao estabelecer uma conexão PDN, é criado um EPS Bearer Default, que envia todo o tráfego IP sem receber trato amento, sendo necessário estabelecer um EPS Bearer adicional ao padrão para dar preferências a um fluxo de dados específico. Este EPS Bearer adicional é conhecido no padrão da 3GPP como serviços portadores EPS dedicados (EPS Bearer Dedicated), assim somente os pacotes escolhidos pelo filtro TFT serão enviados através do EPS Bearer dedicado, os outros irão pelo EPS Bearer Default. Na Figura 2.18, é apresentado os portadores dedicados e os por padrão da rede LTE.

O filtro TFT contém as informações das portas dos protocolos de transporte, endereços IP e das máscaras de sub-rede dos nós remotos, das portas locais dos protocolos de transporte e dos campos específicos da Qualidade de Serviço nos cabeçalhos do protocolo IP, sendo que o filtro de pacotes deve ser instalado no equipamento de usuário para filtrar o tráfego ascendente.

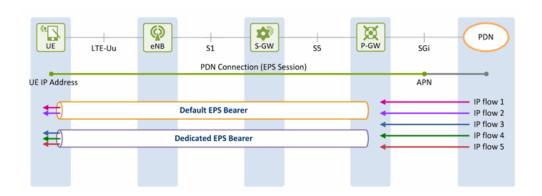


Figura 2.18: EPS Bearer Default e EPS Bearer Dedicate. Adaptada de [5].

O serviço portador *EPS Bearer* vai do UE até a P-GW da rede LTE que fornece *QoS end-to-edge*, e este termo faz referência ao comportamento de QoS entre um equipamento de usuário e um ponto de interconexão com a rede externa. Para implementar um *EPS Bearer* é preciso estabelecer o contexto de informação dos parâmetros de QoS, etiquetas e filtros necessários para a identificação do fluxo de dados ao serviço portador em cada nó onde é processado o plano de usuário.

Quando os pacotes IP são associados a um tipo de serviço portador, eles se identificam enquanto se transportam ao longo da rede. Na interface de rádio, os pacotes associados a um *EPS Bearer* são transmitidos num serviço portador de rádio (*Radio Bearer*), e o cumprimento dos requisitos de QoS se fundamentam na configuração apropriada dos mecanismos de transmissões RLC e H-ARQ, bem como nos mecanismos de escalonamento, na gestão ativa de filas, e no controle de taxa de transferência do *EPS Bearer*.

O modelo de QoS permite definir valores máximos no retardo da transferência entre nós de uma rede IP, levando a uma necessidade de reserva de recursos, onde o comportamento esperado de um EPS Bearer dependerá do serviço final, ou seja, o comportamento de QoS de um serviço VoIP será muito diferente de um serviço de navegação HTTP. Além disso, irá diferenciar os parâmetros de QoS em função de tipos de usuários devido às condições de subscrição na contratação do serviço. Portanto, a operadora da tecnologia LTE pode oferecer um comportamento do sistema diferente para usuários de negócios frente a usuários convencionais, usuários pós-pago frente a usuários pré-pago e usuários em situações de emergência.

O modelo de QoS é baseado em no máximo quatro parâmetros para definir

o comportamento do *EPS Bearer*, além de se complementar com dois parâmetros associados à subscrição. Na Figura 2.19, encontra-se os parâmetros de QoS associados ao sistema LTE.

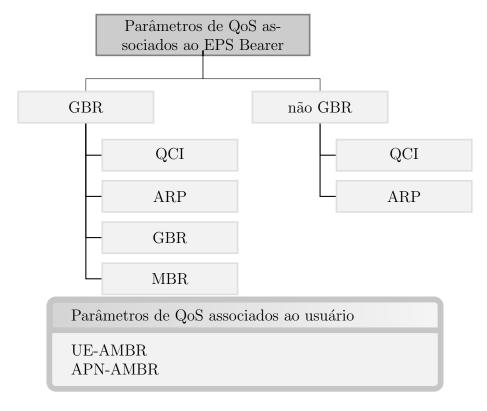


Figura 2.19: Parâmetros QoS em LTE. Adaptado de [6].

O EPS Bearer sempre tem associados dois parâmetros, QCI (QoS class identifier), que determina o comportamento do EPS Bearer no plano do usuário, e ARP (Allocation and Retention Priority) no plano de controle. A seleção de um valor QCI implica, para o EPS Bearer, a utilização de um conjunto de parâmetros em cada nó que processa o plano de usuário. Na Tabela 2.3, são mostrados os valores de QCI padronizados.

O parâmetro Prioridade pode ser usado pelo escalonador para alocação de recursos entre um conjunto de *EPS Bearer* de rádio. O parâmetro de retardo dos pacotes é usado para determinar o comportamento do escalonador, bem como a configuração da camada de enlace (ponto de operação dos mecanismos de retransmissão), e é visto como limiar de retardo máximo que 98% dos pacotes devem satisfazer. E o parâmetro da taxa de perda dos pacotes representa um limiar da taxa de perdas não devidas a congestionamento.

O parâmetro ARP é considerado na hora de decidir se um novo EPS Bearer

Tabela 2.3: Valores de QCI padronizados. Adaptada de [6]

QCI	Tipo Recurs		Prioridade	Retardo do Pacote	Taxa de perda dos pacotes	Exemplo de serviço
1	<del></del>		2	100 ms	$10^{-2}$	Voz
2	GBR		4	150  ms	$10^{-3}$	Transmissão ao vivo
3	GDN		3	50  ms	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4			5	300  ms	$10^{-6}$	Vídeo não-conversacional
						(streaming de buffer)
5			1	100 ms	$10^{-3}$	Sinalização IMS
6			6	300  ms	$10^{-6}$	Video Streaming, Ba-
	Não G	βBR				seado em TCP (www,
						email, chat, ftp, etc)
7			7	100  ms	$10^{-6}$	Voz, Vídeo (transmissão
						ao vivo) Jogos interativos
8			8	200	$10^{-6}$	,
9			9	300  ms	$10^{-6}$	Vídeo Streaming Baseado em TCP v

deve ser criado ou desativado numa rede LTE com escassez de recursos, ou seja, o ARP é usado nos processos de estabelecimento, modificação ou desativação de um *EPS Bearer*, a rede LTE suporta um total de 15 prioridades para este parâmetro.

Como é apresentando na Figura 2.19, o parâmetro GBR indica uma taxa garantida em bits por segundo que deve fornecer o *EPS Bearer*, ou seja, um serviço portador de taxa garantido que curse uma taxa de dados igual ou inferior ao indicado pelo parâmetro GBR, não deve experimentar perdas de pacotes por congestionamento. Este tipo de serviço tem que se submeter sempre a um controle de admissão devido à quantidade de reserva de recursos.

O parâmetro MBR define um valor máximo para a taxa e através do mecanismo de controle de taxa, o tráfego que ultrapasse aquele valor pode ser descartado.

Além dos parâmetros de QoS estabelecidos a cada *EPS Bearer*, MBR, GBR, ARP e QCI, cada usuário possui dois parâmetros adicionais que fazem parte do perfil do usuário, UE-AMBR e AP-AMBR. O parâmetro UE-AMBR faz referência à taxa máxima do equipamento do usuário e o APN-AMBR faz referência à taxa máxima agregada do equipamento do usuário com uma rede externa determinada, associada ao APN.

#### 2.3.3 Escalonadores de Pacotes

O escalonador de pacotes está muito relacionado com as características da interface de rádio do LTE, que consiste em alocar dinamicamente recursos de rádio aos usuários para que eles possam fazer suas transmissões ordenadamente. O escalonador escolhe os usuários que vão transmitir, em quais recursos da interface de rádio, e o formato de modulação e codificação, bem como considera os requerimentos de qualidade de serviço associados aos portadores de rádio, a qualidade do canal por usuário e aos estados dos buffers.

A interface de rádio define uma grade de tempo-frequência dos recursos de rádio, sendo que o mínimo recurso de rádio atribuído a um usuário é um bloco de recurso (Resource Block - RB) ou Bloco de recurso físico (Physical Resource Block - PRB), como é apresentado na Figura 2.20. Esta elevada granularidade permite ao escalonador reagir rapidamente a mudanças no canal.

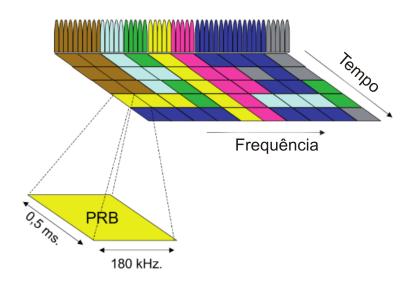


Figura 2.20: Grade Tempo-Frequência em LTE. Tomada de [7].

No domínio da frequência é usada a técnica OFDMA, a qual divide a banda total em pequenas subportadoras espaçadas de 15kHz como 12 subportadoras, e cada uma é modulada individualmente usando QPSK, 16QAM ou 64 QAM. No domínio do tempo o quadro tem uma duração de 10 ms dividido em subquadros, e cada subquadro constitui um (TTI) de 1 ms e é formado por dois *slots*, cada um com 0,5 ms de duração. Finalmente, um *slot* contém 6 ou 7 símbolos OFDM, dependendo do prefixo cíclico usado (normal ou estendido), como é apresentado na Figura 2.21.

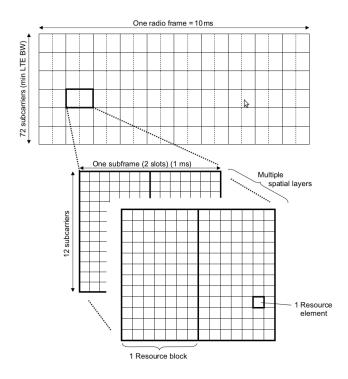


Figura 2.21: Grade Tempo-Frequência em LTE. Tomada de [8].

Neste contexto, o LTE tem a capacidade de suportar a diversidade multiusuário, no domínio temporal. O escalonador leva em conta a qualidade do canal de cada usuário (channel-aware scheduling), e aloca o canal ao usuário com melhor qualidade aproveitando ao máximo os recursos de rádio. Este conceito também é tratado no domínio da frequência, onde as variações do canal, devido aos desvanecimentos seletivos em frequência, são levados em conta. Desta forma, o sistema trabalha com maior eficiência já que o usuário a transmitir é selecionado convenientemente.

Em LTE o escalonador encontra-se no eNB na camada MAC, tanto para *Downlink* quanto para *Uplink*, garantindo a ortogonalidade entre as transmissões, mas também precisa sinalização entre os usuários e o eNB para reportar informações tais como: o estado do canal, e o estado do *buffer*.

Estado do Canal: No enlace descendente, o eNB configura os terminais de forma periódica ou por demanda para enviar um sinal do estado do canal (channel status reports - CSR), sendo importante esclarecer que a mensagem CSR não contém informação do estado canal que o usuário percebe, mas contém uma recomendação por parte dos UEs com os parâmetros de transmissão adequados em função do canal percebido (normalmente SINR). O CSR inclui: Rank Indication (RI), Precoder Matrix Indication (PMI), Channel Quality Indication (CQI).

- Rank Indication (RI): é uma recomendação feita pelo equipamento do usuário no intervalo do canal para transmissão MIMO.
- Precoder Matrix Indication (PMI): é a matriz de pré-codificação recomendada pelo equipamento do usuário.
- Channel Quality Indication (CQI): é o esquema de codificação e modificação baseado no estado do canal medido.

No enlace ascendente, o eNB, estima o estado do canal, analisando o sinal recebido nos PRB alocados num usuário determinado. O eNB configura os usuários ativos para transmitir periodicamente sinais específicas com o objetivo de estimar o estado do canal em qualquer PRB, chamadas SRS.

Estado do Buffer. No Downlink, o eNB conhece o estado dos seus buffers, mas no uplink o UE reporta o estado dos buffers a cada subframe através do (BSR) Buffers Status Report, indicando a quantidade de dados esperados no buffer do terminal.

O envio de um sinal BSR pode ser devido à chegada de dados com maior prioridade daquilo que está sendo transmitido; mudança de célula; expiração de um contador (transmissão periódica); e necessidade de completar um bloco de transporte para alcançar seu tamanho. Estes tipos de sinais só podem ser enviados se o UE possuir recursos alocados; no caso contrário, o terminal deverá solicitar permissões ao eNB para transmitir, podendo ser em duas modalidades, solicitando uma requisição ao escalonador SR (Scheduling Request), indicando novos dados para enviar, ou através do procedimento de acesso aleatório RACH (Random Access Procedure).

O Escalonador é responsável pela adaptação dinâmica do enlace ao selecionar adequadamente o formato de modulação e codificação para as transmissões de cada usuário, baseado no controle de taxa binária (rate control), que consiste em variar aquela taxa em função da qualidade do canal. No caso do *Uplink*, a informação é obtida do sinal SRS; no caso do *Downlink*, é obtido do CSR, para garantir uma determinada taxa de erro (BER), que dependerá dos serviços oferecidos e dos esquemas de codificação disponíveis. Em conclusão, o objetivo dos métodos para escalonar pacotes é decidir para cada PRB em cada subframe o usuário que vai transmitir.

O padrão 3GPP define mecanismos para que seja possível escalonar pacotes, mas não define estratégias específicas para decidir o usuário que deve transmitir

e em qual bloco de recurso de um determinado *subframe*, pelo que devem ser implementadas pelo fabricante.

Geralmente, os escalonadores de recursos são baseados na comparação de métricas por cada bloco de recurso, obtidas para um UE específico. E são dividas em duas classes: independentes do canal e dependentes do canal, como apresentado no esquema da Figura 2.22.

Os Algoritmos independentes do canal pretendem alcançar a justiça e a equidade na distribuição de recursos entre os usuários, por exemplo, *Round Robin* (RR) e *Blind Equal Throughput* (BET).

Os algoritmos dependentes do canal podem ser baseados na qualidade do serviço ou não. Os algoritmos não baseados em QoS alocam recursos aos UEs de acordo com as condições do canal. São exemplos deste tipo de algoritmos: *Maximum Throughput* (MT), *Proportional Fair* (PF) e *Throughput to Average* (TTA). Os algoritmos baseados em QoS, além de levar em conta as condições do canal, leva em conta os requerimentos de Qualidade de Serviço de cada fluxo, e os algoritmos que representam esta classe são o *Priority Set* (PSS), *Adaptive Token Bucket* (TBFQ) e o *Channel and QoS-aware* (CQA).

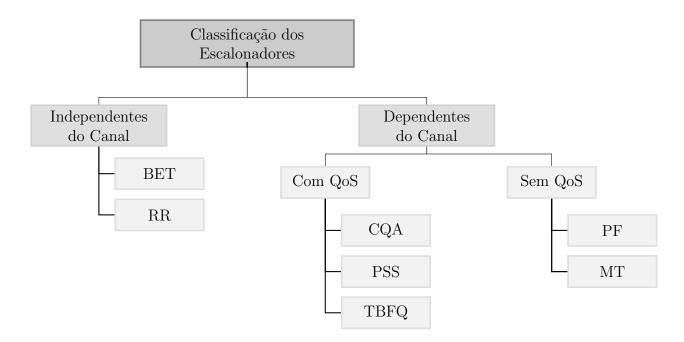


Figura 2.22: Classificação dos Escalonadores

#### Round Robin (RR):

É uma estratégia que aloca recursos cíclicamente aos usuários sem levar em conta condições do canal ou requerimentos de QoS, é um algoritmo que visa a justiça na distribuição dos recursos disponíveis, pelo que cada usuário tem alocado o canal o mesmo tempo, mas é provável que os usuários com piores condições do canal precisem de maior tempo para transmitir. [39].

#### Maximum Rate (MR):

Este algoritmo tem como métrica de prioridade as condições do canal. O algoritmo MR seleciona o usuário com as melhores condições do canal a cada subquadro em um bloco de recurso. Ele pretende maximizar a vazão da célula, mas aloca recursos de maneira injusta para os usuários com piores condições do canal [6] [39].

### Proportional Fair (PF):

O *Proportional Fair* propõe um *tradeoff* entre a vazão instantânea e a justiça entre os usuários. Assim os recursos serão alocados aos usuários com maior razão entre a vazão atingível naquele instante e a última média da vazão atingida. Desta forma todos os usuários terão probabilidade de atendimento com condições do canal diferentes [40].

#### Channel and QoS-aware (CQA):

Este escalonador combina o domínio do tempo com o domínio da frequência. Ele controla a equidade entre os usuários por uma taxa de bits objetivo (TBR) especificada. O Escalonador, no domínio do tempo primeiro seleciona os UEs que não estejam com o buffer vazio, e os divide em dois grupos baseados no TBR.

No grupo 1, estão os UEs que possuem vazão média menor ao TBR. Neste caso o escalonador calcula a métrica de prioridade baseado no algoritmo *Blind Equal throughput* (BET). No caso do grupo 2 estão os UEs que possuem vazão media maior ao TBR. Neste caso o escalonador calcula a métrica de prioridade baseado no algoritmo *Proportional Fair* (PF).

Os UEs que estiveram no grupo 1, possuem maior prioridade sobre os UEs pertencentes ao grupo 2. O Escalonador irá escolher o usuário com maior métrica e encaminhará ao escalonador no domínio da frequência, o qual irá alocar os recursos de radio baseado na métrica da condição do canal. Portanto, o escalonamento pode ser feito pelo algoritmo de *Proportional Fair* ou *Carrier over Interference to Average* (CoIta), que leva em consideração o SINR do usuário no bloco de recurso [41].

# Capítulo 3

# Metodologia do estudo de caso

Este capítulo apresenta a metodologia implementada para realizar o estudo de viabilidade da coexistência de dois tipos de tráfegos H2H e M2M em uma rede LTE com dados reais. Mostra-se a motivação e os objetivos do trabalho. Também são definidos o cenário objeto do estudo, as aplicações M2M e H2H, e os parâmetros de configuração para as simulações.

## 3.1 Motivação

Com o rápido crescimento de "objetos" conectados à Internet, origina-se, o novo paradigma da Internet das Coisas (IoT), onde não existirá somente uma comunicação entre pessoas (H2H), ou uma comunicação entre pessoas e máquinas (H2M), mas também uma comunicação direta entre máquinas sem intervenção humana.

No entanto, em um cenário de *Smart Grid*, onde é proposta uma comunicação bidirecional entre os medidores elétricos com o centro de operações e uma comunicação bidirecional entre dispositivos distribuídos ao longo da rede de transmissão e distribuição, tem surgido uma grande preocupação sobre os escassos recursos de rádio. Assim, a comunicação Maquina-a-Maquina (M2M) torna-se parte importante desta problemática, já que o maior tráfego gerado e recebido será por conta dela [42].

A coexistência de diferentes tipos de tráfego dentro de uma mesma rede pretende otimizar os recursos espectrais e, ao mesmo tempo, oferecer maiores serviços e aplicações. A tecnologia celular LTE possui novas propostas de acesso ao meio e uma nova arquitetura de rede, bem como a possibilidade de implementar diferentes tipos de mecanismos para escalonadores de pacotes na busca para otimizar os recursos de rádio disponíveis e atender os requerimentos dos diferentes tipos de comunicação e suas aplicações.

Portanto, torna-se importante realizar um estudo de convivência de tipos de tráfego com diferentes características, como são os dados gerados pela *Smart Grid* e os dados gerados pela comunicação H2H.

## 3.2 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de uma rede LTE com tráfego H2H convencional e acrescentar o tráfego M2M de *Smart Grid*, para analisar a performance da rede LTE com diferentes escalonadores propostos pela 3GPP.

### 3.2.1 Objetivos Específicos

- Usar diferentes escalonadores de pacotes propostos pela 3GPP para avaliar o desempenho de cada um deles em condições críticas da rede, acrescentando os usuários M2M com dados da Smart Grid.
- Implementar no simulador os dados reais fornecidos pela empresa operadora de comunicações, criando o cenário base com aplicações comuns H2H.
- Determinar a quantidade possível de dispositivos da infraestrutura de medição avançada AMI a ser inclusos na *Smart Grid*, partindo de dados reais.
- Determinar a quantidade possível de dispositivos da automação na rede de distribuição DA a ser inclusos na *Smart Grid*, partindo de dados reais.
- Determinar o ponto crítico, onde a rede esteja quase no limite de atingir os requerimentos de QoS para as aplicações H2H propostas.

## 3.3 Apresentação do estudo de caso

Para modelar a rede LTE com aplicações H2H de voz e ftp, foram usados dados reais de uma rede implementada em um município da Colômbia. Adicionalmente, foi acrescentado o tráfego gerado pelos dados da infraestrutura de Medição Avançada AMI e da automação na rede de distribuição DA da *Smart Grid*, como é apresentado na Figura 3.1.

Os dados fornecidos por uma empresa operadora de Telecomunicações da

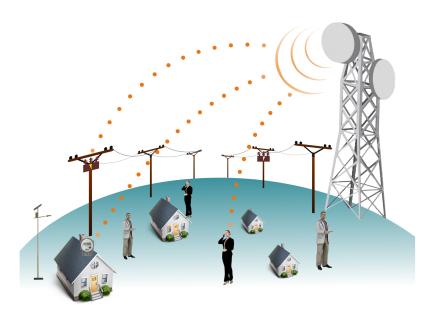


Figura 3.1: Cenário Proposto.

Colômbia foram obtidos no centro do município de Yumbo, localizado no estado do Valle del Cauca, a catorze quilômetros ao norte da capital do estado, a cidade de Cali. O município tem uma superficie de  $229.52\ Km^2$ , e concentra mais de  $2000\ fábricas$  e grandes empresas, pelo qual é conhecido como a capital industrial da Colômbia. A Figura  $3.2\ mostra$  esquematicamente a localização de Yumbo na Colômbia.



Figura 3.2: Localização Yumbo.

### 3.3.1 Usuários M2M do Cenário proposto

Nesta subseção, serão determinados a quantidade de dispositivos que compõem a infraestrutura de medição avançada (AMI), os medidores inteligente, bem como a quantidade de dispositivos envolvidos na rede de distribuição, que para este estudo foi levado em consideração o número de transformadores na região de cobertura da célula.

#### Determinação das residencias no cenário proposto

Segundo o senso de 2011, o município de Yumbo possui uma população total de 106.559 habitantes, sendo que na área urbana se concentram 93.561 habitantes, que representam 87.8%, e na área rural encontram-se 12.998 habitantes representando os 12.2% restantes.

Na área urbana, a cidade é composta por 33 bairros setorizados em 4 zonas, como apresenta-se na Tabela 3.1. A quantidade de habitantes, casas e quarteirões por zona, bem como a quantidade de casas por quarteirão do município são apresentadas na Tabela 3.2, em conformidade com as estatísticas governamentais de Yumbo [43]. A Tabela 3.2 mostra que a média é de 4 habitantes por casa.

Tabela 3.1: Divisão das Zonas do Município de Yumbo.

Zonas	Bairros
1	Alto San Jorge Juan Pablo IIInvi Yumbo San Jorge, La Nueva Estancia,
	Las Américas, Puerto Isaac, La Estancia, Panorama.
2	Belalcázar, Bolívar, Uribe Uribe, C/ Portales de Comfandi y Fray peña.
3	Pedregal, Nuevo Horizonte, San Fernando, Las Cruces, Buenos Aires,
	Asovivir las colinas, Corvivalle.
4	Madrigal, Portales de Yumbo, Jorge E Gaitán Lleras, Guacandá,
	La Ceiba, Floral, Municipal U7 Carlos Pizarro / Cacique, Trinidad /
	Riberas de Yumbo, Dionisio Hernán C, Las Vegas / Finlandia, Bellavista.

Tabela 3.2: Divisão do Município de Yumbo

	1 abcia 9.2. Di	visao de	municipio de	i umbo.
Zonas	Habitantes	Casas	Quarteirões	Casas/Quart.
1	24.935	5.432	298	18.2
2	24.975	6.343	166	38.21
3	13.412	4.264	164	26
4	30.201	7.558	310	24.3

Na Figura 3.3, é apresentado um *Drive Test* com a área de cobertura de uma célula localizada no centro do Município de Yumbo. O *Drive Teste* fornecido pela empresa de telecomunicações é considerado um método para avaliar a cobertura de uma rede móvel. Neste método de avaliação, é usado um veículo com um equipamento de medição, capaz de detectar variações físicas em uma dada área.

Na Figura 3.3, observam-se os diferentes níveis do sinal, representados pelas cores vermelho, amarelo e azul. A cor vermelha representa a área com o maior nível do sinal, logo dentro desta região os usuários têm certeza de conexão à rede LTE. A região de cor amarela representa a área com o nível do sinal menor e os usuários teriam uma alta probabilidade de não conseguirem se vincular à rede LTE, e a cor azul descreve a área com o menor nível de sinal, onde o usuário não consegue se conectar à rede. Portanto, a região escolhida para este cenário é a região identificada com a cor vermelha, com um alcance de 650 metros aproximadamente, como é apresentada na Figura 3.3.

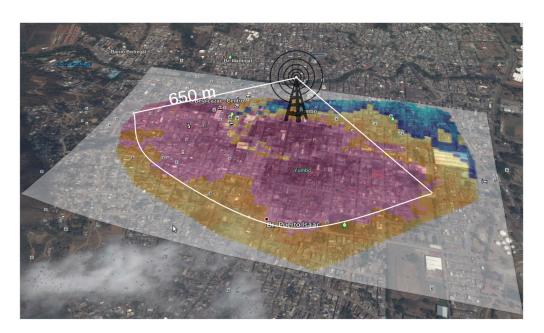


Figura 3.3: Drive Test. Área de cobertura da célula para o cenário.

A partir das informações fornecidas pela empresa, e com o apoio da ferramenta google maps, foi gerado o mapa com os bairros que atingem a área de cobertura da célula, como se observa na Figura 3.4, no qual são identificadas as diferentes cores que representam os bairros do centro do Município de Yumbo. Segundo a Tabela 3.1, todos os bairros desta região pertencem à Zona 2, com um total de 43 quarteirões aproximadamente. De acordo com a Tabela 3.2, a zona 2 apresenta 38 casas por quarteirão, em um total de 1.643 casas na área de cobertura da eNB.

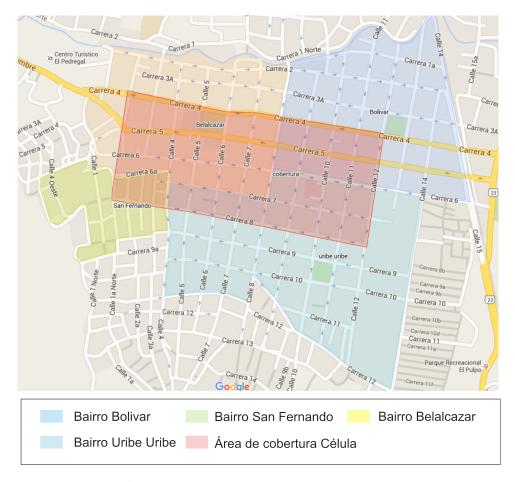


Figura 3.4: Área de cobertura da célula por bairros em Yumbo.

#### Determinação dos transformadores no cenário

Considerando as informações obtidas a partir dos dados gerados pelos transformadores, como: balanço de energia, identificação de falta de energia e cálculos dos indicadores de qualidade da energia [44], adota-se a metodologia proposta pela Eletrificadora de Santander (ESSA) [45] para determinar a quantidade de transformadores na região definida, assumindo que a área de cobertura é totalmente residencial.

A carga por usuário é calculada usando a equação 3.1:

$$S_L = A + B + C \tag{3.1}$$

Onde:

 $S_L$ : Carga por usuário.

A :  $32 \text{ VA}/m^2$  para cargas de iluminação geral.

B: Carga mínima para máquina de lavar e ferro: 1500 VA.

C: Carga mínima para mais circuitos de aparelhos pequenos: 1500 VA

Assumindo que a área por casa é de 200  $m^2$ , a carga mínima instalada por usuário,  $S_L$ , é 10.9 KVA. A demanda máxima total é definida segundo a equação 3.2:

$$D_{max} = \frac{S_R}{F_{divres}} \tag{3.2}$$

Onde:

 $S_R$ : Carga demandada do setor residencial.

 $F_{divres}$ : Fator de diversidade no setor residencial.

A carga demandada pelo setor residencial  $S_R$  é dada por:

$$S_R = [S_M + (S_L - S_M)F_d]N (3.3)$$

Onde:

 $S_M$ : Carga do aparelho com maior potência.

 $F_d$ : Fator de demanda.

N: Número de usuários.

 $S_L$ : Carga mínima instalada por usuário.

Segundo a metodologia da ESSA [45], o fator de demanda  $F_d$  para, os estratos <sup>1</sup> 3 e 4 é de 0.4. Como foi definido anteriormente para este cenário, o numero de usuários N é de 1643 e a carga do aparelho com maior potência é de 1.5KVA. Portanto, a carga demandada pelo setor residencial  $S_R$  é de 8642.18 KVA.

Para determinar a demanda máxima total, o fator de diversidade é calculado pela equação 3.4 [45], dada pela metodologia da ESSA, e é considerado um fator de segurança de 20% para o cálculo dos transformadores, obtendo como valor da demanda máxima 2074.12 KVA.

$$F_{divres*} = \frac{1}{0.2 + 0.8 * e^{\frac{1-N}{6}}}$$
 (3.4)

Assumindo que é usado um transformador convencional de 75KVA para áreas residenciais, estima-se um total de 28 transformadores na região de estudo.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Na Colômbia, os estratos são uma classificação socio-econômica das residencias que devem receber serviços públicos, assim as pessoas com maior capacidade econômica pagam mais, contribuindo para que as pessoas com menos recursos possam pagar suas tarifas.

### 3.3.2 Usuários H2H do Cenário proposto

Para determinar a quantidade de usuários H2H da rede LTE dentro da área de cobertura da eNB, foram considerados os possíveis usuários da internet móvel da tecnologia LTE, a partir da quantidade de habitantes na região definida pela área de cobertura da célula.

Segundo a Tabela 3.2, a quantidade é de 4 habitantes por casa na região. Portanto, para 1643 casas, a quantidade é de 6572 habitantes na área de cobertura. A quantidade de possíveis usuários da tecnologia LTE foi estimada a partir do estudo do ministério de tecnologia da informação e das comunicações da Colômbia, a qual determina que 61,07% da população usa internet móvel, e que a participação da geração 4G, no primeiro trimestre do ano 2015, é de 7,23% [46]. Isso permite concluir que a quantidade de usuários de internet móvel LTE é de 290 na área de cobertura analisada do município de Yumbo.

### 3.3.3 Ferramenta de Simulação

O simulador escolhido para realizar este estudo é o **NS3**, definido como um simulador de eventos discretos, escrito na linguagem C++, que suporta avaliações de redes IP, e envolvem modelos para a tecnologia LTE. Ele é um software sob a licença GNU GPLv2, e está disponível ao público para pesquisa e desenvolvimento.

Na Figura 3.5 é apresentada uma descrição geral do modelo do LTE. Este modelo tem sido projetado para suportar: avaliação de gestão de recursos de rádio, escalonadores de pacotes consciente de QoS, coordenação de interferência entre células e o acesso dinâmico ao espectro. O modelo desenvolvido possui todas as camadas definidas pela pilha de protocolos, tanto no plano de controle quanto no plano de usuário, tornando as simulações mais próximas do real [9].

O Módulo E-UTRAN inclui a pilha de protocolos, tanto no plano de controle quanto no plano de usuário (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Estas entidades estão comprendidas nos nós que definem um UE e um eNB, bem como a interface X2 para dar suporte a mecanismos de handover. O simulador permite a implementação de múltiples usuários, bem como diversas eNBs, e a configuração das condições de propagação no meio sem fio, fornecendo modelos de mobilidade para os usuários e a configuração de antenas, a frequência de operação, entre outros. No simulador é implementado a técnica FDD, técnica mais usada pelas empresas implementadoras da tecnologia LTE.

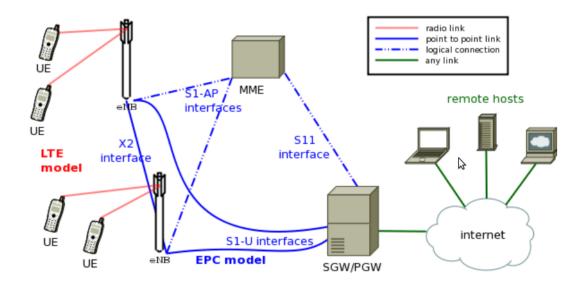


Figura 3.5: Modelo do LTE no simulador. Tomado de [9]

O Módulo EPC define as entidades SGW, PGW e MME, bem como as interfaces das entidades com o eNB, fornece conectividade fim-a-fim sobre o módulo LTE o que suporta a múltipla interconexão dos UEs com a Internet.

A estrutura da Internet é, representada com um nó remoto, que pode ser implementada no simulador com o modulo de redes cabeadas com a pilha de protocolos TCP/IP.

As entidades SGW e PGW são implementadas em um único nó, que pode usar diferentes aplicações com diferentes perfis de QoS, portanto múltiplas *EPS Bearer* devem ser suportados por cada UE, precisando uma classificação dos tráfegos tanto no enlace ascendente, estabelecido pelo UE, quanto no enlace descendente estabelecido pelo eNB.

## 3.3.4 Definição do cenário no Simulador

Considera-se implementar um concentrador que permita coletar os dados dos medidores inteligentes e se comunicar com a rede LTE para sua transmissão, como é apresentado no esquema da Figura 3.6. A implementação do concentrador é fundamentada nas restrições comercias referentes à quantidade de licenças por célula, estabelecidas pelos provedores da tecnologia LTE para a empresa da Colômbia.

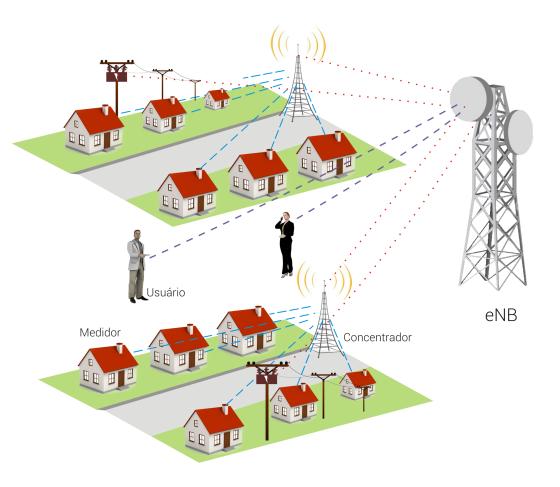


Figura 3.6: Arquitetura da rede proposta com concentradores AMI.

Na Figura 3.6 observa-se a participação de um novo equipamento, o concentrador, encarregado de coletar os dados gerados pelos medidores elétricos, e este dispositivo conta com uma interface de comunicação com os *Smart Meters* e uma interface de comunicação com a rede LTE.

A interface de comunicação entre os medidores elétricos e o equipamento coletor de dados dos *Smart Meters* pode ser cabeada ou não, como foi apresentado no capítulo de revisão bibliográfica. Entretanto, vários estudos [47][48][49][50] e projetos de implementação da *Smart Grid*, como o Projeto Parintins [44], proposto, pela Eletrobras, no Brasil, têm escolhido uma rede em malha RF para a aplicação de *smart metering*. Em 2010, Bill Lichtensteiger *et al.* [47] apresentam um estudo da tecnologia proposta pela *Landis+Gyr's Gridstream*, baseado em uma rede RF, em malha, para a coleta de dados dos medidores inteligentes.

Como foi apresentado na revisão bibliográfica, existem diversas aplicações baseadas na coleta dos dados gerados pelos *Smart Meters*, que influencia na determinação da frequência desses dados. A frequência escolhida para este estudo é de 5 em 5 minutos, já que ela satisfaz os requerimentos da aplicação de gerenciamento da demanda, em tempo real, ou os programas de resposta à demanda (DR). Portanto, é proposto um coletor de dados a cada 100 casas, o que implica na implementação de 17 concentradores para atingir a cobertura total das 1643 casas da região de estudo.

Finalmente, na Tabela 3.3 encontra-se o resumo dos parâmetros gerais dos usuários H2H e M2M definidos para o cenário no simulador.

Tabela 3.3: Resumo dos Parâmetros do Cenário.			
Parâm	Valor		
Número de Rádio de C	1 setorizada 650 mtrs		
Usuários H2H			
Total de H	6572		
Usuários com Inte	ernet móvel 4G	290	
Usuários M2M			
AM	DA		
Total Casas Concentradores	1643 17	Transformadores	28

## Proposta das Aplicações H2H

As aplicações dos usuários H2H, que serão simuladas, são: voz sobre IP e ftp e suas descrições são encontradas abaixo.

#### FTP

Como a maioria dos dados gerados pela *Smart Grid* são no enlace ascendente, foi escolhido que a aplicação FTP esteja representado um envio de dados constante a um servidor em uma rede externa, durante as simulações.

É proposto simular um gerador de tráfego TCP de longa duração constante, no enlace ascendente, imitando um arquivo de tamanho infinito, com o objetivo de sempre manter a rede LTE com dados.

#### VOZ

Para modelar o tipo de aplicação de voz, é usado um modelo proposto na literatura [51] [52], na qual descreve que o tráfego de voz é caracterizado por dois períodos, um ativo (ON) e um inativo (OFF).

O período ON é o tempo utilizado pelo usuário para falar, onde os tamanhos dos pacotes são constantes e transmitidos em intervalos de tempos regulares, com duração T (packetization time). O período OFF é o tempo em que o usuário para de falar e não transmite pacotes. Os dois períodos são estimados por uma distribuição exponencial [53]

Para o período ON.

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha T} \tag{3.5}$$

Tempo médio no período ON.

$$T_{ON} = \frac{1}{\alpha} \tag{3.6}$$

$$T_{ON} = 0.352$$

Para o período OFF.

$$f(x) = \beta e^{-\beta T} \tag{3.7}$$

Tempo médio no período OFF.

$$T_{OFF} = \frac{1}{\beta} \tag{3.8}$$

$$T_{OFF} = 0.650$$

A taxa de pacotes constante é dada por:

$$\lambda = \frac{1}{T} \tag{3.9}$$

A taxa média de pacotes no processo ON-OFF está representada por:

$$\frac{T_{ON}(\lambda)}{T_{ON} + T_{OFF}} \tag{3.10}$$

A taxa de bits depende do *codec* utilizado no tempo de empacotamento. Na Tabela 3.4 são apresentadas as características principais dos *codecs*: G.729 que realizam compressão de dados e G.711 que não realizam compressão [53].

Tabela 3.4: Características dos codecs G.711 e G.729.

Codec	Carga útil de voz (ms)	Carga útil de voz (Bytes)	Codec Bit Rate
G.711	20 (ms) 30 (ms)	160 Bytes 240 Bytes	64 Kbps
G.729	20 (ms) 30 (ms)	20 Bytes 30 Bytes	8 Kbps

Com base na Tabela 3.4 é escolhido o codec G.711, já que, além de ser o mais usado, apresenta uma melhor qualidade de voz ao não realizar compressão de dados. Por conseguinte o tempo de empacotamento usado é 20 (ms) e payload de 160 Bytes, pois oferecem um bom tradeoff entre a latência fim a fim e os requerimentos de largura de banda.

Assim a largura de banda consumida pela aplicação de voz sobre IP é considerada a taxa de bits do *codec* G.711 com 64Kbps, o tempo de empacotamento de 20 ms por pacote e com o tamanho do pacote de 160 Bytes. Os protocolos usados para o transporte de voz são: UDP com cabeçalho de 8 Bytes, RTP com cabeçalho de 12 Bytes e IP com cabeçalho de 20 Bytes. O cálculo da largura de banda por chamada na camada IP é dado pela equação 3.11.

$$L_b = [P_p + C_{pt}]P_s (3.11)$$

onde,  $L_b$  é a largura de banda,  $P_p$  é o payload do pacote,  $C_{pt}$  é o cabeçalho dos protocolos de transporte e  $P_s$  é a quantidade de pacotes por segundo.

A quantidade de pacotes por segundo, dada pela relação entre a taxa de bits do codec G.711 e o payload do pacote, é de 50 pps. Portanto, a largura de banda na camada IP é de 80 kbps.

Contudo, a largura de banda é recalculada, pois o protocolo de RTP não se encontra implementado no simulador, assim o tamanho do cabeçalho do protocolo RTP foi acrescentado no *payload* do pacote, obtendo uma largura de banda de 68.8 kbps.

Na tabela 3.5 apresentam-se os parâmetros obtidos para simular o gerador de tráfego de voz sobre IP no simulador.

Tabela 3.5: Parâmetros da aplicação voip

$T_{ON}$	$T_{OFF}$	Tamanho do pacote	
		[Bytes]	
0.352	0.650	172	

Na tabela 3.6 encontram-se os parâmetros mínimos das métricas para uma boa qualidade de serviço fim a fim na aplicação de voz sobre IP, segundo Hassan *et al.* [51].

Tabela 3.6: Requisitos de Qualidade de serviço para VOIP

Loss%	Jitter (ms)	Delay (ms)
1	10	50

### Proposta das Aplicações M2M

AMI - Infraestrutura de Medição Avançada

Como foi definido no cenário do simulador, será usado um concentrador com uma frequência de 5 em 5 minutos para coletar os dados dos *Smart Meters* por casa. Um concentrador é responsável por coletar os dados de 100 casas, isto é, para uma frequência de 5 minutos, o concentrador entrega dados a cada 3 segundos para a rede LTE.

Foi implementada uma aplicação cliente-servidor sobre o protocolo UDP na simulação para representar a aplicação AMI. Os requisitos de comunicação para esta aplicação, segundo Gungor *et al.* [54], encontram-se na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Requisitos de Qualidade de serviço para AMI

		, i
Largura de banda	Largura de banda	Latência
por dispositivo	backhaul	
10 - 100 [Kbps]	500 [Kbps]	2000 [ms]

**DA** - Automação na rede de Distribuição

Os sistemas de distribuição elétrica atuam como uma ponte entre os sistemas de transmissão e os usuários finais. A automação na rede de distribuição permite as concessionarias monitorar e controlar remotamente ativos com sistemas scada de distribuição na rede, bem como equipamentos de campo, que vão desde unidades terminais remotas até os dispositivos elétricos inteligentes como disjuntores, religadores, chaves, capacitores e transformadores.

A automação na rede de distribuição, fornece detecção de falhas e recuperação de energia eficazmente, reduzindo os impactos e duração das interrupções, e algumas das funções das aplicações avançadas são: controle de carga, balançamento de carga e calculo de queda de tensão (sag)

DA é uma das aplicações mais críticas da *Smart Grid* não tolerante à latência, por exemplo, para comunicação de alerta, a latência deve ser menor que 1 segundo, para troca de mensagens entre os nó, a latência deve ser menor que 100 ms, e para sinais de controle do sistema de energia, menor que 15 ms [55].

Para simular a aplicação DA, foi implementada uma aplicação cliente-servidor sobre o protocolo UDP, gerando 4 eventos ao longo da simulação.

Os requisitos de comunicação para esta aplicação segundo [54] são uma largura de banda de 100 kbps por dispositivo e uma latência entre 20 - 200 ms.

# Capítulo 4

# Resultados e Discussões

Neste capitulo, é apresentada a avaliação do desempenho da rede LTE com a coexistência do trafego H2H e M2M, a qual foi realizada através da implementação de três cenários com diferentes configurações no simulador NS3. Foram estabelecidos como parâmetros fixos para todos os cenários a frequência de operação, a largura de banda, as potências de transmissão e o posicionamento do eNB e dos UEs. Os parâmetros, considerados variáveis nos cenários, foram a quantidade de UEs ativos, a relação das aplicações FTP e voz instaladas nos usuários ativos, a quantidade de aplicações por nó e a configuração do portador de serviço dedicado (EPS Bearer). O estudo dos diferentes cenários permitiu comparar diferentes tipos de escalonadores de pacotes propostos pela 3GPP implementados no simulador NS3.

## 4.1 Parâmetros fixos nos cenários

O simulador foi configurado com uma frequência de operação de 1750 MHz e largura de banda de 20 MHz. Foi implementada uma célula com os seguintes parâmetros de configuração: uma potência de transmissão de 40 dBm, uma antena setorizada com modelo cosenoidal, um *beamwith* de 120° e um ganho de 17 dB, um modelo de posição constante e uma área de cobertura com distância máxima de 650 metros.

A configuração da arquitetura implementada é apresentada na Figura 4.1, onde são criados os UEs com uma interface de conexão de rádio atribuídos ao eNB, o eNB possui uma conexão com o core da rede através da interface S1, e core dispõe uma conexão ponto a ponto com o remote host responsável por consumir os dados gerados pelos usuários, o enlace entre o core e o remote host é configurado como "ideal" sem atraso, para avaliar apenas o desempenho da rede LTE.

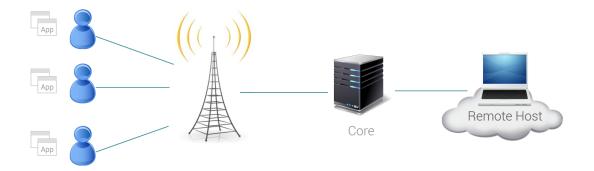


Figura 4.1: Arquitetura implementada no Simulador.

Como foi determinado no capítulo anterior foram implementados 300 UEs com uma potência de transmissão de 20 dBm. Os usuários foram distribuídos aleatoriamente na área de cobertura, com a seguinte restrição: 80% dos usuários contam com um modelo de posição constante dentro das casas, e 20% restante com um modelo de mobilidade posicionado nas ruas, o modelo é aleatório tanto na direção quanto na velocidade. Na Figura 4.3, é apresentado o cenário proposto no simulador.

Os UEs contam com dois tipos de aplicações FTP e voz, os usuários com aplicação FTP foram configurados com uma aplicação BulkSender oferecida pelo simulador NS3, como é mostrado na Figura 4.2. O BulkSender gera dados com a maior velocidade possível de modo que, quando o buffer está no limite, a aplicação espera até liberar espaço para gerar dados novamente e manter um fluxo de dados constante.

Os UEs com aplicação de voz foram configurados com a aplicação ON/OFF oferecida no simulador NS3, como mostrado na Figura 4.2. Os períodos ON e OFF foram estimados com uma distribuição exponencial com média de 0.350 no período ON e 0.650 no período OFF.

Por outro lado, para representar a geração de dados pelos usuários da *smart grid* foram configurados UEs com aplicação cliente-servidor, sobre o protocolo UDP. Os UEs com aplicação AMI geram tráfego a cada 3 segundos com tamanho de pacote 100 Bytes, e os UEs com aplicação DA, estão configurados para gerar 4 eventos ao longo da simulação com tamanho do pacote 100 Bytes.

No *Remote Host* foram instaladas aplicações *Sink*, as quais consomem os dados gerados pelos UEs com aplicações FTP e voz, e também foram instaladas aplicações *server*, para cada aplicação de *Smart Grid*, AMI e DA.

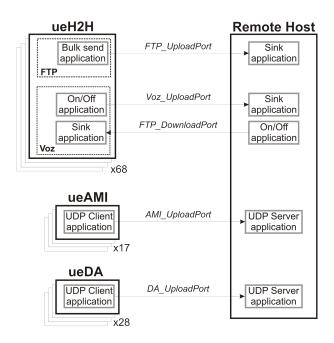


Figura 4.2: Aplicações instaladas nos UEs, no simulador.

Devido aos altos custos computacionais refletidos em tempo de processamento das simulações, o tempo de cada simulação foi limitado a 90 segundos, com 30 execuções.

A Tabela 4.1 resume os parâmetros gerais das simulações. Os parâmetros não inclusos nesta tabela possuem os valores padrões do simulador NS-3 (NS-3, 2015) na sua versão 3.21.

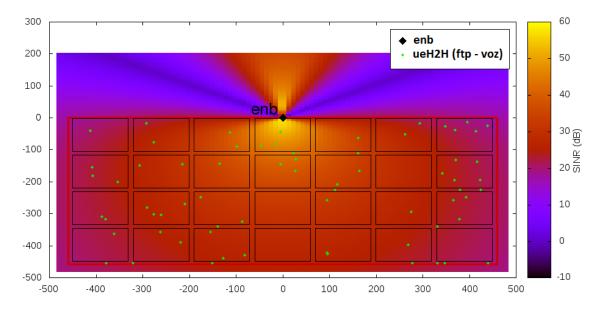


Figura 4.3: Representação do cenário proposto no simulador.

Na Figura 4.3, observa-se o mapa do meio ambiente REM (*Radio Environment Map*) gerado pelo simulador. O REM é uma representação 2D dos valores da

Tabela 4.1: Resumo dos Parâmetros Gerais das simulações.

Parân	netros	Valor			
Tempo de	Simulação	90 Segundos			
Exec	uções		30		
Número d	le Células		1 setorizada		
Potência T	x da célula		43  dBm		
Ganho d	a Antena		$17 \; \mathrm{dB}$		
Rádio de	Cobertura		650 metros		
Largura o	de Banda		$20 \mathrm{\ MHz}$		
Frequência o	de Operação		1750 Mhz		
Modelo de	Propagação	I	Log Distance		
Total de	Usuários	300			
Potência T	x dos UEs	20  dBm			
	Aplicações H2H				
Tipo	Protocolo de	Tamanho do	Tempo entre		
de Aplicação	Transporte	pacote	Transmissões		
Voz	UDP	172 Bytes	on/off mean: $0.352/0.60$		
FTP	TCP	512 Bytes			
	Apl	licações M2M	I		
Tipo   Protocolo de		Tamanho do	Tempo entre		
de Aplicação	Transporte	pacote	Transmissões		
AMI	UDP	100 Bytes	3 Segundos		
DA	UDP	100 Bytes	4 Eventos		

relação sinal-ruido no enlace descendente. Os quadrados pretos representam os quarteirões e o espaciamento entre eles corresponde às ruas, onde os usuários com o modelo de mobilidade vão-se deslocar. As informações dos tamanhos dos quarteirões e das ruas foram obtidas a partir dos dados reais, como foi apresentado no capitulo anterior. O simbolo ♦ mostrado na Figura 4.3, representa os usuários H2H da rede e o simbolo ♦ representa o eNB.

## 4.2 Cenário 1. Uma aplicação por nó

Neste cenário é instalada uma aplicação H2H em cada nó (FTP ou voz), para este contexto, foi usado um *EPS Bearer default*, o que significa, que as aplicações não vão ser tratadas pelo escalonador com Qualidade de Serviço.

Isso indica que o escalonador por padrão o *Proportional Fair* (PF) não estará na capacidade de dar "preferência" a um tráfego sobre outro, para avaliar as métricas sobre as aplicações.

Baseado neste contexto pretende-se levar à rede a um ponto "critico", tal que, as métricas que avaliam as aplicações quase atinjam os limiares. Por conseguinte ao instalar as aplicações nos nós, são definidos 4 cenários, representados em 4 curvas, as quais são caracterizadas por uma quantidade diferente de usuários com aplicações FTP e voz. A tabela 4.2 apresenta em percentagens as aplicações instaldas nos usuários. Aliás os usuários ativos também são variados em percentagens [25%, 50%, 75% e 100%], com o intuito de conhecer a resposta da rede na avaliação da métrica de cada aplicação. As métricas escolhidas são: a vazão no caso da aplicação FTP e o retardo na aplicação de voz.

Tabela 4.2: Relações em percentagens das aplicações instaldas nos nós para o cenário 1.

Curvas	%nós com FTP	%nós com voz
Curva 1	20%	80%
Curva 2	40%	60%
Curva 3	60%	40%
Curva 4	80%	20%

É defino 50 ms de atraso médio como limiar de avaliação para a aplicação de voz, embora a 3GPP define como limiar 150 ms para esta aplicação, mas este valor é considerado fim-a-fim, e de acordo com a arquitetura proposta, a avaliação da métrica está sendo feita quase na borda de rede LTE, portanto Mustofa et al. em [19], consideram que 80 ms é um atraso aceitável para dar uma Qualidade de Serviço end-to-edge, mas a 3GPP recomenda 50 ms de QoS end-to-edge para esta aplicação.

Para a aplicação de FTP, a métrica de avaliação é a vazão minima considerada como banda larga, e é definida 250 kbps como limiar da métrica.

Na Figura 4.4a, é apresentada a resposta da latência em função da variação dos usuários ativos da aplicação de voz, com as 4 relações das aplicações anteriormente descritas. Nesta figura, observa-se pequenas variações da latência ao incrementar os usuários ativos, mas as variações encontram-se muito abaixo do limiar dos requerisitos determinados para esta aplicação.

Na Figura 4.4b, é apresentada a vazão da aplicação FTP. Como esperado, o desempenho da rede mostra uma queda na taxa de bits a razão do aumento do

número de usuários ativos. No entanto, o resultado da Figura 4.4b, mostra que esta tendencia independe da relação entre as aplicações.

Os resultados apresentados na Figura 4.4, mostram que a rede LTE consegue suportar amplamente o primeiro cenário proposto.

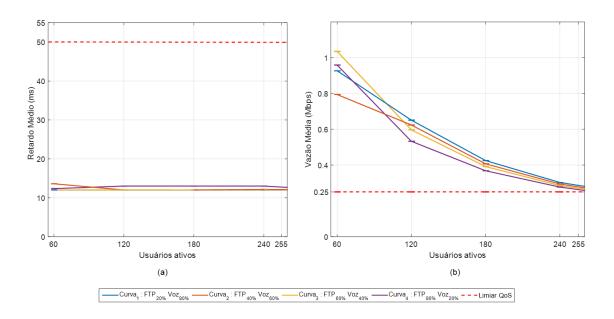


Figura 4.4: Métricas de avaliação das aplicações H2H Cenário 1. a) Latência na aplicação de voz. b) Vazão na aplicação ftp.

Em síntese, o primeiro cenário proposto não consegue levar a rede LTE ao limiar da Qualidade de Serviço para as aplicações. Portanto, é proposto um novo cenário que permita aos nós usarem duas aplicações ao mesmo tempo. Embora é um cenário menos provável, já que todo o tráfego simulado é no enlace de subida, mas em redes de comunicação H2H o enlace mais usado é o downlink, portanto o novo cenário proposto representa um maior desafio na utilização dos recursos da rede LTE.

## 4.3 Cenário 2. Duas Aplicações por Usuário

O intuito deste cenário, é levar a rede a um ponto "critico", tal que as métricas que avaliam as aplicações quase atinjam os limiares, portanto, são instaladas duas aplicações (FTP e voz) por nó com comunicação H2H.

Para cada aplicação é determinada uma classe de serviço que estabelece um portador de serviço dedicado (*Dedicated EPS Bearer*) por aplicação. Na Tabela 4.3 apresenta-se os parâmetros das classes de serviços recomendadas pela 3GPP e configuradas nas aplicações de voz e FTP. O escalonador usado para este cenário é o *Proportiona Fair* (PF).

Tabela 4.3: Classes de serviço das aplicações H2H.

Aplicação	QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Retardo do pacote
VOZ	1	GBR	2	100 ms
FTP	6	Não GBR	9	300 ms

A metodologia usada para determinar o ponto "critico" foi instalar em todos os nós uma aplicação de voz e adicionalmente instalar uma aplicação FTP com incrementos de 25%, de forma que cada usuário gere dados de duas aplicações diferentes ao mesmo tempo durante a simulação.

Por exemplo, na curva 1, da Figura 4.5, mostra-se que 25% dos usuários ativos, têm instaladas duas aplicações por usuário (voz e FTP), e 75% restante só aplicação de voz, a tabela 4.4 contém todas as relações usadas para este cenario. A quantidade dos usuários ativos também foi variada, e o escalonador usado é o *Proportional Fair*.

Tabela 4.4: Relações em percentagens das aplicações instaldas nos nós para o cenário 2.

Curvas	%nós com FTP e voz	% nós com voz
Curva 1	25%	75%
Curva 2	50%	50%
Curva 3	75%	25%
Curva 4	100%	0%

As Figuras 4.5a e 4.5b, apresentam os diferentes comportamentos das métricas latência e vazão das aplicações H2H. Na Figura 4.5a, é apresentada a latência na aplicação de voz. Como esperado existe aumento no retardo médio, mas a rede consegue atender o requisito de QoS no retardo para todos os usuários e independe da relação entre as aplicações.

No entanto, é percebido um comportamento anormal, pois em algumas curvas do gráfico ao acrescentar a quantidade de usuários ativos é detectado uma diminuição na latência, como por exemplo na curva 1 da figura 4.5a. Durante o estudo foi identificado que este comportamento é devido as rajadas de dados geradas pela aplicação *Bulksender* a qual usa o protocolo TCP em pontos específicos do grafico, porém este comportamento não aparece quando é usada uma aplicação com o protocolo UDP.

Na Figura 4.5b, apresenta-se a vazão da aplicação FTP. Como esperado, o desempenho da rede mostra uma queda, na taxa de bits a razão do aumento no número de usuários ativos, independentemente da relação entre as aplicações, esta figura evidencia que apartir de determinado número de usuários ativos, em todos os casos o requisito de QoS é atingido. A curva 4, descreve que foi instalado para o 100% dos UEs, duas aplicações e determina que o limiar é alcançado com menor número de usuários (200 aprox.) quando comparado com as outras curvas.

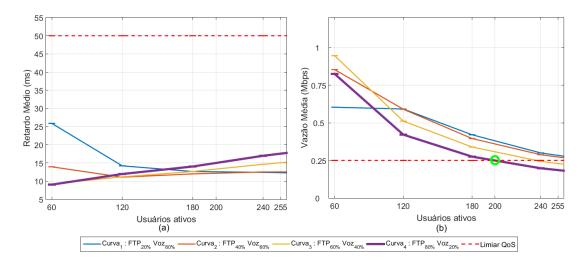


Figura 4.5: Métricas de avaliação das aplicações H2H Cenário 2. a) Comportamento da latência na aplicação de Voz. b) Comportamento da vazão na aplicação ftp.

Baseado neste contexto, é definida a relação da curva 4 com 200 usuários, para avaliar o comportamento dos escalonadores, antes e depois de acrescentar o tráfego da *Smart Grid*.

Em cada aplicação de *Smart Grid* foi determinada uma classe de serviço, para estabelecer um portador serviço dedicado. Na Tabela 4.5 são apresentadas as classes de serviço usadas para as aplicações AMI e DA.

Tabela 4.5: Classes de serviço das aplicações Smart Grid.

Aplicação	QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Retardo do pacote
AMI	9	Não GBR	9	300 ms
DA	5	Não GBR	1	100  ms

São avaliados os comportamentos dos escalonadores no ponto que foi definido como critico. Como foi apresentado no capítulo da revisão bibliográfica, os escalonadores

podem ser divididos em dois grupos, escalonadores independentes do canal e dependentes do canal, o grupo dos escalonadores dependentes do canal é composto por escalonadores baseados na qualidade do canal ou não.

A Figura 4.6, apresenta o comportamento dos diferentes escalonadores com e sem usuários da *Smart Grid*, as cores escuras representam o desempenho do escalonador só com tráfego H2H, e as cores claras representam o desempenho do escalonador acrescentando o tráfego M2M.

Na Figura 4.6, é apresentado o desempenho de 12 escalonadores implementados no simulador, com o intuito de escolher os escalonadores melhores comportados nas métricas de avaliação das diferentes aplicações no ponto "critico".

Na Figura 4.6a, é apresentado o retardo médio da aplicação de voz, a Figura 4.6b, mostra a vazão da aplicação ftp, a Figura 4.6c, contem o retardo na aplicação DA e finalmente a Figura 4.6d, apresenta o retardo na aplicação AMI.

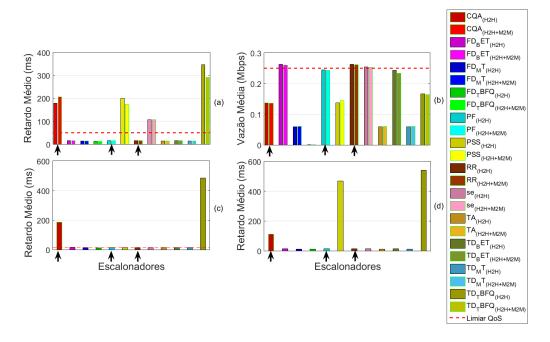


Figura 4.6: Comparação entre os escalonadores no ponto "crítico". a) Retardo médio da aplicação de voz. b) Vazão da aplicação ftp. c) Retardo na aplicação DA d) Retardo na aplicação AMI.

Em todas as métricas avaliadas das aplicações FTP, voz, AMI e DA, os escalonadores Round Robin (RR), Proportional Fair (PF) e Blind Equal Throughput frequency domain (FD-BET) atenderam o requerimentos de QoS, mas as setas na figura indicam os escalonadores Proportional Fair (PF) e Round Robin (RR) escolhidos para a avaliar o desempenho deles, embora o escalonador FD-BET atendeu

os requerimentos neste ponto, mas compartilha o mesmo grupo de escalonadores (escalonadores independente do canal) com o RR, portanto o FD-BET não será levado em conta para o analise seguinte.

Ao longo do estudo foi percebido que os escalonadores possuem comportamentos diferentes quando o numero de usuários variam, portanto é analisado seu comportamento com varição nos usuários com aplicação H2H e mantendo fixos os usuários de Smart Grid, 17 UEs AMI e 28 UEs DA.

As Figuras 4.7a, e 4.7b, descrevem o retardo na aplicação de voz e a vazão na aplicação FTP respetivamente, a linha vertical pontilhada destaca o ponto crítico anteriormente definido (200 UEs), com o intuito de analisar o comportamento dos escalonadores antes e depois.

O escalonador que apresentou o melhor desempenho nas métricas de latência e vazão, é o PF, pois ele consegue manter o menor retardo, na aplicação de voz embora seja pequena a diferença, e no caso da vazão os escalonadores conseguem manter o mesmo nível.

No entanto para as aplicações de *Smart Grid*, DA e AMI, apresentadas nas Figuras 4.7c e 4.7d, o escalonador RR consegue melhor desempenho quando comparado com o PF, pois até 153 UEs o escalonador PF apresenta menor retardo quando comparado com o RR, mas apartir de 153 UEs específicamente no ponto critico 200 UEs o RR possui menor retardo tanto na aplicação DA, quanto na aplicação AMI.

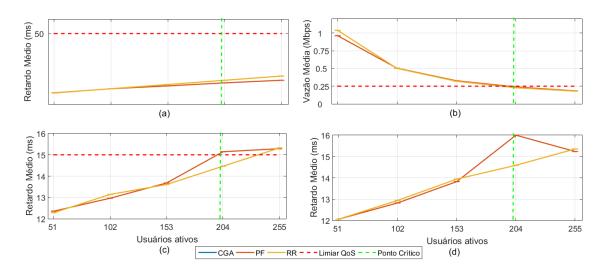


Figura 4.7: Comportamento dos escalonadores PF e RR, em função dos usuários ativos H2H e M2M. a) Retardo na aplicação de voz. b) Vazão na aplicação FTP.

Como foi apresentado, o escalonador RR não desempenhou-se como o melhor escalonador para as aplicações H2H, ainda bem mantive os requisito de QoS definidos, e apresentou o melhor desempenho para as aplicações de *Smart Grid*, portanto é escolhido como o melhor escalonador para este estudo, porém na Figura 4.8 apresenta-se uma comparação do desempenho do escalonador RR antes e depois de acrescentar o tráfego M2M.

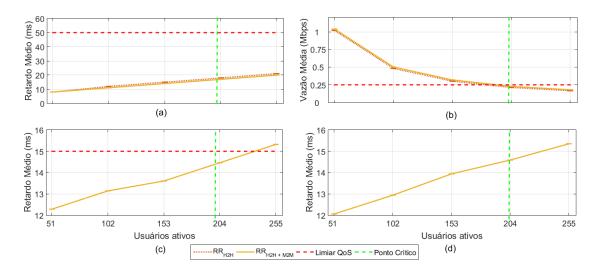


Figura 4.8: Avaliação da influencia do tráfego de *Smart Grid*, sobre o tráfego H2H, com o escalonador *Round Robin* (RR).

Da Figura 4.8 conclui-se que existe pouca influencia do tráfego de *Smart Grid* sobre o tráfego H2H, no cenário proposto. Portanto pode-se determinar que a rede LTE poderia suportar aplicações de comunicações de alerta, troca de mensagens entre nós e até sinais de controle do sistema de distribuição, bem como aplicações demanda e resposta em tempo real e leitura dos medidores inteligentes da infraestrutura de medição avançada, além de manter uma ótima Qualidade do Serviço das aplicação voz e FTP para 200 usuários ao mesmo tempo.

# Capítulo 5

## Conclusões

Foi proposta e desenvolvida uma metodologia baseada em: métricas de população, localização geográfica e área de cobertura da célula, para calcular a quantidade de medidores inteligentes e equipamentos de monitoramento nos transformadores presentes na rede de distribuição elétrica da área de cobertura determinada pela estação base eNB.

A quantidade de usuários H2H na área de cobertura da célula Foi calculada, baseada nas estatísticas de usuários de internet móvel, ao nível nacional, na Colômbia, e a densidade populacional do setor escolhido para o estudo.

A quantidade de transformadores, na área de cobertura da célula, foi calculada, com base em uma norma desenvolvida por uma concessionaria Colombiana, pois leva em consideração parâmetros socio-econômicos próprios do pais e normas técnicas e de certificação Colombiana.

Através das simulações propostas, foi possível determinar um ponto de saturação da rede, com o intuito de avaliar o desempenho do uso da tecnologia LTE acrescentando o tráfego M2M. Neste cenário o estudo evidencia que a Qualidade de Serviço do tráfego H2H não é prejudicado quando existe coexistência dos diferentes tipos de tráfego.

Os resultados deste trabalho podem ser de grande utilidade para levar em consideração o uso dos recursos e infraestrutura existente da tecnologia LTE ao implementar uma Smart Grid na área de estudo, pois foi observado que a rede LTE consegue atender os requisitos de QoS das aplicações M2M sem afeitar o desempenho das aplicações H2H. Porém é necessario uma apropriada configuração do portador de serviço para cada tipo de aplicação e um adequado escalonador de pacotes.

# Referências Bibliográficas

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA MME, E. D. P. E. E., "Estudos da demanda de energia nota técnica DEA 13/14 Demanda de Energia 2050." Disponível em http://www.epe.gov.br, Ultimo acesso em: 15 Fevereiro 2016.
- [2] "Connected, Efficient and Sustainable Energy", Disponível em: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/, Acessado em: 20 Janeiro 2016.
- [3] VON DOLLEN, D., "Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap", Electric Power Research Institute (EPRI) and National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [4] ETSI, T., "102 690:" Machine-to-Machine communications (M2M)", Functional architecture, 2011.
- [5] KHAN, F., LTE for 4G mobile broadband: air interface technologies and performance. Cambridge University Press, 2009.
- [6] AGUSTI COMES, R., BERNARDO ALVAREZ, F., CASADEVALL PALACIO, F.-J., et al., LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone, 2010.
- [7] SCHEME, B. T., "LTE: the evolution of mobile broadband", *IEEE Communications magazine*, pp. 45, 2009.
- [8] CARDOSO, E. H. S., DA SILVA, C. P. A., MONTEIRO, F. P., et al., "Análise de desempenho de algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE Heterogéneas", .
- [9] NS3, "Network Simulator", Disponível em https://www.nsnam.org/, Acessado em: 15 Fevereiro 2016.
- [10] DU, J., QIAN, M., "Research and application on LTE technology in smart grids". In: Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on, pp. 76–80, Aug 2012.

- [11] PETENEL, F. H. J., Análise de Problemas Ligados às Comunicações em Redes Elétricas Inteligentes, Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, 2014.
- [12] KUMARAN, S. G., SINGARAVELU, S., VIVEKANANDAN, K., "Advance Technics, Challenges and Developments in Smart Grid System", .
- [13] DEPARTMENT OF ENERGY, U. S. A., "2014 Smart Grid System Report", Disponível em http://energy.gov/oe/downloads/2014-smart-grid-system-report-august-2014, Acessado em: 3 Fevereiro 2016.
- [14] MUKHOPADHYAY, P., CHAWLA, H. K., "Approach to make Smart Grid a reality". In: Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on, pp. 77–82, Jan 2014.
- [15] FERRARI, P., FLAMMINI, A., LODA, M., et al., "First experimental characterization of LTE for automation of Smart Grid". In: Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2015 IEEE International Workshop on, pp. 108–113, Sept 2015.
- [16] AWAD, A., MOARRAB, S., GERMAN, R., "QoS implementation inside LTE networks to support time-critical smart grid applications". In: Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on, pp. 1204–1209, June 2015.
- [17] YAACOUB, E., KADRI, A., "LTE radio resource management for real-time smart meter reading in the smart grid". In: Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on, pp. 2000–2005, June 2015.
- [18] SALAH, M., ALI, N. A., TAHA, A. E., et al., "Evaluating Uplink Schedulers in LTE in Mixed Traffic Environments". In: Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on, pp. 1–5, June 2011.
- [19] MAIA, A. M., DE CASTRO, M. F., VIEIRA, D., et al., "Um mecanismo para escalonamento de pacotes no uplink da rede LTE no contexto da comunicaç ao Máquina-a-Máquina". In: Proceedings of the 32th Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC 2014), 2014.
- [20] PÖTSCH, T., MARWAT, S. N. K. K., ZAKI, Y., et al., "Influence of future M2M communication on the LTE system". In: Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2013 6th Joint IFIP, pp. 1–4, April 2013.

- [21] LIOUMPAS, A. S., ALEXIOU, A., "Uplink scheduling for Machine-to-Machine communications in LTE-based cellular systems". In: *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011 IEEE, pp. 353–357, Dec 2011.
- [22] FANG, X., MISRA, S., XUE, G., et al., "Smart Grid The New and Improved Power Grid: A Survey", Communications Surveys Tutorials, IEEE, v. 14, n. 4, pp. 944–980, Fourth 2012.
- [23] GLOBO., "Corte na distribuição foi determinado pelo ONS." Disponível em http://www.ecoplanetenergy.com, Ultimo acesso em: 15 Fevereiro 2016.
- [24] GUNGOR, V., SAHIN, D., KOCAK, T., et al., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards", *Industrial Informatics*, *IEEE Transactions on*, v. 7, n. 4, pp. 529–539, Nov 2011.
- [25] YONA LOPES, NATALIA CASTRO FERNANDES, D. C. M.-S., "Geração Distribuída de Energia: Desafios e Perspectivas em Redes de Comunicação", 2015.
- [26] CUNJIANG, Y., HUAXUN, Z., LEI, Z., "Architecture design for smart grid", Energy Procedia, v. 17, pp. 1524–1528, 2012.
- [27] MUKHOPADHYAY, P., CHAWLA, H. K., "Approach to make Smart Grid a reality". In: Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on, pp. 77–82, Jan 2014.
- [28] BARAI, G., KRISHNAN, S., VENKATESH, B., "Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review". In: *Electrical Power* and Energy Conference (EPEC), 2015 IEEE, pp. 138–145, Oct 2015.
- [29] GUNGOR, V. C., LAMBERT, F. C., "A survey on communication networks for electric system automation", Computer Networks, v. 50, n. 7, pp. 877– 897, 2006.
- [30] ZABALLOS, A., VALLEJO, A., SELGA, J. M., "Heterogeneous communication architecture for the smart grid", *IEEE Network*, v. 25, n. 5, pp. 30–37, September 2011.
- [31] PATEL, A., APARICIO, J., TAS, N., et al., "Assessing communications technology options for smart grid applications". In: Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on, pp. 126–131, Oct 2011.

- [32] HUNG, K. S., LEE, W. K., LI, V. O. K., et al., "On Wireless Sensors Communication for Overhead Transmission Line Monitoring in Power Delivery Systems". In: Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on, pp. 309–314, Oct 2010.
- [33] HE, M., MURUGESAN, S., ZHANG, J., "Multiple timescale dispatch and scheduling for stochastic reliability in smart grids with wind generation integration". In: *INFOCOM*, 2011 Proceedings IEEE, pp. 461–465, April 2011.
- [34] DONEGAN, P., "Ethernet backhaul: Mobile operator strategies & market opportunities", *Heavy Reading*, v. 5, n. 8, pp. 4–65, 2007.
- [35] RIEKEN, D., WALKER, M., "Ultra Low Frequency Power-Line Communications Using a Resonator Circuit", Smart Grid, IEEE Transactions on, v. 2, n. 1, pp. 41–50, March 2011.
- [36] EMMERSON, B., "M2M: the Internet of 50 billion devices", WinWin Magazine, pp. 19–22, 2010.
- [37] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT., G., "3GPP TS 22.368 V13.0.0 Technical Specification Group Services and System Aspects (Release 13) Service requirements for Machine-Type Communications (MTC)." Disponível em http://www.3gpp.org/DynaReport/22368.htm, Acesso em: 14 Julho 2015.
- [38] KIM, J., LEE, J., KIM, J., et al., "M2M Service Platforms: Survey, Issues, and Enabling Technologies", Communications Surveys Tutorials, IEEE, v. 16, n. 1, pp. 61–76, First 2014.
- [39] BENDAOUD, F., ABDENNEBI, M., DIDI, F., "Survey on scheduling and radio resources allocation in LTE", arXiv preprint arXiv:1404.2759, 2014.
- [40] SINGH, D., SINGH, P., "Radio Resource scheduling in 3GPP LTE: a review", XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, v. 4, n. 6, pp. 2405–2411, 2013.
- [41] MONGHAL, G., PEDERSEN, K. I., KOVACS, I. Z., et al., "QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution". In: Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE, pp. 2532–2536, May 2008.

- [42] WU, G., TALWAR, S., JOHNSSON, K., et al., "M2M: From mobile to embedded internet", Communications Magazine, IEEE, v. 49, n. 4, pp. 36–43, 2011.
- [43] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN E IN-FORMÁTICA, A. D. Y., "Anuario Estadístico de Yumbo", Dec. 2011.
- [44] ELETROBRAS, "Parintins", Disponível em http://www.smartgrid.com.br/eventos/smartgrid2013/apresentacao/jose\_carlos\_de\_medeiros.pdf/, Ultimo acesso em: 8 Fevereiro 2016.
- [45] ESSA, E. D. S. S. E., "Normas para el calculo de diseño de sistemas de distribución", Dec. 2011.
- [46] MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES, R. D. C., "Boletin Trimestral de las TIC. Cifras Primer Trimestre de 2015", Disponível em http://colombiatic.mintic.gov.co/602/articles-11128-archivo-pdf.pdf, Acessado em: 07 Fevereiro 2016.
- [47] LICHTENSTEIGER, B., BJELAJAC, B., MULLER, C., et al., "RF mesh systems for smart metering: system architecture and performance". In: Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on, pp. 379–384, 2010.
- [48] ZHENG, J., GAO, D. W., LIN, L., "Smart meters in smart grid: An overview".
  In: Green Technologies Conference, 2013 IEEE, pp. 57–64, 2013.
- [49] GEELEN, D., VAN KEMPEN, G., VAN HOOGSTRATEN, F., et al., "A wireless mesh communication protocol for smart-metering". In: Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on, pp. 343–349, 2012.
- [50] KULKARNI, P., GORMUS, S., FAN, Z., et al., "A mesh-radio-based solution for smart metering networks", Communications Magazine, IEEE, v. 50, n. 7, pp. 86–95, 2012.
- [51] HASSAN, H., "Generic modeling of multimedia traffic sources", 2005.
- [52] DENG, S., "Traffic characteristics of packet voice". In: Communications, 1995. ICC '95 Seattle, 'Gateway to Globalization', 1995 IEEE International Conference on, v. 3, pp. 1369–1374 vol.3, Jun 1995.

- [53] CISCO, "Voice Quality", Disponível em http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voiquality/7934-bwidth-consume.html, Acessado em: 15 Janeiro 2016.
- [54] GUNGOR, V., SAHIN, D., KOCAK, T., et al., "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements", *Industrial Informatics*, *IEEE Transactions on*, v. 9, n. 1, pp. 28–42, Feb 2013.
- [55] GUNGOR, V. C., SAHIN, D., KOCAK, T., et al., "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 1, pp. 28–42, Feb 2013.