

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CIBELE CAETANO SALDANHA DE CASTRO

COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SMART GRID SOBRE LTE

CURITIBA

2016

CIBELE CAETANO SALDANHA DE CASTRO

COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SMART GRID SOBRE LTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. : Carlos Marcelo Pedroso

CURITIBA

2016

C355c

Castro , Cibele Caetano Saldanha de
Comunicação de sistemas Smart Grid sobre LTE / Cibele Caetano
Saldanha de Castro . – Curitiba, 2016.
55 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

Orientador: Carlos Marcelo Pedroso .
Bibliografia: p. 53-55.

1. Redes elétricas inteligentes. 2. Smart Grids. 3. Sistemas de
comunicação sem fio. I. Universidade Federal do Paraná. II. Pedroso, Carlos
Marcelo. III. Título.

CDD: 621.31

TERMO DE APROVAÇÃO

CIBELE CAETANO SALDANHA DE CASTRO

COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SMART GRID SOBRE LTE

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Prof. Dr. Carlos Marcelo Pedrosa
Orientador UFPR

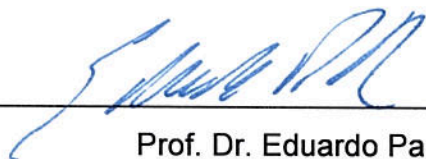
Banca Examinadora



Prof. Dr. Carlos Marcelo Pedrosa
Presidente



Prof.ª. Dr.ª. Keiko Verônica Ono Fonseca (UTFPR)



Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro (UFPR)



Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández (UFPR)

CURITIBA, 09 DE JUNHO DE 2016.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os professores do curso de pós-graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná que me apoiaram de alguma forma durante este período, e agradecer também aos colegas de curso que contribuíram na troca de ideias e conhecimento.

RESUMO

Devido ao crescente consumo de energia elétrica, e avanço do uso de plantas de geração distribuída de energia, as concessionárias têm mostrado maior interesse em otimizar as suas redes e operação através da implantação de sistemas *Smart Grid*. A tecnologia de comunicação a ser implementada neste sistema é muito importante para garantir o seu correto funcionamento, e prover escalabilidade à rede. Neste trabalho é apresentada uma análise dos limites do LTE para comunicações de duas principais aplicações do *Smart Grid*, *Wide Area Measurement System* e Infraestrutura de Medição Avançada, especialmente considerando as limitações impostas pelo procedimento de acesso randômico e pelo escalonamento de recursos. As métricas utilizadas para avaliação da qualidade de serviço são o atraso, *jitter*, perda de pacotes e *throughput*. Os resultados são validados através de simulações realizadas no software NS-3 e análises estatística.

Palavras-chave: Smart Grid, LTE, Redes de Comunicação, Redes Móveis, Sincrofasores.

ABSTRACT

Due to the increase of power consumption and the use of distributed power generation plants, the utilities are more interested in optimizing their network and operation, by the implementation of Smart Grid systems. The communication technology to be used in each Smart Grid application is very important to ensure a proper operation, and provide scalability to the network. This dissertation presents an analysis of the limits of LTE for communication of two main applications of the Smart Grid, Wide Area Measurement System and Advanced Metering Infrastructure, especially considering the limitation imposed by the random access procedure and the LTE resource scheduling. The metrics used for the quality of service analysis are delay, jitter and packet loss. The results are validated through simulations in NS-3 software and statistical analysis using confidence intervals.

Key words: Smart Grid, LTE, Communication Networks, Mobile Networks, Synchronizers.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Arquitetura de um sistema de comunicação de PMUs | 20 |
| 2.2 | Estrutura da grade de recursos do LTE | 23 |
| 3.1 | Probabilidade de bloqueio no acesso randômico | 38 |
| 3.2 | Média do atraso fim-a-fim na comunicação dos PMUs | 41 |
| 3.3 | Percentual de perda de pacotes dos PMUs | 42 |
| 3.4 | Throughput na comunicação dos PMUs | 42 |
| 3.5 | Média do jitter na comunicação dos PMUs | 42 |
| 3.6 | Tipos de topologias de comunicação para AMI | 45 |
| 3.7 | Topologia da rede simulada | 47 |
| 3.8 | Resultados da comunicação dos concentradores de dados da rede AMI | 48 |
| 3.9 | Resultados da comunicação do tráfego de fundo da rede AMI | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Requisitos de comunicação de aplicações <i>Smart Grid</i> | 21 |
| 2.2 | Largura de banda de transmissão vs. Quantidade de RBs no sistema . | 23 |
| 2.3 | QCl's padronizados para o LTE | 29 |
| 3.1 | Parâmetros da simulação | 40 |
| 3.2 | Parâmetros de simulação da rede AMI | 46 |

LISTA DE SIGLAS

AMI *Advanced Metering Infrastructure*

BET *Blind Equal Throughput*

BSR *Buffer Status Report*

CFI *Control Format Indicator*

CQA *Channel and QoS Aware*

CQI *Channel Quality Indicator*

DCI *Downlink Control Information*

EXP/PF *Exponential/Proportional Fair*

FAN *Field-Area Network*

FIFO *Firt In First Out*

HAN *Home-Area Network*

H-ARQ *Hybrid Automatic Repeat Request*

HES *Head-End System*

HI *Hybrid Automatic Repeat Request Indicator*

LTE *Long Term Evolution*

M2M *Machine-to-Machine*

MAC *Medium Access Control*

MCS *Modulation and Coding Scheme*

MDMS *Meter Data Management System*

M-LWDF *Modified Largest Weighted Delay First*

MT *Maximum Throughput*

NS3 *Network Simulator 3*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

PDC *Phasor Data Concentrator*

PDCCP *Packet Data Convergence Protocol*

PF *Proportional Fair*

PHY *Physical Layer*

PLC *Power Line Communication*

PMU *Phasor Measurement Unit*

PRACH *Physical Random Access Channel*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

QCI *QoS Class Identifier*

QoS *Quality of Service*

RA *Random Access*

RB *Resource Block*

RE *Resource Element*

RF *Rádio Frequência*

RLC *Radio Link Control*

RR *Round Robin*

RRC *Radio Resource Control*

SINR *Signal-Interference-Noise Ratio*

SRS *Sounding Reference Signal*

TTI *Transmission Time Interval*

UCI *Uplink Control Information*

UE *User Equipment*

WAMS *Wide Area Measurement System*

WAN *Wide-Area Network*

CONTEÚDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | 6 |
| LISTA DE TABELAS | 7 |
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Objetivos | 14 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 14 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 14 |
| 1.2 Justificativa | 15 |
| 1.3 Método Proposto | 15 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação | 15 |
| 2 ESTADO DA ARTE | 16 |
| 2.1 Comunicação no Smart Grid | 16 |
| 2.1.1 Infraestrutura de Medição Avançada | 17 |
| 2.1.2 Resposta à Demanda | 18 |
| 2.1.3 <i>Wide Area Measurement System (WAMS)</i> | 19 |
| 2.1.4 Gerenciamento da Distribuição | 20 |
| 2.2 <i>Long Term Evolution (LTE)</i> | 21 |
| 2.2.1 Grade de recursos | 22 |
| 2.2.2 Alocação de recursos | 24 |
| 2.2.2.1 Algoritmos independentes do canal | 25 |
| 2.2.2.2 Algoritmos dependentes do canal/sem estratégia de QoS | 26 |
| 2.2.2.3 Algoritmos dependentes do canal/com estratégia de QoS | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.2.4 | Algoritmos semi-persistentes | 28 |
| 2.2.3 | Qualidade de Serviço no LTE | 28 |
| 2.2.4 | Acesso Randômico | 29 |
| 2.3 | Principais preocupações do uso de rede celular em aplicações <i>Smart Grid</i> | 31 |
| 2.4 | Trabalhos relacionados utilizando outras tecnologias de comunicação . | 32 |
| 3 | AVALIAÇÃO DE CONDIÇÕES DE QUALIDADE DO LTE PARA COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SMART GRID | 34 |
| 3.1 | Comunicação de Sincrofasores | 34 |
| 3.1.1 | Análise de Desempenho na Comunicação de Sincrofasores usando LTE | 35 |
| 3.1.2 | Simulação de uma rede com sincrofasores | 39 |
| 3.1.3 | Resultados e discussão | 40 |
| 3.2 | Comunicação na Infraestrutura de Medição Avançada | 43 |
| 3.2.1 | Simulação de uma rede AMI | 45 |
| 3.2.2 | Resultados e discussão | 47 |
| 4 | CONCLUSÕES | 51 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Enquanto a demanda por energia elétrica cresce a cada ano, a infraestrutura da rede de distribuição se mantém nos mesmos moldes há décadas. A arquitetura da rede permanece radial, ou seja, a energia flui de maneira unidirecional, iniciando pelas usinas de geração, passando pelas redes de transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor final. Enquanto nas áreas de geração e transmissão foram feitos investimentos em sistemas de automação e monitoramento, na distribuição há pouca visibilidade sobre a situação da rede. É ainda um sistema de controle passivo [Khan and Khan 2013]. Este fato, aliado ao constante aumento na demanda, faz com que o diagnóstico de problemas na rede de distribuição seja mais difícil, levando a uma piora nos índices de disponibilidade e qualidade do sistema. Além disso, a preocupação com o meio ambiente, principalmente com a redução da emissão de gases e utilização de combustíveis fósseis, gera a necessidade de maior uso de sistemas de geração distribuída. Porém, a característica intermitente das fontes alternativas traz instabilidade à rede [Gungor et al. 2013]. Para integrá-las, deve-se alterar a topologia da rede, permitindo que a energia flua de maneira bidirecional. Para que isso ocorra, é necessária a modernização das redes de transmissão e distribuição, através da implementação de comunicação bidirecional entre os diversos componentes de medição e atuação, trazendo maior automação, controle e monitoramento remoto. Este novo conceito é conhecido como *Smart Grid*.

A infraestrutura de comunicação desempenha papel fundamental no *Smart Grid*, pois deve conectar e transmitir informações dos principais componentes da rede. O padrão de tecnologia celular *Long Term Evolution* (LTE) é uma alternativa promissora para comunicação de sistemas *Smart Grids*, pois oferece grande alcance de cobertura, suporte a diferentes requisitos de qualidade de serviço (QoS), uso eficiente dos

recursos de rádio, e baixo custo, devido à economia de escala por ser um padrão global [Brown and Khan 2013]. No entanto, deve ser analisado se as características e requisitos de comunicação das aplicações *Smart Grid* são atendidas por esta tecnologia, pois muitas delas possuem requisitos específicos de qualidade de serviço.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do projeto é avaliar quantitativamente e qualitativamente o uso do LTE na comunicação de aplicações *Smart Grid*, através da avaliação analítica de desempenho, e resultados de simulações computacionais.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Determinar os requisitos de comunicação das principais aplicações do *Smart Grid*.
- Estudar o modelo de alocação de recursos do LTE, e seus algoritmos de escalonamento.
- Avaliar a capacidade de utilização do sistema LTE para comunicação das aplicações *Wide Area Measurement System* e Infraestrutura de Medição Avançada.
- Estabelecer cenários de uso da rede LTE que permitam realizar a avaliação de desempenho.
- Avaliar a latência, *jitter*, *throughput* e perda de pacotes na comunicação de aplicações *Smart Grid* utilizando a rede LTE.

1.2 Justificativa

A utilização de redes *Smart Grid* vêm ganhando força, devido à necessidade de otimização operacional das redes de distribuição, e integração com fontes de geração distribuída. Este trabalho pretende avaliar qualitativa e quantitativamente se o uso do padrão LTE de comunicação celular é adequado para a comunicação nas redes *Smart Grid*.

1.3 Método Proposto

- Avaliação teórica das fontes de atraso, e limitações referentes ao processo de admissão e sinalização em um sistema LTE.
- Avaliação teórica da quantidade máxima de usuários permitida para assegurar o *throughput* mínimo, considerando o uso do algoritmo de escalonamento *Round Robin*.
- Simulação computacional utilizando o software NS3, para análise do desempenho da rede LTE na comunicação das principais aplicações *Smart Grid*.

1.4 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório esta dissertação está organizada da seguinte forma: O capítulo 2 trata da revisão sobre os principais requisitos de comunicação para sistemas *Smart Grid* e os principais fundamentos da tecnologia LTE. No capítulo 3 são apresentadas avaliações teóricas para previsão do desempenho da rede LTE em aplicações *Smart Grid*, e resultados de simulações de uso da rede nestas aplicações, a fim de validar as avaliações teóricas, e verificar se os requisitos de comunicação de cada um destes cenários é atendido pela rede LTE. Por fim, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Comunicação no Smart Grid

O principal conceito do *Smart Grid* é a integração entre as redes de energia e comunicação, técnicas de processamento de sinais e engenharia de controle, com o objetivo de criar uma rede mais eficiente, confiável e flexível. A infraestrutura de comunicação é peça chave nesta nova rede, pois permite a aquisição de dados, monitoramento e controle remoto dos diversos componentes da rede. A arquitetura de comunicação no *Smart Grid* pode ser dividida em três camadas, de acordo com a abrangência de atuação na rede elétrica. A primeira delas é a *Wide-Area Network* (WAN), responsável pela comunicação entre os componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. A WAN provê comunicação entre as concessionárias de energia e subestações, incluindo os sistemas de geração distribuída. Portanto, nesta camada deve ser utilizada uma tecnologia que permita comunicação em longas distâncias, com grande largura de banda. A segunda camada é a *Field-Area Network* (FAN), responsável pela comunicação no sistema de distribuição de energia, ou seja, entre as subestações e os consumidores. Abrange áreas urbanas, suburbanas e rurais. A escolha da tecnologia varia de acordo com a aplicação, dependendo da abrangência de cobertura, requisitos de latência e largura de banda necessária. Redes celulares, WiMAX, fibra ótica e Rádio Frequência (RF) mesh são alguns exemplos de tecnologias que podem ser utilizadas nestas duas camadas. A última camada é chamada de *Home-Area Network* (HAN), e se limita à comunicação entre os diversos eletrodomésticos e equipamentos e o medidor inteligente dos consumidores. Tecnologias flexíveis, de baixo custo e baixo consumo de energia têm preferência nesta camada, por exemplo ZigBee ou Wi-Fi [Gungor et al. 2013].

Diversas aplicações estão sendo desenvolvidas para o *Smart Grid*. Encontrar a

tecnologia de comunicação mais adequada para cada uma destas aplicações não é simples, pois cada uma delas apresenta diferentes parâmetros de latência, *jitter* e taxa de dados. Por exemplo, em [U.S. Department of Energy 2010] sugere-se que a comunicação nas aplicações que envolvem medições em tempo real apresente latência entre 20 ms e 200 ms, e na aplicação de recarga de veículos entre 2 s e 5 min. Além disso, a comunicação no *Smart Grid* apresenta características de comunicação *Machine to Machine* (M2M) [Khan and Khan 2013], em que há maior tráfego de *uplink*, grande quantidade de terminais, e sessões de comunicação iniciadas frequentemente, mas com poucos e pequenos pacotes [Zhenqi et al. 2013]. Outra característica relevante da comunicação em aplicações *Smart Grid* é que muitas vezes existem duas categorias de troca de dados. Uma delas ocorre periodicamente, e normalmente envolvem dados de medição ou de sensores na rede. A outra categoria é iniciada devido à ocorrência de um evento, tal como um alarme ou envio de um comando. Esta segunda categoria ocorre com menor frequência, porém é mais sensível a latência e tem mais prioridade em relação à primeira categoria. Desta maneira, para modelar estas duas categorias de tráfego, pode-se utilizar um gerador de tráfego constante para os pacotes da primeira categoria, enquanto que para a segunda pode-se gerar um tráfego com intervalo entre chegadas baseado na distribuição de Poisson [Al-Khatib et al. 2014].

A seguir serão detalhadas algumas das principais aplicações em *Smart Grid*.

2.1.1 Infraestrutura de Medição Avançada

Esta aplicação utiliza comunicação bidirecional para coletar remotamente os dados de medição de consumo, alarmes e alertas provenientes dos medidores inteligentes. Em inglês é comumente chamada de *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Ela permite que as concessionárias de energia sejam notificadas automaticamente no caso de interrupções no fornecimento de energia, facilita o processo de faturamento, e é base para a implementação da aplicação de controle de demanda. Já existe um padrão publicado, o IEC 61968-9, que define os tipos de mensagens a serem trocadas pelos

equipamentos de leitura e controle desta aplicação. A infraestrutura de comunicação para a AMI deve prover acesso a um grande número de dispositivos, e suportar rajadas de dados no caso de falha generalizada no fornecimento de energia elétrica, devido ao envio de alarmes provenientes dos medidores inteligentes [Khan and Khan 2013]. A largura de banda necessária estará entre 10 e 100 kbps por componente, e a latência não será crítica, podendo estar entre 2 e 15 segundos. Os dados coletados pelos vários medidores inteligentes podem ser agrupados em um concentrador de dados, que por sua vez os envia ao sistema de controle da concessionária. De acordo com [U.S. Department of Energy 2010], a tecnologia de comunicação entre os medidores inteligentes e os concentradores podem ser redes *mesh* sem fio ou *Power-line Communication* (PLC), mas conforme a necessidade de largura de banda for aumentando, tecnologias de banda larga, como WiMAX ou celulares, poderão ser utilizadas. Já a comunicação entre os concentradores de dados e as concessionárias pode ser feito através de fibras óticas, redes de microondas ou redes comerciais sem fio, e deve ter largura de banda na faixa de 500 kbps.

2.1.2 Resposta à Demanda

A aplicação de resposta à demanda, ou em inglês *Demand Response*, têm por objetivo balancear o fornecimento e a demanda de energia elétrica, reduzindo os picos de consumo de energia, gerando economia na operação e maior confiabilidade na rede. Este controle de demanda pode ser feito através de precificação diferenciada em horários de pico de consumo, ou através de programas de controle remoto de carga. A comunicação nesta aplicação envolve basicamente o envio de mensagens de precificação ou de comandos de desligamento de equipamentos nos consumidores, portanto não necessita de grande largura de banda, estando na ordem de 120 bytes por mensagem. Já os requisitos de latência dependerão da urgência na operação de redução de carga, podendo estar entre 500 ms a 2 segundos, ou até vários minutos. A infraestrutura de comunicação pode ser compartilhada com a aplicação de AMI, utilizando ZigBee ou PLC para envio de comandos de desligamento entre o medidor inteligente

e os equipamentos elétricos.

2.1.3 Wide Area Measurement System (WAMS)

Esta aplicação tem por objetivo monitorar a qualidade da energia transmitida e proporcionar uma visão geral do funcionamento da rede, através da medição de sincrofasores. Estes fasores fornecem medidas precisas de corrente e tensão, e são sincronizados por uma referência de tempo comum, fornecida por satélites GPS. A medição dos sincrofasores é feita por Unidades de Medição Fasoriais (ou *Phasor Measurement Unit* - PMU), instalados nas redes de transmissão e distribuição de energia. As medições geradas pelos PMUs são enviadas através de uma rede de comunicação local para os Concentradores de Dados Fasoriais (ou *Phasor Data Concentrators* - PDCs), que por sua vez agrupam as medições e as repassam para o centro de controle (CC) da concessionária de energia elétrica, como mostrado na Figura 2.1. A comunicação de dados dos PMUs é especificada pelo padrão IEEE C37.118-2005 [IEEE 2006], que define que cada pacote de dados do PMU tem um cabeçalho fixo de 16 bytes e um *payload* de tamanho variável, dependendo da quantidade de fasores medidos. O padrão também especifica a frequência de envio de mensagens ao PDC. Para sistemas de transmissão de energia com frequência de 50 Hz, as taxas de envio de mensagens podem ser de 10, 25 ou 50 amostras/s, enquanto que em um sistema de 60 Hz, as taxas podem ser de 10, 12, 15, 20, 30 ou 60 amostras/s.

Considerando a mensagem de 52 bytes mostrada como exemplo no padrão IEEE C37.118.2-2011, em que são enviados quatro fasores, sendo três para tensão e um para corrente, e adicionando os 28 bytes de cabeçalhos dos protocolos IP e UDP, resulta em um pacote com 80 bytes para cada amostra. Se fosse utilizada a taxa de envio de 30 amostras/s, cada PMU geraria 19,2 kbps, e o atraso na transmissão não poderia passar de $1/30 = 33,33$ ms. Portanto, é necessária a utilização de uma tecnologia de comunicação que proporcione baixa latência, grande largura de banda e escalabilidade, devido à grande quantidade de PMUs enviando dados no *uplink*.

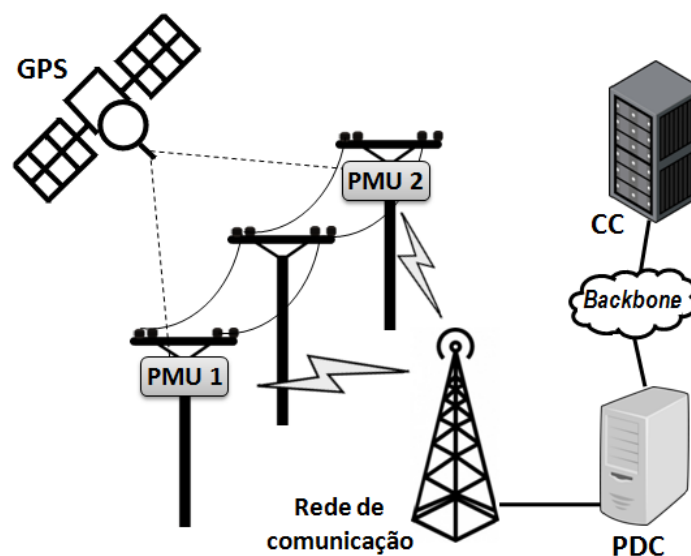


Figura 2.1: Arquitetura de um sistema de comunicação de PMUs

2.1.4 Gerenciamento da Distribuição

Esta aplicação possibilita o gerenciamento, operação e manutenção da rede de distribuição. Pode ser subdividida em duas: Automação da distribuição e automação de subestação. A automação da distribuição proporciona o monitoramento, controle e operação remoto e automático dos diversos componentes da rede em tempo real. Tem como principal objetivo restaurar rapidamente a rede após a detecção de falhas na mesma. É uma das aplicações mais críticas no *Smart Grid*, portanto requer latência na ordem de 100 ms, e largura de banda entre 9,6 e 100 kbps. Já a aplicação de automação da subestação se refere ao monitoramento, proteção e controle dos equipamentos da subestação e alimentadores. O padrão IEC 61850 foi desenvolvido especialmente para esta aplicação, e tem a vantagem de poder ser transportado via redes IP. A comunicação nesta aplicação é extremamente sensível a atrasos, e as mensagens geralmente contém um campo *time-to-live*, que indicam que a mensagem perde sua importância se não for entregue dentro deste prazo. Para esta aplicação, é preferida a utilização de comunicação sem fio, pois tecnologias com fio necessitariam de esquemas de proteção complexos e caros para evitar interferências.

Na Tabela 2.1 são apresentados os requisitos de comunicação das aplicações *Smart Grid* detalhadas nesta seção.

Tabela 2.1: Requisitos de comunicação de aplicações *Smart Grid*
[U.S. Department of Energy 2010]

| Aplicação | Requisitos de comunicação | |
|-------------------------------|---|----------------------|
| | Largura de banda | Latência |
| AMI | 10-100 kbps/medidor e 500 kbps/concentrador | 2-15 s |
| Resposta à demanda | 14-100 kbps | 500 ms - vários min. |
| WAMS | 600-1500 kbps | 20 ms - 200 ms |
| Gerenciamento da distribuição | 9,6-100 kbps | 100 ms - 2 s |

2.2 Long Term Evolution (LTE)

O LTE é um padrão desenvolvido pelo grupo 3GPP [3GPP 36.104 2008] para a quarta geração (4G) de redes móveis sem fio. Suas principais vantagens em relação às tecnologias 3G são o aumento da taxa de dados, a menor latência, e o uso mais flexível e eficiente do espectro, devido à utilização de multiportadoras OFDM. As taxas de pico chegam a 150 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no *uplink*.

O LTE oferece melhor suporte para aplicações que exigem QoS, pois contém um conjunto de parâmetros de QoS já padronizado, que diferencia os fluxos de dados de acordo com os *QoS Class Identifiers* (QCI) [Capozzi et al. 2013]. Outra melhoria implementada no LTE é a arquitetura baseada em comutação por pacotes IP, ao invés da arquitetura baseada em comutação de circuitos utilizada nos padrões 3G. Isto, aliado ao fato de que todos os protocolos da interface de rádio e gerenciamento de recursos estão definidos somente entre a estação rádio-base (e-NodeB, no padrão LTE) e o *User Equipment* (UE), possibilita maiores taxas de dados e menor latência, pois reduz a quantidade de nós na rede [Brown and Khan 2013]. A interface de rádio no LTE é dividida em cinco camadas: Radio Resource Control (RRC), Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC), Medium Access Control (MAC) e Physical Layer (PHY). A camada MAC é especialmente importante na análise de QoS, pois é a responsável pela alocação de recursos de rádio, pelas definições de constelação da modulação de amplitude em quadratura (em inglês, QAM), taxa de codificação, e pela

correção de erros através do mecanismo *Hybrid Automatic Repeat Request* (H-ARQ), dentre outras funções. Para o *downlink*, as constelações de modulação disponíveis são a QPSK, 16QAM e 64 QAM. Para o *uplink*, a constelação 64QAM não é suportada.

A taxa de transmissão oferecida pelo LTE no *uplink* pode ser calculada de acordo com o tamanho do bloco de transporte, que é o pacote enviado pela camada de controle de acesso ao meio à camada física, e transmitido a cada 1 ms. O seu tamanho depende da modulação e codificação escolhidas, e da quantidade de recursos atribuídos para a transmissão do pacote. A especificação do LTE [3GPP 36.213 2008] indica que para um sistema de 10 MHz de largura de banda, a taxa de *uplink* pode variar entre 1,384 Mbps e 36,696 Mbps.

2.2.1 Grade de recursos

A utilização de modulação multiportadora possibilita uma alocação de recursos mais eficiente em um sistema de múltiplos usuários, pois pode reservar conjuntos de subportadoras de acordo com a taxa de dados requerida para cada usuário e seu respectivo indicador de qualidade do canal. O acesso é feito no *downlink* através da técnica *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e no *uplink* através do *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA).

Ambas as tecnologias de acesso apresentam uma grade tempo-frequência para alocação de recursos, também chamada de grade de recursos, mostrada na Figura 2.2. No domínio do tempo, o sinal é dividido em quadros de 10 ms, que por sua vez são divididos em 10 subquadros de 1 ms. Cada subquadro é dividido em 2 slots de 0,5 ms. Estes slots são divididos no domínio da frequência em N partes de 180 kHz. Estas N partes são chamadas de *resource blocks* (RB), e são o elemento básico de alocação de recurso de radio no LTE. Quanto maior a largura de banda de transmissão, maior a quantidade de resource blocks por slot de tempo. A Tabela 2.2 apresenta a relação entre largura de banda de transmissão vs. quantidade de resource blocks no sistema.

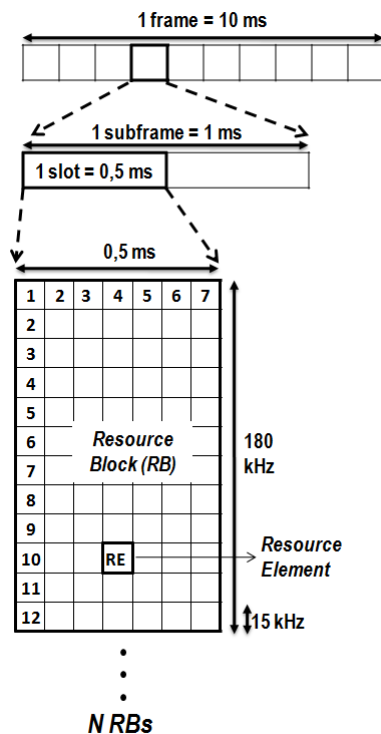


Figura 2.2: Estrutura da grade de recursos do LTE

Tabela 2.2: Largura de banda de transmissão vs. Quantidade de RBs no sistema [Ghosh et al. 2010]

| Largura de banda de transmissão (MHz) | 1,4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---------------------------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Quantidade de resource blocks (N) | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

O RB corresponde a um slot no domínio do tempo (0,5 ms) e 180 kHz no domínio da frequência. Cada RB tem 12 subportadoras de 15 kHz de largura de banda, e 6 ou 7 símbolos OFDM no domínio do tempo. A quantidade de símbolos OFDM no RB depende da extensão do prefixo cíclico utilizado. O prefixo cíclico se encontra entre os intervalos de guarda dos símbolos OFDM, e serve para evitar a interferência intersimbólica causada pelo efeito de multipercurso do sinal de rádio.

Dentro da grade de recursos, a menor unidade tempo-frequência é chamada de *resource element* (RE), e corresponde a uma linha por uma coluna da grade, que representam uma subportadora e um símbolo OFDM, respectivamente. Cada um destes REs representa um símbolo da constelação QAM utilizada na modulação. Como o mínimo intervalo de tempo de transmissão (TTI) é de 1 ms, ou seja, um subquadro, o

mínimo recurso a ser alocado ao usuário são dois RBs. Então, cada usuário receberá no mínimo 12 subportadoras em 14 símbolos OFDM, que equivalem a 168 REs. Porém, nem todos os 168 REs estão disponíveis para transmissão de dados, pois alguns deles são utilizados para transportar sinais de controle.

2.2.2 Alocação de recursos

Para o processo de alocação de recursos, a camada de interface de rádio mais relevante é a MAC. Esta tem como principais funções mapear os canais lógicos e de transporte, priorizar a alocação de recursos entre usuários, e definir como será feito o transporte de dados, escolhendo a constelação QAM, a taxa de codificação, o uso ou não de múltiplas antenas e a potência do sinal. Existe uma entidade MAC tanto no eNode-B quanto no UE. Para transmitir essas informações à camada PHY, a camada MAC utiliza quatro tipos de informações de controle, chamadas de *Downlink Control Information* (DCI), *Control Format Indicator* (CFI), *H-ARQ Indicator* (HI) e *Uplink Control Information* (UCI).

A alocação de recursos é realizada na camada MAC implementada no e-NodeB. A divisão de recursos entre os UEs é realizada por um algoritmo de escalonamento, cuja especificação não faz parte do padrão LTE. Estes algoritmos tem como principais atribuições a alocação de canais físicos e a definição do esquema de modulação e codificação, ou *Modulation and Coding Scheme* (MCS). Portanto, são os responsáveis pela geração da informação transmitida pelo DCI, e realizam esta alocação dinâmica de recursos a cada TTI. Os algoritmos podem considerar variáveis como justiça entre usuários, taxa de dados do sistema, requisitos de QoS e status da fila no buffer de *uplink* do UE [Capozzi et al. 2013]. Para que esta alocação dinâmica de recursos ocorra, o algoritmo utiliza informações recebidas do UE. No processo de alocação de recursos e MCS para o *uplink*, são utilizados o *Sounding Reference Signal* (SRS) e o *Buffer Status Report* (BSR), indicador que aponta a quantidade de pacotes pendentes no buffer de *uplink* do UE. Para as definições referentes ao *downlink*, é utilizado o *Channel Quality Indicator* (CQI) [Brown and Khan 2013]. Este indicador é baseado

na relação sinal-interferência-ruído (SINR) medido pelo UE, e pode ser medido de maneira generalizada para toda a largura de banda de transmissão, ou dividido em sub-bandas. A informação do CQI em sub-bandas permite a seletividade em frequência, em que o algoritmo aloca RBs na frequência de maior SINR. Porém este método consome mais banda de *uplink*, pois precisa enviar mais dados ao e-NodeB. Portanto, em aplicações com vários UEs conectados simultaneamente e que exigem baixa latência, pode ser mais apropriado utilizar o método de medição do CQI único para toda a largura de banda [Ghosh et al. 2010].

Além da alocação dinâmica de recursos, que é mais apropriada para o escalonamento de pacotes de dados, existe no LTE o escalonamento semi-persistente, utilizado para pacotes transportando voz. Como o serviço de voz apresenta chegadas constantes de pacotes, a alocação dinâmica de recursos a cada TTI ocuparia muitos recursos com sua sinalização, o que poderia prejudicar a qualidade do serviço, que requer baixa latência e *jitter* [Ghosh et al. 2010]. A alocação semi-persistente reduz a sinalização, pois reserva previamente um conjunto de RBs ao UE, fazendo com que o UE saiba antecipadamente quais canais físicos ele deve decodificar, e em quais RBs ele pode enviar pacotes [Capozzi et al. 2013].

Como os algoritmos de escalonamento não são especificados pelo padrão LTE, devem ser escolhidos de forma a atender as exigências e restrições de comunicação requeridas pelo sistema. Em seguida serão apresentados alguns deles, categorizados de acordo com a sua estratégia de alocação de recursos: independentes do canal, dependentes do canal/sem estratégia de QoS, dependentes do canal/com estratégia de QoS ou semi-persistentes.

2.2.2.1 Algoritmos independentes do canal

Estes algoritmos não levam em consideração informações de qualidade do canal recebidas do UE, pois são geralmente utilizados em sistemas de comunicação com fio. Portanto, com eles não é possível explorar a diversidade no tempo e na frequência proporcionada pelo LTE, que reduzem os erros por desvanecimento do canal. Alguns

exemplos são o *First In First Out* (FIFO), *Round Robin* (RR), *Weighted Fair Queueing* (WFQ) e *Blind Equal Throughput* (BET).

O FIFO aloca recursos de acordo com a ordem de chegada das solicitações. É um algoritmo simples, porém injusto e ineficiente. O *Round Robin*, também chamado de enfileiramento justo, promove maior justiça se comparado ao FIFO, pois aloca recursos em quantidades de tempo iguais para cada usuário. Ele divide os recursos disponíveis entre os fluxos ativos, ou seja, os canais com *buffer* ocupado. Caso a quantidade de fluxos ativos seja maior do que a quantidade de *Resource Blocks* disponíveis em um subquadro, nem todos os fluxos serão alocados, e no próximo subquadro será alocado primeiramente o último fluxo que não foi alocado. Porém, em um sistema de comunicação sem fio, em que a qualidade de canal não é constante, o *throughput* para cada usuário não será justo. Com o BET esta justiça pode ser atingida, pois este algoritmo utiliza como métrica a média do *throughput* $\overline{R}_k(t)$ de cada usuário k . Para calcular esta média, é utilizada a técnica de média móvel exponencial ponderada (EWMA) com parâmetro α , entre $\overline{R}_k(t)$ e a taxa de dados instantânea $r_k(t)$, tal que

$$\overline{R}_k(t) = \alpha \overline{R}_k(t-1) + (1-\alpha)r_k(t), \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (2.1)$$

Após calculada esta média, o BET aloca o j -ésimo RB ao usuário k que apresentar o maior valor da métrica $m_{k,j}$, sendo que

$$m_{k,j}^{BET} = \frac{1}{\overline{R}_k(t)}. \quad (2.2)$$

Sendo assim, este algoritmo prioriza o usuário que apresenta menor *throughput* médio no momento t .

2.2.2.2 Algoritmos dependentes do canal/sem estratégia de QoS

Os algoritmos pertencentes a esta classe podem utilizar as informações de CQI enviadas pelo UE para definir qual a melhor faixa de frequências para alocação de RBs, e o melhor esquema de modulação e codificação, a fim de alcançar a maior taxa de

dados. Alguns exemplos de algoritmos desta categoria são o *Maximum Throughput (MT)* e *Proportional Fair (PF)*.

O algoritmo MT tem como principal objetivo maximizar a taxa de dados total do sistema, e faz isso alocando recursos aos usuários com melhores condições de canais no momento, na forma

$$m_{k,j}^{MT} = d_k(t), \quad (2.3)$$

onde $d_k(t)$ é a taxa de dados esperada para o usuário k , calculada pela expressão de Shannon para a capacidade do canal, utilizando o *Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)* informado pelo CQI, tal que

$$d_k(t) = \log [1 + SINR_k(t)]. \quad (2.4)$$

Esta estratégia faz com que o algoritmo não seja justo com usuários que se encontram na borda da célula de cobertura, pois estes apresentarão condições piores de qualidade do canal, se comparado aos usuários que estão próximos ao eNode-B.

O algoritmo PF tem por objetivo proporcionar justiça na divisão de recursos entre os usuários, e é a junção dos algoritmos MT e BET. Ele escolhe o usuário com maior taxa de dados esperada $d_k(t)$, em relação ao *throughput* médio $\overline{R_k(t)}$. A alocação de recursos é feita ao usuário que alcançar a maior métrica, de acordo com a equação

$$m_{k,j}^{PF} = \frac{d_k(t)}{\overline{R_k(t)}}. \quad (2.5)$$

2.2.2.3 Algoritmos dependentes do canal/com estratégia de QoS

Estes algoritmos utilizam, além do CQI, os parâmetros dos fluxos diferenciados de *QoS Class ID (QCI)* estabelecidos no LTE. Estes podem estar baseados em requisitos de taxa de dados, latência, perda de pacotes e *jitter*. Nesta categoria, como exemplo, estão os algoritmos *Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF)*, *Exponential/PF (EXP/PF)* e o *Channel and QoS Aware (CQA)*.

2.2.2.4 Algoritmos semi-persistentes

O uso principal de algoritmos semi-persistentes é para o escalonamento de pacotes transportando voz. A utilização de algoritmos dependentes de canal e com alocação dinâmica requerem mais sinalização, o que reduz a capacidade total da rede, conseqüentemente reduzindo a quantidade de usuários na rede. Já os algoritmos semi-persistentes têm por objetivo aumentar a capacidade da rede, a fim de suportar a máxima quantidade de ligações. Portanto, podem ser considerados algoritmos independentes do canal, pois não se utilizam das informações de QCI dos usuários.

2.2.3 Qualidade de Serviço no LTE

Para dar suporte a aplicações que requerem diferentes níveis de QoS, o LTE utiliza o conceito de *bearers* como elemento de controle de QoS. Estes *bearers* são canais lógicos definidos desde o *Core Network*, passando pelo e-NodeB, até o UE. Quando um UE se conecta à rede é criado um *bearer* padrão para a troca de sinais de controle. Para a troca de informações de um serviço específico é criado pelo Core Network um *bearer* adicional, chamado de *bearer* dedicado. Estes *bearers* são divididos em duas classes, *Guaranteed Bit Rate* (GBR) e *Non-GBR*. A primeira garante uma taxa de bits mínima ao UE, e é normalmente utilizada em aplicações em tempo real, como VoIP e *streaming* de vídeo. Já a classe *Non-GBR* não garante taxa mínima, o que faz com que a taxa recebida pelo UE dependa da quantidade de usuários disputando os recursos, e da estratégia de alocação de recursos do algoritmo de escalonamento. Esta classe é utilizada para as aplicações de navegação web, e-mail e FTP, dentre outras. Cada *bearer*, independentemente da sua classe, é associado a um *QoS Class Identifier* (QCI). Existem 9 classificações padronizadas, que levam em consideração o atraso de pacotes, nível de perda de pacotes aceitável e prioridade de transmissão, como mostrado na Tabela 2.3. [Capozzi et al. 2013] [Ghosh et al. 2010]

Tabela 2.3: QCI's padronizados para o LTE

[Ghosh et al. 2010]

| QCI | Classe | Prioridade | Atraso de pacotes (ms) | Taxa de Perda de Pacotes | Exemplo |
|-----|---------|------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | GBR | 2 | 100 | 10^{-2} | Voz |
| 2 | GBR | 4 | 150 | 10^{-3} | Streaming ao vivo de vídeo |
| 3 | GBR | 3 | 50 | 10^{-3} | Jogos em tempo real |
| 4 | GBR | 5 | 300 | 10^{-6} | Streaming de video com buffer |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 | 10^{-6} | Sinalização IMS |
| 6 | Non-GBR | 6 | 300 | 10^{-6} | Streaming de video com buffer e transmissão TCP (web, e-mail, FTP, etc.) |
| 7 | Non-GBR | 7 | 100 | 10^{-3} | Voz, streaming ao vivo de vídeo, jogos interativos |
| 8 | Non-GBR | 8 | 300 | 10^{-6} | Streaming de video com buffer e transmissão TCP (web, e-mail, FTP, etc.) |
| 9 | Non-GBR | 9 | 300 | 10^{-6} | |

2.2.4 Acesso Randômico

O UE aciona o procedimento de acesso randômico (*Random Access - RA*) quando este está tentando se conectar a um eNodeB, e é iniciado após o procedimento de busca de célula pelo UE. Este evento pode ocorrer nas seguintes situações: No primeiro acesso à rede, no reestabelecimento da sincronização entre UE e eNodeB, durante o processo de *handover*, na transmissão de novos dados quando não há recurso escalonado no *uplink*, e para reestabelecer a conexão após falha no *link* de rádio.

Há um canal físico no *uplink* específico para este procedimento, o *Physical Random Access Channel (PRACH)*. São reservados para este canal 6 RBs no domínio da frequência, e no domínio do tempo no mínimo um subquadro de 1 ms a cada dois quadros de 10 ms, e no máximo todos os subquadros de 1 ms. A informação de periodicidade do PRACH é enviada aos UEs pelo eNodeB pelo canal de *broadcast*, através de uma variável chamada *PRACH Configuration Index*. No PRACH os UEs

enviam um preâmbulo para solicitar acesso à rede. Este preâmbulo é escolhido aleatoriamente pelos UEs, com base nas informações de sistema enviadas pelo eNodeB via canal de *broadcast*. São disponibilizados 64 preâmbulos em cada célula, porém alguns deles são reservados pelo eNodeB para acesso prioritário, como por exemplo para o procedimento de *handover*. O procedimento de RA, quando o UE não está sincronizado com o eNodeB, envolve quatro passos. Primeiramente, os UEs requerem acesso à rede transmitindo no PRACH o preâmbulo escolhido. Caso dois UEs enviem o mesmo preâmbulo no mesmo subquadro, ocorre uma colisão, e nenhum deles recebe acesso à rede. Neste caso, o UE poderá reenviar um preâmbulo somente após 3 ms, além da janela de tempo da resposta do eNodeB, que pode variar de 2 ms a 10 ms [Laya et al. 2014]. O segundo passo é a detecção de UEs por parte da eNodeB. Neste momento, a eNodeB aloca recursos aos UEs identificados, calcula a correção de tempo necessária para a sincronização entre a eNodeB e o UE, e envia uma resposta através do canal físico compartilhado no *downlink* (*Physical Downlink Shared Channel* - PDSCH). Esta resposta contém 4 informações para o UE: o código do preâmbulo detectado; um identificador temporário para o UE, chamado de *Random Access Radio Network Temporary Identifier* (RA-RNTI), que é calculado com base no RB em que o preâmbulo foi enviado; uma alocação inicial de recursos; e a informação de correção de tempo para a sincronização. Em caso de falha no acesso, é informada a janela de tempo necessária para uma nova tentativa de acesso randômico pelo UE. No terceiro passo, o UE envia uma nova mensagem a eNodeB nos RBs previamente alocados, informando o *Cell Radio Network Temporary Identifier* (C-RNTI). Este passo existe somente para assegurar de que não houve colisões de preâmbulos no procedimento. O último passo é o envio da resposta pelo eNodeB, confirmando ao UE o sucesso no procedimento de acesso.

Cada UE possui um contador para este procedimento, que é incrementado a cada tentativa de acesso à rede, pois existe um número máximo de tentativas definido pelo eNodeB. Quanto mais usuários a célula tiver, menor a chance de receber acesso à rede na primeira tentativa, e maior a probabilidade de colisões de preâmbulos. Para a

comunicação M2M, esse é um fator relevante, pois gera maior atraso na comunicação, e limita o número de dispositivos em cada célula. Muitos estudos foram realizados a fim de propor soluções para a limitação que o procedimento de acesso randômico gera em uma rede LTE [3GPP TR 23.888 2012], [3GPP TR 37.868 2011].

No NS-3, o valor padrão de préâmbulos disponíveis é 50, assim como a quantidade máxima de tentativas. A janela de tempo de resposta padrão é de 3 ms. Portanto, uma nova tentativa pode ser realizada somente após 6 ms.

2.3 Principais preocupações do uso de rede celular em aplicações *Smart Grid*

Apesar da viabilidade técnica da utilização de redes celulares como infraestrutura de rede para aplicações *Smart Grid*, muitas empresas distribuidoras de energia elétrica vêm investindo em redes próprias de comunicação, devido às preocupações referentes à confiabilidade da rede, tais como: disponibilidade da rede em momentos de falta de energia, priorização do serviço em redes congestionadas, gerenciamento da rede de comunicação e garantia de uso da tecnologia por um período de tempo adequado ao investimento realizado.

A grande vantagem para as distribuidoras no uso de redes celulares comerciais é a economia em investimentos de infraestrutura, por se utilizar uma rede celular comercial já instalada. Porém, as distribuidoras se preocupam com o nível de serviço oferecido pelas companhias de telecomunicações. A principal motivação do conceito *Smart Grid* é trazer maior confiabilidade na rede de distribuição de energia elétrica. Para que isto ocorra, a rede de comunicação deve ter alta disponibilidade e estar em funcionamento mesmo quando ocorrem quedas de energia e desastres naturais. Portanto, um dos argumentos das empresas que investiram em redes próprias de comunicação é de que elas garantem *backup* de energia por no mínimo 8 horas, e dependendo da aplicação, até por algumas semanas, o que não acontece com redes comerciais. De acordo com uma análise feita pela distribuidora *Northeast Uti-*

lities System, em um ano, as redes de comunicação privadas ficaram indisponíveis três vezes menos horas em comparação com as redes comerciais utilizadas por eles [U.S. Department of Energy 2010].

Outra questão importante é a rapidez com que as tecnologias celulares avançam, fazendo com que investimentos nesta rede fiquem obsoletos rapidamente. Por exemplo, em 2001 foi oferecido pela NTT DoCoMo o primeiro serviço comercial de rede 3G. Em 2009 já estava lançada pelo 3GPP toda a especificação do padrão LTE. Em 2017, espera-se que ocorram testes com tecnologia 5G. Essa rapidez na troca de tecnologia faz com que as distribuidoras prefiram manter redes próprias de comunicação, para garantir o *payback* do investimento realizado e evitar custos operacionais devido à troca de equipamentos.

Porém, redes móveis podem ser aplicadas à sistemas *Smart Grid* em que a concessionária não tenha o interesse em desenvolver a sua própria rede, ou em casos onde os nós de comunicação são tão distantes entre si que inviabilizam outras tecnologias.

2.4 Trabalhos relacionados utilizando outras tecnologias de comunicação

Vários estudos foram apresentados para comunicação *Smart Grid* utilizando diversas tecnologias, tais como Rádio Frequência (RF), WiMax, PLC, ZigBee, dentre outros. Cada uma das tecnologias tem suas vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação *Smart Grid* que está sendo estudada.

O uso de RF Mesh é predominante no Brasil e nos EUA para a aplicação de Infraestrutura de Medição Avançada, por ser financeiramente mais viável se comparado a uma comunicação celular, e por permitir que as concessionárias implementem a sua própria infraestrutura de comunicação utilizando faixas de frequência não licenciadas. Tecnicamente, esta é uma opção interessante se os nós da rede estão próximos entre si, e no que se refere ao atraso imposto pela rede, atende aos requisitos da aplicação.

No trabalho apresentado sobre RF Mesh [Lichtensteiger et al. 2010] para aplicação de AMI, a latência média entre o envio de um comando do coletor e a respectiva resposta do medidor está na faixa de 5s a 8s.

O trabalho sobre comunicação de PMUs utilizando WiMax [Khan and Khan 2012] faz uma análise do uso de diferentes classes de QoS aplicados à rede. São comparados os resultados entre o serviço de melhor esforço da rede (*Best Effort* - BE), o *unsolicited grant service* (UGS) e o *real-time polling service* (rtPS), sendo estes dois últimos serviços usualmente aplicados à comunicações em tempo real. Os resultados das simulações para os três tipos de escalonadores mostram que o uso do convencional BE não é possível para a aplicação de PMUs, pois apresentou atraso médio de 2,5 segundos em uma rede com 50 PMUs. Já os escalonadores UGS e rtPS apresentaram para a mesma quantidade de PMUs atrasos médios de 22,4 milissegundos e 31,6 milissegundos respectivamente, possibilitando a comunicação de baixa latência requerida por esta aplicação. Importante frisar que esta simulação não continha tráfego de fundo, mas somente o tráfego dos PMUs.

Um outro artigo [Chenine and Nordstrom 2011] explora a questão da comunicação de PMUs em uma rede de fibra ótica utilizada para interligar 10 PMUs espalhados pelo território sueco. Diversos cenários são simulados, cada um com uma diferente porcentagem de tráfego de fundo disputando recursos da rede, e diferentes capacidades de tráfego. Cada PMU gera 30 mensagens por segundo. Os cenários de 2 Mbps com tráfego de fundo utilizando 50% e 70% da capacidade apresentaram atrasos médios de 15 ms e 27 ms, respectivamente.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DE CONDIÇÕES DE QUALIDADE DO LTE PARA COMUNICAÇÃO DE SISTEMAS SMART GRID

Neste capítulo é avaliada a qualidade de comunicação via LTE para duas aplicações descritas na seção 2.1. A primeira delas é a *Wide Area Measurement System*. Esta aplicação foi escolhida por ser a que necessita de mais baixa latência dentre as quatro apresentadas. A segunda aplicação é a de Infraestrutura de Medição Avançada, e foi escolhida por ser a mais comum comercialmente dentre as aplicações *Smart Grid*, pois a partir desta aplicação muitas outras podem aproveitar a infraestrutura de comunicação já implementada.

3.1 Comunicação de Sincrofasores

Como já descrito no item 2.1.3, a comunicação entre PMUs possui padrões de frequência entre as mensagens, sendo que a frequência mínima é de 10 mensagens/s, e a frequência máxima é de 60 mensagens/s, considerando um sistema de transmissão de energia de 60 Hz. Isso significa que o atraso entre uma mensagem não poderá passar de $1/10 = 100$ milissegundos e $1/60 = 16,66$ milissegundos, respectivamente. Com relação ao tamanho do pacote, se forem enviadas medições de 3 fasores de tensão e 1 de corrente, o pacote terá 52 bytes. Adicionados os cabeçalhos IP e UDP, o tamanho do pacote chega a 80 bytes. Portanto, essa aplicação exige uma comunicação de baixa latência, e a capacidade de transmitir pequenos pacotes com tráfego constante.

3.1.1 Análise de Desempenho na Comunicação de Sincrofasores usando LTE

Para avaliar se é adequado utilizar uma rede LTE para esta aplicação, é necessário analisar qual o atraso mínimo oferecido por esta rede, e quais são os fatores que mais o afetam. De acordo com [Brown and Khan 2013], as principais fontes de atraso no *uplink* são o tempo gasto no processo de solicitação de alocação de recursos pelo UE, o atraso gerado pelas retransmissões H-ARQ, e o tamanho do pacote a ser enviado. O processo de solicitação de alocação de recursos se inicia com o envio do *Scheduling Request* (SR) pelo UE. Porém, existem intervalos periódicos pré-definidos para o envio de SRs. O atraso gerado neste processo pode ser modelado por uma distribuição uniforme discreta $U_1 \sim Un(1, SR_I)$, em que U_1 representa a quantidade de subquadros de 1 ms até a próxima oportunidade de envio de SR pelo UE, e SR_I representa o intervalo periódico de subquadros configurado para o envio de SRs. SR_I pode assumir os valores 1, 2, 5, 10, 20, 40 ou 80 subquadros. Outra fonte de atraso neste mesmo processo é o tempo que o eNodeB demorará para responder o SR com uma permissão ao UE, que será aqui definido por U_2 , e depende principalmente do algoritmo de alocação de recursos utilizado, e da capacidade de processamento da eNodeB. Deve ser somado a esses dois fatores o atraso fixo de quatro subquadros, do momento que o UE recebe a permissão de envio de dados até o momento que ele propriamente envia os primeiros pacotes. Se a comunicação ocorrer sem problemas, somente estas três fontes de atraso são consideradas. Porém, se for necessária a retransmissão de algum pacote, o processo *Hybrid Adaptive Repeat Request* (H-ARQ) adiciona um atraso fixo de oito subquadros para cada retransmissão no *uplink*. Então, de acordo com esta análise, a latência em milissegundos, já que cada subquadro representa um milissegundo, entre as camadas MAC do eNodeB e UE é dada por

$$T_{uplink} = U_1 + U_2 + 4 + 8R, \quad (3.1)$$

sendo R a quantidade de retransmissões realizada pelo processo H-ARQ, que por

padrão tem valor máximo 4. Sendo assim, no melhor dos casos, a latência mínima entre as camadas MAC é de 6 ms. Caso ocorra uma retransmissão, a latência mínima já sobe para 14 ms, e caso ocorram duas retransmissões, o valor fica em 22 ms. Portanto, a quantidade de retransmissões se torna um fator crítico para o sistema de comunicação da aplicação WAMS. É importante frisar que esta análise considera que o UE não possui permissão prévia de envio de dados, e que está enviando um pacote pequeno de dados. Caso seja enviado um pacote maior que o espaço alocado inicialmente para o UE, a latência aumenta devido à necessidade de um novo pedido de permissão de envio de dados, pois o pacote deverá ser fragmentado.

Outro fator que afeta a latência na comunicação M2M é o procedimento de acesso randômico à rede. Para avaliar como este processo interfere na comunicação dos PMUs, foi realizada para esta dissertação uma avaliação teórica a fim de prever o desempenho do sistema, e posteriormente validar esta avaliação em simulações no NS3. Se considerado um sistema que aloque o canal físico de acesso randômico em todos os subquadros, ou seja, um PRACH disponível a cada 1 ms, a probabilidade de bloqueio no acesso à rede pode ser calculado da seguinte forma:

$$p = \left(1 - \frac{P_{\text{PRACH}}}{U}\right)^n, \text{ para } P_{\text{PRACH}} \leq U, \quad (3.2)$$

onde P_{PRACH} é o número de preâmbulos disponíveis, U é a quantidade de UEs solicitando simultaneamente acesso à rede, e n é a quantidade máxima de tentativas possíveis de comunicação com a eNodeB. O valor de n pode ser configurado entre 3 e 50. Note que a probabilidade de bloqueio no acesso à rede aumenta conforme o número de UEs aumenta, devido à maior chance de dois ou mais UEs terem escolhido o mesmo preâmbulo para iniciar o procedimento, acarretando em colisões. Conforme a quantidade de tentativas aumenta, reduz a probabilidade de colisões, pois reduz a quantidade de UEs solicitando acesso. Então, de acordo com a avaliação teórica representada por (3.2), e considerando um sistema com 50 preâmbulos disponíveis e 200 solicitações simultâneas, a probabilidade de colisões de preâmbulos na primeira tentativa de acesso à rede ($n = 1$) é de 75%. De acordo com simulações realizadas

por [Subramanian and Sandrasegaran 2014] utilizando o software NS3, a probabilidade de colisão verificada em uma célula com 200 UEs foi de 75%. Portanto, o valor teórico correspondeu ao valor constatado na simulação.

Cada nova tentativa de acesso do UE à rede gera um atraso na comunicação de no mínimo 5 ms. Por isso, foi também avaliada neste estudo a quantidade máxima de tentativas que um PMU pode utilizar para acessar a rede antes que o prazo da sua mensagem expire. Esta depende da sua taxa de envio de mensagens por segundo f , e da janela de tempo de resposta do eNodeB j , que pode assumir valores entre 2 ms a 10 ms. A quantidade n está representada por

$$n = \left\lfloor \frac{1000/f}{3 + j} \right\rfloor. \quad (3.3)$$

Utilizando os valores padrão de configuração do NS3, em que $P_{\text{PRACH}} = 50$ e $j = 3$, temos que para um sistema com PMUs enviando 30 mensagens por segundo, o valor de n deve ser no máximo 5 tentativas. Utilizando este valor de n em (3.2), resulta nas probabilidades apresentadas no gráfico da Figura 3.1(a). Pode-se verificar que em um sistema com 250 UEs, a probabilidade de bloqueio é de 32,77%. Ou seja, aproximadamente 1 dentre 3 PMUs não conseguirá acessar a rede em tempo hábil para enviar a sua mensagem. Fixando-se a quantidade de UEs em 250, e variando a quantidade de tentativas máximas n , resulta na curva de probabilidade da Figura 3.1(b), mostrando que quanto mais possibilidades de tentativas de acesso randômico o sistema disponibiliza, menor é a probabilidade de bloqueio.

Caso sejam admitidos na rede, os PMUs passam pelo processo de controle de acesso realizado pela camada MAC, de acordo com o algoritmo de escalonamento configurado. Então, foram estabelecidas expressões para determinar o número máximo de PMUs admitidos no sistema, considerando o uso do algoritmo de escalonamento *Round Robin* no *uplink*, de forma a atender aos requisitos de atraso máximo e *throughput*. Para atender o *throughput* mínimo exigido, o número de usuários U_t admitidos no eNodeB deve ser de

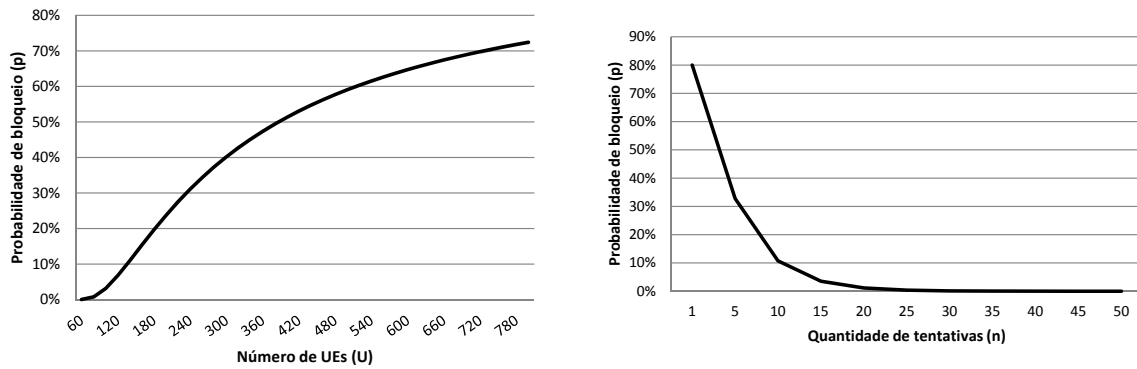
(a) $n = 5$; $P_{\text{PRACH}} = 50$ (b) $U = 250$; $P_{\text{PRACH}} = 50$

Figura 3.1: Probabilidade de bloqueio no acesso randômico

$$U_t < \frac{R_a \cdot N}{R_p}, \quad (3.4)$$

onde R_a é taxa de transmissão de um par de RBs, N é o número de RBs disponíveis no domínio da frequência, e R_p é a taxa de dados exigida pelo PMU.

Para atender ao requisito de atraso, o número de UEs admitidos pelo eNodeB deve ser de

$$U_d < \frac{(1000/f) \cdot N}{N_{rbg}}, \quad (3.5)$$

onde N_{rbg} representa o número mínimo de RBs alocados pelo escalonador em um *slot* para cada UE.

Desta forma, com o uso do escalonador *Round Robin* no *uplink*, o número máximo de usuários admitidos pela eNodeB pode ser calculado através de $\min(U_t, U_d)$ [Castro and Pedroso 2015]. Por exemplo, um sistema LTE operando com largura de banda de 10 MHz possui $N = 50$. Se os PMUs medirem 4 fasores com frequência de 30 amostras por segundo, a taxa necessária seria de $R_p = 19,2$ kbps. Considerando o uso do QPSK e um *overhead* de sinalização de 25%, a taxa de transmissão de dois RBs será dada por $R_a = 0,75 \cdot (12 \cdot 14 \cdot 2 \cdot 1000) = 252$ kbps. Se $N_{rbg} = 3$, o número máximo de usuários admitidos pela eNodeB seria dado por $\min(656, 555)$. No entanto, as Equações (3.2) e (3.3) indicam que o número efetivo de usuários pode

ser ainda menor, em função do procedimento de acesso aleatório do LTE. No gráfico da Figura 3.1(a), pode-se verificar que sistemas com mais de 540 UEs apresentam mais de 60% de probabilidade de colisão de preâmbulos. Este é um resultado importante, pois indica que a qualidade de serviço em uma rede LTE não está relacionada somente ao algoritmo de escalonamento, ou à utilização de QoS *bearers*. Para garantir QoS, deve-se considerar também as restrições impostas pelo procedimento de acesso aleatório.

3.1.2 Simulação de uma rede com sincrofasores

A fim de verificar se a avaliação teórica corresponde aos resultados práticos, e analisar o desempenho da rede LTE aplicada à comunicação de PMUs, foram realizadas simulações computacionais utilizando o software NS3. Este software foi escolhido por apresentar um desenvolvido módulo LTE que cobre todos os requisitos para a simulação proposta. Os parâmetros da simulação estão listados na Tabela 3.1. Os modelos de simulação para a camada física, como propagação e *fading* foram mantidos no padrão NS3, já que o intuito não era se aprofundar em análises da camada física.

A topologia da rede simulada é muito semelhante à apresentada na Figura 2.1. Além da eNodeB conectando os PMUs e UEs via LTE, há um servidor remoto conectado ao *Evolved Packet Core* (EPC) do sistema LTE através de um link ponto a ponto de 10 Gbps, simulando a comunicação entre a rede LTE e o PDC. Esta taxa de transmissão é alta para evitar que haja atraso neste link, pois o objetivo da simulação é de avaliar somente o atraso da rede LTE. Foram realizadas simulações em 21 cenários diferentes. A quantidade de PMUs variou entre 30, 60 e 90, e a de UEs gerando tráfego de fundo variou entre 10, 20, 50, 100, 150, 200 e 250. A taxa de dados gerada pelo tráfego de fundo foi fixada em 36 Mbps para todos os cenários, a fim de estressar o sistema. Isso foi feito alterando-se a média exponencial utilizada no gerador de tráfego exponencial UDP, conforme a variação de UEs. A simulação foi repetida 10 vezes em cada cenário para se estabelecer o erro máximo no intervalo de confiança de 97,5%. Como foram realizadas 10 amostras para cada ponto do gráfico, na maior parte das

Tabela 3.1: Parâmetros da simulação

| Parâmetro | Valor |
|---|--|
| Frequência | <i>Uplink</i> : 1920 MHz; <i>Downlink</i> : 2110 MHz |
| Largura de banda e duplexação | 10 MHz FDD |
| Posicionamento dos PMUs e UEs | Distribuídos uniformemente em um círculo de raio 1000 m; Sem mobilidade |
| Posicionamento do eNodeB | Posicionamento fixo; Altura 45 m |
| Tráfego dos PMUs (<i>uplink</i>) | UDP/IP; Pacotes de 80 bytes com tráfego constante de 30 pacotes/s |
| Tráfego de fundo UEs (<i>uplink</i>) | UDP/IP; Pacotes de 1028 bytes com intervalo entre pacotes exponencial; Taxa de 36 Mbps |
| Algoritmo de escalonamento no <i>uplink</i> | <i>Round Robin</i> |
| Algoritmo de escalonamento no <i>downlink</i> | <i>Proportional Fair</i> |
| Reuso da frequência na rede | Sem reuso. Fator de reuso = 1 |
| Modelo de propagação | Modelo de perdas de Friis |
| Modelo de <i>fading</i> | Não há |

situações simuladas o intervalo de confiança ficou bem pequeno, não aparecendo em alguns pontos do gráfico.

3.1.3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos para a média do atraso na comunicação dos PMUs são apresentados na Figura 3.2. Este atraso considera o tempo entre o envio do pacote pelo PMU e seu recebimento no servidor remoto. Portanto, trata-se do atraso entre os PMUs e o PDC. Cada uma das curvas deste gráfico apresenta o valor do atraso de diferentes cenários de simulação, onde a quantidade de PMUs era fixada em 30, 60 ou 90, e variava-se a quantidade de dispositivos de tráfego de fundo, de acordo com os valores apresentados no eixo horizontal. Os fluxos nos quais não houve qualquer comunicação, provavelmente por não terem conseguido acesso à rede, e portanto seria considerado um atraso infinito, não foram considerados neste gráfico. Pode-se perceber neste gráfico que a média do atraso fim-a-fim na comunicação dos PMUs

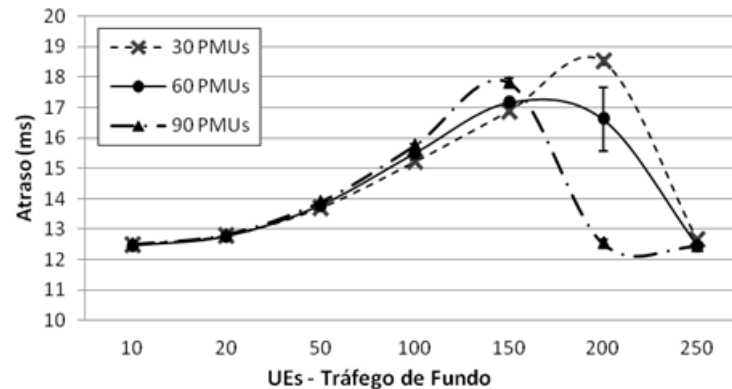


Figura 3.2: Média do atraso fim-a-fim na comunicação dos PMUs

cresceu proporcionalmente à quantidade de dispositivos inseridos como tráfego de fundo, e nos pontos onde a quantidade total de dispositivos na rede chegou próximo de 230 iniciou-se a queda em todas curvas, já que os dispositivos que não conseguiram acesso não estão representados. Essa queda ocorre porque a partir desta quantidade de dispositivos tentando se conectar à mesma antena, a quantidade de colisões no processo de acesso randômico se acentua, fazendo com que muitos dispositivos não recebam acesso à rede. Isso faz com que os recursos sejam divididos entre menos dispositivos, diminuindo assim o atraso na comunicação. Esse fato pode ser visualizado também na Figura 3.3, que apresenta a perda de pacotes dos PMUs. No mesmo ponto, a partir de 230 dispositivos na rede, a perda de pacotes cresceu exponencialmente, chegando próximo do nível de perda total de pacotes. Isto mostra que os PMUs tentaram transmitir a sua mensagem, mas por não conseguir acesso à rede, não conseguiram se comunicar. A mesma análise pode ser feita para o gráfico mostrado na Figura 3.4, pois a partir da mesma quantidade de dispositivos o *throughput* cai de modo exponencial. Os resultados do *jitter*, na Figura 3.5, apresentaram valores aceitáveis para a comunicação de PMUs, acompanhando o gráfico de atraso médio.

O escalonador utilizado alocou no mínimo três *resource blocks* no domínio da frequência para cada usuário, ou seja, $N_{rbg} = 3$. Como o sistema simulado tem largura de banda de 10 MHz, a quantidade disponível de RBs é 50. Sendo assim, no máximo 16 usuários obtiveram permissão para envio de dados a cada subquadro no

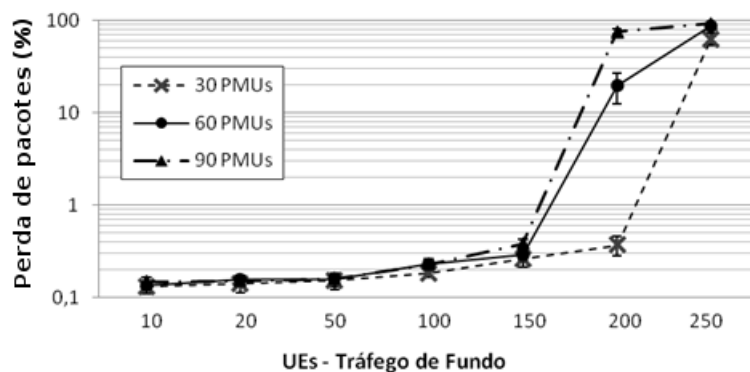


Figura 3.3: Percentual de perda de pacotes dos PMUs

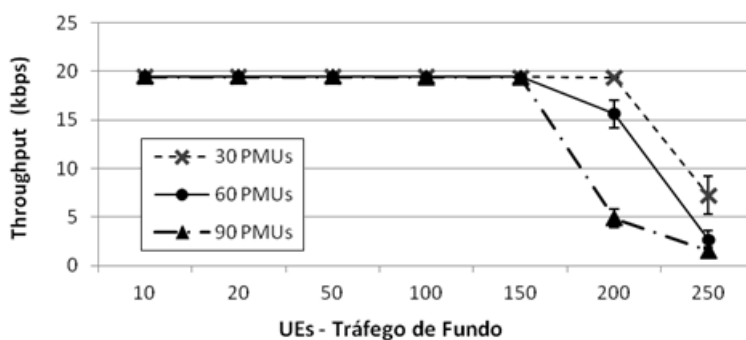


Figura 3.4: Throughput na comunicação dos PMUs

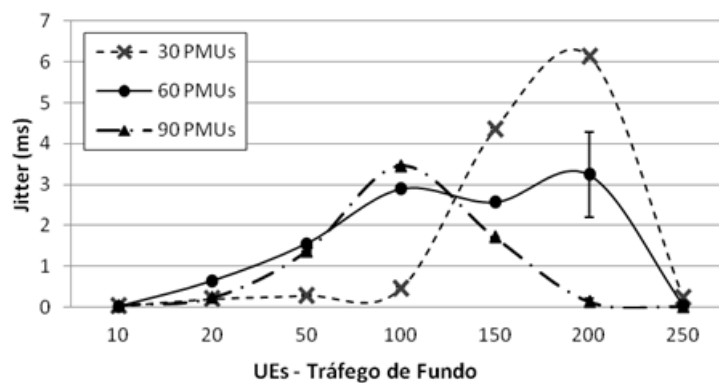


Figura 3.5: Média do jitter na comunicação dos PMUs

uplink. Se divididas por 16 as taxas mínima e máxima de transmissão no *uplink* comentadas anteriormente, obtém-se para o pior caso 84,25 kbps, e para o melhor caso 2,2 Mbps. Isto significa que em qualquer situação os PMUs não necessitam solicitar mais recursos que os já escalonados a eles inicialmente, o que levaria a um aumento no atraso da comunicação. Desta forma, pode-se dizer que os PMUs levam vantagem em relação aos UEs de tráfego de fundo no escalonamento de recursos feito pelo RR, pois com um único subquadro eles já são atendidos. Os UEs de tráfego de fundo, por sua vez, precisam de várias rodadas para enviar seus pacotes de 1028 bytes, e apresentam uma média de atraso na faixa entre 0,5 a 1 segundo na sua comunicação.

Os resultados das simulações mostram que há uma queda na qualidade do serviço a partir do momento em que a quantidade de dispositivos no sistema passa de 230. O atraso sentido na rede LTE para a comunicação de PMUs está dentro dos limites aceitáveis para esta aplicação, porém, conforme se aumenta a quantidade de dispositivos na rede, a maior probabilidade de colisões geradas no procedimento de acesso rândomico prejudica e pode até mesmo inviabilizar a comunicação. Além disso, é possível perceber que, apesar do RR não oferecer priorização de pacotes por categorias de QoS, os PMUs conseguem obter acesso à rede no tempo adequado, desde que tenham sido admitidos no acesso inicial. Portanto, as restrições à quantidade de dispositivos M2M conectados à rede se devem ao procedimento de acesso aleatório do LTE, que impede o sistema de atingir sua capacidade máxima, fato constatado teoricamente neste estudo.

3.2 Comunicação na Infraestrutura de Medição Avançada

A infraestrutura de medição avançada, ou AMI, é uma das principais aplicações *Smart Grid*. Isto porque sua rede de comunicação serve como base para várias outras aplicações, e também porque é uma das principais fontes de informação sobre o consumo de energia elétrica realizado pelos consumidores. Essas informações são utilizadas por várias outras aplicações, como geração distribuída de energia e Gerenciamento

da Rede de Distribuição, enquanto que a sua infraestrutura pode ser aproveitada, por exemplo, para as aplicações de Resposta à Demanda, carga de carros elétricos e acionamento remoto de corte e religamento de cargas. Fazem parte desta infraestrutura os sistemas de gerenciamento de dados de medição (em inglês, *Meter Data Management System* - MDMS), responsável pelo tratamento, validação e agrupamento dos dados dos consumidores, e o *Head-End System* (HES), que é responsável pela operação e coordenação dos componentes instalados na AMI.

A topologia de uma rede de comunicação AMI pode assumir diversas configurações, como pode ser visto na Figura 3.6. Os sistemas de controle da concessionária podem ser ligados diretamente ao HES, ou utilizar o MDMS, para que as informações sejam trabalhadas e validadas antes de serem utilizadas por estes sistemas. A rede WAN pode ser própria da concessionária, ou pública. Para a conexão entre as redes WAN e HAN, é utilizado o concentrador de dados (CD). Estes equipamentos podem agregar dados da ordem de centenas de medidores e geralmente se conectam à WAN via rede celular ou fibra ótica, devido à necessidade de largura de banda para transmitir a grande quantidade de informações coletada. Já na rede HAN, entre o medidor e o concentrador de dados, as tecnologias de acesso mais utilizadas são o PLC e RF Mesh. O primeiro é mais utilizado na Europa, enquanto que o segundo é mais utilizado nas Américas. Esta diferença se deve à topologia de rede de distribuição de energia presente nestes locais. Na Europa, os transformadores de média tensão/baixa tensão se encontram mais distantes dos consumidores, então o mesmo transformador atende à centenas de residências, tornando possível o uso de PLC. Já nas Américas, o transformador é instalado mais próximo dos consumidores, reduzindo a concentração de domicílios em uma mesma rede, e inviabilizando o uso de PLCs. De acordo com [Lichtensteiger et al. 2010], as redes RF Mesh trazem menor dependência sobre a topologia da rede de distribuição, e se utilizada na camada HAN, para conexão entre os concentradores de dados e medidores, cada concentrador pode coletar informações de centenas de medidores inteligentes.

A comunicação em uma aplicação de leitura remota de medidores geralmente en-

Topologia

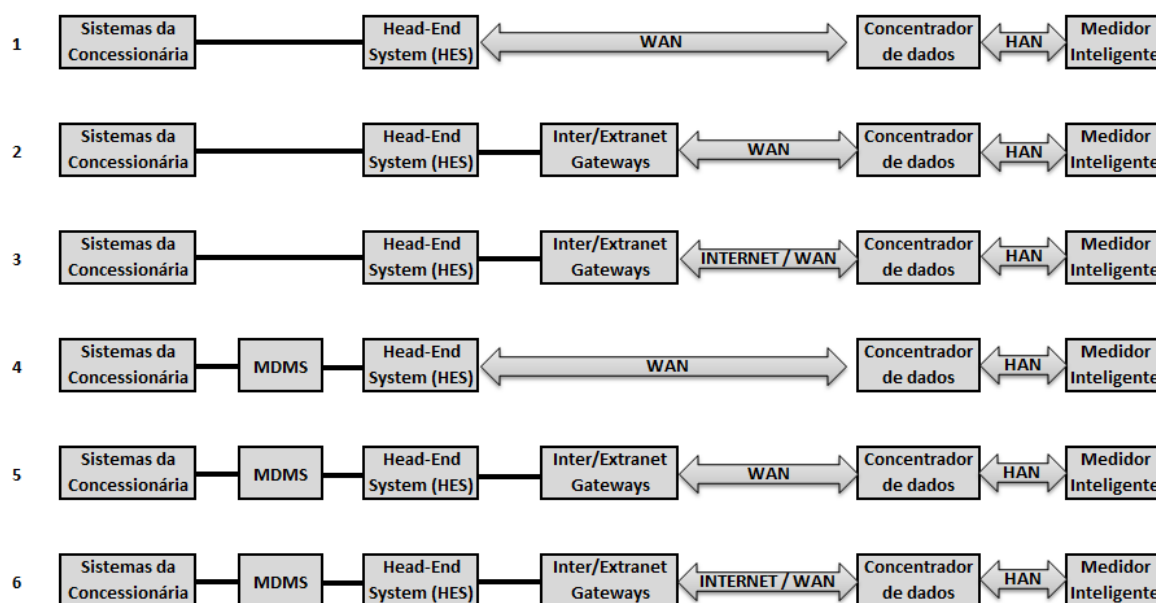


Figura 3.6: Tipos de topologias de comunicação para AMI [OpenSG Team 2012]

envolve dois fluxos distintos de mensagens. O mais frequente é o fluxo de informações de leituras dos medidores, enquanto que os menos frequentes são os fluxos de mensagens de comandos e alarmes. A recepção de dados dos medidores pode ocorrer de duas formas: Ou o HES envia uma solicitação de leitura, e o medidor a responde com os últimos valores lidos, ou o medidor está programado para enviar os dados em um período pré-definido de tempo, geralmente na faixa de 4 a 6 horas. Neste caso, o tráfego de dados é constante, e os requisitos de latência na comunicação não são rígidos, podendo chegar a 15 segundos.

3.2.1 Simulação de uma rede AMI

Para analisar se a rede LTE atende aos requisitos de comunicação entre concentradores de dados e o *Head End System* (HES), foram realizadas simulações computacionais no NS-3. Para montar um cenário de simulação de medição avançada próximo da realidade, foram coletados dados do censo demográfico de 2010 da cidade de Curitiba. Foi selecionado como base o bairro "Centro". Este bairro é o sexto mais populoso da cidade, com 37.283 habitantes, e possui 23.360 domicílios em uma área de 3,28

km^2 [IPPUC 2015]. Considerando um eNodeB cobrindo uma área de $1 km^2$, esta delimitação abrangeria 7.122 domicílios no bairro. Utilizando a mesma premissa de simulação de [Lichtensteiger et al. 2010], em que foram configurados 350 medidores para cada concentrador, tem-se para este cenário a necessidade de 21 concentradores de dados. Para avaliar a influência do tráfego de fundo em uma rede LTE comercial, foram configurados nós representando o uso de *smartphones*. A topologia desta rede está ilustrada na Figura 3.7. Neste cenário, não é analisada a comunicação entre medidores e concentradores de dados, pois o uso de comunicação celular na rede HAN não se mostra comercialmente atrativa.

Foram realizadas diversas simulações, alterando a quantidade de nós de tráfego de fundo, para avaliar como a disputa por recursos de rede LTE influencia a comunicação da rede AMI. A simulação foi repetida 10 vezes em cada cenário para se estabelecer o erro máximo no intervalo de confiança de 97,5%. O desvio padrão encontrado entre as 10 amostras para cada ponto simulado é na maioria das vezes baixo, então o intervalo de confiança ficou bem pequeno, aparecendo somente em alguns pontos do gráfico. Os parâmetros da simulação estão listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de simulação da rede AMI

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| Frequência | <i>Uplink</i> : 1920 MHz; <i>Downlink</i> : 2110 MHz |
| Largura de banda e duplexação | 10 MHz FDD |
| Posicionamento dos PMUs e UEs | Distribuídos uniformemente; Sem mobilidade |
| Posicionamento do eNodeB | Posicionamento fixo; Altura 30 m |
| Tráfego dos CDs (<i>uplink</i>) | UDP/IP; Pacotes de 1528 bytes com intervalo entre pacotes exponencial. Taxa de aprox. 300 bps |
| Tráfego de fundo UEs (<i>uplink</i>) | TCP/IP; Pacotes de 1046 bytes |
| Algoritmo de escalonamento no <i>uplink</i> | <i>Round Robin</i> |
| Algoritmo de escalonamento no <i>downlink</i> | <i>Proportional Fair</i> |
| Modelo de propagação | Modelo de perdas de Friis |
| Modelo de <i>fading</i> | Não há |

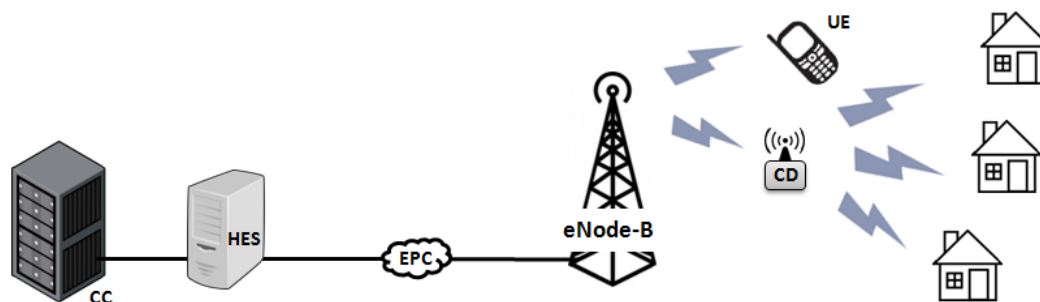


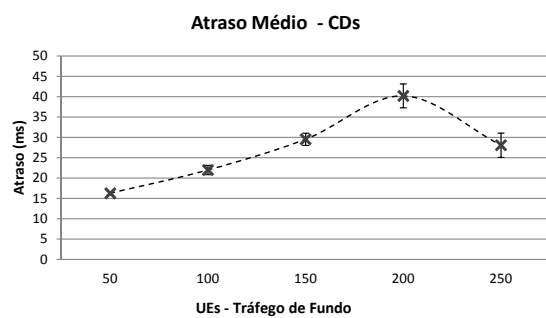
Figura 3.7: Topologia da rede simulada

3.2.2 Resultados e discussão

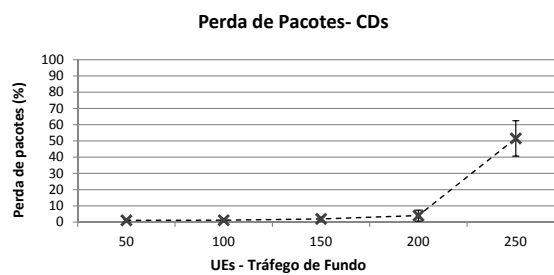
Nas Figuras 3.8 e 3.9 são apresentados os gráficos que resumem os resultados obtidos na simulação. A Figura 3.8 apresenta os gráficos de atraso, perda de pacotes, jitter e *throughput* relacionados à comunicação dos concentradores de dados da rede AMI. A Figura 3.9 apresenta a mesma análise, porém relacionada à comunicação do tráfego de fundo inserido na rede. Estes gráficos permitem verificar se houve diferença na qualidade da comunicação entre os dois tipos de tráfego de dados.

Pode-se perceber que a rede se comportou de maneira semelhante à rede de PMUs da seção 3.1.2, pois quando se aumenta a quantidade de dispositivos na rede, há um aumento exponencial na perda de pacotes, devido às colisões no procedimento de acesso randômico. Da mesma forma que na análise de comunicação de PMUs, os dados de fluxos que não conseguiram acesso à rede foram expurgados dos gráficos. A perda de pacotes se mantém estável e aceitável quando se tem até 150 UEs de tráfego de fundo, não passando de 2%. Nesta taxa a perda de pacotes pode ser contornável através de mecanismos de retransmissão configurados na camada de aplicação. A partir de 200 UEs de tráfego de fundo, esta taxa sobe para 4%, e com 250 UEs torna-se inaceitável, chegando a uma taxa de mais de 51%.

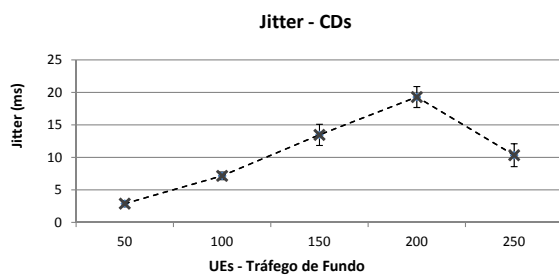
O *throughput* decresce conforme se aumenta a quantidade de UEs na rede, por consequência da perda de pacotes, porém mesmo no ponto mais baixo, onde o *throughput* é de 11 kbps, ele atende a necessidade dos 21 concentradores, que precisam de no mínimo 6,3 kbps para trafegar os dados.



(a) Média do atraso fim-a-fim



(b) Percentual de perda de pacotes



(c) Média do jitter

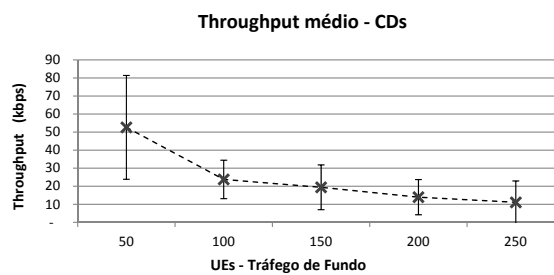
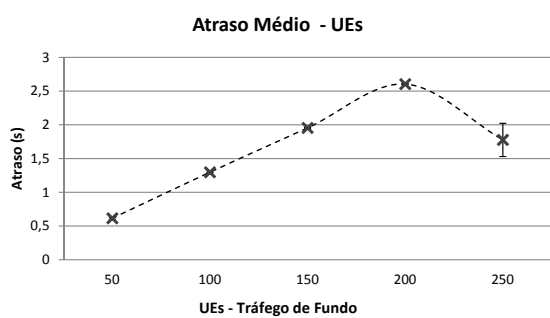
(d) Média do *throughput*

Figura 3.8: Resultados da comunicação dos concentradores de dados da rede AMI

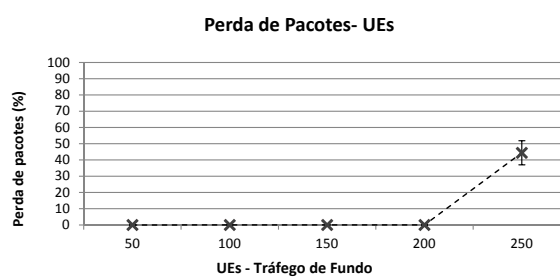
Com relação aos dados de atraso médio, os valores encontrados para a comunicação de concentradores de dados atenderam o requisito de atraso máximo de 15 segundos apresentado na tabela 2.1. Nota-se também que o atraso na comunicação dos pacotes dos concentradores de dados é bem menor se comparado ao atraso encontrado nos pacotes de dados do tráfego de fundo. Enquanto que nos CDs o atraso se encontra abaixo de 40 ms, no tráfego de fundo o atraso passou dos 2 segundos. Isso se deve à diferença do tipo de tráfego. Enquanto o tráfego dos concentradores de dados é via UDP, com transmissão exponencial com média de 41 segundos, o tráfego de fundo é feito por um gerador de tráfego TCP, enviando dados o mais rápido possível até que o *buffer* sature, a fim de manter um fluxo constante de dados. Como o escalonador *Round Robin* busca a justiça entre os usuários, o fluxo de comunicação dos concentradores de dados é mais rapidamente atendido quando solicita recursos, pois como o faz com menor frequência, tem um *buffer* menos ocupado. A queda no atraso a partir de 200 UEs de tráfego de fundo se deve ao fato de se ter expurgado da análise os fluxos que não conseguiram acesso à rede devido ao procedimento de acesso randômico. Sendo assim, os dispositivos que conseguiram acesso à rede se beneficiaram de uma menor concorrência dos recursos, e foram atendidos mais rapidamente.

O gráfico de jitter dos concentradores de dados acompanhou o comportamento do gráfico de atraso, tendo como ponto máximo o momento em que estavam conectados 150 UEs de tráfego de fundo à rede, chegando a 19 ms.

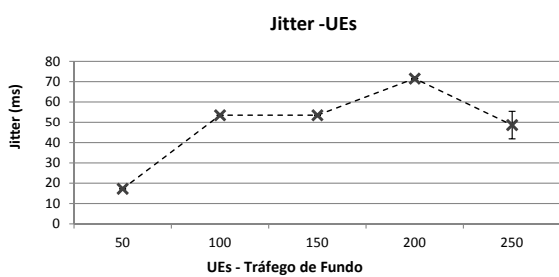
Como pode ser visto na Figura 3.9, as curvas dos gráficos que representam os parâmetros da comunicação de tráfego de fundo são muito semelhantes aos gráficos dos concentradores de dados, alterando-se basicamente a grandeza dos valores. O atraso médio neste caso ficou na ordem dos segundos, em vez de milissegundos, e o throughput apresentou curva muito semelhante, porém com valores mais elevados em relação aos concentradores de dados. Esta correspondência no comportamento dos dois tipos de fluxo demonstra que ambos sofreram com a limitação imposta pelo procedimento de acesso randômico.



(a) Média do atraso fim-a-fim



(b) Percentual de perda de pacotes



(c) Média do jitter

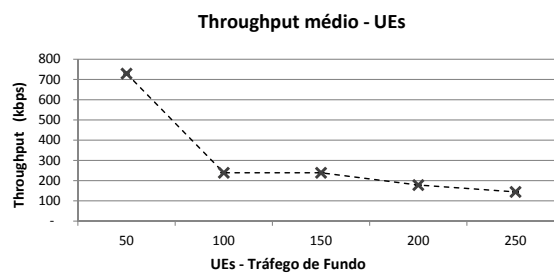
(d) Média do *throughput*

Figura 3.9: Resultados da comunicação do tráfego de fundo da rede AMI

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

A avaliação teórica realizada neste estudo aponta que é possível atingir os níveis de qualidade necessários na comunicação entre PMUs e para a medição inteligente, apenas limitando-se o número de usuários na rede LTE, sem a necessidade de utilização de algoritmos de escalonamento mais complexos. Mesmo utilizando o simples algoritmo *Round Robin* foi possível garantir uma comunicação com baixa latência na aplicação WAMS.

Outra contribuição deste estudo foi a apresentação da restrição imposta pelo procedimento de acesso randômico de uma rede LTE, limitando a quantidade de conexões em uma mesma eNodeB. Em uma comunicação com características M2M, esta restrição deve ser tratada antes de se iniciar qualquer trabalho relacionado à QoS através de algoritmos de escalonamento.

Se comparados os resultados das simulações realizadas para cada aplicação, verifica-se que o atraso médio na comunicação entre PMUs foi menor do que o atraso na comunicação de concentradores de dados da rede AMI. Isso ocorre por dois motivos: Primeiro porque o tamanho do pacote enviado pelos concentradores de dados é dezenove vezes maior que os enviados pelos PMUs, fazendo com que os concentradores percam mais tempo solicitando recursos ao eNodeB. Os PMUs, apesar de gerarem um tráfego mais frequente, não necessitam solicitar mais recursos do que o inicialmente reservado. Outro motivo é que o tráfego de fundo dos concentradores de dados foi transmitido por TCP, consumindo mais recursos de *uplink* com seus pacotes de controle de fluxo que o tráfego de fundo gerado por UDP. No entanto, em ambas as aplicações, o maior atraso ocorreu no momento em que a quantidade de tráfego estava entre 220 e 230 dispositivos conectados à rede, apontando para a mesma limitação relacionada ao procedimento de acesso randômico. Os resultados para a

taxa de perda de pacotes comprovam este fato, pois também foram muito similares. Quando o sistema estava operando na faixa de 270-280 UEs, a taxa foi de 62% para a aplicação de PMUs, e de 51% para os concentradores de dados AMI.

De acordo com as análises e resultados expostos, é possível concluir que o LTE é viável tecnicamente para uso nas aplicações de Infraestrutura de Medição Avançada e *Wide Area Management System*, desde que se limite a quantidade de usuários em uma mesma eNodeB. Comparado a tecnologias de comunicação como WiMax ou RF Mesh, o LTE apresentou qualidade de serviço superior.

Após garantido o acesso dos dispositivos na rede, é possível melhorar a qualidade da comunicação através dos algoritmos de escalonamento com estratégias de QoS, ou até mesmo através do uso de algoritmos semi-persistentes, devido à característica de comunicação com tamanhos de pacote e periodicidade pré-definidos. A limitação imposta pelo procedimento de acesso randômico é abordada em diversos outros estudos, e a busca por uma solução para a redução de colisões na solicitação de acesso à rede é um interessante tema para trabalhos futuros.

BIBLIOGRAFIA

- [3GPP 36.104 2008] 3GPP 36.104 (2008). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
- [3GPP 36.213 2008] 3GPP 36.213 (2008). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. TS 36.213, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- [3GPP TR 23.888 2012] 3GPP TR 23.888 (2012). System Improvements for Machine-Type Communications.
- [3GPP TR 37.868 2011] 3GPP TR 37.868 (2011). Study on RAN Improvements for Machine-type Communications.
- [Al-Khatib et al. 2014] Al-Khatib, O., Hardjawana, W., and Vucetic, B. (2014). Traffic modeling and performance evaluation of wireless smart grid access networks. In *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on*, pages 1876–1881.
- [Brown and Khan 2013] Brown, J. and Khan, J. Y. (2013). Key performance aspects of an LTE FDD based Smart Grid communications network. *Computer Communications*, 36(5):551–561.
- [Capozzi et al. 2013] Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., and Camarda, P. (2013). Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15(2):678–700.
- [Castro and Pedroso 2015] Castro, C. C. S. and Pedroso, C. M. (2015). Uso de Redes LTE para Comunicação de PMUs em Sistemas Smart Grid. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT2015)*.

- [Chenine and Nordstrom 2011] Chenine, M. and Nordstrom, L. (2011). Modeling and Simulation of Wide-Area Communication for Centralized PMU-Based Applications. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 26(3):1372–1380.
- [Ghosh et al. 2010] Ghosh, A., Zhang, J., Andrews, J. G., and Muhamed, R. (2010). *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 1st edition.
- [Gungor et al. 2013] Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., and Hancke, G. P. (2013). A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 9(1):28–42.
- [IEEE 2006] IEEE (2006). IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. *IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995)*, pages 1–57.
- [IPPUC 2015] IPPUC (2015). Nosso bairro: Centro. IPPUC - Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba.
- [Khan and Khan 2012] Khan, R. H. and Khan, J. Y. (2012). Wide area PMU communication over a WiMAX network in the smart grid. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, pages 187–192. IEEE.
- [Khan and Khan 2013] Khan, R. H. and Khan, J. Y. (2013). A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, 57(3):825–845.
- [Laya et al. 2014] Laya, A., Alonso, L., and Alonso-Zarate, J. (2014). Is the random access channel of LTE and LTE-A suitable for M2M communications? a survey of alternatives. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 16(1):4–16.
- [Lichtensteiger et al. 2010] Lichtensteiger, B., Bjelajac, B., Mueller, C., and Wietfeld, C. (2010). Rf mesh systems for smart metering: System architecture and performance.

In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pages 379–384.

[OpenSG Team 2012] OpenSG Team (2012). Smart Grid Networks System Requirements Specification .

[Subramanian and Sandrasegaran 2014] Subramanian, R. and Sandrasegaran, K. (2014). RACH Congestion in Vehicular Networking. *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, 6(5):153–164.

[U.S. Department of Energy 2010] U.S. Department of Energy (2010). Communication requirements of smart grid technologies. Technical report, Department of Energy, USA.

[Zhenqi et al. 2013] Zhenqi, S., Haifeng, Y., Xuefen, C., and Hongxia, L. (2013). Research on uplink scheduling algorithm of massive M2M and H2H services in LTE. In *Information and communications technologies (IETICT 2013), IET international conference on*, pages 365–369. IET.