

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

IUDY MAKINO

**DESEMPENHO DE SISTEMAS *SMART GRID* SOB PLATAFORMA DE
TRANSMISSÃO LTE**

CURITIBA

2013

IUDY MAKINO

**DESEMPENHO DE SISTEMAS *SMART GRID* SOB PLATAFORMA DE
TRANSMISSÃO LTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, Ênfase em Telecomunicações/Eletrônica, à Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Carlos Marcelo Pedroso.

CURITIBA

2013

IUDY MAKINO

Título: DESEMPENHO DE SISTEMAS *SMART GRID* SOB PLATAFORMA DE TRANSMISSÃO LTE.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações/Eletrônica, à Universidade Federal do Paraná.

Data: 02 de agosto de 2013

Prof. Dr. Carlos Marcelo Pedroso

Orientador

Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro

Prof. M. Sc. Waldomiro Yuan

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, pela ciência e conhecimento que me permitiu adquirir, à minha família que sempre me apoia em minhas decisões, aos amigos que me alegam nas horas mais difíceis e à minha namorada pelo carinho enorme perante a mim.

Agradecimentos

Aos meus pais, minhas referências, Carlos e Aparecida, por toda dedicação, todo o amor e por não pouparem esforços para minha formação.

Ao Professor Carlos Pedroso pelo seu empenho e pela oportunidade de desenvolver esse trabalho sob sua orientação.

A minha namorada Renata Romano pelo enorme apoio, compreensão pelas horas ausentes e por sempre demonstrar entusiasmo com o resultado deste trabalho. Seu apoio foi imprescindível para eu nunca deixar de acreditar.

Ao meu irmão pelo apoio e compreensão nas horas mais difíceis.

Aos meus verdadeiros amigos por fazerem desses cinco anos de faculdade, os melhores.

A Deus, por tudo!

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do sistema LTE (Long Term Evolution) como plataforma de comunicação de redes *smart grid*. Esses sistemas, também denominados redes inteligentes, visam proporcionar uma modernização e um aumento na eficiência energética dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Deseja-se determinar se o LTE, quanto submetido ao perfil de tráfego previsto para redes *Smart Grid*, é capaz de suportar as necessidades de comunicação e, assim, produzir uma avaliação quantitativa sobre os limites operacionais da rede de transmissão.

Palavras-Chave: *Smart grid*; LTE; distribuição de energia elétrica; tráfego de dados

Abstract

This study aims to evaluate the system performance LTE (Long Term Evolution) as a communication platform for *smart grid* networks. These systems are designed to provide energy efficiency in distribution systems of electric power. The goal is to evaluate the performance of LTE, submitted to traffic pattern of *smart grid* systems. The study was performed using network simulation and the results provide a quantitative analyze on the operational limits of using LTE for smart grid system communications.

Key Words: *Smart grid*; Long Term Evolution; electric power distribution; communication networks.

Lista de Figuras

Figura 1 – Visão hierárquica da infraestrutura Smart Grid	19
Figura 2 – Infraestrutura de Comunicação de uma rede Smart Grid.....	21
Figura 3 – Casos típicos de comunicações em Redes Inteligentes	23
Figura 4 – Desafios da Tecnologia LTE	26
Figura 5 – Valores de Throughput e Latência para LTE e HSPA.....	26
Figura 6 – Arquitetura de rede do sistema LTE.....	28
Figura 7 – Overview do modelo de simulação LTE-EPC	32
Figura 8 – Cenário Básico para Simulação	33
Figura 9 - Cenário A - Modelo de Tráfego sem interferência.....	34
Figura 10 – Disponibilização de Agregadores de Dados – Cenário A.....	35
Figura 11 – Cenário B - Modelo de Tráfego com interferência - 1 NB.....	36
Figura 12 – Cenário C - Modelo de Tráfego com interferência – 10 NB.....	37
Figura 13 – Disponibilização de Agregadores de Dados – Cenário B e C	38
Figura 14 – Simulação Cenário B, Intervalo 2, 10 DAU's.....	52
Figura 15 – Medições do Cenário A – Intervalo 1	53

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 1.....	41
Gráfico 2 - Medições de DELAY – Intervalo 1	41
Gráfico 3 - Medições de JITTER – Intervalo 1.....	41
Gráfico 4 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 2.....	44
Gráfico 5 – Medições de DELAY – Intervalo 2	44
Gráfico 6 – Medições de JITTER – Intervalo 2.....	45
Gráfico 7 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 3.....	47
Gráfico 8 – Medições de DELAY – Intervalo 3	47
Gráfico 9 – Medições de JITTER – Intervalo 3.....	47
Gráfico 10 – Medições de <i>Lost Packets</i>	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características e Benefícios do Smart Grid.....	17
Tabela 2 – Tabela de domínios de uma rede Smart Grid.....	18
Tabela 3 – Associação Modelo GWAC stack x Modelo OSI	20
Tabela 4 – Características de mensagens para Smart Meters.....	24
Tabela 5 – Tabela das Taxas de Transmissão – LTE	27
Tabela 6 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 1	39
Tabela 7 – Medições de DELAY – Intervalo 1	40
Tabela 8 – Medições de JITTER – Intervalo 1	40
Tabela 9 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 2	42
Tabela 10 – Medições de DELAY – Intervalo 2.....	43
Tabela 11 – Medições de JITTER – Intervalo 2	43
Tabela 12 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 3	45
Tabela 13 – Medições de DELAY – Intervalo 3.....	46
Tabela 14 – Medições de JITTER – Intervalo 3	46
Tabela 15 – Medições de <i>Lost Packets</i>	48
Tabela 16 – Valores de Intervalo de Confiança - Throughput	51
Tabela 17 – Valores de Intervalo de Confiança – Delay	51
Tabela 18 – Valores de Intervalo de Confiança – Jitter	51
Tabela 19 – Análise quantitativa de DAU's	54

LISTA DE SIGLAS

LTE – *Long Term Evolution*

4G – *4th Generation*

NS3 – *Network Simulator 3*

NIST - *National Institute of Standards and Technology*

AMI - *Advanced Metering infrastructure*

GWAC - *GridWise Architecture Council*

OSI – *Open System Interconnection*

DAU – *Data Aggregator Unit*

SM – *Smart Metes*

MDMS - *Meter Data Management System*

SANET - *Sensor-Actuator Network*

3GPP - *3rd Generation Partnership Project*

W-CDMA - *Wideband Code Division Multiple Access*

HSPA - *High Speed Packet Access*

UL - *Uplink*

DL - *Downlink*

ITU - *International Telecommunication Union*

RB – *Resource Block*

EPC - *Evolved Packet Core*

UE – *User Equipament*

E-UTRAN - *Evolved Universal Terrestrial Radio. Access Network*

M2M – *Machine-to-Machine*

QoS – *Quality of Service*

SGW – *Serving Gateway*

PGW – *Packet Data Network Gateway*

ENB – *Evolved NodeB*

MME - *Mobility Management Entity*

UDP - *User Datagram Protocol*

FTP - *File Transfer Protocol*

CBR - *Constant Bit Rate*

TCP - *Transmission Control Protocol*

IC – *Intervalo de Confiança*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO	15
1.3	ESTRUTURA	15
2	ESTADO DA ARTE	16
2.1	<i>SMART GRID</i>	16
2.1.1	<i>Infraestrutura de Comunicação</i>	18
2.1.2	<i>Smart Meter – Medidores Inteligentes</i>	22
2.2	LTE – LONG TERM EVOLUTION	25
2.2.1	<i>Arquitetura de rede</i>	28
2.3	LTE: PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO PARA SMART GRID	29
3	SIMULAÇÃO	31
3.1	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	31
3.2	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	32
3.2.1	<i>Modelo sem interferência de tráfego de fundo – Cenário A</i>	34
3.2.2	<i>Modelo com interferência de tráfego de fundo – Cenário B e C</i>	36
3.3	PARÂMETROS	38
4	RESULTADOS	39
4.1	INTERVALO 1	39
4.2	INTERVALO 2	42
4.3	INTERVALO 3	45
4.4	PERDA DE PACOTES	48
4.5	INTERVALO DE CONFIANÇA	49
4.6	ANÁLISE	52
5	CONCLUSÃO	55
6	REFERÊNCIA	57
7	APÊNDICE A – SCRIPT PARA SIMULAÇÃO	59

1 INTRODUÇÃO

É notável o aumento da demanda de energia elétrica em todo o mundo nos últimos anos e diversos fatores vem contribuindo para que o nível do consumo de energia elétrica aumente cada vez mais, principalmente em países que vem se desenvolvendo, como o Brasil. Especificadamente neste país, influenciado principalmente pelo fortalecimento da economia nacional, estima-se que a demanda de energia aumentou cerca de 4,5% de 2012 para 2013[1]. Devido a este fator, além da depleção de fontes primárias de energia e diversas outras causas, a rede de energia elétrica no país está cada vez mais congestionada e vista como incapaz de suportar as demandas energéticas futuras. Em busca de encontrar soluções para o contínuo aumento do consumo de energia elétrica no país, muitos estudos vem sendo elaborados visando uma modernização nas redes de transmissão de eletricidade, assim como uma forma de aumentar a eficiência energética na rede elétrica.

A idéia de promover o desenvolvimento de uma rede inteligente que pudesse mudar as antigas premissas de gerenciamento e eficiência de energia elétrica foi iniciada por volta do ano de 2005 na Europa e nos Estados Unidos, e foi denominada *Smart Grid* [2]. Esse sistema se baseia no conceito de automatização da rede de distribuição de energia elétrica, atuando sob uma forma que proporciona ao usuário monitorar e manusear o uso da própria eletricidade em tempo real. O maior propósito desta rede inteligente é de modernizar o sistema elétrico, permitindo um fluxo bidirecional de energia e informações entre consumidor e concessionária, assim como um aperfeiçoamento do gerenciamento de informações da rede.

Este fluxo bidirecional de informações proporciona uma participação mais ativa, por parte do consumidor, na rede, aumentando seu poder de controle da energia elétrica através de informações, em praticamente tempo real, sobre o consumo de eletricidade e seu custo associado[3]. Devido a essa infra-estrutura de comunicações desejada, o *smart grid* irá incrementar na rede elétrica os benefícios de uma rede inteligente de comunicações, capaz de fornecer um sistema de balanceamento e fornecimento de eletricidade da maneira mais eficiente possível.

O sistema *smart grid* pode ser considerado como uma rede de vários sistemas e sub-sistemas interconectados inteligentemente, oferecendo assim uma energia elétrica de confiança e baixo custo que seja capaz de atender ao crescimento da demanda. A implementação de uma moderna infra-estrutura de comunicação para redes inteligentes tem como objetivo aumentar a confiabilidade, a segurança, a interoperabilidade e principalmente a eficiência da rede de energia elétrica[3].

Este trabalho avalia o desempenho da tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) como plataforma de comunicação de redes *Smart Grid* para distribuição de energia elétrica. O desempenho do sistema foi avaliado através de testes utilizando simulações computacionais. Com isso, foi possível realizar uma avaliação quantitativa deste sistema integrado, em termos de quantidade de agregadores de tráfego em relação a uma determinada taxa de amostragem de dados em diversos cenários de simulação.

1.1 Justificativa

A utilização da tecnologia LTE como plataforma de comunicação para redes inteligentes de distribuição de energia elétrica é visto como uma solução bastante inovadora, isso porque, atualmente, seu uso é voltado principalmente como plataforma para sistemas de telefonia móvel, também conhecidos como 4G. Esta integração do sistemas LTE nas redes *Smart Grid* apresenta vantagens que veêm para aprimorar a qualidade da rede de distribuição de energia, como aumento da confiabilidade do sistema e melhor gerenciamento de informações.

Além disso, a implementação da plataforma LTE para redes inteligentes pode beneficiar concessionárias de energia elétrica, pois o controle e manutenção do sistema podem ser feitos por uma operadora de telefonia, já que a infraestrutura do sistema 4G pode ser compartilhado entre sistemas *Smart Grid* e sistemas de telefonia móvel.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da implementação da tecnologia LTE como plataforma de comunicação de redes inteligentes, *Smart Grid*, para concessionárias do sistema elétrico. Através de simulações do desempenho de um sistema de transmissão sob plataforma 4G, quando submetido a um perfil de tráfego de redes inteligentes, foi possível realizar uma análise quantitativa do número de agregadores de tráfego que podem ser implantados no sistema de acordo com a taxa de amostragem desejada. Cenários com configurações compatíveis a determinado modelo de perda também foram realizadas, com o objetivo de reproduzir situações de tráfego de fundo de ambiente urbano.

1.3 Estrutura

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo este primeiro o introdutório. O capítulo 2 foi designado apresentar os conceitos teóricos necessários, principalmente a respeito das características dos dois principais temas deste projeto: *Smart Grid* e LTE.

O capítulo 3 apresenta o software utilizado para as simulações, *Network Simulator* – NS3, além de apresentar os diferentes cenários de simulações utilizados. No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos nas respectivas simulações, através de tabelas e gráficos. A partir desses dados adquiridos, fez-se a análise e as conclusões sobre os gráficos obtidos, além realizar as análises quantitativas. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, apresentando uma visão geral, a partir dos dados obtidos e mostrados no capítulo anterior, do sistema LTE como plataforma de comunicação para sistemas *Smart Grid*.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 SMART GRID

Definido também como redes inteligentes, o *Smart Grid* foi uma oportunidade de utilizar a evolução das tecnologias da informação e comunicação (ICT) para revolucionar as redes de distribuição de energia elétrica no mundo[2]. A inovação dos sistemas de comunicação, impulsionado particularmente pelo avanço da *internet*, possibilitou uma melhora no monitoramento e no controle do desempenho dos sistemas de eletricidade e, assim, oferecendo uma maior eficiência, flexibilidade e menores custos de operação.

Não há uma única definição para o termo *Smart Grid*. O conceito de redes inteligentes é baseado na combinação de diversas tecnologias, cujo objetivo é fornecer as melhores soluções de distribuição de energia elétrica para os consumidores. Segue abaixo algumas definições do termo “*Smart Grid*”.

- De acordo com a *European SmartGrids Technology Platform*[4]:

“O Smart Grid é uma rede de eletricidade que pode, inteligentemente, integrar todos os usuários conectados a ela (geradores, consumidores e aqueles que fazem ambos) com o objetivo de entregar de forma eficiente uma energia sustentável, econômica e segura.”

- De acordo com o *U.S. Department of Energy*[5]:

“O smart grid utiliza uma tecnologia digital para melhorar a confiabilidade, segurança e a eficiência (tanto econômica quanto a energética) do sistema elétrico de grande geração, através de sistemas de distribuição de eletricidade aos consumidores e do crescimento do número de geração-distribuída e armazenamento de recursos”.

- De acordo com o *Department of Energy and Climate Change*[6]:

“O smart grid utiliza sensores, processos aperfeiçoados e comunicação digital para propiciar uma rede elétrica que possa ser observável, controlável, automatizável e totalmente integrada (interoperabilidade com sistemas já existentes e a capacidade de incorporar novas fontes de energia).”

A rede inteligente, desenvolvida por volta do ano de 2005, passou a ser vista como principal solução para a rede de distribuição de energia elétrica devido a

fatores como o grande crescimento da demanda de eletricidade nos pontos consumidores, além da rápida diminuição do número de fontes primárias de energia e da não-confiabilidade que o sistema apresenta.

Uma das principais características que torna o *Smart Grid* uma rede de distribuição mais inteligente que a atual é o fato de integrar ao seu sistema um fluxo bi-direcional de informações, juntamente com a eletricidade, pelo qual pode fornecer ao consumidor uma efetiva e controlada geração e utilização da energia elétrica. Este fluxo da informação de dois sentidos possibilita a participação ativa do usuário, do qual poderá controlar e gerenciar o próprio consumo de eletricidade através de informações sobre custos e demanda em tempo real. Além desta característica, o sistema *Smart Grid* também garante e amplia confiabilidade ao sistema elétrico, promovendo a segurança da rede ao ser resiliente a distúrbios, ataques e desastres naturais no sistema. Antecipações e respostas a distúrbios no sistemas, através de manutenções preditivas e *self-healing*, são maneiras que as redes inteligentes utilizam para reforçar a segurança no fornecimento de energia[7]. A Tabela 1 apresenta algumas das principais características e benefícios do *Smart Grid*.

Tabela 1 – Características e Benefícios do Smart Grid

SMART GRID	
CARACTERÍSTICA	BENEFÍCIOS
Self-healing	Capacidade de, rapidamente, detectar, analisar, responder e restaurar uma falta ou falha no sistema.
Consumer Friendly	Habilidade de envolver o consumidor em processo de decisões a respeito da rede elétrica.
Alta Confiabilidade e Qualidade de energia	Habilidade de fornecer energia continuamente.
Resistência a ataques cibernéticos	Habilidade de ser imune e proteger o sistema contra ataques físicos e cibernéticos.
Dispõe de todas as opções de geração e armazenamento	Habilidade de adaptar a qualquer tipo de fonte de geração de energia e dispositivos de armazenamento.
Otimização de recursos	Habilidade de monitorar e otimizar os capitais, minimizando as operações e os custos de manutenção.
Permitir novos mercados	Oferta de novas fontes de energia para os consumidores.

Fonte: Referência [3].

2.1.1 Infraestrutura de Comunicação

Com o desenvolvimento das redes inteligentes surge também alguns desafios, tanto técnicos como processuais para a implantação da rede. Por exemplo, as redes inteligentes devem oferecer sistemas de comunicação bastante seguros e confiáveis, suficientes para aguentar diversos tipos de tecnologias diferentes. Além disso, os equipamentos inteligentes da rede e as técnicas de gerenciamento de dados devem ser robustos e escaláveis para suportar as aplicações a serem inventadas futuramente. Por último é necessário, também, que o *Smart Grid* possua dispositivos e sistemas com interoperabilidade suficiente para interagir entre a nova e a já existente rede elétrica.

Para entendimento da interoperabilidade que o *Smart Grid* deve atender, o Instituto de Normas e Tecnologias do Estados Unidos (NIST) desenvolveu um modelo conceitual, que atualmente é utilizado por diversas Instituições, pelo qual é visto como base para descrever, discutir e desenvolver a arquitetura final do *Smart Grid*. Este modelo é dividido em sete domínios diferentes, apresentados na Tabela 2, de forma que é possível identificar todos os *stakeholders* das redes inteligentes, ou seja, os grupos mais interessados, assim como, todas as interfaces de comunicação que o sistema possui e suas respectivas aplicações.

Tabela 2 – Tabela de domínios de uma rede Smart Grid

	Domínio	Aplicação	Interface de Comunicação
1	Cliente	Usuários finais de eletricidade	2,5,6,7
2	Distribuição	Controle e automação de subestações	1,3,5,6
3	Transmissão	Sistemas de monitoramento e controle	2,4,6
4	Geração	Geração de energia e gerenciamento de custos	3,5,6
5	Mercado	Comércio e varejo	1,2,3,4,6,7
6	Operação	Monitoramento e controle da rede	1,2,3,5,7
7	Operadoras	Monitoramento e manutenção para clientes	1,5,6

Fonte: Referência [3].

Uma visão hierárquica das redes inteligentes pode ser feito de acordo com os domínios estudados no NIST. Na Figura 1 segue um esboço da arquitetura hierárquica da rede *Smart Grid* e alguns exemplos de tecnologias e componentes associados. Percebe-se que cada domínio interage-se com classes vizinhas; essa interação é possível graças a um modelo de infraestrutura denominado AMI (Infraestrutura de Medição Avançada), do qual permite um fluxo de informação e de energia de duplo sentido, contribuindo para a gestão de demanda e distribuição de energia elétrica.

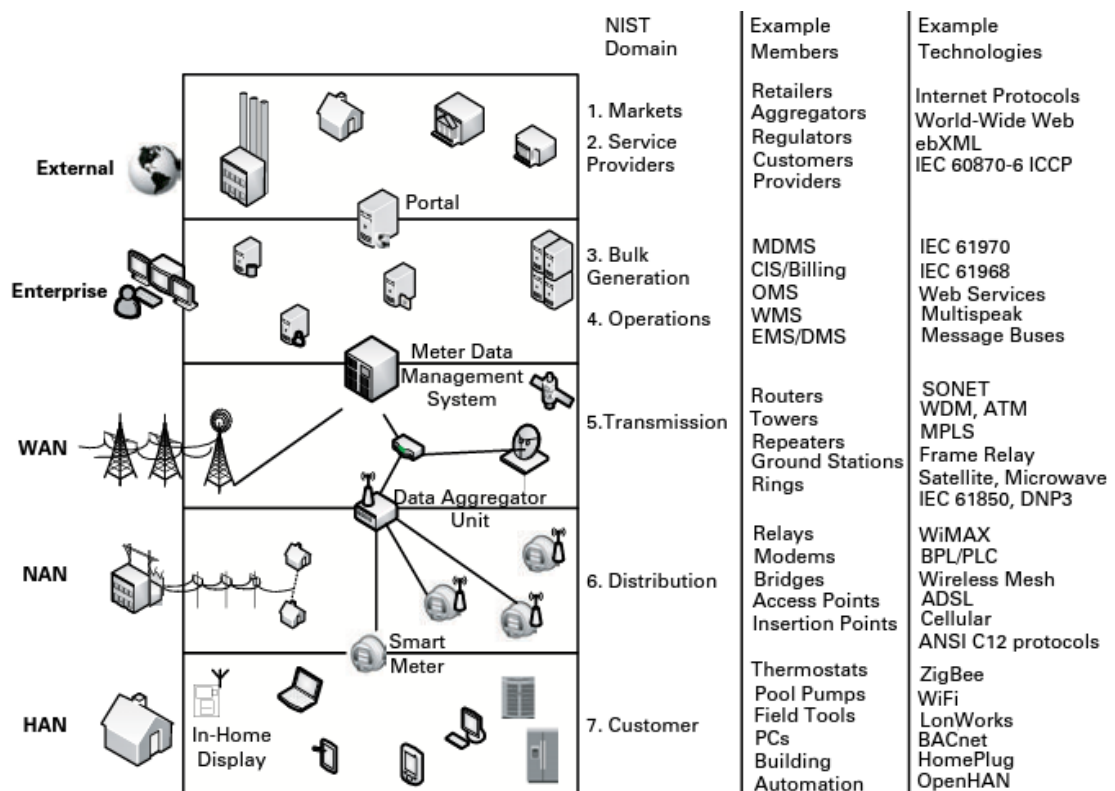


Figura 1 – Visão hierárquica da infraestrutura Smart Grid

Fonte: Referência [3].

A função de interoperabilidade é uma questão muito importante no horizonte do *Smart Grid*, já que é responsável pela permissão do fluxo e a troca de informações na rede elétrica sem intervenções para os usuários. O principal objetivo desta interoperabilidade é oferecer uma habilidade de “*plug-and-play*” na rede, onde um dispositivo pode ser configurado automaticamente no sistema e comece a operar simplesmente ao ser ligado[3].

De forma a visualizar melhor as necessidades desse sistema de interoperabilidade, o Conselho de Arquitetura *GridWise* (GWAC) desenvolveu um modelo de abordagem de caracterização conhecido como “GWAC Stack”[8]. Este modelo identifica oito categorias de interoperabilidade que são relevantes na integração de diferentes sistemas das redes inteligentes. Essas oito categorias estão divididas em três gamas:

- Organizacional: Política regulatória; Objetivos e procedimentos de negócios (Pragmática).
- Informação: Contexto de negócios; troca de informações (Semantica).
- Técnica: Formato da informação; Camadas conectadas (Sintaxe).

É importante ressaltar que cada camada do modelo GWAC Stack define uma questão de interoperabilidade que pode permitir a flexibilidade de outras camadas, ou seja, cada camada depende da camada superior, e são dependência para camadas inferiores. Na

Tabela 3 é possível observar uma associação das camadas do modelo GWAC stack com o Modelo de sete camadas de comunicação - Modelo OSI[9] – assim como suas funções.

Tabela 3 – Associação Modelo GWAC stack x Modelo OSI

MODELO OSI	GWAC Stack	Funções	Interoperabilidade
7. Aplicação	3. Interoperabilidade Sintática - Entendimento de dados - Estrutura das mensagens - Intercâmbio entre sistemas	- Transporte de dados de um formato para outro. - Mensagem de estrutura de conteúdo. - Padrão de troca de mensagens Exemplos: HTML, XML, ASN.1.	- Compartilhamento de entendimento de conteúdo. - Identificação de recursos. - <i>Plug & Play</i> - Tempo de sincronização e sequenciamento. - Qualidade de serviço (QoS) - Segurança & Privacidade - Escalabilidade
6. Apresentação			
5. Sessão	2. Interoperabilidade de Rede - Intercâmbio entre sistemas - Sistema integrado com diversas redes	- Transporte de endereços lógicos e nome dentro de endereços físicos. - Transparência e confiabilidade na transferência de dados entre sistemas diferentes. - Transferência de dados entre fontes e destino através de redes intermediárias. - Gerenciamento de congestionamento de rede. - Gerenciamento de entrega de mensagem. Exemplos: FTP, TCP, UDP, IP	
4. Transporte			
3. Rede			
2. Enlace	1. Conectividade Básica Mecanismo para estabelecimento Físico e Lógico Conexão de sistemas	- Conectividade elétrica e acesso a media Hardware. - Transferência de dados entre nós - Codificação, transmissão, recepção, decodificação e correção de erros Exemplos: Ethernet, Wi-fi, Frame Relay	
1. Física			

Fonte: Referência [3].

Redes inteligentes requerem arquiteturas dinâmicas, algoritmos inteligentes e mecanismos eficientes para se desenvolver continuamente. Para isso, uma grande gama de tecnologias devem ser postas em operação como por exemplo tecnologias de comunicação, sensores, medidores e sistemas de controle avançado. A implementação dessas tecnologias é o fator chave para a criação de uma dinâmica e interativa infraestrutura que irá integrar todos os sentidos, *upstream* (sentido gerador) e *downstream* (sentido consumidor), de forma que ambos trabalhem de forma unificada. Considerando a sigla “A” para os atuadores, a sigla “S” para os sensores, “SM” para os medidores inteligentes, “DAU” para os agregadores de dados, “R” para os roteadores e “MDMS” o sistema de gestão de medição de dados, a Figura[2] apresenta uma completa infraestrutura de comunicação do *Smart Grid* integrada com as redes Core e a as conexões *last mile*, seguida pela explicação das camadas presentes na ilustração.

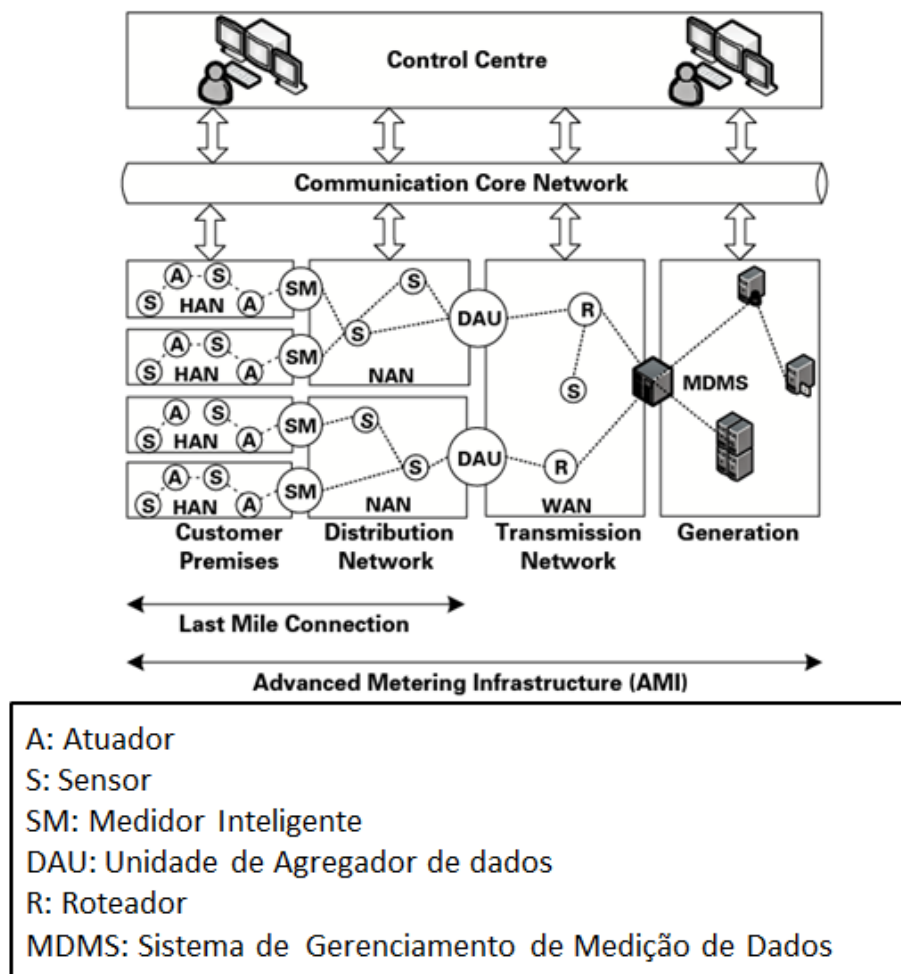


Figura 2 – Infraestrutura de Comunicação de uma rede Smart Grid
Fonte: Referência [3].

- Premissas do consumidor: Refere-se a casas, construções e indústrias, onde estão os consumidores da cadeia hierárquica. A principal função desses usuários é gerenciar e reduzir seus consumos de energia elétrica. O sistema de gerenciamento de energia elétrica (EMS) vem surgindo como uma solução para resolver o problema de consumo de energia desnecessária, oferecendo um monitoramento e um controle de aplicações elétricas usando vários sensores, atuadores e tecnologias de comunicação na rede;
- Núcleo da rede de comunicação: O núcleo *core* da rede *smart grid* fornecerá toda comunicação necessária para efetivar a comunicação de duplo sentido da rede. A infraestrutura AMI utilizada neste núcleo da rede, tem como principal objetivo oferecer um melhor controle e gerenciamento do consumo de energia elétrica;
- Comunicação *Last-Mile*: Essa rede refere-se a entrega da conectividade das operadoras até o consumidor, ou seja, a rede de acesso do sistema. No caso do sistema *smart grid*, a comunicação *last-mile* significa a conectividade da subestação e das premissas dos clientes até o núcleo da rede de alta velocidade;
- Centro de Controle: Este centro é necessário para agregar todos os dados coletados durante as diversas partes da rede. Para promover um controle avançado da rede, proteção e medidas em tempo real, a rede utilizará um sistema denominado WAMS (*wide-area measurement system*), que pode ser integrado com o SCADA;
- SANET: Sensores e atuadores da rede (SANET) é uma rede heterogênea que consiste em diversos nós, dos quais podem ser atuadores, sensores ou ambos. Esses dispositivos são utilizados para o monitoramento das características e comportamentos dos dispositivos inteligentes, prevenindo falhas e distúrbios na rede.

2.1.2 Smart Meter – Medidores Inteligentes

Smart meters (SM) são medidores digitais inteligentes que, nas redes *Smart Grid*, são os dispositivos responsáveis pela recepção e transmissão dos dados de consumo dos usuários para a rede elétrica. Esses aparelhos são instalados nos pontos terminais da rede e, conectados à rede IP, recebem e armazenam todas as informações do consumo de energia dos equipamentos eletrônicos existentes. Os medidores inteligentes são conectados à rede elétrica através de um meio de transmissão suficientemente eficiente para suportar as demandas de tráfego dos SM's.

A Figura 3 ilustra e detalha alguns casos de transmissão de informações de medidores inteligentes até os centros de rede de uma Operadora, e vice-versa.

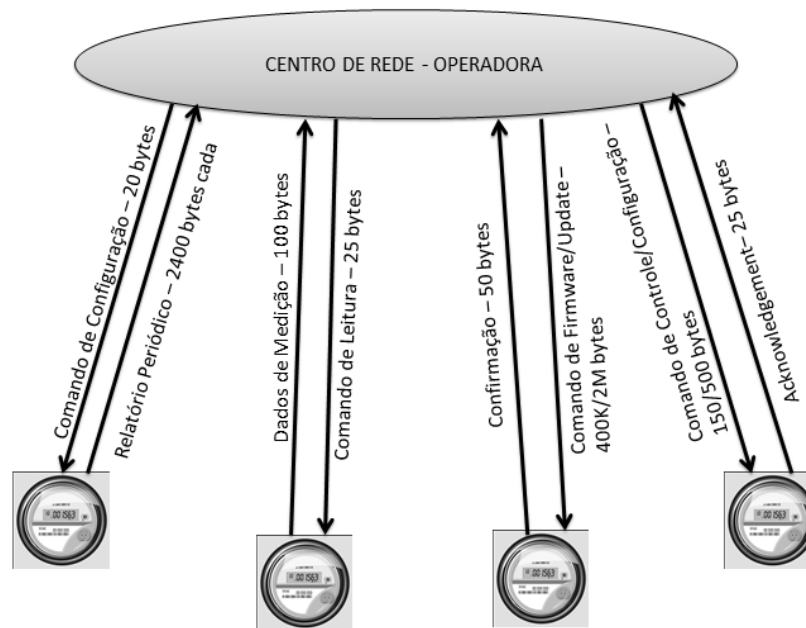


Figura 3 – Casos típicos de comunicações em Redes Inteligentes
 Fonte: Referência [3].

Dentre as principais mensagens que os *smart meters* mandam para a rede elétrica, estão:

- Leitura de medição em vários intervalos: O medidor é configurado pela rede para enviar relatórios de medição de dados dos consumidores cerca de 4 a 6 vezes ao dia, sendo que cada relatório consiste em uma lista de várias medições. Conforme Figura 3, os comandos de configuração dos medidores inteligentes, requeridos pela rede, é de cerca de 25 *bytes*, enquanto os relatórios periódicos, enviados para a rede, são de cerca de 2400 *bytes* cada. Como os relatórios enviados não são informações transmitidas em tempo real, não há a necessidade de baixa latência para a rede de transmissão. Considera-se uma taxa de confiabilidade desse caso em 98%, esta taxa refere-se ao número de mensagens entregues com sucesso à rede;
- Medição de leitura *on-demand*: Neste caso, o medidor inteligente recebe uma mensagem da rede para enviar uma leitura imediata de dados, e espera-se uma resposta do *smart meter* em tempo real, ou seja, em menos de 5 segundos. A medição pode ser enviada à rede em um pacote de 100 *bytes*;
- Atualização: A rede pode vir a enviar comandos de atualização *Firmware* para os medidores inteligentes que ocasionalmente apresentarem alguns problemas ou requerirem aprimoramentos de recursos. Essas atualizações,

que podem vir a ocorrer em uma média de 2 vezes por ano, podem ter tamanhos de até 2 *MegaBytes*. Os pedidos de atualização nos medidores inteligentes podem ser enviados de duas formas: *Point-to-Point* ou *Multicast*. No primeiro caso, o comando de atualização é solicitado a um específico *smart meter*, e admite-se uma latência de 4 horas. No caso de atualização *multicast*, o pedido pode ser solicitado por até 100 mil medidores inteligentes, e tolera-se uma latência de até 7 dias;

- **Distribuição Automatizada:** A rede envia remotamente diversos comandos para os dispositivos de distribuição para trocar suas configurações ou controlar suas operações em tempo real. Esta tarefa é uma das mais importante no setor de comunicações, e requer latências pequenas, menores que 1 segundo. Esses comandos que os medidores inteligentes recebem podem ter de 150 a 500 bytes, e assim que os *smart meters* recebem os comandos, eles retornam uma mensagem de 25 bytes de confirmação para a rede de operações.

Essas e outras trocas de mensagens que devem ser feitas entre rede e medidores inteligentes, assim como seus respectivos tempos de latência, suas frequências e suas taxas de confiabilidade, são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características de mensagens para Smart Meters

Use Cases:	Distribution Automation – Volt/VAR Centralized Control	Multi-Interval Meter Reading	On-Demand Meter Reading	Firmware/Program Updates	Outage Management	Service Switch ²	DR–Direct Load Control	Real-Time Pricing
Latency	< 1 sec per message	< 4 hours	< 5 sec per message	P2P: < 4hrs per meter. Broadcast/ Multicast: <7 days per 100,000 meters	< 5 sec per message	< 30 sec per message	< 5 sec per message	< 5 sec per message
Interval	CBC op: 1 per 12hr CBC config.: 1 per wk Reclosure config.: 1 per wk Switch op: 1 per wk Switch config.: 1 per wk VR op: 1 per 2 hr VR config.: 1 per 12 hr	4-6 per meter per day	25 per 1000 meters per day	2 per meter per year	1 per meter per event	1-50 per 1000 meters per day	60 per 1000 meters per day	60 per 1000 meters per day (for each of CPP, TOU, and RTP)
Device Density	15 devices per 1000 meters (projected to increase by 20X in 10 yrs)	Urban: 2000 meters/km ² Sub-urban: 800 meters/km ² Rural: 10 meters/km ²						
Reliability ¹	> 99.5%	> 98%						

Fonte: Referência [10].

2.2 LTE – Long Term Evolution

O LTE é uma tecnologia de banda larga sem fio (*wireless*), também conhecida como tecnologia 4G. Desenvolvida pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) no final do ano de 2004, e seguindo os padrões apresentados nas *Releases* 8[11] e 9[12], o LTE é a última padronização de tecnologia para sistemas de telefonia móvel. Motivado principalmente pela necessidade de altas taxas de transmissão de dados em redes *wireless*, o LTE é um projeto de desenvolvimento baseado na evolução da tecnologia W-CDMA (3G – *Wideband – Code Division Multiple Access*), especificada para telefonia móvel. Entretanto, o escopo da rede LTE não é fixo apenas para telefonia móvel, mas sim para qualquer dispositivo, que possua conectividade à rede IP. A seguir é listado alguma das principais motivações para o desenvolvimento da tecnologia LTE[13]:

- Necessidade de altas taxas de transmissão de dados;
- Necessidade do aumento da eficiência do espectro de frequência;
- Necessidade de um sistema otimizado de comutação de pacotes;
- Necessidade de alta qualidade de serviços (QoS);
- Necessidade de uma infraestrutura mais barata;
- Desejo de redução do custo por bit transmitido;
- Melhor relação custo de serviço / experiência do usuário;
- Necessidade de redução da complexidade terminal.

Para implementação do sistema, definiu-se necessário o cumprimento de alguns requerimentos definidos pelo 3GPP, dos quais são baseados nos requerimentos do ITU (*Internacional Telecommunication Union*) para 4G e operadores 3GPP. Alguns desses itens estão incluídos na lista a seguir[13] [14]:

- Eficiência espectral 2 ou 4 vezes superior à do HSPA *Release* 6;
- Pico de taxa de transmissão superior a 100 Mbps na transmissão Downlink;
- Pico de taxa de transmissão superior a 50 Mbps na transmissão Uplink;
- Máxima cobertura da célula LTE, com desempenho otimizado, igual a 5 km;
- Máxima cobertura da célula LTE, com desempenho razoável, igual a 30 km;
- Máxima cobertura da célula LTE, com desempenho aceitável, igual a 100 km;
- Capacidade de usuários ativos por célula LTE igual a 200;
- Desempenho otimizado para mobilidade de baixas velocidades: 0-15 km/h;
- Suporte para mobilidade em altas velocidades;

- Latência no plano do usuário menor que 5ms;
- Latência no plano de controle menor que 50 ms;
- Escalabilidade no uso de largura de banda – 20, 15, 10, 5, 3, 1.4 MHz.

Para que uma tecnologia nova seja implementada em uma rede já consolidada, existe alguns desafios principais que devem ser avaliados. No caso de uma tecnologia voltada para sistemas de telefonia móvel, busca-se a melhor relação possível entre a experiência do usuário e o custo dos serviços prestados[13]. As expectativas dos clientes lidera os desafios das operadoras de telecomunicações, que neste caso podem ser relacionadas a redução do custo por bits transmitidos, do fornecimento de altas taxas de transmissão de dados e baixa latência, como mostra a Figura 4.

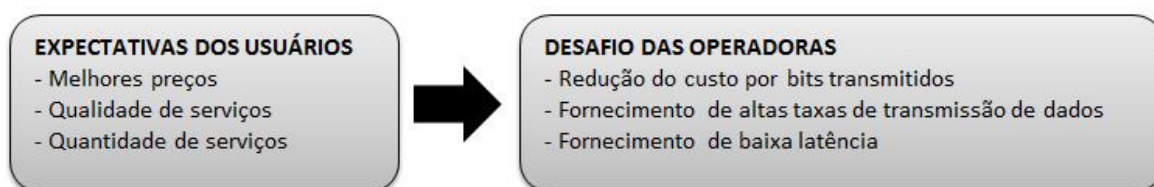


Figura 4 – Desafios da Tecnologia LTE

Uma das principais características da tecnologia LTE é a transmissão de dados em alta taxa de transmissão (*high throughput*) e baixa latência. A alta relação entre essas características fornece ao sistema diversas vantagens em relação a experiência do usuário, como por exemplo o impulso pela pretensão de novos assinantes e a permissão de acesso a novas aplicações. Na Figura 5 é possível observar a grande evolução que o sistema LTE apresentou, em relação aos valores de *throughput* e latência, comparados aos dados obtidos sob tecnologia HSPA.

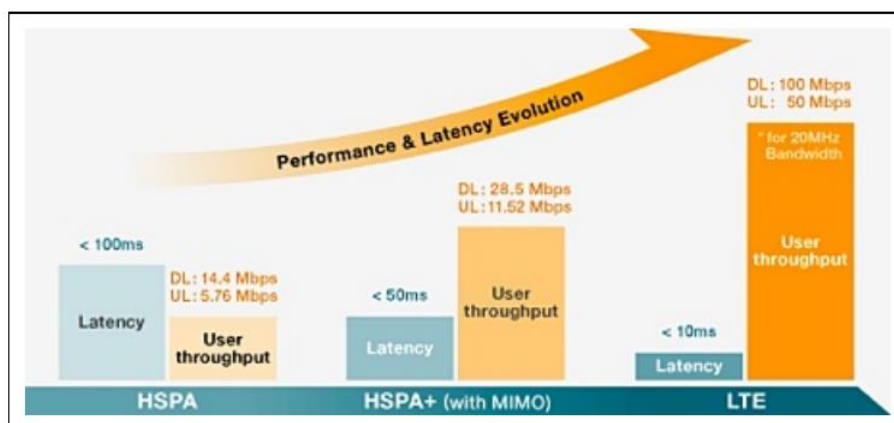


Figura 5 – Valores de Throughput e Latência para LTE e HSPA
Fonte: Referência [15].

Para otimização do desempenho do sistema LTE faz-se necessária a adequação para com as condições que a localidade proporciona, como, por exemplo, a regulamentação do espectro de frequência do país, a disponibilidade do espectro de frequência e as condições de mercado das tecnologias wireless. Para atender essas condições, as especificações do 4G incluem uma grande gama de canais de banda larga selecionáveis, desde 1.4 até 20MHz, com sub portadora de 15kHz. O menor espaço para recursos que podem ser alocados dentro de um link é chamado de RB (*Resource Block*) e, para padrões LTE, compreende a 12 sub portadoras em um espaço de 15kHz. Esta escalabilidade de largura de banda proporcionada pela tecnologia LTE contribui para flexibilidade do sistema em relação ao uso de diferentes redes de transmissão[16].

As taxas de transmissão consideradas viáveis para o sistema LTE em ideais condições são relativamente altas, variando entre 10 a 326.4Mbps no *downlink* e entre 50 a 85.4Mbps no *uplink*, dependendo sempre da configuração da antena e do tipo de modulação utilizada. Essas taxas citadas representam o máximo absoluto que um sistema pode suportar, porém a taxa de transmissão deverá ser escalada de acordo com certa categoria de cada usuário, ou seja, o *throughput* terminal depende das características que cada equipamento suporta. A Tabela 5 apresenta taxas de transmissão que a tecnologia LTE oferece de acordo com a categoria do usuário e a configuração das antenas de transmissão/recepção.

Tabela 5 – Tabela das Taxas de Transmissão – LTE

Categoria do usuário	Taxa de Transmissão - Downlink	Configuração da antena - DL	Taxa de Transmissão – Uplink	Suporte para 64QAM - UPLINK
Categoria 1	10.3 Mbps	1 x 2	51.6 Mbps	NÃO
Categoria 2	51.0 Mbps	2 x 2	25.4 Mbps	NÃO
Categoria 3	102.0 Mbps	2 x 2	51.0 Mbps	NÃO
Categoria 4	150.7 Mbps	2 x 2	51.0 Mbps	NÃO
Categoria 5	302.7 Mbps	4 x 2	75.4 Mbps	SIM

Fonte: Referência [18].

Outro importante objetivo da implementação da tecnologia 4G nas redes de transmissão de dados é a redução da complexidade da rede. O sistema LTE é totalmente baseado na arquitetura da rede IP, caracterizado pela baixa latência na

transmissão de dados, grande flexibilidade, baixo número de elementos no sistema e, conseqüentemente, baixo custo de operação.

2.2.1 Arquitetura de rede

Com o objetivo de proporcionar maiores taxas de transmissão e redução na latência da rede, para oferecer uma melhor QoS para o usuário, o LTE possui arquitetura EPC, ou seja, uma arquitetura simplificada com interfaces abertas baseadas nos protocolos TCP/IP que possibilita a comunicação entre redes fixas e móveis.

Considerando as siglas “EPC” como *Evolved Packet Core*, “UE” como equipamento do usuário, “E-UTRAN” como *Evolved-Terrestrial Radio Access Network*, “eNodeB” como estação rádio base, “MME” como *Mobility Management Entity*, “S-GW” como *Serving Gateway*, “P-GW” como *Packet Data Network Gateway*, “SAE” como *System Architecture Evolution*, “HSS” como *Home Subscriber Server* e “PCRF” como *Policy and Charging Rules Function*, a Figura 6 apresenta uma arquitetura de uma rede baseada na tecnologia LTE.

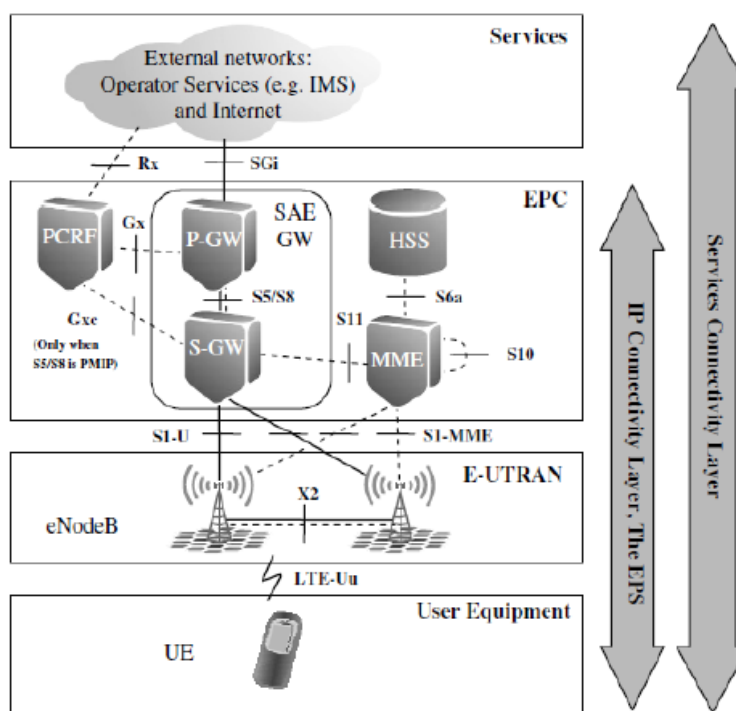


Figura 6 – Arquitetura de rede do sistema LTE
Fonte: Referência [17].

2.3 LTE: PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO PARA SMART GRID

O maior propósito das redes inteligentes é fornecer uma confiável energia elétrica, de maneira eficiente, de modo que atenda ao aumento da demanda de eletricidade nos pontos consumidores. O sistema *Smart Grid* funciona de maneira que sua infraestrutura de comunicação é sobreposta a infraestrutura do sistema elétrico, dessa forma as técnicas avançadas de comunicação auxiliam no aumento da confiabilidade, segurança, interoperabilidade e da eficiência da rede elétrica. Além disso, as redes inteligentes utilizam as arquiteturas de plataformas abertas (OSI) como um meio de integração entre os sistemas de forma que opere perfeitamente entre os diversos dispositivos inteligentes da rede[3].

O sucesso e a rápida inserção da tecnologia LTE em muitos países da Europa e da América do Norte são motivos do aumento do interesse do uso desta tecnologia para diversas outras aplicações. No contexto do *Smart Grid*, o uso do LTE é considerado válido já que esse sistema de comunicação wireless de alta velocidade possui diversas características compatíveis com os requerimentos de uma rede inteligente. Uma das grandes vantagens da tecnologia 4G para redes inteligentes é o fato de que medidores inteligentes e roteadores para *Smart Grid* estão integrados com a próxima geração de padrão de comunicação LTE [23]. Alguns dos benefícios da inserção do 4G como plataforma para redes inteligentes são:

- Aplicações M2M (*machine-to-machine*);
- Rede de auto-configuração (*Plug-and-play*);
- Política de controle e prioridades – QoS;
- Baixa latência;
- Alta capacidade de comunicação em banda larga;
- Rede robusta.

Além disso a tecnologia 4G é basicamente um sistema voltado para sistemas de telefonia móvel, das quais possuem características importantes que são argumentos para a implantação desta tecnologia em redes inteligentes. Algumas dessas características são citadas em lista a seguir:

- Grande área de cobertura – no Brasil aproximadamente 70% da população possui celular [20];
- Alta confiabilidade – rede de celular possui uma arquitetura totalmente redundante;
- Segurança Robusta;
- Alta performance – Alta taxa de transmissão de dados e baixo tempo de latência;
- Alta escalabilidade;
- Interoperabilidade contínua;
- Baixo custo de manutenção.

3 SIMULAÇÃO

3.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O *software* utilizado para simulação da rede LTE é o *Network Simulator* – versão 3, mais conhecido como NS-3. Este *software* é um simulador de rede de eventos discretos, aberto e disponível ao público para pesquisa e uso educacional.

A infra-estrutura do *software* NS-3 estimula o desenvolvimento de modelos de simulação realistas suficientes para permitir que o NS-3 seja utilizado como um emulador de rede em tempo real, permitindo também a implementação de protocolos existentes e atuais nas simulações.

O grande diferencial deste *software* é a disponibilidade de uma grande gama de modelos de tecnologias disponíveis para simulações, principalmente modelos de sistemas *wireless* para camadas 1 e 2 e variedade de protocolos de roteamento para camadas 3 e 4[21].

O NS-3 é simulador diferenciado dos outros já que possui uma biblioteca específica para a tecnologia LTE, possibilitando a utilização de diversos modelos para simulação de testes utilizando as redes 4G. Denominado de “LTE-EPC”, e ilustrado na Figura 7, esta biblioteca é dividida em duas principais partes[22]:

- Modelo LTE: Este modelo possui um conjunto de protocolos específicos para LTE (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Este modelo é responsável, basicamente, pelos UE's (Equipamentos terminais) e pelas eNB (Estações Rádio Base);
- Modelo EPC: Este modelo inclui a parte mais central da rede, ou seja, interface do núcleo da rede. Protocolos e entidades residem entre SGW (*Serving Gateway*), PGW (*Packet Data Network Gateway*), MME (*Mobility Management Entity*) e as eNB's.

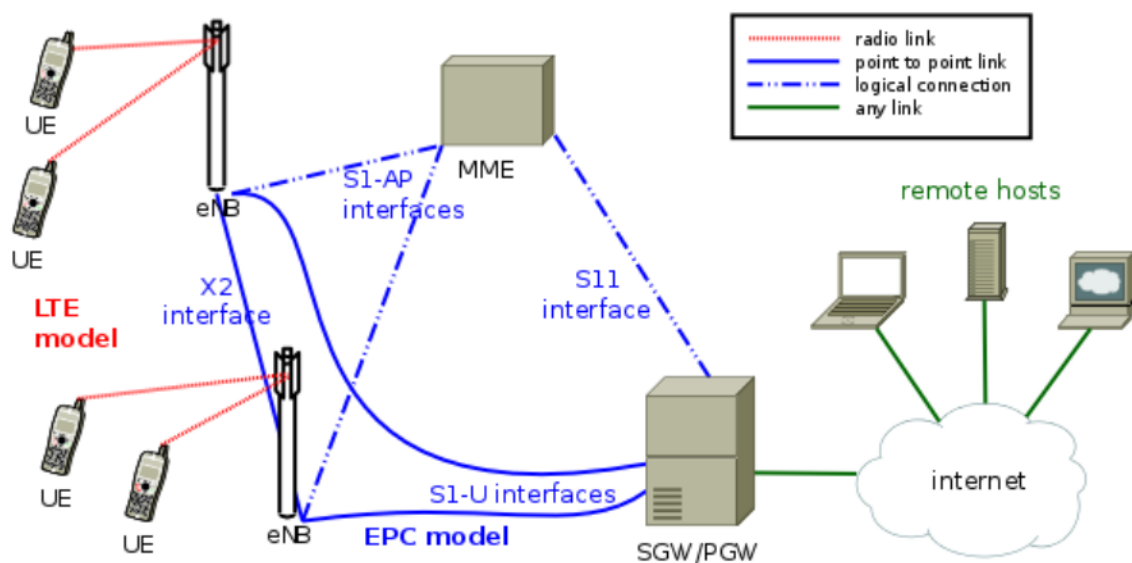


Figura 7 – Overview do modelo de simulação LTE-EPC

Fonte: Referência [23].

3.2 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Com objetivo de realizar um estudo sobre o comportamento de uma rede de transmissão LTE, sob perfil de tráfego de uma rede *Smart Grid*, foram realizadas diversas simulações no *software* NS-3. Com os dados obtidos, foi possível realizar uma análise quantitativa do número de agregadores de tráfego (DAU), conectados a medidores inteligentes, a rede 4G suporta e, assim, estabelecer um modelo de cálculo para a quantidade aproximada de DAU's que uma rede pode suportar para uma específica taxa de amostragem desejada.

Em um cenário básico, apresentado na Figura 8, foi estabelecido *links* de conexão entre um servidor, conectado à Internet, e diversos nós, que representam os agregadores de tráfego de dados, responsáveis por receber ou enviar mensagens para a rede de transmissão. Atuando como interface entre os dois pontos, há um nó desempenhando o papel de uma eNB (*Evolved NodeB*), também conhecida como estação rádio base, responsável pela transmissão, *Downlink*, e recepção, *Uplink*, de mensagens dos pontos consumidores.

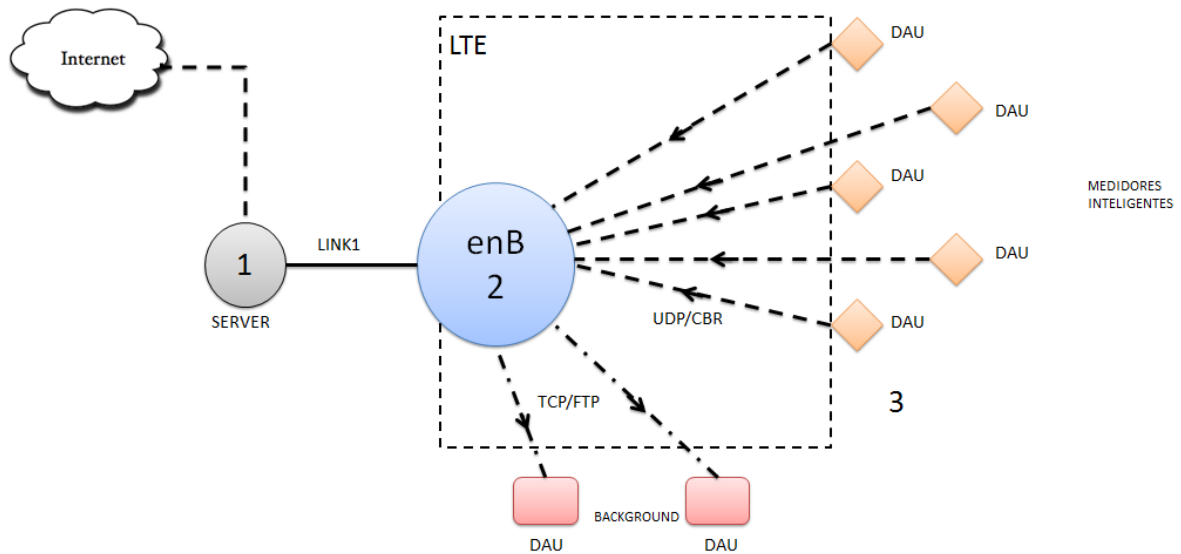


Figura 8 – Cenário Básico para Simulação

Denominado, na Figura 8, de LINK1, o tipo de conexão entre a enB e o servidor é independente para esta simulação, já que o foco é analisar o desempenho do sistema entre a enB e os pontos terminais, utilizando a tecnologia LTE. Estabelecendo uma conexão fim-a-fim, sendo que no LINK1 seja estabelecido um ótimo desempenho de transmissão e valor insignificante de latência, a simulação poderá ser sucedida sem que este link citado possa ser considerado um ponto de falha do sistema. O objetivo da simulação é proporcionar valores de *throughput* (taxa de transmissão), atraso (*delay*) e *jitter* (variação do atraso), para diferentes quantidades de agregadores na rede. A partir desta análise, uma avaliação quantitativa do sistema foi verificada em busca de averiguar a viabilidade técnica do uso da tecnologia LTE como plataforma de comunicação para redes inteligentes.

Dois cenários finais foram estabelecidos, a partir do cenário básico, de forma que no primeiro seja estudado o comportamento de uma rede 4G, submetida a um perfil de tráfego de uma rede Smart Grid, e no segundo cenário seja introduzido situações de tráfego de fundo reproduzindo condições reais de transmissão de dados em ambientes urbanos.

Determinou-se que a simulação deveria ser feita para três diferentes valores de taxa de amostragem. Esse parâmetro é muito influente já que para redes *Smart Grid* a taxa de amostragem varia de acordo com o tipo de medição que deseja ser feita, como mostra Tabela 4. Como deseja-se fazer apenas um estudo da rede, foi

estipulado três valores de intervalos de transmissão de mensagens diferentes, que seguem:

- Intervalo 1: 8,33 ms – 122,5 kbps – 120Hz
- Intervalo 2: 10 ms – 102,0 kbps
- Intervalo 3: 1 s – 1,02 kbps

3.2.1 Modelo sem interferência de tráfego de fundo – Cenário A

A Figura 9 mostra o cenário da simulação realizada sem interferência de tráfego de fundo. Nesta circunstância o sistema LTE estabelece as conexões entre uma eNB e diversos agregadores de tráfego, em um raio de 1000 metros, estimado como padrão de alcance, com desempenho aceitável, para células LTE em ambientes urbanos[13]. Neste cenário de simulação as trocas de mensagens são todas *Uplink*, ou seja, as mensagens são enviadas dos *smart meters* em direção aos DAU's que, por sua vez, enviam as mesmas para a rede de transmissão.

As mensagens possuem pacotes de 1020 bits cada e foram posicionadas de forma que seguissem o modelo de transmissão CBR (*Constant BitRate*), ou seja, o sistema transmite as mensagens a uma taxa de transmissão constante, utilizando o protocolo de transporte UDP (*User Datagram Protocol*). O valor do tamanho do pacote foi definido seguindo, aproximadamente, o modelo definido na Figura 3, onde uma medição de leitura, enviada no sentido *Uplink*, possui, em média, um tamanho entre 100 a 150 bytes.

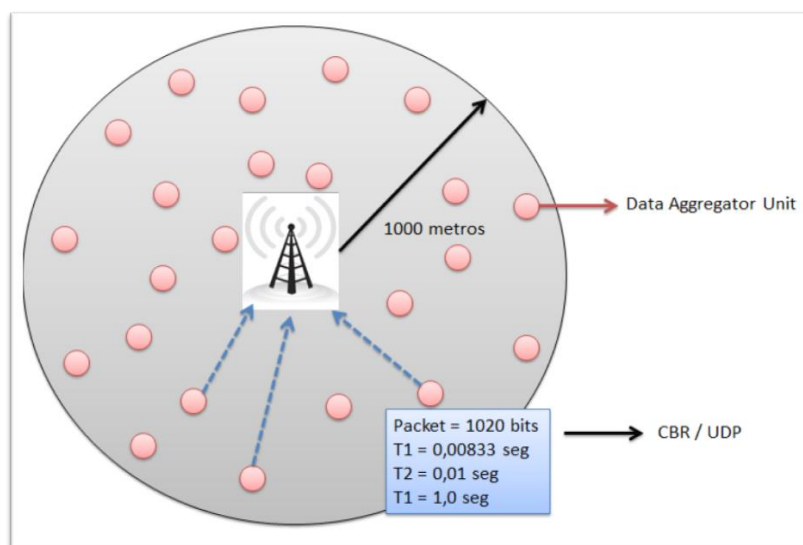


Figura 9 - Cenário A - Modelo de Tráfego sem interferência

A disponibilização dos agregadores distribuídos em torno do raio de 1000 metros foi feito conforme ilustra a Figura 10. A posição de cada DAU é fixa e pode ser calculada seguindo a Equação 1. Como esses são dispositivos estáticos, instalados em pontos estratégicos próximos aos pontos consumidores de eletricidade, o modelo de mobilidade não existe, dissemelhante a um modelo padrão de telefonia móvel onde é necessário estipular uma velocidade máxima para os dispositivos móveis.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Vetor } (x, y, z) \\ (1000 - i*50, 1000 - u*50, 0) \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 \leq i < \text{Número de Agregadores} \\ 0 \leq u < 21 \end{array}$$

Equação 1 – Modelo de distribuição de medidores inteligentes

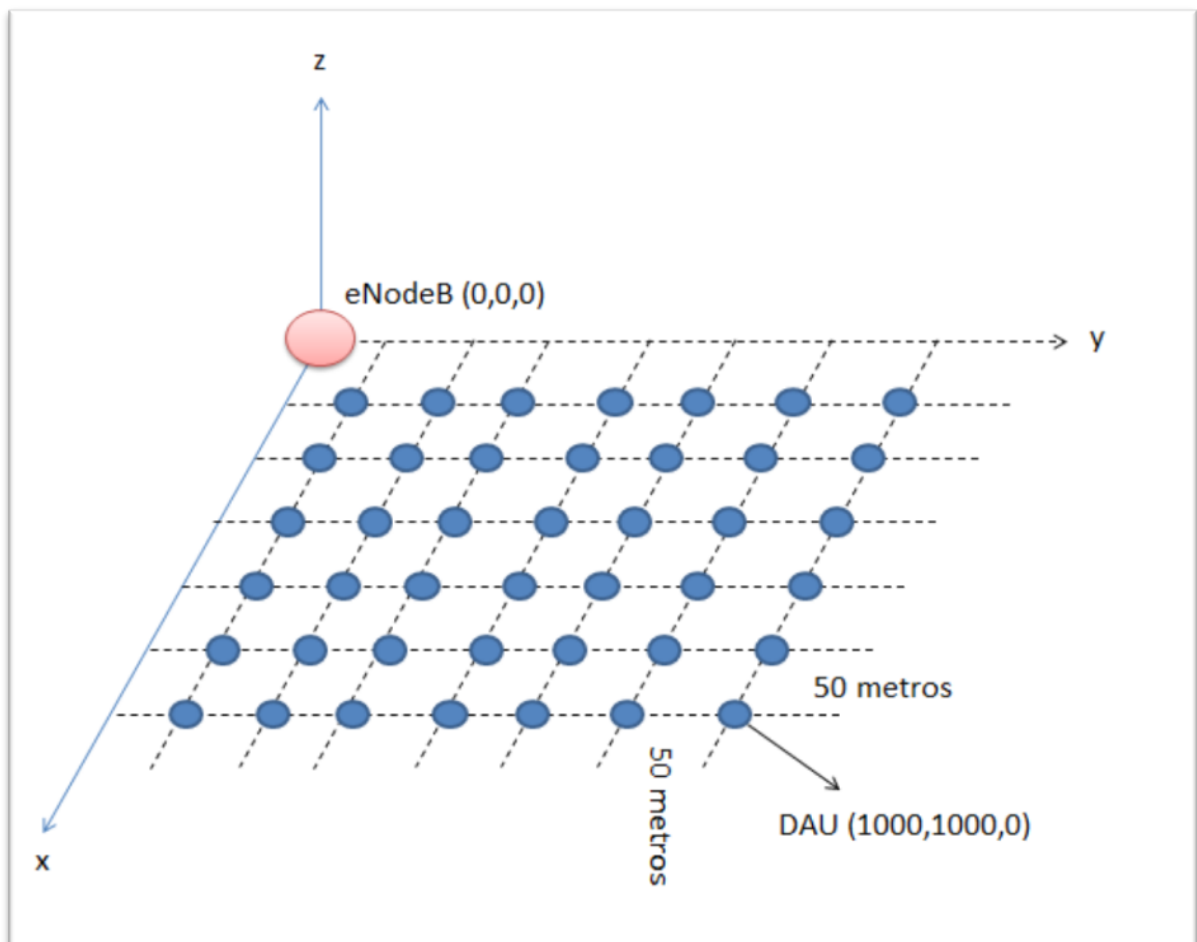


Figura 10 – Disponibilização de Agregadores de Dados – Cenário A

3.2.2 Modelo com interferência de tráfego de fundo – Cenário B e C

As Figura 11 e Figura 12 mostram os cenários das simulações realizadas com interferência de tráfego de fundo para 1 e 10 nós *background*, respectivamente. Nessas circunstâncias o sistema LTE estabelece dois tipos de conexões: a primeira entre uma enB e diversos agregadores de dados e a segunda entre a mesma estação rádio base e nós terminais, denominados de nós *background* (NB), dos quais podem ser correlacionado a agregadores de dados, porem responsáveis pela transmissão do tráfego de fundo nas simulações. Neste cenário de simulação, além das mensagens *Uplink*, em direção à rede de transmissão, há também as mensagens *Downlink*, onde o sentido do fluxo é da rede de transmissão até os nós *background*.

As mensagens *Uplink* mantém as mesmas configurações do cenário citado no item 3.2.1, já as mensagens *Downlink*, configuradas com taxa de transmissão de 1Gbps e tamanho de pacote de 100kbits, são simuladas com protocolo de transporte TCP e modelo de transferência de arquivos FTP.

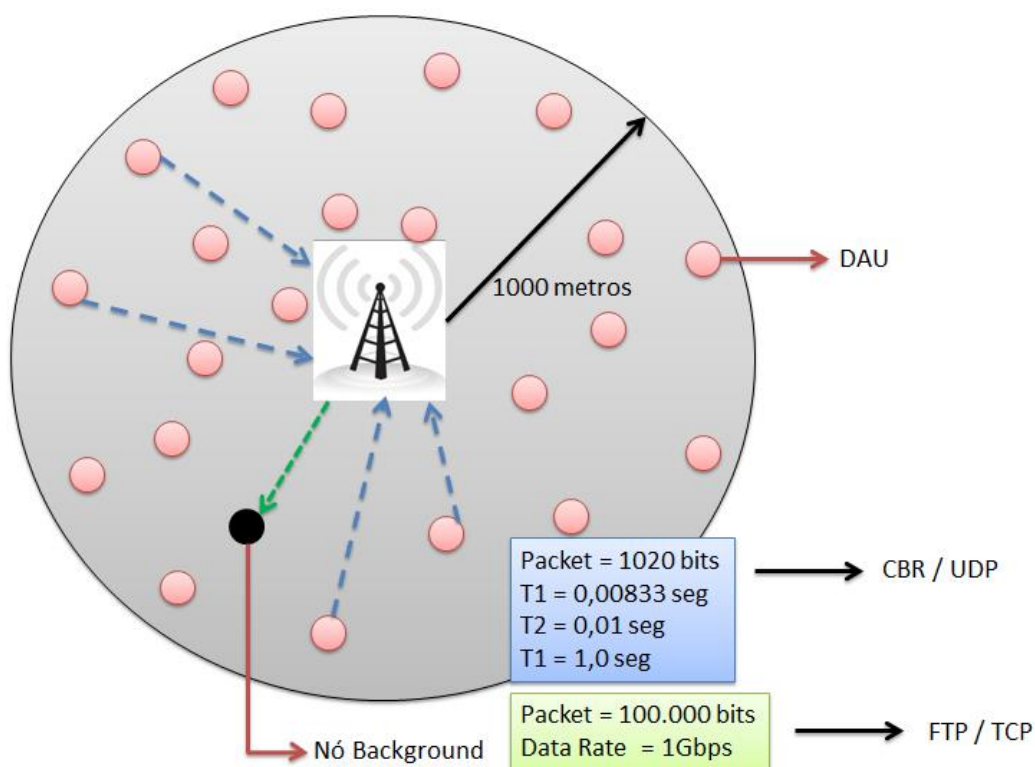


Figura 11 – Cenário B - Modelo de Tráfego com interferência - 1 NB

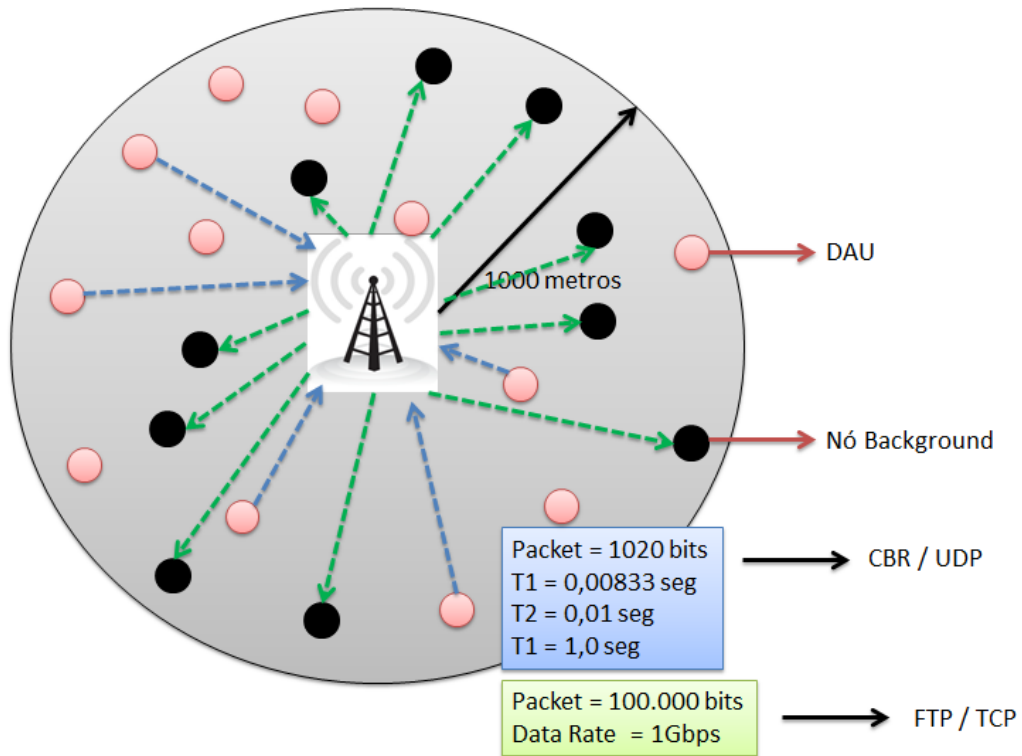


Figura 12 – Cenário C - Modelo de Tráfego com interferência – 10 NB

A disponibilização dos agregadores distribuídos em torno do raio de 1000 metros foi feito conforme ilustra a Figura 13. A posição de cada DAU é fixa e pode ser calculada seguindo a Equação 1, já as posições dos nós background seguem o modelo de cálculo apresentado na Equação 2. Assim como os medidores inteligentes e os agregadores de dados, os nós background também são dispositivos estáticos, e não necessitam de modelo de mobilidade.

$$\begin{array}{l}
 \text{Vetor } (x, y, z) \\
 (900 - i \cdot 45, 900 - u \cdot 45, 0)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Vetor } (x, y, z) \\ (900 - i \cdot 45, 900 - u \cdot 45, 0) \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 0 \leq i < \text{Número de Nós Background} \\
 0 \leq u < 6
 \end{array}$$

Equação 2 – Modelo de distribuição de nós *background*

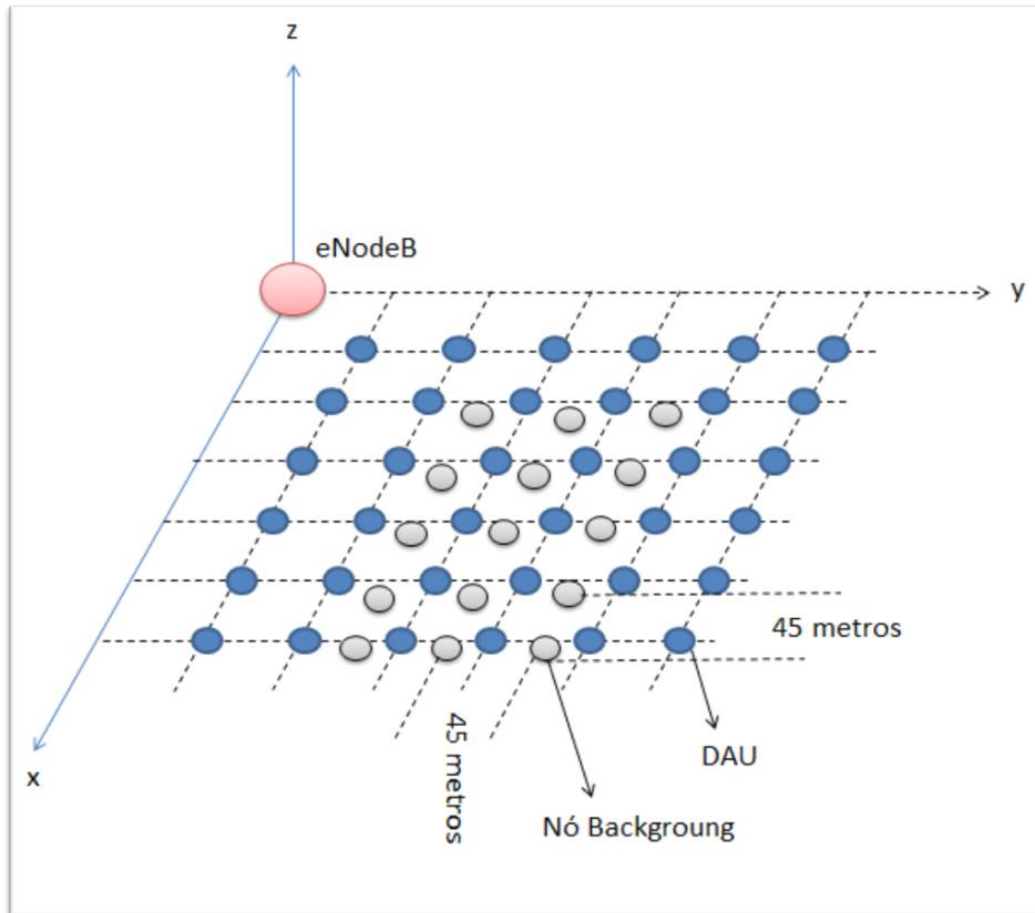


Figura 13 – Disponibilização de Agregadores de Dados – Cenário B e C

3.3 PARÂMETROS

Como parâmetros padrão para a rede 4G, a rede foi configurada de forma que o sistema seja simulado sob perfil de tráfego de redes Smart Grid. Os parâmetros escolhidos são apresentados em lista a seguir:

- Modelo de Perda de Caminho: Perda por Propagação de Espectro
- Largura de Banda para Uplink: 20 MHz
- Largura de Banda para Downlink: 20 MHz
- DL Earfcn: 2500 MHz
- UL Earfcn: 2500 MHz
- Potência de Transmissão UE: 24 dBm
- Figura de Ruído UE: 9 dB
- Potência de Transmissão Enb: 32 dBm
- Figura de Ruído Enb: 5 dB

4 RESULTADOS

4.1 Intervalo 1

No caso dos agregadores de dados enviarem mensagens às estações rádio base a cada 8,33ms, seguindo uma frequência de 120Hz, e considerando os pacotes com 1020 bits cada, a taxa de amostragem da simulação é igual a aproximadamente 122,5 kbps.

Com essa taxa de amostragem, variando a quantidade de agregadores de dados (DAU) na rede, foi estabelecido, para os três tipos de cenários, as medidas de *Throughput*, *Delay* e *Jitter*, dos quais são apresentados nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 6 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 1

INTERVALO 1	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	1,051	1	17,279	1	19,008
	3	3,04	3	20,795	3	20,795
	5	5,189	5	21,767	5	21,767
	8	7,348	7	23,801	7	24,9585
	10	8,6785	8	26,7425	8	26,193
	12	11,61	10	28,2585	10	27,739
	13	12,051	12	29,6543	12	29,052
	15	13,2555	13	30,194	13	29,5915
	17	14,4945	15	30,1635	15	30,5545
	18	14,7815	17	30,775	17	30,466
	19	15,0055	18	30,247	18	30,211
	22	15,352	20	28,942	20	30,011
	23	15,1345	22	28,3745	22	30,175
	25	14,7545	23	27,1365	23	29,9945
	27	14,613	25	25,8955	25	30,11
	28	14,563	27	24,722	27	29,995
	30	13,346	30	23,6975	30	30,0465
			33	23,224	33	30,762
			35	23,2435	35	30,617

Tabela 7 – Medições de DELAY – Intervalo 1

INTERVALO 1	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0,0119	1	0,011905	1	2,043896
	3	0,140749	3	0,176807	3	0,780801
	5	0,062418	5	0,552612	5	1,357764
	8	0,772646	7	0,386905	7	0,867171
	10	0,113746	8	0,089833	8	0,898184
	12	0,686055	10	0,137509	10	1,500596
	13	1,094879	12	1,105403	12	1,583971
	15	2,2465	13	1,237605	13	1,398562
	17	1,555698	15	2,2465	15	2,024288
	18	1,316826	17	1,434096	17	2,543589
	20	1,99041	18	1,98966	18	2,361641
	22	2,41532	20	2,17025	20	2,398465
	23	2,514787	22	2,693063	22	2,221586
	25	2,55875	23	2,445513	23	1,991825
	27	2,510746	25	2,401829	25	1,558849
	28	1,96235	27	1,970758	27	1,970758
	30	1,595728	30	1,747449	30	1,747449
			33	1,305597	33	1,305597
			35	1,166436	35	1,166436

Tabela 8 – Medições de JITTER – Intervalo 1

INTERVALO 1	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0,0000056	1	0,0000216	1	0,006878252
	3	0,007148535	3	0,006342964	3	0,003106198
	5	0,002904845	5	0,003531708	5	0,004366278
	8	0,003184594	7	0,002197543	7	0,002397491
	10	0,002306889	8	0,001263207	8	0,001415672
	12	0,00166369	10	0,0017108	10	0,001489856
	13	0,001384111	12	0,001285341	12	0,001653254
	15	0,002136906	13	0,001508767	13	0,001628574
	17	0,001631724	15	0,002136906	15	0,001808978
	18	0,001425691	17	0,001511123	17	0,00239189
	20	0,00200441	18	0,002073238	18	0,002556907
	22	0,002175008	20	0,002299207	20	0,002930904
	23	0,002376675	22	0,002266563	22	0,003060136
	25	0,002739694	23	0,002661768	23	0,003023236
	27	0,002994042	25	0,002887006	25	0,00301021
	28	0,003020279	27	0,003008861	37	0,003008861
	30	0,002930737	30	0,003036922	30	0,003036922
			33	0,003009278	33	0,003009278
			35	0,003010997	35	0,003010997

Com esses dados obtidos foi possível relacioná-los em gráficos, capazes de apresentar, de acordo com o aumento do número de DAU's na rede, o desempenho de cada parâmetro, conforme ilustram os Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3.

Gráfico 1 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 1

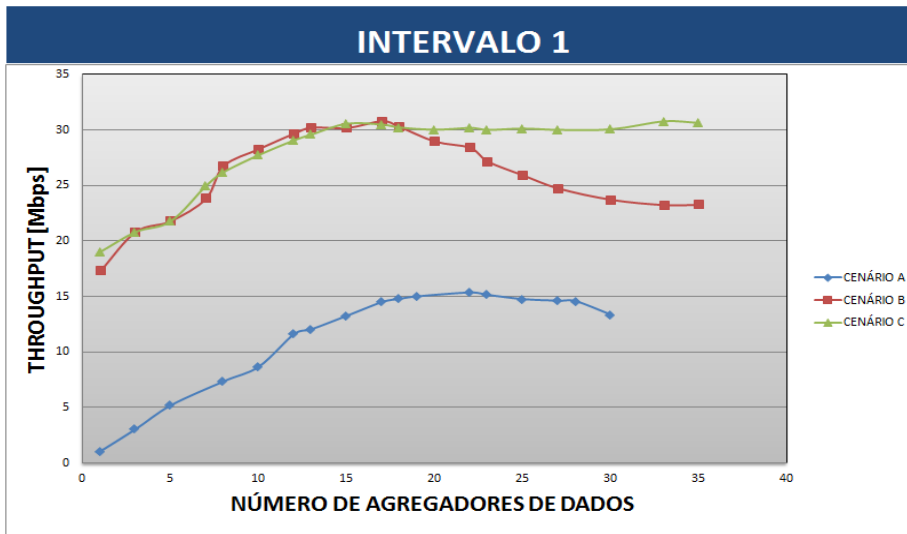


Gráfico 2 - Medições de DELAY – Intervalo 1

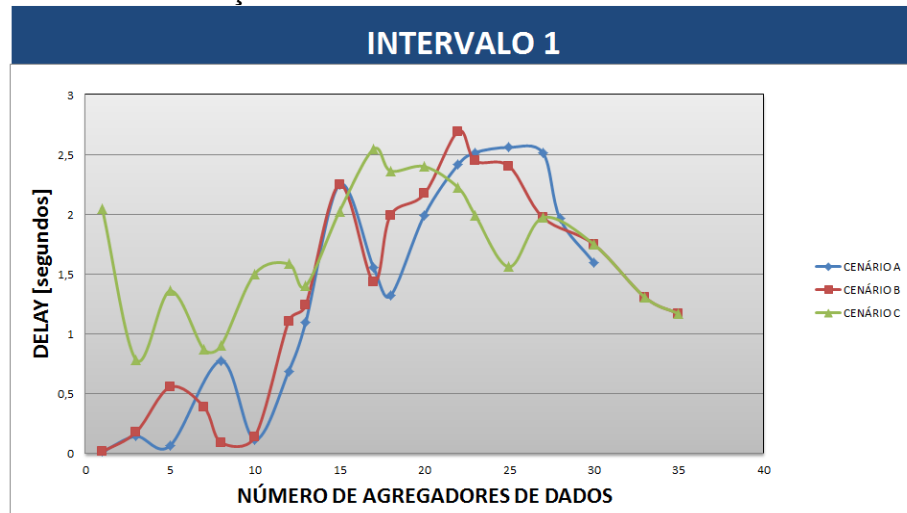
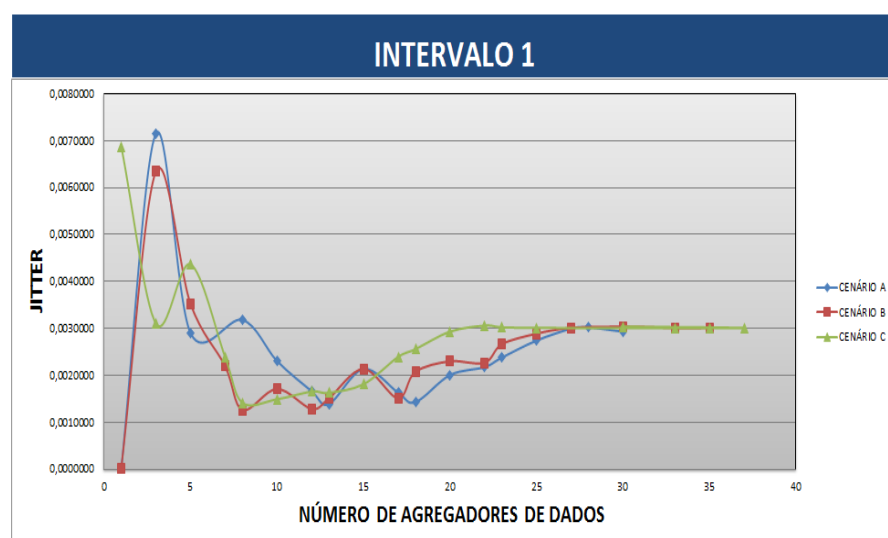


Gráfico 3 - Medições de JITTER – Intervalo 1



4.2 Intervalo 2

No caso dos agregadores de dados enviarem mensagens às estações rádio base a cada 10ms e considerando os pacotes com 1020 bits cada, a taxa de amostragem da simulação é igual a 102,0 kbps. Com essa taxa de amostragem, variando a quantidade de agregadores de dados (DAU) na rede, foi estabelecido, para os três tipos de cenários, as medidas de *Throughput*, *Delay* e *Jitter*, dos quais são apresentados nas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11, respectivamente.

Tabela 9 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 2

INTERVALO 2	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0,856	1	19,329000	1	18,074500
	2	1,6905	2	20,314500	2	18,977000
	3	2,5455	3	20,514000	3	20,471500
	4	3,3965	4	21,415000	4	20,898500
	5	4,233	5	22,388500	5	20,966000
	6	5,088	6	23,000000	6	22,925500
	7	5,9095	7	23,821000	8	24,471000
	8	6,7285	8	24,066500	10	26,694000
	9	7,476	9	25,915500	12	28,061500
	10	8,4365	10	26,801500	14	29,087500
	11	9,3105	11	27,577500	15	29,323000
	12	10,065	12	28,407500	16	29,787000
	13	10,872	13	28,968500	17	30,635500
	14	11,501	14	29,548500	18	30,818500
	15	12,019	15	28,368000	19	29,811500
	17	13,107	16	30,255500	20	29,847500
	18	13,5715	17	29,627000	23	29,847500
	19	14,159	18	29,277000	25	30,059000
	20	14,4325	19	27,594000	28	27,078500
	22	15,333000	20	28,871000	30	30,031500
	23	15,082000	23	28,871	33	30,676000
	25	14,711000	25	25,865500	35	30,744500
	27	14,587000	28	24,457500	37	30,833000
	28	14,540500	30	23,694000	40	
	30	14,472500	33	23,121000		
			35	22,943500		
			37	22,624000		
			40	22,299000		

Tabela 10 – Medições de DELAY – Intervalo 2

INTERVALO 2	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
1	0,012585083		1	0,013733872	1	1,058780459
2	0,012651134		2	0,013092032	2	1,538804122
3	0,012290996		3	0,013961281	3	0,266077797
4	0,013176098		4	0,013738058	5	0,895367229
5	0,012680035		5	0,013773757	6	0,061589278
6	0,012556954		7	0,33216277	8	0,281911521
7	0,012647905		8	0,066671981	10	0,289493252
8	0,013193796		9	0,283319004	12	0,870935061
9	0,031806721		10	0,049918258	14	1,218082536
10	0,035325866		11	0,101563353	15	1,547326054
11	0,038447988		12	0,22855316	16	1,95711044
12	0,093947581		13	0,521757352	17	1,784306999
13	0,231806004		14	0,802070134	18	1,932916431
14	0,364559823		15	0,74715338	19	2,541004411
15	0,651582484		16	0,930761341	20	2,286021274
16	1,224238321		17	0,832344827	23	2,558162659
17	0,932483187		18	1,431744988	25	2,359047682
18	0,815031917		19	2,250229398	28	1,581940969
19	1,439170244		20	1,446708356	30	1,825767265
20	1,747543619		23	2,077530982	33	1,591909363
22	1,335840712		25	2,371429968	35	1,404495763
23	1,669018574		28	2,368228498	37	1,213265905
25	2,26497293		30	1,825767265		
27	2,578819223		33	1,869978654		
28	2,153603268		35	1,631567665		
30	2,447727125					

Tabela 11 – Medições de JITTER – Intervalo 2

INTERVALO 2	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
1		0	1	0,0000005	1	0,0006576
2	0,0000001		2	0,0000006	2	0,0010193
3	0,0000002		3	0,0000163	3	0,0012686
5	0,0000002		4	0,0001667	5	0,0023687
7	0,0000003		5	0,000017	6	0,0013683
8	0,0000009		7	0,0012599	8	0,0015264
9	0,0019649		8	0,0014935	10	0,0011321
10	0,0020515		9	0,0004379	12	0,0017204
11	0,0019495		10	0,001784	14	0,0016278
12	0,0015623		11	0,001569	15	0,0018489
13	0,0014514		12	0,0014339	16	0,0022318
14	0,0018661		13	0,001712	17	0,0019638
15	0,0012402		14	0,00145	18	0,0022594
16	0,0021187		15	0,0013606	19	0,0028677
17	0,0016175		16	0,0015644	20	0,002931
18	0,0018773		17	0,0018066	23	0,0033124
19	0,0019736		18	0,0019914	25	0,00358891
20	0,0019382		19	0,0021751	28	0,00365634
22	0,0017431		20	0,0020514	30	0,00367247
23	0,0019864		23	0,0023494	33	0,00358003
25	0,0025107		25	0,002876734	35	0,00364187
27	0,00297		28	0,003282251	37	0,00286773
28	0,0031783		30	0,003673558		
30	0,0033395		33	0,003645743		
			35	0,003590854		

Com esses dados obtidos foi possível relacioná-los em gráficos, capazes de apresentar, de acordo com o aumento do número de DAU's na rede, o desempenho de cada parâmetro, conforme ilustram os Gráfico 4, Gráfico 5 e Gráfico 6.

Gráfico 4 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 2

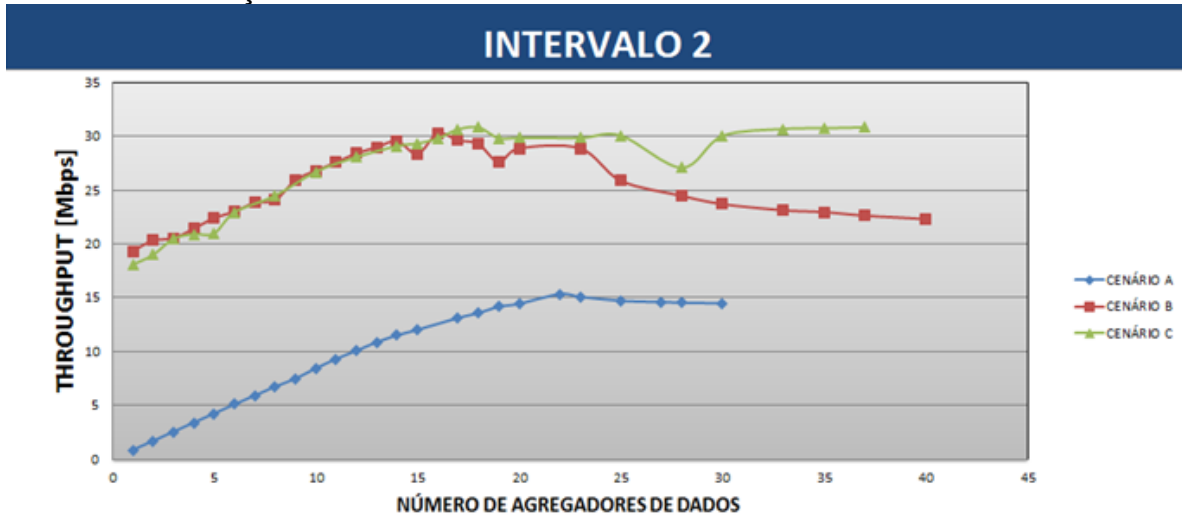


Gráfico 5 – Medições de DELAY – Intervalo 2

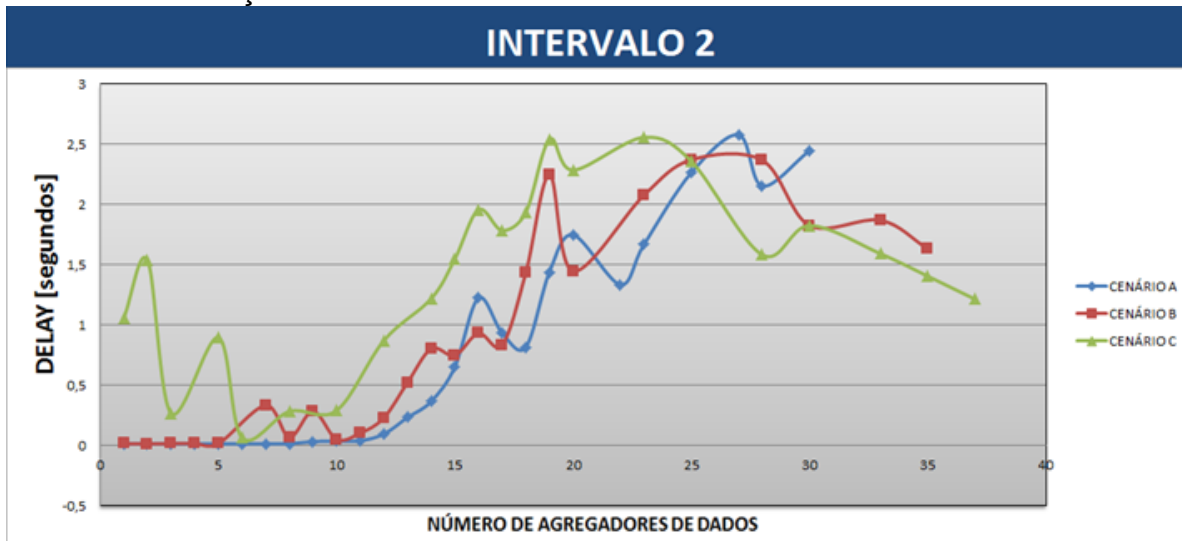


Gráfico 6 – Medições de JITTER – Intervalo 2



4.3 Intervalo 3

No caso dos agregadores de dados enviarem mensagens às estações rádio base a cada 1 segundo e considerando os pacotes com 1020 bits cada, a taxa de amostragem da simulação é igual a 1,02 kbps. Com essa taxa de amostragem, considerada bastante baixa para padrões de medições de qualidade, e variando a quantidade de agregadores de dados (DAU) na rede, foi estabelecido, para os três tipos de cenários, as medidas de *Throughput*, *Delay* e *Jitter*, dos quais são apresentados nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, respectivamente.

Tabela 12 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 3

INTERVALO 3	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0,009000	1	18,555500	1	18,418000
5	0,043500	5	18,951000	5	18,358000	
10	0,086500	10	18,636000	10	18,346000	
20	0,171000	20	18,187000	20	18,017000	
30	0,256500	30	18,512000	30	17,463500	
40	0,341500	40	18,769500	40	17,850000	
50	0,428000	50	18,538000	50	18,092500	
60	0,512500	60	18,774500	60	18,074000	
80	0,684000	80	18,960000	80	18,325500	
100	0,854000	100	19,448500	100	18,671000	
125	1,065000	125	19,404000	125	18,881500	
150	1,278000	150	19,976000	150	19,230500	
175	1,487500	175	18,291000	175	19,272500	
200	1,649000	200	17,871000	200	19,595500	

Tabela 13 – Medições de DELAY – Intervalo 3

INTERVALO 3	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0,006467	1	0,0138648	1	0,0133581
	5	0,0125282	5	0,0132557	5	0,0135206
	10	0,01254	10	0,0134412	10	0,0139056
	20	0,0126912	20	0,013072	20	0,014791
	30	0,0124618	30	0,0130817	30	0,0159483
	40	0,0124891	40	0,0125804	40	0,016215
	50	0,0125312	50	0,0133661	50	0,015555
	60	0,0126223	60	0,0132872	60	0,0163312
80	0,012695	80	0,0135583	80	0,0165417	
100	0,0128043	100	0,0136517	100	0,0168761	
125	0,0128521	125	0,0135049	125	0,0165545	
150	0,0128717	150	0,0136517	150	0,0169126	
175	0,0128253	175	0,0124218	175	0,0168284	
200	0,0128917	200	0,0139932	200	0,0171604	

Tabela 14 – Medições de JITTER – Intervalo 3

INTERVALO 3	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
	1	0	1	0,0001	1	0,0002
	5	0,00007	5	0,000133	5	0,0001667
	10	4,7E-05	10	0,0001	10	0,0003833
	20	0,0001	20	0,0001367	20	0,0007828
	30	4,2E-05	30	0,0000967	30	0,0011586
	40	6,8E-05	40	0,00002	40	0,0008586
	50	9,5E-05	50	0,0000828	50	0,0006943
	60	5,7E-05	60	0,0000931	60	0,0009828
80	5,2E-05	80	0,0001414	80	0,0008092	
100	8,8E-05	100	0,0001072	100	0,0011081	
125	5,4E-05	125	0,0000486	120	0,0009776	
150	3,6E-05	150	0,0001072	150	0,0009595	
175	2,1E-05	175	0,0004241	175	0,0009483	
200	8,4E-05	200	0,0005345	200	0,00068	

Com esses dados obtidos foi possível relacioná-los em gráficos, capazes de apresentar, de acordo com o aumento do número de DAU's na rede, o desempenho de cada parâmetro, conforme ilustram os Gráfico 7, Gráfico 8 e Gráfico 9.

Gráfico 7 – Medições de THROUGHPUT – Intervalo 3

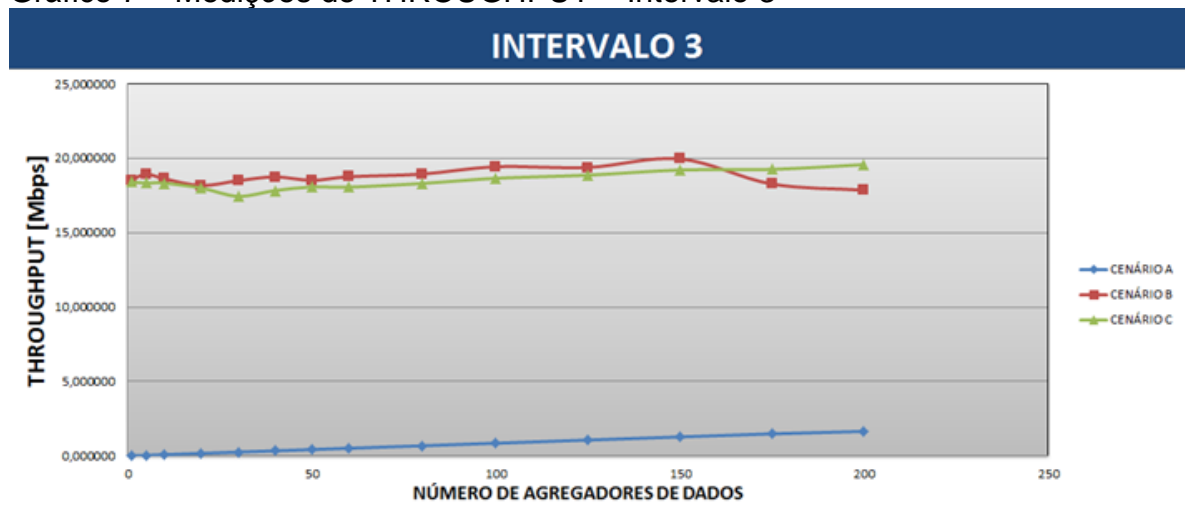


Gráfico 8 – Medições de DELAY – Intervalo 3

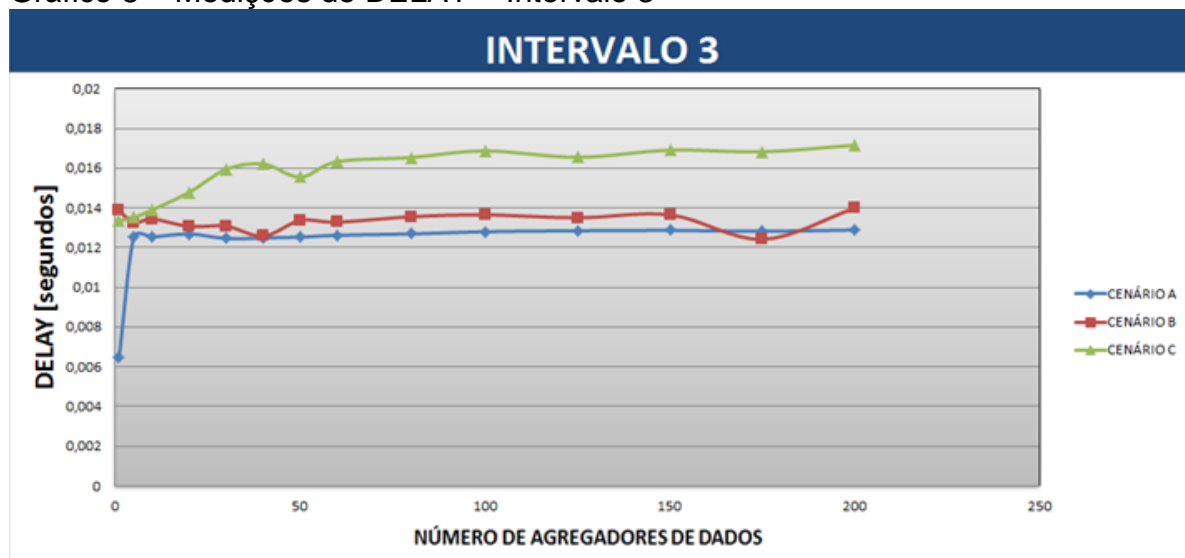
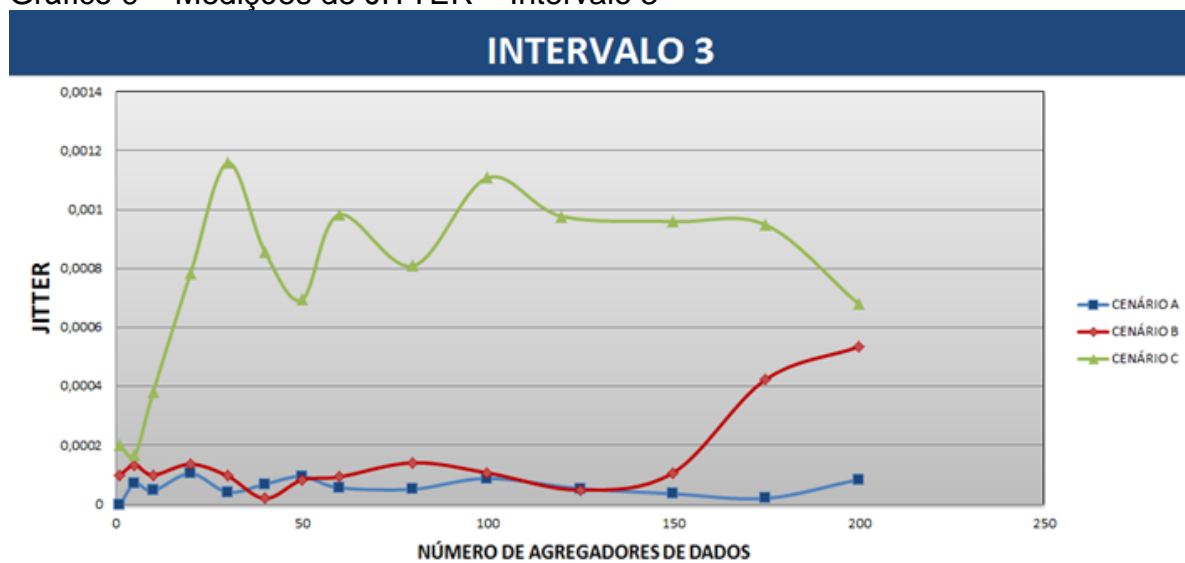


Gráfico 9 – Medições de JITTER – Intervalo 3



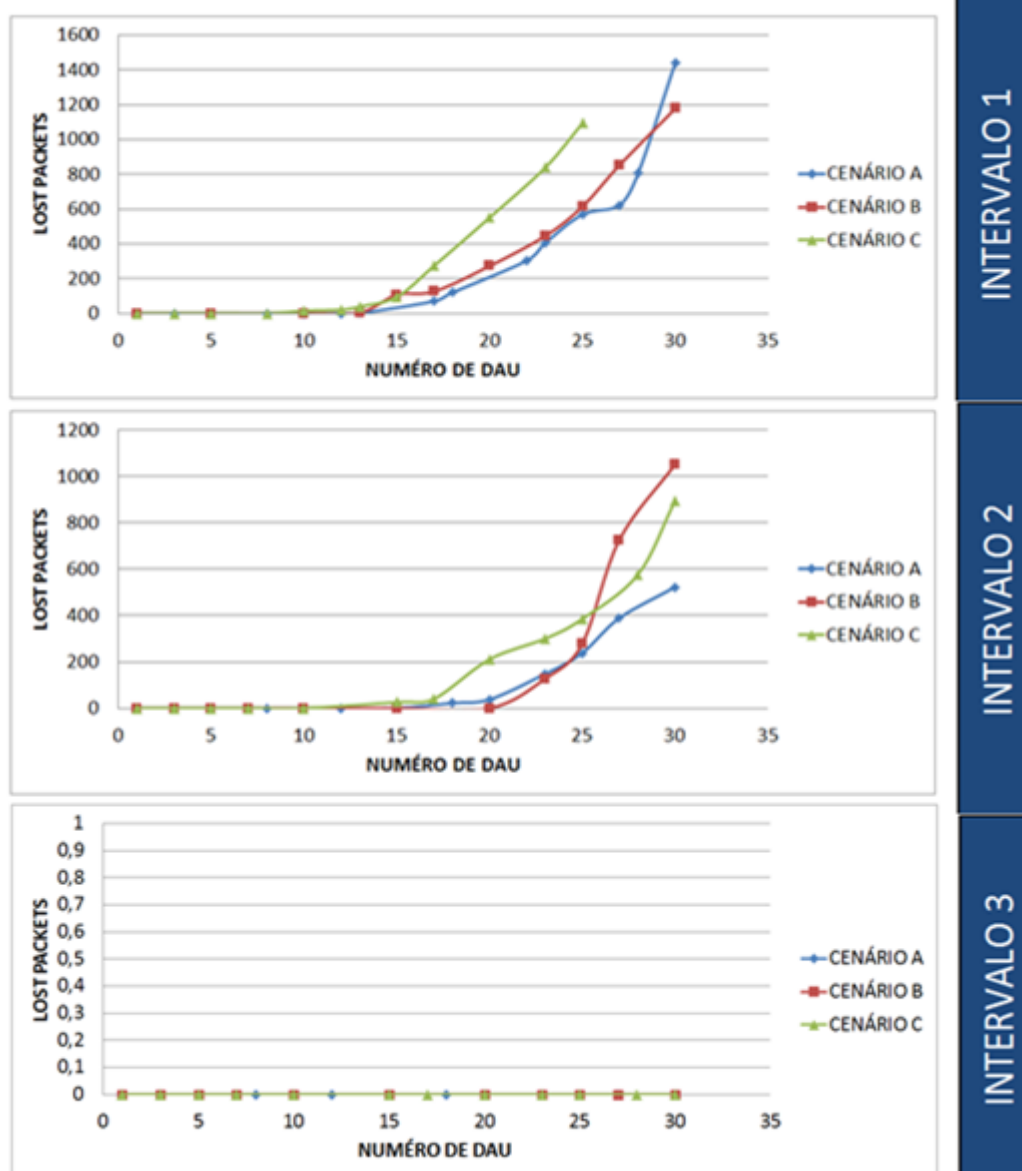
4.4 Perda de Pacotes

Para complementar o estudo dos casos da simulação da rede LTE sob perfil de tráfego de *Smart Grid* foram obtidos alguns dados do parâmetro de perda de pacotes. Este parâmetro é importante para análise em conjunto com os gráficos apresentados anteriormente. Variando a quantidade de agregadores de dados (DAU) na rede, foram estabelecidas as medidas de *Lost Packets*, dos quais são apresentados na Tabela 15 e no Gráfico 10.

Tabela 15 – Medições de *Lost Packets*

	A		B		C	
	DAU	Media	DAU	Media	DAU	Media
INTERVALO 1	1	0	1	0	1	0
	3	0	5	0	3	0
	5	0	10	0	5	0
	8	0	13	5	8	0
	10	0	15	107	10	14
	12	0	17	126	12	21
	13	1	20	273	13	39
	17	70	23	446	15	95
	18	120	25	615	17	274
	22	304	27	854	20	552
	23	406	30	1179	23	840
	25	569			25	1096
27	623					
28	807					
30	1444					
INTERVALO 2	1	0	1	0	1	0
	3	0	3	0	3	0
	5	0	5	0	5	0
	8	0	7	0	7	0
	10	0	10	0	10	0
	12	0	15	0	15	26
	15	1	20	0	17	40
	18	22	23	127	20	211
	20	38	25	278	23	300
	23	148	27	726	25	385
	25	238	30	1051	28	576
	27	389			30	894
30	522					
INTERVALO 3	1	0	1	0	1	0
	3	0	3	0	3	0
	5	0	5	0	5	0
	8	0	7	0	7	0
	10	0	10	0	10	0
	12	0	15	0	15	0
	15	0	20	0	17	0
	18	0	23	0	20	0
	20	0	25	0	23	0
	23	0	27	0	25	0
	25	0	30	0	28	0
	27	0			30	0
30	0					

Gráfico 10 – Medições de *Lost Packets*



4.5 Intervalo de Confiança

Para proporcionar os dados mais confiáveis, para qualquer estudo proposto, as simulações podem ser incrementadas com cálculos estatísticos que garantam a confiabilidade do sistema.

Nessas simulações das redes LTE, foi imposto um intervalo de confiança a fim de garantir uma maior probabilidade de sucesso nas avaliações dos dados obtidos. Esse parâmetro IC (intervalo de confiança) foi escolhido com o valor de

98%, o que significa que, encontrado um intervalo de valores, o resultado contera o valor verdadeiro com 98% de confiança.

Para análise dos intervalos de confiança, foi definido o caso da simulação onde o número de DAU's é igual a 10. Assim, para o valor de 5 simulações diferentes, alterando a semente (*seed*) em cada processo, foi possível definir vários valores de intervalo de confiança, referentes a cada caso de cenário distinto, que é perfeitamente válido para todos os tipos de simulações realizadas, garantindo, assim, uma maior confiabilidade para os resultados obtidos.

Utilizando as fórmulas apresentadas nas Equação 3 e Equação 4, os valores de intervalo de confiança são apresentados nas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 para os dados de *Throughput*, *Delay* e *Jitter*, respectivamente. Esses valores encontrados significam que o valor médio das simulações devem ser acrescidos e diminuídos, em cada caso, do valor do intervalo calculado, para que seja válido a porcentagem de confiança de 98%, descrita anteriormente.

Equação 3 – Desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Equação 4 – Intervalo de confiança

$$\mu = \bar{x} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}}$$

Tabela 16 – Valores de Intervalo de Confiança - Throughput

THROUGHPUT									
	INTERVALO 1 - 0,0083 s			INTERVALO 2 - 0,01 s			INTERVALO 3 - 1,0 s		
SEED	A - 10-0	B - 10-1	C - 10-10	A - 10-0	B - 10-1	C - 10 - 10	A - 10 - 0	B - 10 - 1	C - 10 - 10
1	9,859	27,198	26,683	8,279	25,768	25,656	0,085	17,598	17,469
2	9,835	27,202	26,982	8,118	25,781	25,878	0,085	17,563	17,483
3	9,828	27,067	27,108	8,258	25,738	25,934	0,085	17,635	17,611
4	9,893	27,166	27,122	8,219	25,717	25,893	0,084	17,708	17,417
5	9,83	27,174	27,04	7,837	25,764	25,684	0,084	17,59	17,511
DESV. PADRAO	0,027540879	0,054952707	0,178966477	0,18149022	0,02573519	0,1289147	0,000547723	0,056113278	0,071702162
INTERVALO DE CONFIANÇA	0,028652825	0,057171389	0,186192141	0,188817778	0,026774233	0,134119554	0,000569837	0,058378818	0,074597093

Tabela 17 – Valores de Intervalo de Confiança – Delay

DELAY									
	INTERVALO 1 - 0,0083 s			INTERVALO 2 - 0,01 s			INTERVALO 3 - 1,0 s		
SEED	A - 10-0	B - 10-1	C - 10-10	A - 10-0	B - 10-1	C - 10 - 10	A - 10 - 0	B - 10 - 1	C - 10 - 10
1	0,036955814	0,061216892	1,238499138	0,022815956	0,02475389	0,026656125	0,012919885	0,012727501	0,014465447
2	0,061198193	0,067255609	0,45314512	0,025790535	0,027382744	0,079928623	0,012801597	0,012987918	0,014522313
3	0,040546139	0,034222776	0,266256368	0,037825249	0,019506793	0,026226359	0,011657553	0,012841043	0,014039987
4	0,036955814	0,078910589	0,041263683	0,039173105	0,031028475	0,07502215	0,013888898	0,013134793	0,013192422
5	0,042933226	0,030240356	0,285484222	0,256957424	0,051167467	0,083853067	0,012224757	0,01328167	0,012678812
DESV. PADRAO	0,010095643	0,021232697	0,460812657	0,101127816	0,01215165	0,02928495	0,00083437	0,00022194	0,000813376
INTERVALO DE CONFIANÇA	0,010503249	0,022089954	0,47941769	0,105210791	0,012642265	0,030467312	0,000868057	0,000230901	0,000846216

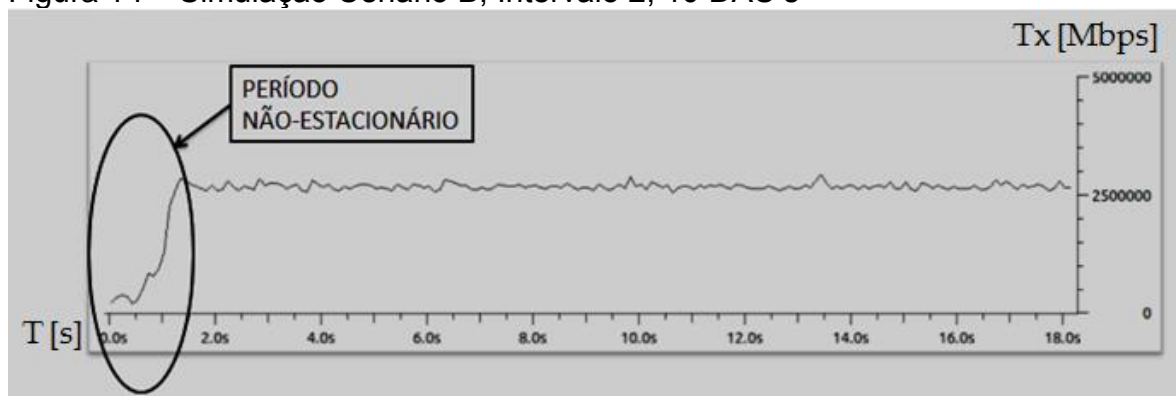
Tabela 18 – Valores de Intervalo de Confiança – Jitter

JITTER									
	INTERVALO 1 - 0,0083 s			INTERVALO 2 - 0,01 s			INTERVALO 3 - 1,0 s		
SEED	A - 10-0	B - 10-1	C - 10-10	A - 10-0	B - 10-1	C - 10 - 10	A - 10 - 0	B - 10 - 1	C - 10 - 10
1	0,001616049	0,001132128	0,001315787	0,001844478	0,001758486	0,000841438	0,000233333	0,000266667	0,0004
2	0,001943655	0,00114542	0,001261806	0,001630329	0,001643273	0,001659875	0,000233333	3,33333E-05	0,000466667
3	0,000867603	0,001015682	0,001152334	0,001300867	0,001427063	0,001109545	0	3,33333E-05	0,000266667
4	0,001616049	0,001207278	0,001856597	0,001635508	0,001571644	0,003106664	0,0002	3,33333E-05	0,0005
5	0,001222046	0,001045032	0,001240826	0,000945022	0,00194428	0,001524542	0	3,33333E-05	0,0002
DESV. PADRAO	0,000415314	7,79743E-05	0,000280795	0,00035268	0,000195231	0,000878003	0,000122474	0,00010435	0,000129099
INTERVALO DE CONFIANÇA	0,000432082	8,11224E-05	0,000292132	0,000366919	0,000203113	0,000913452	0,000127419	0,000108563	0,000134312

Além disso, para obter maior chance de sucesso nas análises dos dados, em cada caso estudado foi excluído das análises o período da simulação do qual denominamos de período de aquecimento da simulação, ou seja, o intervalo de tempo em que a simulação ainda não atingiu o estado estacionário.

Na Figura 14 é mostrado um exemplo de um gráfico obtido no caso da simulação referente ao intervalo 2, cenário B e a quantidade de 10 agregadores de dados. Na ilustração é possível observar que a simulação inicia com certa instabilidade, e apenas a partir do tempo de 2 segundos é que a simulação se estabiliza. Sendo assim, neste caso, o período entre 0 a 2 segundos é denominado de período não estacionário, e o período entre 2 segundos até o final da simulação é denominado de período estacionário, onde se encontra por absoluto, todos os dados analisados no estudo.

Figura 14 – Simulação Cenário B, Intervalo 2, 10 DAU's



4.6 Análise

Analisando os gráficos referentes aos dados obtidos nas simulações é possível observar que a medida que aumenta a quantidade de agregadores de dados (DAU's), a tendência é a velocidade de transmissão (*Throughput*) aumentar de maneira proporcional, como o Gráfico 4 mostra com evidência. Isso acontece devido ao fato de que, até quando o sistema suportar, todos os nós que enviarem pacotes à rede de transmissão, realizarão essa tarefa de maneira mais eficiente possível.

Outro fato a observar é que o sistema de transmissão possui um valor máximo de *throughput* capaz de suportar, sendo que esse valor é inversamente proporcional a taxa de amostragem do sistema, ou seja, o *throughput* máximo para o sistema do Intervalo 3 (aproximadamente 20 Mbps) é menor que o *throughput* máximo para o sistema do Intervalo 2 (aproximadamente 30 Mbps), que por sua vez é menor que o valor obtido no caso do Intervalo 1 (aproximadamente 31 Mbps). Quando o sistema ativo chega ao seu limiar, a rede começa a se esgotar, ou seja, o número de perdas de pacotes começa a aumentar radicalmente, e a eficiência das transmissões são abaladas. É possível verificar este momento de esgotamento da rede no Gráfico 10, onde observa-se, em cada caso, que a partir de um certo momento o número de perda de pacotes na transmissão aumenta exponencialmente, deduzindo, dessa forma, que a rede não se faz aproveitável. Neste momento, apesar da taxa de transmissão se manter constante, as medidas de atraso são derrubadas para a nulidade e a variação de atraso passa a não existir mais, mantendo o *jitter* constante. Esse fato é possível observar na Figura[15], onde

mostra os mesmos casos dos Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3, para o Cenário A, porém sob um maior número de casos medidos.

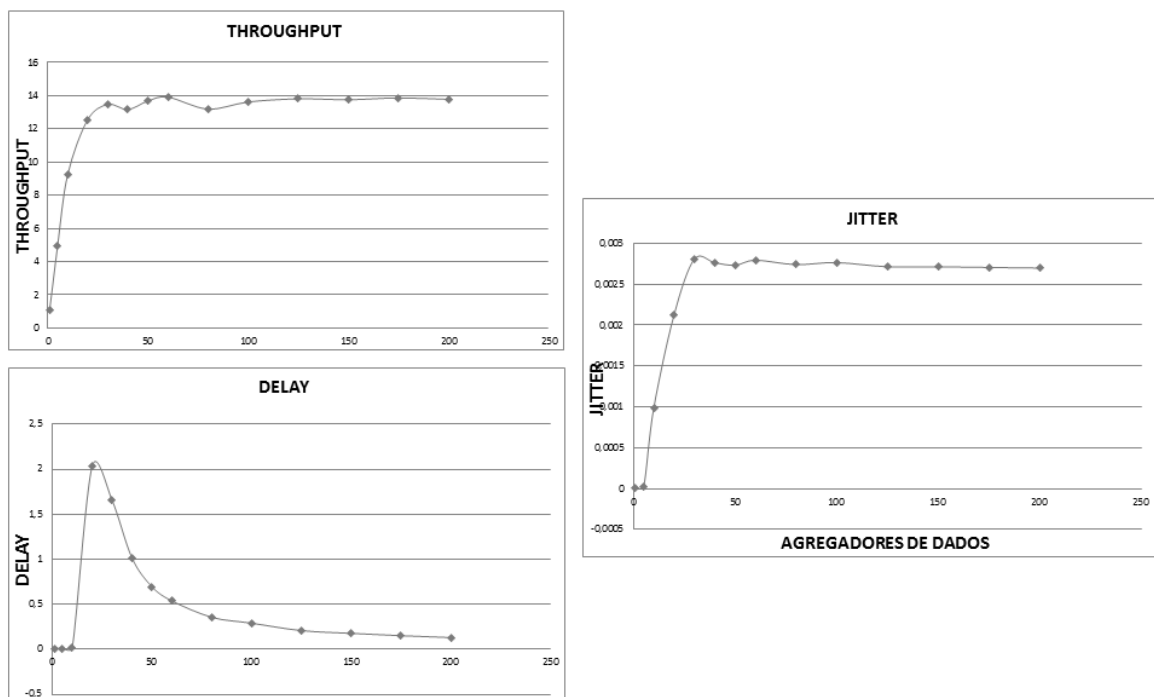


Figura 15 – Medições do Cenário A – Intervalo 1

É evidente a mudança dos parâmetros de todos os casos quando inserido ao sistema um tráfego TCP/FTP. No caso do parâmetro referente a taxa de transmissão, quando o sistema está sob capacidade máxima, e o *throughput* se mantém constante, o valor chega, em média, a duplicar quando há um tráfego de transferência de arquivos (FTP). Já nos parâmetros de *delay* e *jitter* também ocorre uma mudança em seus valores, isso ocorre devido ao fato de que, quando um tráfego diferente aparece no sistema, há uma disputa de espaço entre os dois tipos de tráfego (TCPxUTP), que, além de aumentar o tráfego que o sistema deverá suportar, provoca no mesmo uma alteração no atraso das mensagens, assim como uma variação dessa. Esta variação no atraso é chamada de *jitter*, e é basicamente a variação deste parâmetro entre pacotes de dados sucessivos na rede de transmissão. Esse fenômeno ocorre principalmente quando há um congestionamento de tráfego na rede ou há muita alternância de caminho dos dados, e uma das principais consequências deste evento é a perda de pacotes no sistema de transmissão. Para evitar o acontecimento de *jitter* na rede, utiliza-se

buffers para armazenamento de pacotes, a fim de diminuir a ocorrência de congestionamento no sistema.

Na Tabela 19 observa-se a análise quantitativa dos agregadores de dados em redes de transmissão LTE sob demanda de tráfego de redes inteligentes. Salienta-se que esses dados foram obtidos a partir das taxas de amostragem adotadas para realização das simulações, porém é possível descobrir qualquer valor desejado a partir de cálculos utilizando as Equação 5, Equação 6, Equação 7 e Equação 8, dependendo dos cenários desejados. Para as fórmulas citadas, considera-se 'X' a quantidade de agregadores de dados, 'Tx' a taxa de amostragem do sistema (em bits por segundo), 'T' o tamanho dos pacotes (em bits) e 'i' o intervalo de tempo de transmissão das mensagens.

Equação 5 – Quantidade de agregadores de dados para Cenário A

$$X_A = (25 * 127,5k) / T_x$$

Equação 6 – Quantidade de agregadores de dados para Cenário B

$$X_B = (22 * 127,5k) / T_x$$

Equação 7 – Quantidade de agregadores de dados para Cenário C

$$X_C = (17 * 127,5k) / T_x$$

Equação 8 – Taxa de Amostragem

$$T_x = T / i$$

Tabela 19 – Análise quantitativa de DAU's

INTERVALO	1			2			3		
TAXA DE AMOSTRAGEM	127,5 kbps			102,0 kbps			1,02 kbps		
CENÁRIO	A	B	C	A	B	C	A	B	C
DAU	25	22	17	30	28	23	3125	2750	2125

5 CONCLUSÃO

Com o aumento veloz e contínuo da demanda de energia elétrica nos pontos consumidores nos últimos anos no país, é cada vez mais necessário um arranjo que faça da distribuição de eletricidade um sistema mais eficiente possível. Estudos sobre a implantação de redes *Smart Grid* vem sendo elaborados em busca de modernizar o sistema de distribuição de energia elétrica, que hoje, é visto como incapaz de suportar as demandas energéticas futuras.

Este modelo de redes inteligentes apresenta diversas vantagens ao sistema elétrico como, por exemplo, um melhor gerenciamento de distribuição de eletricidade, medições de energia e coordenação de falhas ou interrupções. Além disso, a participação do consumidor é mais ativa ao se utilizar *Smart Grid*, já que proporciona ao usuário a oportunidade de acompanhar e controlar seu consumo de energia elétrica através de medidores inteligentes, implantados nas residências e/ou pontos terminais, capazes de compartilhar informações com a rede elétrica através de um fluxo bidirecional de informações, característico dessas redes inovadoras. Porém, esse sistema proeminente exige uma infraestrutura de comunicação eficiente, confiável e que ofereça uma interoperabilidade dentro da rede.

A escolha da tecnologia LTE é uma boa alternativa como plataforma de transmissão de redes Smart Grid. As redes 4G, atualmente sendo utilizadas para sistemas de telefonia móvel, apresentam inúmeras vantagens quanto a sua implantação, já que possuem uma alta confiabilidade, devido a sua arquitetura de rede ser totalmente redundante, além de possuir uma boa performance (alto *throughput* e baixa latência) e possuir a característica de interoperabilidade, requerida pelas redes inteligentes. Outra vantagem bastante significativa é que a infraestrutura de transmissão pode ser compartilhada com as redes de telefonia móvel, podendo, assim, reduzir bastante os custos de manutenção para as Operadoras de Sistemas Elétricos, já que a responsabilidade passaria a ser das Operadoras de Telefonia.

Definindo três tipos de Cenários diferentes (A, B e C) e três valores de taxa de amostragem distintos (Intervalo 1, 2 e 3), foram realizadas diversas simulações no *software* NS-3 em busca de analisar o comportamento da rede de

transmissão, utilizando plataforma LTE. Dados de taxa de transmissão (*Throughput*), latência (*Delay*) e variância do atraso (*Jitter*) foram obtidos das simulações e separados para análise.

As simulações foram bem sucedidas já que foi possível verificar, graficamente, qual o comportamento da rede para cada caso distinto, e assim, determinar qual o número máximo de agregadores de tráfego (DAU) que uma rede LTE pode suportar para cada evento sucedido.

Porém, é importante ressaltar que a relação quantitativa encontrada de número de DAU e taxa de amostragem pode ser feito para qualquer caso, ou seja, definindo um valor de taxa de amostragem (*bits por segundo*) é permitido realizar um cálculo de número de agregadores de tráfego que uma rede LTE pode suportar antes de saturar, assim como, definindo um número de DAU's é factível descobrir qual o valor máximo de taxa de amostragem que é possível inserir na rede.

É possível concluir que a utilização da tecnologia LTE atuando como plataforma de comunicação para sistemas com perfil de tráfego de redes inteligentes, propiciam uma alta taxa de transmissão de informações, podendo alcançar o valor de *throughput* de até 30 Mbps, considerado um valor alto para redes *wireless*. Além disso, o fato da rede 4G suportar mais de 20 agregadores de tráfego, transmitindo informações a mais de 100 kbps, considerando ainda um tráfego de fundo, já pode ser considerado um positivo argumento para implementação desse sistema.

É importante ressaltar, também, que o número de medidores inteligentes na rede é variável de acordo com a taxa de amostragem desejada e o tipo de medição que interessa realizar. Por exemplo, para medições de qualidade de energia, espera-se que a taxa de amostragem seja bastante alta, assim estipula-se que há vários *smart meters* na rede transmitindo um alto número de medições.

Para esses diversos tipos de medições há diversos estudos sendo realizados com objetivo de verificar qual a taxa de amostragem desejada, porém as redes inteligentes são muito novas no mercado e pouca literatura está disponível a respeito. Porém, com o resultado destas simulações é possível verificar que a tecnologia LTE pode desempenhar um bom desempenho nas redes de transmissão com perfil de tráfego de *Smart Grid*.

6 REFERÊNCIA

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico. Projeções da Carga de Energia e Demanda para o Planejamento Anual da Operação Energética 2011-2015. Rio de Janeiro (RJ); 2011.
- [2] EKANAYAKE J. et. al. Smart Grid Technology and Applications. United Kingdom. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, 289p.
- [3] HOSSAIN, E. Smart Grid Communications and Networking. New York. Cambridge University Press, 2012, 480p.
- [4] European Commission Research, “European smart grids technology platform vision and strategy for Europe”s electricity networks of the future”. Disponível em: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf, acessado em Fevereiro/2013.
- [5] Department of Energy, USA, “The smart grid: an introduction”. Disponível em: <http://www.oe.energy.gov/SmartGridIntroduction.htm>, Acessado em: Fevereiro/2013.
- [6] U.S. Department of Energy, “The SMART GRID: An Introduction”, Disponível em [http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages\(1\).pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf), Acessado em Junho/2013.
- [7] MOMOH J. Smart Grid Fundamentals of Design and Analysis. New Jersey. John Willey & Sons, Inc, 2012, 218p.
- [8] The Grid Wise Architecture Council, “Grid Wise interoperability context-setting framework”. Disponível em: <http://www.gridwiseac.org/about/publications.aspx> , acessado em Fevereiro/2013.
- [9] ZIMMERMANN H. OSI reference model – the ISO model of architecture for open systems interconnection, IEEE Transactions on Communications, vol. 28.
- [10] Smart Energy and Security, “3G Cellular Technology for Smart Grid Communications”. Disponível em <http://www.qualcomm.com/solutions/ioe/smart-energy>, acessado em Fevereiro/2013.
- [11] 3GPP, Overview 3GPP Release 8 V0.2.11, Disponível em http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/, Acessado em Junho/2013

- [12] 3GPP, Overview 3GPP Release 9 V0.2.10, Disponível em http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/, Acessado em Junho/2013.
- [13] ITU/BDT Arab Regional Workshop on “4G Wireless Systems” LTE Technology, Disponível em <http://www.cert.nat.tn>, Acessado em Junho/2013.
- [14] Agilent Technologies, “Introducing LTE-Advanced”, Disponível em <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-6706EN.pdf>, Acessado em Junho/2013.
- [15] NEC Corporation, “Empowering the Next Generation of Mobile Networks” Disponível em http://de.nec.com/de_DE/en/global/solutions/nsp/lte/pdf/brochure.pdf , Acessado em Junho/2013.
- [16] H. Holma e A. Toskala. WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE. 2007. John Wiley & Sons. 4ª Edição.
- [17] H. Holma e A. Toskala. LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. 2009. John Wiley & Sons, Ltd.
- [18] Agilent, “Agilent 3GPP Long Term Evolution”, Disponível em <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>, Acessado em Fevereiro/2013.
- [20] VEJA, “Mais de 69% da população brasileira têm celular”, Disponível em <http://veja.abril.com.br/noticia/brasil/pnad-2011-mais-de-69-da-populacao-brasileira-tem-celular>“, Acessado em Fevereiro/2013.
- [21] NS-3, “What is NS-3”, Disponível em <http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/> , Acessado em Fevereiro/2013.
- [22] NS-3, “LTE-Module”, Disponível em <http://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html>, Acessado em Fevereiro/2013.
- [23] GridNet, “4G Smart Grid Solution”, Disponível em http://www.ngusummitna.com/media/whitepapers/Gridnet_NGUNA.pdf, Acessado em Julho/2013.

7 APÊNDICE A – SCRIPT PARA SIMULAÇÃO

```
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/tcp-socket.h"
#include "ns3/olsr-module.h"
#include "ns3/dsdv-module.h"
/-----
using namespace ns3;
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("Simulacao - LTE/Smart Grid");
int
main (int argc, char *argv[])
{
/-----Parametros da Simulação
uint16_t seed = 1; // SEMENTE DE SIMULAÇÃO
uint16_t numberOfNodes1 = 10; // NUMÉRO DE DAU
uint16_t numberOfNodes2 = 0; // NUMERO DE NÓS BACKGROUND
double simTime = 30.0; // TEMPO DE SIMULAÇÃO
double interPacketInterval = 0.01; // INTERVALO DE TRANSMISSÃO DE PACOTES
std::string name ("A10-Simulacao"); // NOME DO ARQUIVO SALVO
/-----Linha de comandos para alterar parametros no código
CommandLine cmd;
cmd.AddValue("seed", "Seed of simulation", seed);
cmd.AddValue("numberOfNodes1", "Number of UE1 pairs", numberOfNodes1);
cmd.AddValue("numberOfNodes2", "Number of UE2 pairs", numberOfNodes2);
cmd.AddValue("simTime", "Total duration of the simulation [s]", simTime);
cmd.AddValue("interPacketInterval", "Inter packet interval [s]", interPacketInterval);
cmd.Parse(argc, argv);
ns3::SeedManager::SetSeed(seed);
/-----LTE Module
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<EpcHelper> epcHelper = CreateObject<EpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
/----- LTE Parameters
/*
default ns3::LteHelper::Scheduler "ns3::PifMacScheduler"
default ns3::LteHelper::PathlossModel "ns3::FriisSpectrumPropagationLossModel"
*
default ns3::LteEnbNetDevice::UfBandwidth "25"
*
default ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth "25"
*
default ns3::LteEnbNetDevice::DlEarfcn "25000"
*
default ns3::LteEnbNetDevice::UfEarfcn "25000"
*
default ns3::LteUePhy::TxPower "24"
*
default ns3::LteUePhy::NoiseFigure "9"
*
default ns3::LteEnbPhy::TxPower "32"
*
default ns3::LteEnbPhy::NoiseFigure "5" */
ConfigStore inputConfig;
inputConfig.ConfigureDefaults();
inputConfig.SetFilename("input-default.txt");
//ns3::ConfigStore::Filename=input-default.txt
/-----Antenna Parameters
lteHelper -> SetEnbAntennaModelType ("ns3::CosineAntennaModel");
lteHelper -> SetEnbAntennaModelAttribute ("Orientation", DoubleValue (0));
lteHelper -> SetEnbAntennaModelAttribute ("Beamwidth", DoubleValue (60));
lteHelper -> SetEnbAntennaModelAttribute ("MaxGain", DoubleValue (0.0));
/-----Linha de Comando
cmd.Parse(argc, argv)
Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();
/-----Criar RemoteHost
NodeContainer remoteHostContainer;
```

```

remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (remoteHostContainer);
/-----Criar link internet
PointToPointHelper p2ph;
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100000000b/s"))); // Taxa de Transmissão LINK1
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (64000)); // MTU Jumbo Frame
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.0000010))); /
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, remoteHost);
/-----Determinar endereço IP para link
Ipv4AddressHelper ipv4h;
ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpfaces;
internetIpfaces = ipv4h.Assign (internetDevices);
/-----interface 0 é localhost e interface1 é dispositivo p2p
Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpfaces.GetAddress (1);
Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting>remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);
/-----Criar NodeContainer para cada grupo de nós
NodeContainer ueNodes1; // Criar grupo de nós DAU
NodeContainer ueNodes2; // Criar grupo de nós BACKGROUND
NodeContainer enbNodes; // Criar grupo de nós eNODEB
enbNodes.Create(1);
ueNodes1.Create(numberOfNodes1);
ueNodes2.Create(numberOfNodes2);
/----- Instalar Modelo de Mobilidade
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc0 = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc0->Add (Vector(0, 0, 0));
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc1 = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes1; i++)
{
    for (uint16_t u = 0; u <= 21; u++)
    {
        positionAlloc1->Add (Vector(1000-i*50, 1000-u*50, 0));
    }
}
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc2 = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes2; i++)
{
    for (uint16_t u = 0; u < 6; u++)
    {
        positionAlloc2->Add (Vector(900-i*45, 900-u*45, 0));
    }
}
/----- Modelo de Mobilidade para Enb
MobilityHelper mobility0;
mobility0.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility0.SetPositionAllocator(positionAlloc0);
mobility0.Install(enbNodes);
/----- Modelo de Mobilidade para DAU
MobilityHelper mobility1;
mobility1.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility1.SetPositionAllocator(positionAlloc1);
mobility1.Install(ueNodes1);
/----- Modelo de Mobilidade para NB
MobilityHelper mobility2;
mobility2.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility2.SetPositionAllocator(positionAlloc2);
mobility2.Install(ueNodes2);
/----- Instalar LTE Devices para cada grupo de nós
NetDeviceContainer enbDevs;
NetDeviceContainer ueDevs1;
NetDeviceContainer ueDevs2;
enbDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);
ueDevs1 = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes1);
ueDevs2 = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes2);
/----- Instalar Internet aos dispositivos terminais
internet.Install (ueNodes1);
Ipv4InterfaceContainer uE_Interface1;
uE_Interface1 = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueDevs1));
internet.Install (ueNodes2);
Ipv4InterfaceContainer uE_Interface2;
uE_Interface2 = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueDevs2));
/----- Determinar endereço IP e instalar aplicações
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes1.GetN (); ++u)
{

```

```

Ptr<Node> ueNode_sg = ueNodes1.Get (u);
Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting1 = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode_sg->GetObject<Ipv4> ());
ueStaticRouting1->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
}
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes2.GetN (); ++u)
{
Ptr<Node> ueNode_ftp = ueNodes2.Get (u);
Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting2 = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode_ftp->GetObject<Ipv4> ());
ueStaticRouting2->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
}
/----- Atribuir todos dispositivos à Enb
lteHelper->Attach (ueDevs1, enbDevs.Get (0));
lteHelper->Attach (ueDevs2, enbDevs.Get (0));
/-----Determinar numero randomico
Ptr<UniformRandomVariable> rand;
rand= CreateObject<UniformRandomVariable>();
rand -> SetAttribute("Min",DoubleValue (0.0));
rand -> SetAttribute("Max",DoubleValue (10.0));
{ std::cout << "rand: " << rand->GetValue()
<< "\n\n "
<< std::endl;
}
/-----Rodar Aplicação CBR/UDP
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes1.GetN (); ++u)
{ uint16_t ulPort = 2000;
++ulPort;
ApplicationContainer clientApps1; // CRIAR INTERFACE CLIENTE
ApplicationContainer serverApps1; // CRIAR INTERFACE SERVIDOR
PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), ulPort));
clientApps1 = ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost); // INSTALA INTERFACE SERVIDOR NO DAU
UdpClientHelper ulClient (remoteHostAddr, ulPort);
ulClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (interPacketInterval))); // DEFINE INTERVALO DE TRANSMISSAO
ulClient.SetAttribute ("MaxPackets", UintegerValue(100000000));
ulClient.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (1020)); // DEFINE NUMERO MAXIMO DE PACOTES
Config::SetDefault ("ns3::UdpSocket::RcvBufSize", UintegerValue (1000000000)); // DEFINE TAMANHO DO BUFFER
serverApps1 = ulClient.Install (ueNodes1.Get(u)); // INSTALA INTERFACE CLIENTE NA ENB
serverApps1.Start (Seconds (rand->GetValue()/9)); // INICIA APLICAÇÃO SERVER
clientApps1.Start (Seconds (rand->GetValue()/9)); // INICIA APLICAÇÃO CLIENT
clientApps1.Stop (Seconds (simTime)); // FINALIZA APLICAÇÃO CLIENT
serverApps1.Stop (Seconds (simTime)); // INICIA APLICAÇÃO SERVER
}
/-----Rodar Aplicação FTP/TCP
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes2.GetN (); ++u)
{
uint16_t dlPort = 1234;
++dlPort;
ApplicationContainer clientApps2; // CRIAR INTERFACE CLIENTE
ApplicationContainer serverApps2; // CRIAR INTERFACE SERVIDOR
Address sinkLocalAddress (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), dlPort));
PacketSinkHelper sinkHelper ("ns3::TcpSocketFactory", sinkLocalAddress);
clientApps2 = sinkHelper.Install (ueNodes2.Get(u)); // INSTALA INTERFACE SERVIDOR NO NO BACKGROUND
OnOffHelper sourceHelper ("ns3::TcpSocketFactory", Address ());
sourceHelper.SetAttribute ("OnTime", StringValue ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=1.0]"));
sourceHelper.SetAttribute ("OffTime", StringValue ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0.0]"));
AddressValue remoteAddress (InetSocketAddress (ueInterface2.GetAddress(u), dlPort));
sourceHelper.SetAttribute ("Remote", remoteAddress);
sourceHelper.SetAttribute ("DataRate", DataRateValue(DataRate("1Gbps"))); // TAXA DE TRANSMISSAO
sourceHelper.SetAttribute ("PacketSize", UintegerValue (100000)); // DEFINE TAMANHO DO PACOTE
Config::SetDefault ("ns3::TcpSocket::RcvBufSize", UintegerValue (1000000000)); // DEFINE TAMANHO BUFFER
serverApps2 = sourceHelper.Install (remoteHost);
clientApps2.Start (Seconds (1.0)); // INICIA APLICAÇÃO CLIENT
clientApps2.Stop (Seconds (simTime)); // FINALIZA APLICAÇÃO CLIENT
serverApps2.Start (Seconds (1.0)); // INICIA APLICAÇÃO SERVER
serverApps2.Stop (Seconds (simTime)); // FINALIZA APLICAÇÃO SERVER
}
lteHelper->EnableTraces ();
/-----PCAP Wireshark
p2ph.EnablePcapAll(name);
/-----Flow Monitor
Ptr<FlowMonitor> flowmon;
FlowMonitorHelper flowmonHelper;
flowmon = flowmonHelper.InstallAll ();

```

```
Simulator::Stop(Seconds(simTime));  
Simulator::Run();  
flowmon->SerializeToXmlFile (name + ".flowmon", false, false);  
Simulator::Destroy();  
return 0;  
}
```