

CIBELE CAETANO SALDANHA DE CASTRO

**UTILIZAÇÃO DO PROTOCOLO PR-SCTP PARA COMUNICAÇÃO DE  
SISTEMAS SMART GRID SOBRE LTE**

Proposta de Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Marcelo Pedroso

CURITIBA

2014

# CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E METODOLOGIA</b>	<b>5</b>
2.1	Avaliação do estado da arte . . . . .	5
2.2	Modelo proposto . . . . .	6
2.3	Validação do método . . . . .	6
<b>3</b>	<b>CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>	<b>7</b>
3.1	Comunicação no Smart Grid . . . . .	7
3.1.1	Infraestrutura de Medição Avançada . . . . .	8
3.1.2	Resposta à Demanda . . . . .	9
3.1.3	<i>Wide Area Measurement System (WAMS)</i> . . . . .	9
3.1.4	Gerenciamento da Distribuição . . . . .	10
3.2	<i>Long Term Evolution (LTE)</i> . . . . .	11
3.2.1	Grade de recursos . . . . .	13
3.2.2	Alocação de recursos . . . . .	15
3.2.3	Qualidade de Serviço . . . . .	16
3.3	<i>Partial Reliable Stream Control Transmission Protocol (PR-SCTP)</i> . . . .	17
<b>4</b>	<b>CRONOGRAMA</b>	<b>19</b>

## 1 INTRODUÇÃO

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

A infraestrutura de comunicação desempenha papel fundamental no *Smart Grid*, pois deve conectar e transmitir informações dos principais componentes da rede. O padrão de tecnologia celular *Long Term Evolution* (LTE) é uma alternativa promissora para comunicação de sistemas *Smart Grids*, pois oferece grande alcance de cobertura, suporte a diferentes requisitos de qualidade de serviço (QoS), uso eficiente dos recursos de rádio, e baixo custo, devido à economia de escala por ser um padrão global [Brown and Khan 2013]. No entanto, deve ser analisado se as características e

requisitos de comunicação das aplicações *Smart Grid* são atendidas por esta tecnologia, pois muitas delas possuem requisitos específicos de qualidade de serviço.

Um protocolo da camada de transporte que está sendo muito estudado para comunicações em tempo real é o *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP), por oferecer algumas funcionalidades adicionais aos tradicionais protocolos de transporte, TCP e UDP, como por exemplo *multi-homing*, *multistreaming*, confiabilidade parcial e entrega não-ordenada de pacotes. Além destas funcionalidades do SCTP, foi definida uma extensão para este protocolo, chamada *Partial Reliable Stream Control Transmission Protocol* (PR-SCTP), que oferece o serviço *Timed Reliability*. Este serviço permite configurar o prazo de entrega de cada uma das mensagens a ser enviada, e pode ser interessante para a comunicação de algumas aplicações *Smart Grid* em que o recebimento de informações atrasadas já não é mais útil. Alguns trabalhos envolvendo o protocolo SCTP em comunicação de aplicações *Smart Grid* exploram o serviço de *multi-homing* e *multi-streaming* [Alowaidi et al. 2012] [Chen et al. 2013], porém não foi encontrado nenhum trabalho explorando as funcionalidades do PR-SCTP.

Este projeto de dissertação de mestrado está estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta os objetivos do projeto e a metodologia de trabalho. O Capítulo 3 apresenta uma série de conceitos que são fundamentais para compreensão do tema, como as principais aplicações de sistemas *Smart Grid* e o escalonamento de recursos em redes LTE. O Capítulo 4 apresenta o cronograma de desenvolvimento das atividades.

## 2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo geral do projeto é avaliar quantitativamente e qualitativamente os benefícios do uso do protocolo de transporte PR-SCTP na comunicação de aplicações *Smart Grid* sobre LTE, se comparado aos protocolos mais comumente utilizados, TCP e UDP.

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Estabelecer políticas de retransmissão de pacotes, considerando os diversos tipos de aplicações *Smart Grid*.
- Avaliar a latência, *jitter*, *throughput* e perda de pacotes na comunicação de aplicações *Smart Grid* utilizando o protocolo PR-SCTP sobre LTE.
- Estabelecer cenários de uso da rede LTE que permitam realizar a avaliação de desempenho.

### 2.1 Avaliação do estado da arte

Para a avaliação do estado da arte, serão realizadas as seguintes tarefas:

- Pesquisa de métodos, modelos e protocolos desenvolvidos para a comunicação de aplicações *Smart Grid*.
- Levantamento dos requisitos de comunicação de aplicações *Smart Grid*.
- Estudo sobre o padrão LTE, especialmente nos tópicos de alocação de recursos, retransmissão de pacotes e ferramentas voltadas à qualidade do serviço.
- Estudo sobre o protocolo PR-SCTP, suas aplicações e novidades.

## 2.2 Modelo proposto

A proposta deste projeto é a criação de uma nova política de retransmissão de pacotes de aplicações *Smart Grid*, através do protocolo de transporte PR-SCTP, utilizando o padrão LTE como tecnologia de comunicação. Este modelo visa a redução da latência e perda de pacotes, e a garantia de tráfego de mensagens prioritárias para a aplicação.

## 2.3 Validação do método

Serão realizadas simulações computacionais do sistema proposto utilizando a ferramenta NS3 [NS-3], que permite simulações de diversas topologias de rede. O NS3 possui suporte às tecnologias LTE e SCTP, e é muito utilizado para pesquisas por possuir código aberto, sendo possível desenvolver as simulações de acordo com as necessidades do projeto. A análise dos resultados será feita utilizando ferramentas estatísticas, principalmente através de intervalos de confiança. As simulações serão realizadas em um servidor DELL Power Edge, com sistema operacional Linux, disponível no Laboratório de Sistemas de Comunicação. A avaliação de resultados será realizada utilizando-se o software estatístico R. Os resultados serão comparados com os métodos disponíveis atualmente, nos quesitos atraso, *jitter*, *throughput* e *goodput*.

## 3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo estão descritos os conceitos fundamentais dos principais tópicos a serem estudados para a realização deste projeto.

### 3.1 Comunicação no Smart Grid

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

Wi-Fi [Gungor et al. 2013].

Diversas aplicações estão sendo desenvolvidas para o *Smart Grid*. Encontrar a tecnologia de comunicação mais adequada para cada uma destas aplicações não é simples, pois cada uma delas apresenta diferentes parâmetros de latência, *jitter* e taxa de dados. Por exemplo, em [U.S. Department of Energy 2010] sugere-se que a comunicação nas aplicações que envolvem medições em tempo real apresente latência entre 20 ms e 200 ms, e na aplicação de recarga de veículos entre 2 s e 5 min. Além disso, a comunicação no *Smart Grid* apresenta características de comunicação *Machine to Machine* (M2M) [Khan and Khan 2013], em que há maior tráfego de *uplink*, grande quantidade de terminais, e sessões de comunicação iniciadas frequentemente, mas com poucos e pequenos pacotes [Zhenqi et al. 2013]. A seguir serão detalhadas algumas das principais aplicações em *Smart Grid*.

### 3.1.1 Infraestrutura de Medição Avançada

Esta aplicação utiliza comunicação bidirecional para coletar remotamente os dados de medição de consumo, alarmes e alertas provenientes dos medidores inteligentes. Em inglês é comumente chamada de *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Ela permite que as concessionárias de energia sejam notificadas automaticamente no caso de interrupções no fornecimento de energia, facilita o processo de faturamento, e é base para a implementação da aplicação de controle de demanda. Já existe um padrão publicado, o IEC 61968-9, que define os tipos de mensagens a serem trocadas pelos equipamentos de leitura e controle desta aplicação. A infraestrutura de comunicação para a AMI deve prover acesso a um grande número de dispositivos, e suportar rajadas de dados no caso de falha generalizada no fornecimento de energia elétrica, devido ao envio de alarmes provenientes dos medidores inteligentes [Khan and Khan 2013]. A largura de banda necessária estará entre 10 e 100 kbps por componente, e a latência não será crítica, podendo estar entre 2 e 15 segundos. Os dados coletados pelos vários medidores inteligentes podem ser agrupados em um concentrador de dados, que por sua vez os envia ao sistema de controle da concessionária. De acordo com

[U.S. Department of Energy 2010] , a tecnologia de comunicação entre os medidores inteligentes e os concentradores podem ser redes *mesh* sem fio ou *Power-line Communication* (PLC), mas conforme a necessidade de largura de banda for aumentando, tecnologias de banda larga, como WiMAX ou celulares, poderão ser utilizadas. Já a comunicação entre os concentradores de dados e as concessionárias pode ser feito através de fibras óticas, redes de microondas ou redes comerciais sem fio, e deve ter largura de banda na faixa de 500 kbps.

### **3.1.2 Resposta à Demanda**

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

### **3.1.3 Wide Area Measurement System (WAMS)**

Esta aplicação tem por objetivo monitorar a qualidade da energia transmitida e proporcionar uma visão geral do funcionamento da rede, através da medição de sincrofasores. Estes fasores fornecem medidas precisas de corrente e tensão, e são sincronizados por uma referência de tempo comum, fornecida por satélites GPS. A medição dos

sincrofasores é feita por Unidades de Medição Fasoriais (ou *Phasor Measurement Unit* - PMU), instalados nas redes de transmissão e distribuição de energia. As medições geradas pelos PMUs são enviadas através de uma rede de comunicação local para os Concentradores de Dados Fasoriais (ou *Phasor Data Concentrators* - PDCs), que por sua vez agrupam as medições e as repassam para o centro de controle (CC) da concessionária de energia elétrica, como mostrado na figura 3.1.

A comunicação de dados dos PMUs é especificada pelo padrão IEEE C37.118-2005 [IEEE 2006], que define que cada pacote de dados do PMU tem um cabeçalho fixo de 16 bytes e um *payload* de tamanho variável, dependendo da quantidade de fasores medidos. O padrão também especifica a frequência de envio de mensagens ao PDC. Para sistemas de transmissão de energia com frequência de 50 Hz, as frequências de envio de mensagens podem ser de 10 ou 25 Hz, enquanto que em um sistema de 60 Hz, as frequências podem ser de 10, 12, 15, 20 ou 30 Hz. Assumindo o envio de 4 fasores, 3 para tensão e 1 para corrente, e considerando os cabeçalhos de outros protocolos, como IP e UDP, seria enviado um pacote com 76 bytes. Considerando que o envio de um pacote de dados não ultrapasse o envio do próximo pacote, o atraso máximo deste pacote é o inverso da frequência de transmissão [Khan and Khan 2012]. Em uma rede elétrica de 60 Hz, o atraso máximo deve ser de 33,33 ms para uma frequência de transmissão de 30 Hz. Com relação à largura de banda requerida, estima-se que esta esteja entre 600 kbps e 1500 kbps. Sendo assim, torna-se necessária a utilização de uma tecnologia de comunicação que proporcione baixa latência, grande largura de banda e escalabilidade, devido a grande quantidade de PMUs enviando dados no *uplink*.

### **3.1.4 Gerenciamento da Distribuição**

Esta aplicação possibilita o gerenciamento, operação e manutenção da rede de distribuição. Pode ser subdividida em duas: Automação da distribuição e automação de subestação. A automação da distribuição proporciona o monitoramento, controle e operação remoto e automático dos diversos componentes da rede em tempo real.

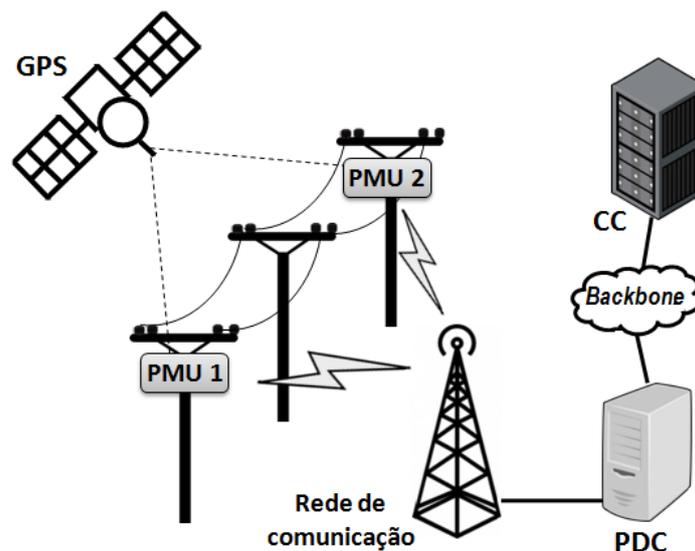


Figura 3.1: Arquitetura de um sistema de comunicação de PMUs

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

Na tabela 3.1 são apresentados os requisitos de comunicação das aplicações *Smart Grid* detalhadas nesta seção.

### 3.2 Long Term Evolution (LTE)

O LTE é um padrão desenvolvido pelo grupo 3GPP [3GPP 36.104 2008] para a quarta geração (4G) de redes móveis sem fio. Suas principais vantagens em relação às tecnologias 3G são o aumento da taxa de dados, a menor latência, e o uso mais flexível

Tabela 3.1: Requisitos de comunicação de aplicações *Smart Grid*  
[U.S. Department of Energy 2010]

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

e eficiente do espectro, devido a utilização da modulação multiportadora OFDM. As taxas de pico chegam a 150 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no *uplink*. Além disso, oferece melhor suporte para aplicações que exigem QoS, pois contém um conjunto de parâmetros de QoS já padronizado, que diferencia os fluxos de dados de acordo com os *QoS Class Identifiers* (QCI) [Capozzi et al. 2013]. Outra melhoria implementada no LTE é a arquitetura baseada em comutação por pacotes IP, ao invés da arquitetura baseada em comutação de circuitos utilizada nos padrões 3G. Isto, aliado ao fato de que todos os protocolos da interface de rádio e gerenciamento de recursos estão definidos somente entre a estação rádio-base (e-NodeB, no padrão LTE) e o *User Equipment* (UE), possibilita maiores taxas de dados e menor latência, pois reduz a quantidade de nós na rede [Brown and Khan 2013]. A interface de rádio no LTE é dividida em 5 camadas: Radio Resource Control (RRC), Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC), Medium Access Control (MAC) e Physical Layer (PHY). A camada MAC é especialmente importante na análise de QoS, pois é a responsável pela alocação de recursos de rádio, pelas definições de constelação da modulação de amplitude em quadratura (em inglês, QAM) e taxa de codificação, e pela correção de erros através do mecanismo *Hybrid Automatic Repeat Request* (H-ARQ), dentre outras funções.

Alguns fatores importantes a serem considerados na análise de latência no *uplink* do LTE são o tempo gasto no processo de solicitação de permissão de envio dados pelo UE, o atraso gerado pelas retransmissões H-ARQ, o algoritmo de alocação de

recursos utilizado, e o tamanho do pacote a ser enviado. Em [Brown and Khan 2013], os autores calculam que a menor latência possível entre as camadas MAC do UE e eNode-B é de 6 ms, se enviado um pacote que não excede a permissão inicial de 73 bytes, já contados os cabeçalhos de todas as camadas. Caso o pacote seja maior, a latência mínima sobe para 11 ms, e cada retransmissão H-ARQ acrescenta 8 ms. Então, o envio de um pacote de 40 bytes de *payload* de aplicação via UDP/IP, e que sofra uma retransmissão H-ARQ, já não cumpre o requisito de uma aplicação Smart Grid que exija latência máxima de 20 ms.

### 3.2.1 Grade de recursos

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

Ambas as tecnologias de acesso apresentam uma grade tempo-frequência para alocação de recursos, também chamada de grade de recursos, mostrada na figura 3.2. No domínio do tempo, o sinal é dividido em frames de 10 ms, que por sua vez são divididos em 10 subframes de 1 ms. Cada subframe é dividido em 2 slots de 0,5 ms. Estes slots são divididos no domínio da frequência em  $N$  partes de 180 MHz. Estas  $N$  partes são chamadas de *resource blocks* (RB), e são o elemento básico de alocação de recurso de rádio no LTE. Quanto maior a largura de banda de transmissão, maior a quantidade de resource blocks por slot de tempo. A tabela 3.2 apresenta a relação entre largura de banda de transmissão vs. quantidade de resource blocks no sistema.

Tabela 3.2: Largura de banda de transmissão vs. Quantidade de RBs no sistema [Ghosh et al. 2010]

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

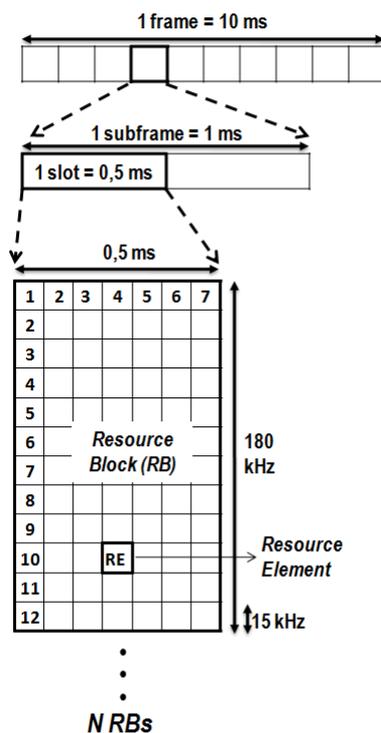


Figura 3.2: Estrutura da grade de recursos

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

Dentro da grade de recursos, a menor unidade tempo-frequência é chamada de *resource element* (RE), e corresponde a 1 linha por 1 coluna da grade, que representam uma subportadora e um símbolo OFDM, respectivamente. Cada um destes REs representa um símbolo da constelação QAM utilizada na modulação. Como o mínimo intervalo de tempo de transmissão (TTI) é de 1 ms, ou seja, 1 subframe, o mínimo recurso a ser alocado ao usuário são dois RBs. Então, cada usuário receberá no mínimo 12 subportadoras em 14 símbolos OFDM, que equivalem a 168 REs. Porém, nem todos os 168 REs estão disponíveis para transmissão de dados, pois alguns deles são utilizados para transportar sinais de controle do LTE.

### 3.2.2 Alocação de recursos

Para o processo de alocação de recursos, a camada de interface de rádio mais relevante é a MAC. Esta tem como principais funções mapear os canais lógicos e de transporte, priorizar a alocação de recursos entre usuários, e definir com será feito o transporte de dados, escolhendo a constelação QAM, a taxa de codificação, o uso ou não de múltiplas antenas e a potência do sinal. Existe uma entidade MAC tanto no eNode-B quanto no UE. Para transmitir essas informações à camada PHY, a camada MAC utiliza 4 tipos de informações de controle, chamadas de *Downlink Control Information* (DCI), *Control Format Indicator* (CFI), *H-ARQ Indicator* (HI) e *Uplink Control Information* (UCI).

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

em aplicações com vários UEs conectados simultaneamente e que exigem baixa latência, pode ser mais apropriado utilizar o método de medição do CQI único para toda a largura de banda [Ghosh et al. 2010].

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

Como os algoritmos de escalonamento não são especificados pelo padrão LTE, devem ser escolhidos de forma a atender as exigências e restrições de comunicação requeridas pelo sistema. Estes algoritmos podem ser categorizados de acordo com a sua estratégia de alocação de recursos: independentes do canal, dependentes do canal/sem estratégia de QoS, dependentes do canal/com estratégia de QoS ou semi-persistentes [Capozzi et al. 2013].

### 3.2.3 Qualidade de Serviço

Para dar suporte a aplicações que requerem diferentes níveis de QoS, o LTE utiliza o conceito de *bearers* como elemento de controle de QoS. Estes *bearers* são canais lógicos definidos desde o Core Network, passando pelo e-NodeB, até o UE. Quando um UE se conecta à rede, é criado um *bearer* padrão para a troca de sinais de controle. Para a troca de informações de um serviço específico é criado pelo Core Network um *bearer* adicional, chamado de *bearer* dedicado. Estes *bearers* são divididos em duas classes, *Guaranteed Bit Rate* (GBR) e *Non-GBR*. A primeira garante uma taxa de bits mínima ao UE, e é normalmente utilizada em aplicações em tempo real, como VoIP e *streaming* de vídeo. Já a classe *Non-GBR* não garante taxa mínima, o que faz com

que a taxa recebida pelo UE dependa da quantidade de usuários disputando os recursos, e da estratégia de alocação de recursos do algoritmo de escalonamento. Esta classe é utilizada para as aplicações de navegação web, e-mail e FTP, dentre outras.

Cada *bearer*, independentemente da sua classe, é associado a um *QoS Class Identifier* (QCI). Existem 9 classificações padronizadas, que levam em consideração o atraso de pacotes, nível de perda de pacotes aceitável e prioridade de transmissão, como mostrado na tabela 3.3 [Capozzi et al. 2013].

Tabela 3.3: QCIs padronizados para o LTE [Ghosh et al. 2010]

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

### 3.3 *Partial Reliable Stream Control Transmission Protocol (PR-SCTP)*

O protocolo SCTP é definido pela RFC 4960 [Stewart 2007], e foi inicialmente desenvolvido para o transporte de sinalização de sistemas de transmissão de voz sobre IP. Possui características semelhantes ao TCP, pois é orientado à conexão, full duplex, oferece confiabilidade na entrega da mensagem, e realiza controle de fluxo e de congestionamento. Adicionalmente, o SCTP oferece serviços de entrega não-ordenada

de pacotes, *multi-homing*, *multi-streaming* e confiabilidade parcial. Para aplicações em tempo real, os serviços de entrega não-ordenada e confiabilidade parcial se tornam vantajosos, pois aliam a confiabilidade do TCP com a rapidez e simplicidade da transmissão UDP. O serviço de confiabilidade parcial é útil em aplicações que geram dados com diferentes prioridades ou prazos de entrega, pois no caso de congestionamento ou perda de pacotes, somente os prioritários e ainda válidos são retransmitidos, reduzindo assim a latência fim a fim da transmissão e economizando recursos da rede. A RFC 3758 [Stewart et al. 2004] define uma extensão para o SCTP chamada de *Partial Reliable Stream Control Transmission Protocol* (PR-SCTP), em que é possível configurar diferentes níveis de garantia da entrega dos dados, de acordo com os seus requisitos individuais de QoS. Através de um serviço de confiabilidade parcial chamado de *Timed Reliability*, o PR-SCTP permite que a aplicação configure o prazo de entrega de cada uma das mensagens a serem enviadas. Caso este prazo expire, o PR-SCTP não tenta retransmitir a mensagem. Além do serviço *Timed Reliability*, outras duas políticas estão sendo especificados por um *Internet-Draft* [Tuexen et al. 2013] para o PR-SCTP. A primeira delas, chamada de retransmissão limitada, permite que a aplicação limite a quantidade de tentativas de retransmissão da mensagem. A outra é a política de prioridade, que permite ao remetente descartar mensagens de baixa prioridade caso o *buffer* de mensagens já esteja cheio. Estas funcionalidades do PR-SCTP podem ser interessantes para a transmissão de mensagens de aplicações *Smart Grid*, já que algumas delas necessitam comunicação em tempo real. Existem diversos estudos indicando que o uso do PR-SCTP é interessante para transmissões em tempo real de *streaming* de multimídia [Wang et al. 2003], IPTV [Kim et al. 2007], e VoIP [Fitzpatrick et al. 2008].

## 4 CRONOGRAMA

As atividades previstas compreendem:

1. Revisão bibliográfica;
2. Desenvolvimento de um modelo para transmissão de aplicativos Smart Grid sobre LTE utilizando o protocolo SCTP;
3. Realização de experimentos de transmissão de dados de sistemas Smart Grid sobre LTE; e
4. Validação e comparação dos resultados.

A Tabela 4.1 apresenta a lista resumida das atividades previstas, como uma legenda para uso no cronograma, que é apresentado na Figura 4.1.

		<b>CRONOGRAMA</b>											
<b>Ano →</b>		<b>2014</b>											
<b>Mês →</b>													
<b>Atividade ↓</b>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>A</b>		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>B</b>		■	■										
<b>C</b>			■										
<b>D</b>			■	■									
<b>E</b>			■	■	■								
<b>F</b>				■	■	■							
<b>G</b>					■	■	■						
<b>H</b>						■	■	■	■				
<b>I</b>							■	■	■	■			
<b>J</b>									■	■	■	■	
<b>K</b>											■	■	■
<b>L</b>						■	■	■	■			■	■

Figura 4.1: Cronograma do Mestrado em Engenharia Elétrica.

Tabela 4.1: Atividades Previstas e Cronograma de Execução

<b>Atividade</b>	<b>Descrição resumida</b>
<b>A</b>	Revisão bibliográfica.
<b>B</b>	Estudo da plataforma de simulação a ser utilizada.
<b>C</b>	Programação de rotinas de processamento dos vídeos.
<b>D</b>	Escolha dos cenários e topologias a serem empregadas.
<b>E</b>	Escolha dos vídeos a serem usados.
<b>F</b>	Escolha dos métodos de avaliação de qualidade a serem usados.
<b>G</b>	Programação de <i>scripts</i> para automação dos experimentos.
<b>H</b>	Realização dos experimentos.
<b>I</b>	Tratamento e validação de resultados da simulação.
<b>J</b>	Modelagem da degradação da qualidade.
<b>K</b>	Validação dos resultados da modelagem.
<b>L</b>	Elaboração de artigos.

## BIBLIOGRAFIA

- [3GPP 36.104 2008] 3GPP 36.104 (2008). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
- [Alowaidi et al. 2012] Alowaidi, M., Yu, F., El Saddik, A., and Aljanah, A. (2012). Improving performance of smart grid communications using multi-homing and multi-streaming offered by SCTP. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, pages 175–180. IEEE.
- [Brown and Khan 2013] Brown, J. and Khan, J. Y. (2013). Key performance aspects of an LTE FDD based Smart Grid communications network. *Computer Communications*, 36(5):551–561.
- [Capozzi et al. 2013] Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., and Camarda, P. (2013). Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15(2):678–700.
- [Chen et al. 2013] Chen, Y.-W., Yuan, A. S., Lu, K.-T., and Wu, Q. (2013). The study of 6LoWPAN with SCTP multi-homing in Smart Grid. In *Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on*, pages 735–740.
- [Fitzpatrick et al. 2008] Fitzpatrick, J., Murphy, S., Atiquzzaman, M., and Murphy, J. (2008). ECHO: A Quality of Service Based Endpoint Centric Handover Scheme for VoIP. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, pages 2777–2782.
- [Ghosh et al. 2010] Ghosh, A., Zhang, J., Andrews, J. G., and Muhamed, R. (2010). *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, 1st edition.
- [Gungor et al. 2013] Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., and Hancke, G. P. (2013). A survey on smart grid potential applications and

communication requirements. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 9(1):28–42.

[IEEE 2006] IEEE (2006). IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. *IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995)*, pages 1–57.

[Khan and Khan 2012] Khan, R. H. and Khan, J. Y. (2012). Wide area PMU communication over a WiMAX network in the smart grid. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, pages 187–192. IEEE.

[Khan and Khan 2013] Khan, R. H. and Khan, J. Y. (2013). A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, 57(3):825–845.

[Kim et al. 2007] Kim, S. T., Koh, S. J., and Kim, Y. J. (2007). Performance of SCTP for IPTV Applications. In *Advanced Communication Technology, The 9th International Conference on*, volume 3, pages 2176–2180.

[NS-3 ] NS-3. NS-3 Network Simulator – <http://www.nsnam.org/>.

[Stewart 2007] Stewart, R. (2007). Stream Control Transmission Protocol. RFC 4960 (Proposed Standard).

[Stewart et al. 2004] Stewart, R., Ramalho, M., Xie, Q., Tuexen, M., and Conrad, P. (2004). Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Partial Reliability Extension. RFC 3758 (Proposed Standard).

[Tuexen et al. 2013] Tuexen, M., Seggelmann, R., Stewart, R., and Loreto, S. (2013). Additional Policies for the Partial Delivery Extension of the Stream Control Transmission Protocol. Internet-Draft draft-tuexen-tsvwg-sctp-prpolicies-03, Internet Engineering Task Force. Work in progress.

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

[Wang et al. 2003] Wang, H., Jin, Y., Wang, W., Ma, J., and Zhang, D. (2003). The performance comparison of PRSCTP, TCP and UDP for MPEG-4 multimedia traffic in mobile network. In *Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003. International Conference on*, volume 1, pages 403–406 vol.1.

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