



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**RENATO CAMINHA JUAÇABA NETO**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS**  
**DE RÁDIO PARA COMUNICAÇÕES MÁQUINA-À-MÁQUINA EM REDES**  
**NARROWBAND IOT**

**FORTALEZA**

**2017**

RENATO CAMINHA JUAÇABA NETO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE  
RÁDIO PARA COMUNICAÇÕES MÁQUINA-À-MÁQUINA EM REDES NARROWBAND  
IOT

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Redes de Computadores

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Bezerra Rodrigues

Co-Orientadora: Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- J82a Juaçaba Neto, Renato.  
Avaliação de Desempenho de Técnicas de Alocação de Recursos de Rádio para Comunicações Máquina-à-Máquina em Redes Narrowband IoT / Renato Juaçaba Neto. – 2017.  
92 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Emanuel Bezerra Rodrigues.  
Coorientação: Prof. Dr. Carina Teixeira de Oliveira.
1. Narrowband IoT. 2. Comunicações M2M. 3. Redes Celulares LTE. 4. Alocação de Recursos de Rádio.  
5. Internet das Coisas. I. Título.

CDD 005

---

RENATO CAMINHA JUAÇABA NETO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE  
RÁDIO PARA COMUNICAÇÕES MÁQUINA-À-MÁQUINA EM REDES NARROWBAND  
IOT

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Redes de Computadores

Aprovada em: 27 de Novembro de 2017

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Emanuel Bezerra Rodrigues (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira (Co-Orientadora)  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Marcial Porto Fernandez  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

---

Prof. Dr. Miguel Franklin de Castro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Danielo Gonçalves Gomes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a meus pais, minha companheira, a meus colegas de pesquisa e ao restante da minha família, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu completasse esta etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por todos os obstáculos superados e conquistas alcançadas.

Aos meus pais, Renato e Jocélia, e a minha companheira, Aline, por todo o suporte durante os momentos bons e ruins.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Emanuel, e minha co-orientadora, professora Carina, por todas as orientações, dedicação e correções de português fornecidas.

Aos professores Marcial, Miguel Franklin e Daniello, que compõem a banca examinadora e certamente contribuirão para o sucesso da solução desenvolvida.

Agradeço também ao Departamento de Computação da Universidade Federal do Ceará e a todos os colegas que o compõem, pela oportunidade e cooperação durante este período.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de fazer o mestrado.

A todos os amigos e colegas que acompanharam e compartilharam experiências durante o mestrado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

"Tempo é viver, é celebrar, é conhecer. Tempo é poder amar ao nosso tempo. O tempo só pode ser a mágica de fazer tudo acontecer e possibilitar que os sonhos possam florescer, leve o tempo que precisar".

(Jeniffer Harth)

## RESUMO

As previsões no contexto de redes 5G apontam que o ambiente de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) comporá uma grande fatia do tráfego de dados. É esperado que esse tráfego, conhecido como comunicação Máquina-à-Máquina (*Machine-to-Machine* - M2M), apresente um comportamento diferente daquele de aplicações convencionais. As principais diferenças são referentes à direção do tráfego, ao volume de tráfego por aplicação e à quantidade de dispositivos por célula. Em outras palavras, enquanto as aplicações convencionais são geralmente caracterizadas pelo *download* de arquivos grandes por um pequeno número de dispositivos, as aplicações M2M são compostas de *upload* de arquivos pequenos por uma quantidade massiva de dispositivos. Por isso, novas tecnologias já começaram a ser desenvolvidas para dar suporte a este perfil diferenciado de aplicações. O *Narrowband IoT* (NB-IoT) é uma dessas tecnologias e foi definido como uma nova funcionalidade no popular padrão *Long Term Evolution* (LTE) de redes celulares. Um grande diferencial do NB-IoT está na reutilização de parte da pilha de protocolos e da infraestrutura física utilizada nas portadoras LTE. Essa característica faz com que o NB-IoT herde a robustez destes protocolos e seja implantado sem a necessidade de um novo hardware. Através da utilização de transmissões *single-tone* e *multi-tone* é possível implantar um alto número de dispositivos por portadoras NB-IoT. São definidos 5 tipos de transmissão de *uplink* no NB-IoT, cada um com diferentes capacidades de ocupação do canal, duração de transmissão e capacidade de transmissões simultâneas. Neste trabalho, são investigados os comportamentos destes tipos de transmissão em portadoras NB-IoT com aplicações M2M. Para essa investigação foram simulados múltiplos cenários de alocação estática para entender o comportamento de cada configuração. Em seguida, o conhecimento utilizado pela observação do comportamento das estratégias estáticas foi utilizado para propor uma nova estratégia dinâmica de alocação de recursos NB-IoT. Os resultados apontam que o uso do padrão NB-IoT para redes M2M é viável, principalmente em cenários com múltiplas portadoras. Também é mostrado que a presença de portadoras NB-IoT não afeta significativamente o comportamento do portadora LTE. Finalmente, é mostrado que a alocação estática é superior à proposta dinâmica devido à superioridade das configurações de curto tempo de transmissão no cenário de aplicações considerado.

**Palavras-chave:** Narrowband-IoT. Comunicações M2M. Redes Celulares LTE. Alocação de Recursos.

## ABSTRACT

The expectations for the scenario of 5G internet show that the Internet of Things (IoT) environment will amount to a large share of the data traffic. This category of traffic, known as Machine-to-machine (M2M) communications, is expected to have a different behaviour when compared to conventional applications. These applications contrast in the direction of the traffic, data volume and the amount of devices per wireless cell. While conventional applications are dominated by large downloads being done by a smaller amount of devices, and these applications are mainly constituted by a larger amount of devices making upload transmissions of small amounts of data. Because of that, multiple technologies are being developed right now to ensure the requirements of this variety of applications. One of these technologies is known as Narrow-Band IoT (NB-IoT), which is defined as a feature of the renown standard for cellular networks Limited Term Evolution (LTE). The major advantage of NB-IoT over its competitors is the reuse of some of the protocol stack and all the hardware of common LTE networks. That means that this new standard inherits the advantages of the well developed LTE protocols and there is no requirement of new hardware. But the major feature of NB-IoT that allows the deployment of a massive amount of end devices per NB-IoT carrier is the employment of single-tone and multi-tone transmissions. These two kinds of transmissions are split into 5 different configurations, each with different characteristics of channel occupation, time duration and channel multiplexing. We investigate each of these configurations with M2M traffic. This allows the proposal of a dynamic resource allocation strategy for NB-IoT carriers. Our results show that the NB-IoT standard is feasible for M2M networks, especially in scenarios with multiple carriers. We also see that multiple NB-IoT carriers can be deployed on a single LTE carrier without significant effect. Lastly, it is shown that the static approach is better than the dynamic approach proposed. Which is due to the superior performance of the we confront the behaviour of the static allocation of NB-IoT resources with the dynamic approach proposed in this work.

**Keywords:** Narrowband-IoT. M2M Communications. LTE Cellular Networks. Resource Allocation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Previsão de crescimento do número de dispositivos. . . . .	2
Figura 2 – Arquitetura de redes celulares. . . . .	4
Figura 3 – Exemplo de alocação de recursos no modo FDD. . . . .	18
Figura 4 – Tipos de implantação do NB-IoT no domínio da frequência. . . . .	23
Figura 5 – Ilustração do significado do valor $I_{sc}$ . . . . .	26
Figura 6 – Exemplo de alocação de recursos NB-IoT. . . . .	26
Figura 7 – Arquitetura LoRaWAN. . . . .	31
Figura 8 – Resumo do diagrama de classe da implementação NB-IoT. . . . .	44
Figura 9 – Desempenho agregado de todas as aplicações no sistema LTE em função do número de dispositivos . . . . .	52
Figura 10 – Desempenho das aplicações CBR no sistema LTE em função do número de dispositivos. . . . .	53
Figura 11 – Desempenho das aplicações VoIP no sistema LTE em função do número de dispositivos . . . . .	53
Figura 12 – Desempenho das aplicações de vídeo no sistema LTE em função do número de dispositivos. . . . .	54
Figura 13 – Desempenho das aplicações ED no sistema LTE em função do número de dispositivos. . . . .	54
Figura 14 – Desempenho das aplicações TD no sistema LTE em função do número de dispositivos. . . . .	54
Figura 15 – Taxa de entrega das aplicações convencionais em portadora LTE com largura de banda de 3 MHz em cenários com múltiplas portadoras NB-IoT . . . . .	55
Figura 16 – Taxa de entrega das aplicações convencionais em portadora LTE com largura de banda de 10 MHz em cenários com múltiplas portadoras NB-IoT . . . . .	55
Figura 17 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia RR em função do número de dispositivos . . . . .	57
Figura 18 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia MT em função do número de dispositivos . . . . .	57
Figura 19 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia PF em função do número de dispositivos . . . . .	57

Figura 20 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia AE em função do número de dispositivos . . . . .	58
Figura 21 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos . . . . .	58
Figura 22 – Comportamento em função do número de dispositivos das estratégias de alocação utilizando a configuração de UR 4 em portadora NB-IoT . . . . .	60
Figura 23 – Comportamento das aplicações ED em portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos . . . . .	61
Figura 24 – Comportamento das aplicações TD em portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos . . . . .	61
Figura 25 – Comportamento das aplicações M2M sob QoS relaxado na portadora NB-IoT considerando estratégia PF em função do número de dispositivos . . . . .	63
Figura 26 – Comportamento das aplicações M2M sob QoS relaxado na portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos . . . . .	63
Figura 27 – Comportamento das aplicações ED sob cenário de atraso relaxado em função do número de dispositivos . . . . .	64
Figura 28 – Comportamento das aplicações TD sob cenário de atraso relaxado em função do número de dispositivos . . . . .	64
Figura 29 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de $N_{ur}$ desativado e cálculo de configuração ativado . . . . .	66
Figura 30 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de $N_{ur}$ ativado e cálculo de configuração ativado . . . . .	66
Figura 31 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de $N_{ur}$ ativado e cálculo de configuração reduzido . . . . .	66
Figura 32 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de $N_{ur}$ desativado e cálculo de configuração reduzido . . . . .	67
Figura 33 – Desempenho da alocação estática vs dinâmica com ambas aplicações M2M em função do número de dispositivos . . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações de largura de banda LTE. . . . .	16
Tabela 2 – Configurações do modo TDD. . . . .	17
Tabela 3 – Comparativo entre estratégias de alocação de recursos. . . . .	21
Tabela 4 – Configurações de transmissões NB-IoT. . . . .	25
Tabela 5 – Informações sobre as classes de dispositivos SigFox. . . . .	33
Tabela 6 – Comparação entre tecnologias LPWAN. . . . .	34
Tabela 7 – Comparação entre trabalhos relacionados. . . . .	37
Tabela 8 – Resumo dos modelos de tráfego utilizados neste trabalho. . . . .	39
Tabela 9 – Divisão das aplicações. . . . .	39
Tabela 10 – Limite de implantações de portadoras NB-IoT <i>inband</i> . . . . .	40
Tabela 11 – Parâmetros de alocação estática . . . . .	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AE	Atraso Exponencial
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
BR	Bloco de Recurso
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
EB	Estação Base
ED	<i>Event Driven</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IQS	Índice de Qualidade de Sinal
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MCA	Modulação e Codificação Adaptativa
MLWDF	<i>Modified Largest Weighted Delay First</i>
MT	<i>Maximum Throughput</i>
MTC	<i>Machine Type Communications</i>
NB-IoT	<i>Narrowband IoT</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAR	Rede de Acesso via Rádio
RN	Rede Núcleo
RR	<i>Round Robin</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCS	<i>Service Capacity Server</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i>
TD	<i>Time Driven</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UR	Unidade de Recurso
VoIP	<i>Voice over IP</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$ur$	Unidade de recurso
$u$	Dispositivo
$sc$	Subportadora
$br$	Bloco de recurso
$c$	Configuração de transmissão utilizada
$N_{ur}$	Numero de unidades de recurso alocados para transmissão
$I_{sc}$	Identificador de subportadoras
$IQS$	Valor médio de Índice de Qualidade de Sinal
$PF_u^{br}$	Métrica PF para dispositivo $u$ no BR $br$
$Q_u^{br}$	Qualidade de sinal do dispositivo $u$ no BR $br$
$V_u$	Vazão média do dispositivo $u$
$AE_u$	Métrica de atraso exponencial para dispositivo $u$
$holDelay_u$	Atraso atual do próximo pacote a ser transmitido por $u$
$maxDelay_u$	Atraso máximo permitido pelos requisitos de QoS da aplicação do dispositivo $u$
$MLWDF_u^{br}$	Métrica MLWDF para o dispositivo $u$ no BR $br$
$\sigma_u$	Porcentagem desejada de perda de pacotes da aplicação do dispositivo $u$
$holData_u$	Quantidade de dados restantes para serem transmitidos no próximo pacote de $u$
$\rho_u$	Parâmetro limitador do atraso máximo
$TBT_{IQS}^{N_{ru}}$	Tamanho do bloco de transporte referente aos parâmetros $N_{ru}$ e $IQS$
$N_{sc_c}$	Numero de subportadoras ocupadas se a configuração $c$ for utilizada
$Dur_c$	Duração da transmissão utilizando a configuração $c$
$TR_u$	Tamanho do relatório de dados gerado pela aplicação do dispositivo $u$

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	1
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	9
2.1	<b>Redes <i>Machine-to-Machine</i> (M2M)</b>	9
2.1.1	<i>Aplicações M2M</i>	10
2.1.2	<i>Características de aplicações M2M</i>	12
2.2	<b>O padrão LTE de redes celulares</b>	15
2.2.1	<i>Alocação de recursos de rádio</i>	15
2.2.2	<i>Formatos de divisão de recursos LTE</i>	16
2.2.3	<i>Estratégias de alocação de recursos</i>	18
2.3	<b>Redes M2M auxiliadas por redes celulares</b>	21
2.4	<b><i>Narrowband Internet of Things</i> (NB-IoT)</b>	22
2.4.1	<i>Tipos de implantação do padrão NB-IoT em uma rede LTE</i>	23
2.4.2	<i>Objetivos de design do padrão NB-IoT</i>	23
2.4.3	<i>Modos de transmissão NB-IoT</i>	24
3	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	27
3.1	<b>Congestionamento no plano de dados</b>	28
3.2	<b><i>Low Power Wide Area Networks</i></b>	29
3.2.1	<i>Os padrões LoRa e LoRaWAN</i>	30
3.2.2	<i>O padrão SigFox</i>	33
3.2.3	<i>LoRa vs Sigfox vs NB-IoT</i>	34
3.3	<b>O estado-da-arte em Narrowband IoT</b>	35
3.4	<b>Conclusões</b>	37
4	<b>MODELO DO SISTEMA</b>	38
4.1	<b>Modelos de tráfego</b>	38
4.2	<b>Modelo LTE</b>	39
4.3	<b>Modelo NB-IoT</b>	40
4.4	<b>Implementação das funcionalidades NB-IoT</b>	42
4.5	<b>Conclusão</b>	45
5	<b>ALOCAÇÃO DE RECURSOS NO UPLINK DA REDE NB-IOT</b>	46
5.1	<b>Estratégia de alocação estática</b>	46

5.2	Proposta de alocação dinâmica . . . . .	47
5.3	Conclusão . . . . .	50
6	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO</b> . . . . .	51
6.1	Métricas de avaliação de desempenho . . . . .	51
6.2	Avaliação do padrão LTE no cenário M2M . . . . .	52
6.3	Efeito de múltiplas portadoras NB-IoT <i>inband</i> sobre uma portadora LTE	55
6.4	Avaliação da estratégia de alocação estática . . . . .	56
6.5	Avaliação da proposta de alocação dinâmica . . . . .	65
6.6	Alocação estática vs dinâmica . . . . .	68
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	70
7.1	Conclusões desse trabalho . . . . .	70
7.2	Produção bibliográfica . . . . .	71
7.3	Limitações desse trabalho . . . . .	71
7.4	Perspectivas para trabalhos futuros . . . . .	71
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	73

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de objetos inteligentes em ambientes domésticos e corporativos trará inúmeros benefícios a seus usuários em termos de comodidade e produtividade. A automação de atividades por objetos inteligentes e sua conseqüente geração automática de informação poderão ser utilizadas para apoio à tomada de decisão nos mais variados cenários (ex: saúde, transporte, segurança, educação, comunicações, etc). Por exemplo, dispositivos poderão realizar ações por conta própria como se ligar e desligar automaticamente no início e fim de expediente; sensores poderão extrair informações sobre o conteúdo de um almoxarifado e disponibilizá-las em tempo real aos seus administradores; etc.

A área de estudo que visa tornar este conceito possível é conhecida como Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). A expectativa é de que essa área emergirá em função da combinação dos avanços tecnológicos de múltiplos domínios de estudo, tais como: sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento (SANTOS *et al.*, 2016).

Segue abaixo uma definição formal para IoT (MINERVA *et al.*, 2015):

Uma rede IoT conecta 'coisas' unicamente identificáveis com a Internet. Essas 'coisas' possuem capacidades de sensoriamento, atuação e potencial de programabilidade. Através da exploração da identificação única e sensoriamento, informações sobre as 'coisas' podem ser coletadas e o estado das 'coisas' podem ser modificados de qualquer lugar, em qualquer momento, por qualquer 'coisa'.

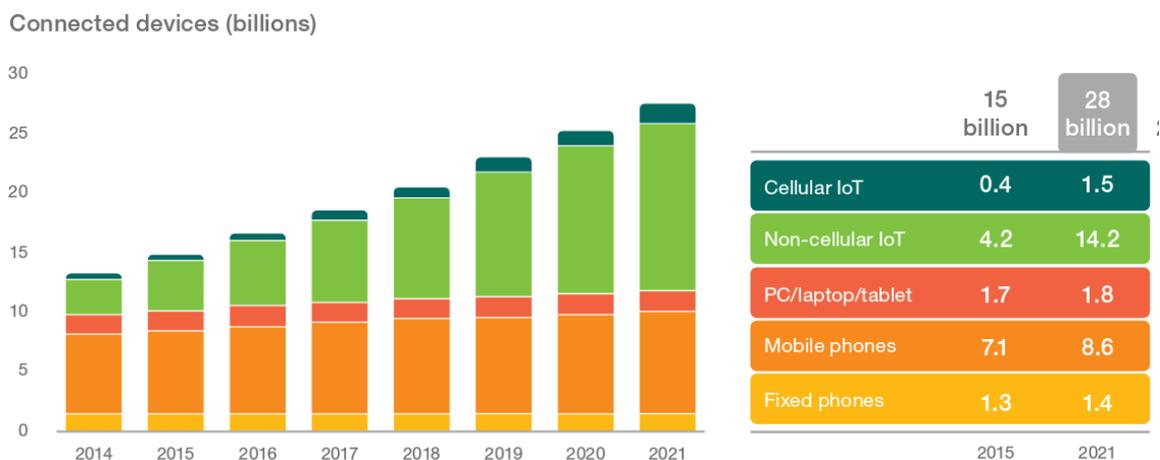
Esta definição evidencia três pontos importantes para o entendimento dos requisitos do cenário IoT:

1. As 'coisas' devem ser endereçáveis e conectadas com a Internet. Isso significa que entidades remotas podem se comunicar com os dispositivos específicos.
2. Essas mesmas 'coisas' atuarão, principalmente, como transmissões de dados de sensoriamento ou comandos de atuadores.
3. Por fim, as informações devem estar disponíveis a todo momento, mesmo que as coisas estejam inacessíveis, independente do quê e de onde estão sendo acessadas, podendo ser acessadas, até mesmo, por outras 'coisas'.

Diversos trabalhos estão sendo realizados para englobar os três pontos detalhados acima. Contudo, neste trabalho, o foco é centrado no ponto 2, pois este aponta que o tráfego gerado pelas aplicações IoT será diferente do tráfego atual, sendo caracterizado, principalmente, pela geração e transmissão dos dados pelos dispositivos IoT.

A Figura 1 apresenta uma previsão do aumento da quantidade dos dispositivos conectados à rede até 2020. Observe que este gráfico, além de mostrar a quantidade de dispositivos esperada para os diferentes anos, também discretiza as diferentes classes de dispositivos e a previsão do tamanho de suas populações. Observe também que o aumento exibido no gráfico se concentra nos dispositivos IoT, que crescem exponencialmente entre os anos exibidos. A parcela de dispositivos IoT é incrementada de 30% para 60% do total e a quantidade de dispositivos aumenta em 240%. Este tipo de previsão é relevante porque evidencia a necessidade do estudo teórico e prático da escalabilidade em ambientes IoT.

Figura 1 – Previsão de crescimento do número de dispositivos.



Fonte – (ERICSSON, 2016b)

Além do desafio da escalabilidade, é esperado que os pacotes dos dispositivos IoT sejam menores ( $< 125$  Bytes) quando comparadas à quantidade de bytes gerada pelas aplicações atuais. Também é esperado que as transmissões IoT ocorram com uma certa constância e entre intervalos de tempo maiores, o que também as diferencia das aplicações convencionais. Este novo tipo de tráfego é conhecido como comunicação Máquina-à-Máquina (*Machine-to-Machine - M2M*) (GHAVIMI; CHEN, 2015; MAIA *et al.*, 2016).

De acordo com Ghavimi e Chen (2015), levando em consideração a quantidade de dispositivos previstos e suas características específicas, é esperado que o tráfego M2M componha uma fatia considerável do total de tráfego da rede.

Para suportar este tráfego, as tecnologias de rede utilizadas atualmente estão sendo adaptadas e, além disso, novas tecnologias estão sendo criadas para esse tipo de tráfego. Neste contexto, o trabalho de Palattella *et al.* (2016) propõe algumas técnicas utilizadas por estas tecnologias, como: o uso de larguras de banda estreitas para maximizar o aproveitamento do

espectro de frequências; protocolos de baixa complexidade para possibilitar um número ainda maior de dispositivos; dentre outras.

Também são propostas soluções com redes capilares como *WiFi*, *ZigBee* e *Bluetooth*, que atuam com menor alcance. Conforme ilustrado na Figura 1, tais soluções também são conhecidas como *non-cellular IoT*. Observa-se que elas compõem a maioria do crescimento experimentado pelos dispositivos IoT. As redes capilares são muitas vezes caracterizadas por *relays* para repasse de mensagens e *gateways* para concentração e coleta de dados (XIAO, 2005; ALLIANCE, 2009; MCDERMOTT-WELLS, 2004).

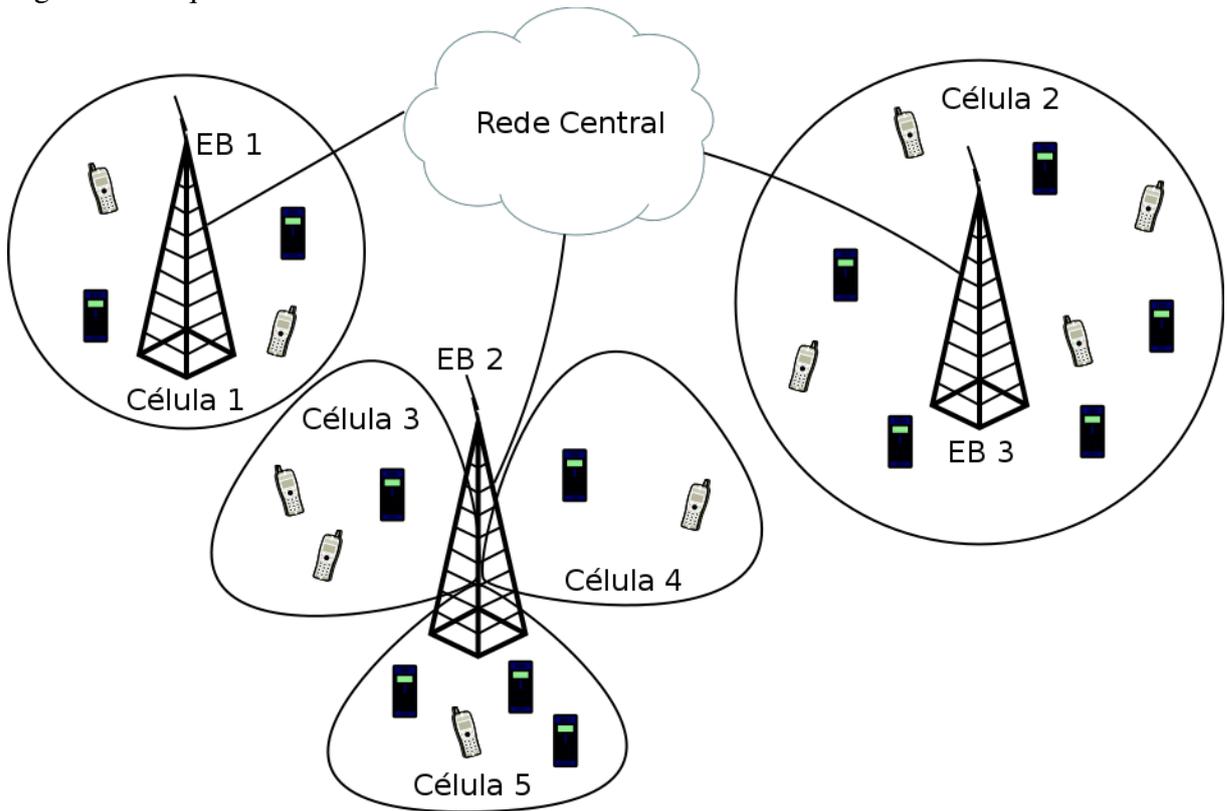
Outra característica dessas redes está na ausência de uma unidade controladora central, o que torna necessária a utilização de algoritmos distribuídos e cooperativos para gerenciar a rede. Nota-se que isso resulta em uma competição entre os dispositivos pelo meio sem fio, de maneira que recursos de rádio podem ser desperdiçados com colisões de canal ou tempo ocioso. Esse problema torna-se ainda mais relevante e desafiador em cenários com quantidades massivas de dispositivos (NOVO *et al.*, 2015).

Ao contrário da proposta de uso de redes capilares, neste trabalho o foco está no uso de tecnologias celulares (ou *Cellular IoT*, conforme a Figura 1) para atender o tráfego esperado para as comunicações M2M. Por um lado, as tecnologias celulares são interessantes para conexões IoT devido a presença de unidades centralizadoras que gerenciam o uso do meio sem fio da rede. Esta entidade, que é responsável por diversas funcionalidades na rede celular, entre elas, controlar o acesso ao meio, é conhecida como Estação Base (EB). Isso resulta em melhores condições de competição pelo meio em situações com grandes quantidades de dispositivos, pois a EB pode determinar com exatidão os dispositivos que utilizam os recursos de rádio disponíveis. Em compensação, a necessidade da presença das EBs torna mais custosa a implantação e operação desse tipo de rede.

Conforme apresentado na Figura 2, as tecnologias celulares são caracterizadas pela presença de EBs e pela divisão da área geográfica em células, onde os dispositivos estão posicionados. Cada EB gerencia uma célula (ex: EB 1 da Figura 2) ou várias células setoriais (ex: EB 2 da Figura 2), além de ser responsável pelo gerenciamento do meio sem fio e por permitir que os dispositivos sejam capazes de acessar a rede. Através do controle do acesso ao meio realizado pela EB, é possível eliminar a interferência entre as comunicações dos dispositivos de uma mesma célula.

Um exemplo de tecnologia celular é o padrão *Long Term Evolution* (LTE). Ele foi

Figura 2 – Arquitetura de redes celulares.



Fonte: O autor

desenvolvido por um conjunto de organizações internacionais do setor de telecomunicações no contexto do *Third Generation Partnership Project* (3GPP). Segundo Gozalvez (2016), este padrão é considerado uma das principais tecnologias celulares disponibilizadas no mercado. O LTE é capaz de prover conexões 4G para dispositivos celulares. Além disso, também propõe especificações para a evolução deste padrão, conhecida como *LTE-Advanced*, reconhecida como uma tecnologia 4,5G (DAHLMAN *et al.*, 2013).

Recentemente, em 2016, o padrão *Narrowband IoT* (NB-IoT) foi definido para possibilitar o suporte do padrão LTE às aplicações *ultra-low-end* IoT, ou seja, às aplicações mais simples e com menos prioridade. Mais detalhadamente, o NB-IoT é definido como uma funcionalidade do padrão LTE. Isso significa que ele é opcional e funciona em paralelo ao LTE, ocupando apenas 180 kHz da largura de banda por portadora NB-IoT. Esta faixa de frequência de 180 kHz pode se encontrar fora da faixa LTE, dentro da faixa de guarda ou até mesmo dentro da faixa LTE (HUAWEI, 2015).

Esse uso de banda de frequência reduzida, conhecida como *narrowband*, está bastante popular entre as tecnologias emergentes para IoT. Podemos citar como exemplo as tecnologias LoRa, que utiliza bandas menores que 500kHz, e Sigfox, que utiliza bandas de 100 Hz. Estas

tecnologias apresentam vantagens devido ao uso de sinais *narrowband*, como sinais mais resistentes ao ruído e menor potência de transmissão, mas possuem menor capacidade de transmissão e maiores latências. (XU *et al.*, 2017)

A principal diferença entre o NB-IoT e o padrão LTE se encontra na camada física, que foi ajustada devido ao espectro reduzido. Por outro lado, as semelhanças possibilitam que os protocolos superiores do LTE possam ser reutilizados. Também é possível reutilizar a infraestrutura de EB para implantar esta nova funcionalidade, pois as mesmas antenas utilizadas para o sinal de rádio LTE podem ser reutilizadas pelo sinal NB-IoT.

## Motivação

Apesar da banda reduzida, Ratasuk *et al.* (2016b) mostram que uma portadora NB-IoT é capaz de suportar dezenas de milhares de dispositivos de baixa complexidade. Estes dispositivos são descritos como sensores que enviam relatórios pequenos (80 Bytes) para servidores remotos em intervalos na ordem de horas.

Entre as funcionalidades que proporcionam esta alta capacidade de dispositivos por célula, pode-se citar os tipos de transmissões de *uplink* NB-IoT, conhecidas como *single-tone* e *multi-tone* (SCHLIENZ *et al.*, 2016).

Estas configurações só existem no *uplink*, ou seja, nas transmissões dos dispositivos para a EB, e o NB-IoT define cinco tipos diferentes. Cada tipo define Unidades de Recurso (URs) com características de duração e ocupação do espectro de frequência diferentes. Em contrapartida, o *downlink* NB-IoT funciona da mesma forma que o LTE convencional.

Como é feito no padrão LTE convencional, cabe ao escalonador de *uplink* distribuir os recursos de rádio. Para tanto, é necessário que o escalonador NB-IoT defina:

- a configuração da UR;
- o tempo que o dispositivo utiliza determinada UR;
- o espaço de frequência ocupado por determinada UR.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada neste trabalho de mestrado, a utilização dos recursos NB-IoT é feita de forma arbitrária. Em outras palavras, não existe uma estratégia amplamente aceita para alocação de recursos NB-IoT. Por exemplo, o trabalho de Ratasuk *et al.* (2016a) utiliza os parâmetros citados anteriormente de forma arbitrária e os fixa em suas simulações. Esse também é o caso do trabalho de Yu *et al.* (2017), que se limita ao estudo dos aspectos de repetição de transmissão, sem se preocupar com os outros aspectos citados

acima.

Dada a problemática detalhada, a seguinte questão de pesquisa norteou o presente trabalho de mestrado:

**Questão de Pesquisa:** Qual a melhor estratégia para a configuração e distribuição de recursos de rádio em cenários NB-IoT com aplicações M2M?

## Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é examinar os aspectos de alocação de recursos de rádio no padrão NB-IoT e determinar a melhor maneira de fazê-lo em cenários com uma ou mais portadoras dando cobertura a uma grande quantidade de dispositivos M2M.

A partir deste objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos para o trabalho:

- Pesquisar a literatura relacionada aos contextos de NB-IoT, M2M, alocação de recursos e congestionamento de dados em redes celulares. E, assim, aprender as especificações desta nova funcionalidade do padrão LTE através da literatura científica e textos de padronização disponível. Além disso, aprender também sobre o estado atual da literatura relacionada ao tema e cenário de estudo.
- Determinar o cenário de avaliação da alocação de recursos NB-IoT e configurar apropriadamente um ambiente de simulação capaz de simulá-lo, permitindo que as singularidades desta tecnologia possam ser avaliadas em um ambiente próximo da realidade.
- Avaliar o comportamento dos diferentes tipos de recursos de rádio presentes no padrão NB-IoT através do ambiente de simulação preparado.
- Projetar e avaliar uma proposta de estratégia de alocação de recursos para o padrão NB-IoT.
- Comparar a proposta com outras estratégias para determinar sua viabilidade.

## Metodologia

O trabalho seguiu a seguinte metodologia:

- **Revisão da literatura:** A pesquisa iniciou com o estudo de trabalhos relacionados às temáticas de IoT, comunicação M2M, controle de congestionamento de dados e alocações de recursos em redes celulares. Foram utilizadas as bases de dados conhecidas como IEEE Xplore, Elsevier e SCOPUS para a busca de trabalhos relacionados à problemática

selecionada. Este estudo foi necessário para delimitar o escopo do trabalho ao contexto de NB-IoT. Finalmente, o problema de determinação da configuração de recursos se mostrou mais interessante.

- **Estudo dos trabalhos relacionados:** O problema de congestionamento de dados foi investigado para fundamentar os efeitos da quantidade de dispositivos na rede e também, o estudo de Redes de Grande Alcance e Baixa Potência (*Low Power Wide Area Networks - LPWAN*) foi agregado devido as similaridades ao padrão NB-IoT fazer parte desta classe de tecnologias.
- **Definição da estratégia de alocação dinâmica:** Foi apresentado um algoritmo de alocação dinâmica que considera o atraso máximo de transmissão dos pacotes e o tamanho do relatório de dados para determinar a configuração do recursos de rádio utilizada.
- **Modelagem do sistema:** Com base nos estudos da literatura e trabalhos relacionados, foi definido o sistema considerado na pesquisa. Devido ao foco deste trabalho ser em examinar as diferentes formas de alocação de recursos no padrão NB-IoT, foram desconsiderados alguns fatores do mundo real que poderiam interferir na análise, como a interferência entre células, troca de células e o tráfego de controle. Este modelo foi configurado no ambiente de simulação através de modelos matemáticos e algorítmicos encontrados na literatura.
- **Implementação do simulador:** Considerando o sistema definido e a falta de um simulador NB-IoT pronto e disponível para o estudo, foi necessário desenvolver uma ferramenta de simulação. O simulador LTE-Sim, proposto em Piro *et al.* (2011b), foi escolhido para ser estendido com as funcionalidades NB-IoT necessárias.
- **Avaliação de desempenho:** Foram implementadas as estratégias de alocação estáticas e a proposta dinâmica, que foram simuladas para visualizar seus comportamentos sobre uma quantidade variável de dispositivos.

## Contribuições

As seguintes contribuições são produzidas neste trabalho de mestrado:

- O desenvolvimento de um ambiente de simulação preparado para cenários de redes LTE com portadoras NB-IoT *inband*.
- Uma análise de desempenho das diferentes configurações de recurso de rádio definidas no padrão NB-IoT.
- Uma proposta de estratégia de alocação dinâmica de recursos de rádio em portadoras

NB-IoT.

### **Organização da Dissertação**

O restante deste texto é organizado da seguinte forma. Inicialmente, no Capítulo 2, são apresentados os conceitos teóricos das tecnologias relacionadas a este trabalho de mestrado. Nele, são detalhados os conceitos de comunicação M2M, descrevendo os requisitos e aplicações inseridas neste meio. Depois, são discutidas as redes celulares e como é feita a alocação de recursos de rádio em redes LTE. Finalmente, é discutido o contexto de comunicação M2M em redes celulares e introduzido o padrão NB-IoT.

Na sequência, no Capítulo 3, são apresentados os trabalhos relacionados à problemática de alocação de recursos de rádio no padrão NB-IoT. Neste capítulo, é explorado o estado da arte de controle de congestionamento em redes celulares M2M. Então, é apresentada a categoria de dispositivos LPWAN, da qual o padrão NB-IoT faz parte. Finalizamos este capítulo discutindo o estado da arte do padrão NB-IoT e onde a nossa proposta de alocação se encaixa neste contexto.

No Capítulo 4 é feita a apresentação do sistema levado em consideração neste trabalho. Neste capítulo são determinados os fatores do cenário real que foram considerados no trabalho e as limitações do mesmo.

Em seguida, os algoritmos de alocação estática e nossa proposta de algoritmo de alocação dinâmica de recursos de rádio NB-IoT são apresentados no Capítulo 5.

Finalizamos o trabalho apresentando os resultados das simulações realizadas e as conclusões do estudo, nos Capítulos 6 e 7, respectivamente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma visão geral dos principais conceitos necessários para uma melhor compreensão da proposta. Primeiramente, na seção 2.1, contextualiza-se as comunicações M2M no cenário de IoT, discutindo as singularidades deste tipo de tráfego, bem como as aplicações que o compõem. Em seguida, na seção 2.2, são discutidas as redes celulares LTE, apresentando seus diferentes modos de operação e como é realizada a alocação dos recursos de rádio. Na seção 2.3 é discutido o contexto de redes celulares dando cobertura às aplicações M2M. Então, finaliza-se este capítulo na seção 2.4 discutindo alguns detalhes do funcionamento do padrão NB-IoT.

### 2.1 Redes *Machine-to-Machine* (M2M)

A área de IoT abrange uma gama de oportunidades de pesquisa devido à sua grande complexidade. Dentre suas temáticas de estudo, encontra-se a de *Machine-to-Machine* (M2M), que estuda a comunicação entre os dispositivos inteligentes, incluindo os diferentes tipos de tráfego e as tecnologias encontradas nesse cenário (AL-FUQAHA *et al.*, 2015).

Segundo a definição de Ghavimi e Chen (2015), o cenário M2M é caracterizado por uma quantidade massiva de dispositivos autônomos inteligentes. Esses dispositivos são heterogêneos em relação à mobilidade, tecnologias de comunicação e recursos computacionais.

Com relação à mobilidade, os dispositivos podem ser estacionários, como, por exemplo, medidores inteligentes e eletrodomésticos. Em um outro extremo, os dispositivos podem ser completamente móveis, como os celulares e os veículos inteligentes. Entre estes dois extremos, encontramos os dispositivos parcialmente móveis, como sensores móveis limitados à áreas como hospitais e reservas florestais.

Outra forma de classificação citada por Ghavimi e Chen (2015) está na tecnologia utilizada para comunicação entre os dispositivos. No caso de dispositivos estáticos, é possível implantar tecnologias cabeadas como *Ethernet*. Esse tipo de tecnologia possibilita uma conexão mais estável do que tecnologias sem fio. Além disso, utilizando o padrão IEEE 802.3af (*Power-over-Ethernet*) é possível que o dispositivo tenha uma fonte constante de energia. Contudo, devido ao alto custo de implantação da tecnologia cabeada para a quantidade massiva de dispositivos em cenários do futuro, é impraticável a utilização de conexões cabeadas em tal cenário. Logo, espera-se que os dispositivos utilizem, em sua maioria, conexões sem fio (MENDELSON,

2004).

É possível classificar as tecnologias sem fio disponíveis em capilares ou celulares. As redes capilares, como *WiFi*, *ZigBee* e *Bluetooth*, possuem um alcance menor em comparação às redes celulares. Além disso, as redes capilares possuem protocolos de comunicação descentralizados. Por outro lado, as redes celulares possuem EBs como entidades centralizadoras, controlando a utilização dos recursos de rádio em células com raios de cobertura na ordem de centenas de metros a quilômetros (NOVO *et al.*, 2015).

Infelizmente, no contexto de M2M, o desempenho dos algoritmos descentralizados deteriora-se bastante devido à quantidade de dispositivos, tornando difícil garantir um nível mínimo de Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*) para as aplicações utilizadas. Por isso, as redes celulares vem recebendo bastante atenção na área de M2M.

A última categoria da classificação definida por Ghavimi e Chen (2015) é referente à quantidade de recursos computacionais disponíveis nos dispositivos. Estima-se que a maior parte dos dispositivos seja extremamente limitada em relação à bateria, processamento e armazenamento. Por isso, o custo financeiro esperado para os mesmos também é extremamente baixo, tornando-os até mesmo descartáveis.

Apesar da heterogeneidade de dispositivos, a quantidade de dispositivos deve ser o maior desafio na área de M2M. Espera-se que a quantidade de dispositivos aumente exponencialmente até 2020. Conforme discutido no Capítulo 1, as previsões colocam a quantidade de dispositivos conectados na faixa de dezenas de bilhões em 2020 (JERMYN *et al.*, 2015; ERICSSON, 2016b).

A quantidade massiva de dispositivos resulta em uma disputa por recursos compartilhados, como o espectro de frequências, criando a necessidade de protocolos de acesso ao meio capazes de garantir um nível mínimo de QoS. Neste sentido, as redes celulares são vantajosas, já que podem controlar e reservar a utilização dos recursos, provendo justiça e garantia de QoS no processo de disputa de recursos realizado pelos dispositivos.

Nas próximas seções são detalhados os diferentes tipos de aplicações encontradas no cenário de comunicações M2M e como elas se caracterizam.

### **2.1.1 Aplicações M2M**

Dado o que foi apresentado sobre a rede M2M, é possível perceber que ela é uma tecnologia promissora para aplicações inteligentes de próxima geração. Entre os exemplos de

aplicações que farão parte deste cenário de dispositivos inteligentes, pode-se citar: cidades inteligentes, sistemas de transporte inteligente, *smart grid* e oferta/demanda de produtos (CHEN *et al.*, 2012).

Sistemas de transporte inteligente podem utilizar dispositivos M2M para auxiliar ou automatizar sistemas como transporte público ou tráfego de veículos. Através de funções como a detecção de acidentes em estradas ou engarrafamentos, esse tipo de aplicação pode gerar informações como os horários do transporte público ou recomendações de vias para seus usuários de forma autônoma (MATHEUS, 2010).

Aplicações de *smart grid* utilizam sensores inteligentes para prover maior informação e controle sobre a demanda e produção de energia elétrica para os provedores, possibilitando benefícios como a redução da quantidade de energia gerada desnecessariamente e dos picos de consumo de energia.

Aplicações de oferta e demanda seguem a mesma ideia de *smart grid*, mas para produtos em geral, como uma geladeira que notifica a quantidade de produtos necessários para cada residência ou um sistema que automatize as requisições de produtos de escritório.

Kim *et al.* (2014) categorizam as aplicações de M2M em três tipos principais: (i) *streaming* de dados, como vídeo e áudio; (ii) funcionamento periódico, como sensores climáticos; e (iii) serviços baseados em eventos, como sensores de emergências médicas.

Como exemplo de aplicação de *streaming* de dados M2M tem-se uma câmera de vigilância enviando imagens para um servidor que identifica pessoas que tiveram acesso à determinada área. No caso de funcionamento periódico, tem-se sensores clássicos de temperatura, umidade, etc, que enviam informações em intervalos de tempo predeterminados. Por último, sensores baseados em eventos notificam se algo ocorreu como, por exemplo, falhas em sistemas ou situações de emergência com pacientes de hospitais.

Mesmo com essa variedade de aplicações, a maioria irá se encaixar na categoria de sensoriamento, coleta e distribuição de informações para tomada de decisões e atuação. Esse tipo de tráfego é caracterizado por transmissões esporádicas compostas por uma baixa quantidade de dados. Por exemplo, um sensor de temperatura que envia periodicamente apenas um valor numérico ou um sensor que monitora se algo está funcionando através do envio de um *bit* (KIM *et al.*, 2014).

Essa grande quantidade de dispositivos enviando relatórios de dados pequenos deve ser levada em consideração porque pode causar problemas no acesso ao meio em situações de

congestionamento. Também pode resultar em alto *overhead* de controle, pois a quantidade de dados de controle pode ser consideravelmente maior que a quantidade de dados de aplicações, conforme discutido por Asadi *et al.* (2014).

Na próxima subseção, são discutidas as características específicas das aplicações M2M que as diferem de aplicações convencionais.

### **2.1.2 Características de aplicações M2M**

Nessa seção, discute-se as características de M2M listadas por Ghavimi e Chen (2015) e como elas afetam o bom funcionamento da rede.

#### *Baixa mobilidade*

Como discutido anteriormente, os dispositivos podem ser estacionários, móveis ou parcialmente móveis. Por exemplo, eletrodomésticos inteligentes, dispositivos celulares e instrumentos médicos, respectivamente.

A característica de baixa mobilidade das aplicações M2M se aplica aos dispositivos estacionários e parcialmente móveis. Ela é interessante porque diminui drasticamente os requisitos dos mecanismos de gerência de mobilidade, especialmente em redes celulares, nas quais a mobilidade ocorre quando um dispositivo muda de célula.

Estes mecanismos podem ser reduzidos quase que completamente. Por exemplo, em um hospital onde dispositivos inteligentes transitam pelo perímetro, as células poderiam ser implantadas de forma que uma ou duas células cubram toda a área, reduzindo a quantidade de mudanças de células e a necessidade de atualizações constantes de posições.

#### *Funcionamento Periódico*

Uma característica esperada para grande parte dos dispositivos será um comportamento periódico na geração dos relatórios de dados. Assim como em redes de sensores, os dispositivos alternam entre o estado de atividade, no qual as informações são geradas e transmitidas, e o estado de economia de bateria, no qual o dispositivo aguarda uma mudança no ambiente.

O intervalo pode ser da ordem de milissegundos para aplicações com constante atualização de informações, como sensores críticos em usinas nucleares. No entanto, o intervalo

também pode ser da ordem de horas e até mesmo dias, como é o caso, por exemplo, de aplicações de monitoramento ambiental.

#### *Tolerância a atrasos*

Algumas aplicações M2M possuem o diferencial de permitirem que suas transmissões sejam atrasadas. Por exemplo, mensagens de um sensor de umidade não precisam chegar instantaneamente no receptor porque esse tipo de informação não será utilizado naquele momento.

Essa característica pode ser explorada para garantir o QoS de outros tipos de aplicações ou para mitigar problemas de congestionamento da rede. A rede pode, por exemplo, optar por priorizar uma informação como a notificação de uma queda de um sistema ao invés de atualizar o histórico de umidade do ambiente.

#### *Pequenas transmissões de dados*

Esta é uma das principais características das aplicações M2M, estando presente em quase todas elas, exceto naquelas de *streaming* de áudio e vídeo.

Como dito no Capítulo 1, a maior fatia de aplicações esperadas para o cenário IoT terá o objetivo de monitoramento, o que se traduz em transmissões de relatórios com pouca quantidade de dados.

A informação útil destes pacotes pode ser de apenas alguns *bytes* representando variáveis inteiras, ou bits, representando variáveis booleanas. No entanto, as estruturas XML e JSON são utilizadas para adicionar contexto, como a identificação do sensor que gerou aquele dado, o tipo do valor, etc. Estas estruturas fazem com que os relatórios de dados aumentem de tamanho consideravelmente.

#### *Monitoramento de dispositivos*

Esta característica é importante para aplicações M2M dada a premissa desse tipo de rede funcionar de maneira autônoma e, devido a isso, a própria rede deve detectar o mau funcionamento ou anomalias para alertar alguma entidade que trate do problema ou resolver por ela mesma.

### *Mensagem de alarme com prioridade*

A mensagem de alarme com prioridade é um tipo diferenciado de evento. Tal mensagem requer uma prioridade superior em relação à outras mensagens, pois alerta sobre problemas como incidentes médicos e falhas em outros sistemas emergenciais. Por exemplo, um pedido de ajuda de uma idosa que caiu e se machucou, um ataque cardíaco de um paciente de UTI ou um servidor de banco de dados importante que parou de responder.

### *Conexões seguras*

Algumas aplicações podem ter o requisito de conexões seguras para proteger dados importantes de usuários. Essa segurança é pensada em nível de privacidade, confiabilidade ou integridade. Nesses três casos, é normalmente necessário utilizar algum tipo de criptografia, mecanismos de retransmissão e/ou configuração de conexão.

O protocolo CoAP, por exemplo, possibilita a utilização de alguns desses mecanismos, mas a criptografia em M2M ainda é um tema em estudo devido às limitações de recursos (SHELBY *et al.*, 2014).

### *Destino de dados definido pela rede*

Esta característica mostra uma funcionalidade que permite que a rede proporcione um destino para as informações geradas pelos dispositivos que a compõem. Por exemplo, os sensores podem ser configurados para transmitir seus relatórios para a EB que, por sua vez, os encaminharia somente para sistemas com interesse em utilizá-los ou que estejam pagando para utilizá-los.

Assim, não é necessária a reconfiguração dos dispositivos no caso da mudança do destino dos dados ou a configuração dos dispositivos de maneira individual. Também permite a geração de dados de monitoramento de maneira pública pelos dispositivos proprietários.

### *Transmissões infrequentes*

Como mencionado anteriormente, algumas aplicações possuem um funcionamento periódico e essa característica dita que alguns deles funcionem entre grandes intervalos de tempo, por exemplo, uma vez por dia ou a cada duas horas.

### *Funcionamento em grupos*

Devido à quantidade de dispositivos almeçados para as aplicações M2M, é esperado que os dispositivos possam ser gerenciados por meio de políticas e endereçamento em grupo.

Políticas em grupos podem ser utilizadas para determinar permissões ou prioridades para diferentes dispositivos, por exemplo. Já o endereçamento em grupo pode ser utilizado para enviar ou divulgar informações para grupos.

## **2.2 O padrão LTE de redes celulares**

O padrão *Long Term Evolution* (LTE) foi criado pela instituição *Third Generation Partnership Project* (3GPP), que é dedicada, principalmente, à tecnologias na área de redes celulares. De acordo com Gozalvez (2016), o LTE é considerado a principal tecnologia de redes celulares atualmente disponível no mercado.

O 3GPP atualiza seus padrões através das *releases*, nas quais são introduzidos novos padrões, protocolos e melhorias. Foi na oitava *release*, em 2008, que o padrão LTE foi proposto.

Este padrão apresenta as suas funcionalidades como componentes modulares que são divididos em dois espaços principais: a Rede Núcleo (RN), popularmente conhecida como *Core Network*, e a Rede de Acesso via Rádio (RAR). A RN é responsável por funcionalidades como prover acesso à Internet, rotear dados entre EBs e controlar os mecanismos de mobilidade. A RAR é composta pelas EBs e os dispositivos celulares. Sua principal função é conectar a RN com os dispositivos, realizando funções como codificação e decodificação de dados e gerenciamento de recursos de rádio, tais como potência de transmissão e subportadoras de frequência.

Como o foco do presente trabalho é no padrão NB-IoT, que reutiliza todos os aspectos da RN, as próximas subseções ficarão centradas na discussão da RAR.

### **2.2.1 Alocação de recursos de rádio**

Sempre que um dispositivo enfileira um pacote para ser transmitido para a EB, ou vice versa, é necessário que ele receba instruções da EB para determinar como será feita a transmissão. Mas, no caso do *uplink*, o dispositivo precisa requisitar recursos à EB, para que ela o inclua durante a distribuição dos recursos de rádio.

Este procedimento é realizado através de um canal aleatório, onde os dispositivos utilizam algoritmos distribuídos de controle de canal. Claramente, a competição por este meio

pode causar congestionamento no cenário clássico no ambiente M2M formado por muitos dispositivos.

Depois que o dispositivo transmite sua requisição à EB, ela irá selecionar os recursos de rádio que serão utilizados pelo dispositivo para aquela transmissão. A EB divide os recursos nos eixos do tempo e frequência, em unidades chamadas de Blocos de Recurso (BRs). Tais unidades que são distribuídas para os dispositivos.

Para que se possa entender como são feitas as transferências de dados no padrão LTE, é detalhado, nas próximas seções, como os recursos de rádio são divididos em BRs e, além disso, como é feita a distribuição destes BRs.

### 2.2.2 Formatos de divisão de recursos LTE

Existem dois modos de funcionamento no padrão LTE: o modo Divisão *Duplex* de Frequência (*Frequency Division Duplex* - FDD) e o modo Divisão *Duplex* de Tempo (*Time Division Duplex* - TDD). Eles ditam como os recursos de rádio são divididos para serem alocados aos dispositivos requisitantes (DAHLMAN *et al.*, 2013).

Ambos os formatos discretizam os eixos de tempo e frequência em BR que ocupam 180 kHz no eixo da frequência e duram 1 milissegundo no eixo do tempo. Usuários utilizam o espaço desses BR para transmitir e receber dados. A Tabela 1 mostra a quantidade de blocos de recursos por milissegundo resultante das diferentes larguras de banda definidas no padrão LTE.

Tabela 1 – Configurações de largura de banda LTE.

Largura de Banda	Quantidade de Blocos de Recursos (BR)
1.4 MHz	6 BR
3 MHz	15 BR
5 MHz	25 BR
10 MHz	50 BR
15 MHz	75 BR
20 MHz	100 BR

Fonte – (DAHLMAN *et al.*, 2013).

Cada modo divide as frequências em BR de maneira diferente. Enquanto um baseia sua divisão no tempo, o outro utiliza o eixo da frequência.

### O modo TDD

No modo TDD, os recursos de rádio se alternam entre *uplink* e *downlink* (transmissões da EB para o dispositivo) dependendo da configuração utilizada pela estação base. Existem sete possíveis configurações para o LTE TDD, cada configuração com capacidades diferentes de *uplink* e *downlink*, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Configurações do modo TDD.

Configuração 0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
Configuração 1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
Configuração 2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
Configuração 3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
Configuração 4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
Configuração 5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
Configuração 6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Fonte – (DAHLMAN *et al.*, 2013)

Os caracteres U significam um *subframe* de *uplink*, os caracteres D significam um *subframe* de *downlink* e os caracteres S significam um *subframe* especial de guarda entre as trocas de *downlink* e *uplink*. Nota-se, por exemplo, que a Configuração 0 fornece mais recursos de *uplink* e a Configuração 5 mais recursos de *downlink*.

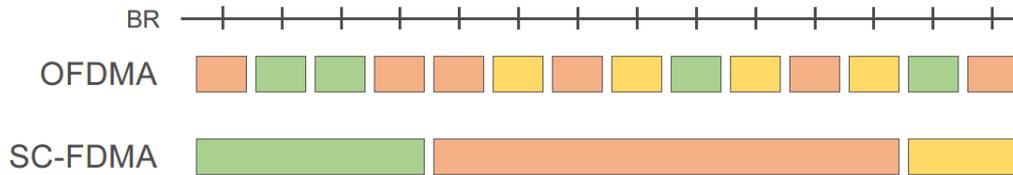
### O modo FDD

Atualmente, o modo FDD é o formato padrão para redes LTE. Nesse modo, a faixa de frequência é dividida para o *downlink* e o *uplink*, cada um recebendo metade da faixa total. Assim, é possível fornecer conexões *full-duplex* para os usuários. Este trabalho terá como foco o modo FDD por ser o utilizado no padrão NB-IoT.

O *uplink* utiliza o formato de sinal *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) e o *downlink* utiliza o formato *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). A principal diferença entre os formatos é a restrição do formato SC-FDMA, que dita que os usuários desse formato devem transmitir utilizando BRs vizinhos no eixo da frequência. Esse formato de sinal é utilizado porque economiza a bateria dos dispositivos se comparado ao formato OFDMA (ABU-ALI *et al.*, 2014).

Observa-se na Figura 3 um exemplo de alocação de BRs em uma portadora LTE no modo FDD. Nesta figura, os dispositivos são representados pelas diferentes cores e os BRs são representados pelo eixo horizontal encontrado na parte superior da figura.

Figura 3 – Exemplo de alocação de recursos no modo FDD.



Fonte: O autor.

Percebe-se que o OFDMA permite que os dispositivos utilizem quaisquer BR, independente do seu lugar no eixo da frequência, enquanto o modo SC-FDMA é restrito devido à limitação de vizinhança no eixo da frequência.

### 2.2.3 Estratégias de alocação de recursos

Conforme apresentado na seção anterior, os usuários utilizam o espaço dos BRs para transmitir e receber dados. Cabe à EB decidir como os BRs serão divididos. O padrão define a entidade responsável por tal divisão, que é chamada de escalonador. No modo FDD, existem dois escalonadores que operam de forma independente, um para o *uplink* e outro para o *downlink*.

O padrão LTE deixa em aberto qual estratégia de alocação deve ser utilizada, portanto, a decisão cabe à operadora da rede celular. Logo, diversas estratégias são utilizadas para dividir os BRs entre os dispositivos.

A estratégia utilizada afeta diretamente a performance da célula devido aos objetivos e as métricas utilizadas por cada uma. Por exemplo, algumas estratégias visam algum objetivo específico, como maximizar a vazão da célula ou a justiça na divisão de recursos.

Nos próximos parágrafos são discutidos alguns exemplos de estratégias de alocação de recursos em redes celulares, bem como seus objetivos e métricas utilizadas.

#### *Round Robin (RR)*

A estratégia RR prioriza a justiça na divisão nos dados, ou seja, todos os usuários recebem a mesma quantidade de recursos em intervalos uniformes de tempo. Por exemplo, em uma situação na qual 25 BRs são divididos para 30 usuários, cada usuário recebe um BR e os usuários que não receberem recursos em uma determinada rodada irão ser os primeiros a receber recursos na próxima rodada.

### *Vazão Máxima (Maximum Throughput - MT)*

A estratégia MT visa maximizar a vazão total da célula alocando os dispositivos nos BRs onde eles possuem melhor qualidade de canal. Muitas estratégias de alocação utilizam a qualidade do canal como principal medição para alocação de recursos. Esta métrica é calculada pelo receptor de uma transmissão e reflete a probabilidade de perda de transmissão.

Ela varia bastante no eixo do tempo e frequência devido a diversos motivos, como a mobilidade dos dispositivos e os efeitos de perda de percursos, sombreamento e desvanecimento rápido, portanto, é necessário que esta métrica seja calculada constantemente. No *uplink*, os dispositivos fazem transmissões de sinais de referência para a EB, assim a estação base consegue estimar a qualidade de sinal dos dispositivos.

Outra vantagem da alta qualidade de sinal é a possibilidade de utilizar codificações e modulações mais complexas, resultando em transmissões de mais bits por sinal de *uplink*. Portanto, estas estratégias garantem que os recursos sejam usados da melhor maneira possível, maximizando a vazão total do sistema, mas prejudicando dispositivos que estejam com qualidade de sinal ruim.

### *Justiça Proporcional (Proportional Fair - PF)*

As estratégias RR e MT mostram dois extremos entre as estratégias de alocação, uma maximiza a justiça entre os dispositivos e outra maximiza o desempenho do sistema. A estratégia PF pode ser considerada um meio termo entre as duas por observar a justiça na divisão dos recursos e levar em consideração a qualidade de canal (KOLDING *et al.*, 2003).

A Equação 2.1 apresenta a métrica PF para cada usuário  $u$  e bloco de recurso  $br$ , sendo  $Q_u^{br}$  a qualidade de sinal do usuário  $u$  no bloco de recurso  $br$  e  $V_u$  a vazão média de dados do usuário  $u$ .

$$PF_u^{br} = \frac{Q_u^{br}}{V_u} \quad (2.1)$$

Nota-se que essa métrica apresenta maiores valores quando a qualidade do canal é alta. Porém, se o usuário estiver transmitindo muito, o valor da métrica é reduzido, permitindo, assim, que outros dispositivos tenham a chance de transmitir.

A estratégia PF simplesmente calcula a métrica para todos os usuários e seleciona os usuários com maior valor da métrica  $PF_u^{br}$  para receber recursos. As próximas estratégias também usam uma métrica de ordenação para selecionar os usuários que receberão recursos.

### *Atraso Exponencial (AE)*

Considerando que em aplicações em tempo real dados antigos perdem a importância, o atraso dos pacotes se torna um valor muito importante na decisão do escalonador. Portanto, o tempo que um pacote fica esperando para ser transmitido se torna importante no momento de distribuir os BRs.

Conforme apresentado na Equação 2.2, a métrica de Atraso Exponencial  $AE_u$  de um usuário  $u$  é calculada utilizando o atraso da próxima mensagem da fila de cada dispositivo  $headDelay_u$  e um valor de atraso máximo  $maxDelay_u$  predeterminado pela aplicação do usuário  $u$ .

$$AE_u = \exp\left(\frac{headDelay_u}{maxDelay_u}\right) \quad (2.2)$$

A função  $\exp$  é utilizada para fazer com que a métrica cresça exponencialmente à medida que o atraso do pacote do usuário se aproxima do limiar máximo da aplicação em questão, dando prioridade maior aos usuários que estão prestes a perder pacotes.

### *Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF)*

Esta estratégia fornece um meio termo entre a métrica PF e a métrica de atraso exponencial. A Equação 2.3 apresenta a métrica  $MLWDF_u^{br}$ , são utilizados os parâmetros  $Q_u^{br}$  e  $V_u$  da métrica PF e os parâmetros  $headDelay_u$  e  $maxDelay_u$  da métrica AE (AMEIGEIRAS *et al.*, 2004).

$$MLWDF_u^{br} = -\log(\sigma_u) * \frac{Q_u^{br}}{V_u} * \frac{headDelay_u}{maxDelay_u} \quad (2.3)$$

Observa-se também que o MLWDF utiliza um parâmetro  $\sigma_u$ , que indica a porcentagem máxima de perda de pacotes desejada para a aplicação de determinado usuário  $u$ .

Este valor é utilizado para estabelecer a prioridade de aplicações específicas. Portanto, o valor de  $\sigma_u$  permite que prioridades maiores sejam dadas para aplicações específicas. Quanto maior o valor de  $\sigma_u$ , menor o valor de  $MLWDF_u^{br}$  e menor a prioridade do usuário.

A Tabela 3 mostra um comparativo entre as estratégias acima, considerando tratamento de justiça, vazão, *starvation* e atraso máximo.

Tabela 3 – Comparativo entre estratégias de alocação de recursos.

Estratégia de alocação	Maximiza Vazão	Trata Justiça	Permite starvation	Considera atraso
<i>Round Robin</i> (RR)		✓		
<i>Maximum Throughput</i> (MT)	✓		✓	
<i>Proportional Fair</i> (PF)	✓	✓	✓	
Atraso Exponencial (AE)			✓	✓
<i>Modified Largest Weighted Delay First</i> (MLWDF)	✓	✓	✓	✓

Fonte – O autor.

### 2.3 Redes M2M auxiliadas por redes celulares

Neste trabalho são estudadas as redes M2M auxiliadas por redes celulares, pois, como citado anteriormente, elas possuem as vantagens de maior facilidade e menor custo de implantação em relação às redes cabeadas como *Ethernet*.

Além disso, possuem a vantagem de maior controle sobre o meio sem fio, com relação a outros tipos de rede sem fio, proporcionando características como garantias de QoS, entidade centralizadora e mecanismos de segurança e mobilidade robustos.

Mais especificamente, é tratado o padrão de redes celulares 3GPP LTE devido à arquitetura modular, funcionamento completamente baseado em IP e interoperabilidade com outras arquiteturas celulares.

#### **Redes M2M em Arquiteturas 3GPP**

O 3GPP utiliza a nomenclatura Comunicações do Tipo Máquina (*Machine Type Communications* - MTC) para determinar comunicações M2M e define duas entidades principais: servidores MTC e dispositivos MTC.

Os cenários definidos pelo 3GPP para MTC são: comunicação entre dispositivos MTC e entre dispositivos MTC e servidores MTC. Os servidores MTC são responsáveis pela comunicação com o usuário da aplicação MTC e por prover serviços para os dispositivos, por exemplo, armazenamento de dados e configuração de dispositivos.

Nas *releases* mais recentes é definida uma entidade chamada Servidor de Capacidade de Serviço (*Service Capacity Server* - SCS) que reside dentro da rede LTE e realiza ações como *trigger* de dispositivos e mapeamento de identificadores (PRASAD *et al.*, 2016).

Outras definições encontradas nas *releases* mais recentes são: tipos específicos de dispositivo com menos recursos para tornar a implantação desse tipo de rede mais barata e

também diversos requisitos de serviços e segurança para redes MTC.

Entre essas definições nós encontramos as categorias 1, 0 e M1, lançadas nas releases 8, 12 e 13, respectivamente. A categoria 1 é a que aproxima mais do LTE convencional pois permite comunicação *full duplex* e suporta ambos os modos FDD e TDD, mas possui a banda limitada. A categoria 0 reduz a complexidade dos dispositivos permitindo que o dispositivo opere em modo *half duplex* e com capacidade ainda menor de banda.

Finalmente a categoria M1 tem 3 objetivos: reduzir ainda mais a complexidade dos dispositivos em comparação a categoria 0, ampliar o alcance e aumentar a vida útil das baterias. Para atingir esses objetivos essa categoria utiliza uma banda de frequência de 1.08 MHz, um amplificador de sinal de 20 dBm e técnicas de economia de bateria (GSM, 2016)

Na próxima seção, são discutidos os conceitos do padrão NB-IoT, alvo deste trabalho.

#### **2.4 Narrowband Internet of Things (NB-IoT)**

Na *release* 13 do 3GPP, o NB-IoT é definido como uma nova funcionalidade da 3GPP para o padrão LTE. O NB-IoT visa reutilizar a infraestrutura de hardware e parte da pilha de protocolos LTE. É capaz de suportar as exigências de aplicações IoT *ultra-low-end* de forma que seja acoplada à sistemas existentes sem grandes dificuldades, exigindo uma faixa limitada de frequência (WANG *et al.*, 2017).

Entre as vantagens adquiridas por reutilizar parte dos protocolos do padrão LTE, destacam-se:

- A facilidade de implantação em uma rede LTE já existente;
- A confiabilidade de protocolos LTE; e
- A coexistência entre o LTE padrão e o NB-IoT.

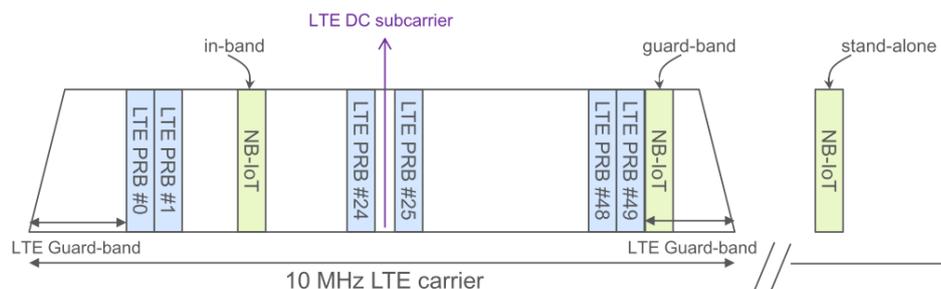
Apesar de reutilizar os protocolos das camadas superiores da rede LTE (RRC, RLC e MAC), o NB-IoT possui diferenças, como o acesso ao meio aleatório e os canais físicos, que tiveram que ser modificados para serem utilizados na banda reduzida, conforme explicado por Ratasuk *et al.* (2014).

Esse novo padrão utiliza o modo FDD e define portadoras com largura de banda de 200 kHz, o equivalente a um BR LTE. Destaca-se que essas frequências podem estar dentro da faixa do LTE ou fora, dependendo de como o NB-IoT é instalado. Na próxima seção é discutido sobre as configurações de implantação deste padrão.

### 2.4.1 Tipos de implantação do padrão NB-IoT em uma rede LTE

Como ilustrado na Figura 4, o 3GPP define três formatos para a implantação do NB-IoT: *inband*, *guardband* e *standalone*.

Figura 4 – Tipos de implantação do NB-IoT no domínio da frequência.



Fonte – (WANG *et al.*, 2017).

**Inband** Nesse formato, as portadoras NB-IoT ocupam o espaço de frequência de um BR em uma portadora LTE, limitando a quantidade de recursos para os outros tipos de dispositivos. Essa multiplexação permite o menor custo de operação, pois as duas tecnologias ocupam a mesma frequência.

**Guardband** Neste outro formato, a portadora NB-IoT ocupa parte do espaço de frequência não utilizado na faixa de guarda do LTE.

**Standalone** Por fim, esse formato se caracteriza pelo NB-IoT ocupar frequências fora de uma portadora LTE. Esse formato pode ser utilizado para substituir tecnologias mais antigas, como o GSM, por exemplo.

Na próxima seção, são discutidos os objetivos do padrão NB-IoT e as funcionalidades que o permitem atingir cada objetivo.

### 2.4.2 Objetivos de design do padrão NB-IoT

Entre as promessas do NB-IoT, tem-se:

- Maior área de cobertura;
- Baixo custo dos dispositivos;
- Vida útil das baterias dos dispositivos de até 10 anos;
- Atraso de transmissão menor que 10 segundos;
- Capacidade para dezenas de milhares de dispositivos por célula.

De acordo com Wang *et al.* (2017), a maior área de cobertura é resultado do maior

orçamento do *link* obtido pelo NB-IoT, que é capaz de alcançar 164dB, em comparação ao orçamento de 144dB alcançado pelo LTE. Essa diferença de 20dB resulta em um alcance até sete vezes maior. Um dos principais motivos desse maior alcance é o uso de repetição de sinal.

Essa maior área de cobertura é necessária para suportar cenários como zonas rurais e zonas de difícil acesso, que serão situações comuns de utilização desse tipo de tecnologia. Landström *et al.* (2016) fazem uma avaliação de como o NB-IoT se comporta nesse tipo de cenário.

O baixo custo e a elevada vida útil de dispositivos são necessários para que estes dispositivos sejam tratados como descartáveis. Estudos mostram que o padrão NB-IoT é capaz de funcionar em dispositivos de \$5 e estes dispositivos possuem vida útil de até 10 anos. Segundo Wang *et al.* (2017), para possibilitar isso, o padrão limita-se a funcionalidades mais simples como um algoritmo simples de detecção de erro no *downlink* e operações reduzidas de mobilidade.

O atraso de transmissão de 10 segundos pode ser considerado um relaxamento dos valores comuns de QoS presentes em outros tipos de aplicações, mas esse relaxamento é justificado pela baixa prioridade desse tipo de tráfego, como discutido na subseção 2.1.2.

A alta capacidade de dispositivos pode ser justificada pela capacidade de multiplexar o espaço de um bloco de recurso para diversos usuários no mesmo espaço de tempo e, também, pela capacidade de aumentar o número de portadoras com baixa ocupação da faixa de frequências disponível.

No caso da implantação *inband*, é possível que os escalonadores de BRs LTE sejam capazes de alternar os BR entre a portadora LTE e diversos portadores NB-IoT, dividindo os dispositivos entre esses portadores.

### **2.4.3 Modos de transmissão NB-IoT**

Como dito na seção anterior, muito da alta capacidade do padrão NB-IoT vem da habilidade de multiplexar a sua estreita faixa de frequência para muitos dispositivos. Essa habilidade vem de transmissões conhecidas como *single-tone* e *multi-tone*. Esses tipos de transmissões são possíveis apenas no *uplink*. O *downlink* NB-IoT funciona da mesma forma que o *downlink* LTE, mas sendo composto por apenas um BR.

Como no padrão LTE, o espaço de frequência de uma portadora NB-IoT é dividido em subportadoras, mas, neste novo padrão, é definido o uso de duas configurações diferentes de espaçamento entre subportadoras. É possível utilizar os valores 3,75 kHz e 15 kHz. O uso de

transmissões *multi-tone* é exclusiva para o espaçamento de subportadoras de 15 kHz.

O espaçamento de 15 kHz é o mesmo utilizado no padrão LTE e permite a existência de 12 subportadoras por portadora NB-IoT. Já o espaçamento de 3,75 kHz permite a existência de 48 subportadoras, mas pode causar interferência com portadoras LTE.

As transmissões *single-tone* permitem a transmissão utilizando apenas uma subportadora, permitindo que 12 e 48 transmissões sejam feitas ao mesmo tempo. Já as transmissões *multi-tone* fazem transmissões utilizando 3, 6 e 12 subportadoras.

A vantagem de utilizar transmissões *multi-tone* é que a duração da transmissão é reduzida significativamente. Na Tabela 4 são exibidas as diferentes configurações de transmissões, suas durações e ocupação dos subportadoras.

Tabela 4 – Configurações de transmissões NB-IoT.

Tipo de transmissão	Espaçamento de subportadoras	Número de subportadoras	Duração da transmissão
<i>Single-tone</i>	3.75 kHz	1	32 ms
	15 kHz	1	8 ms
<i>Multi-tone</i>	15 kHz	3	4 ms
	15 kHz	6	2 ms
	15 kHz	12	1 ms

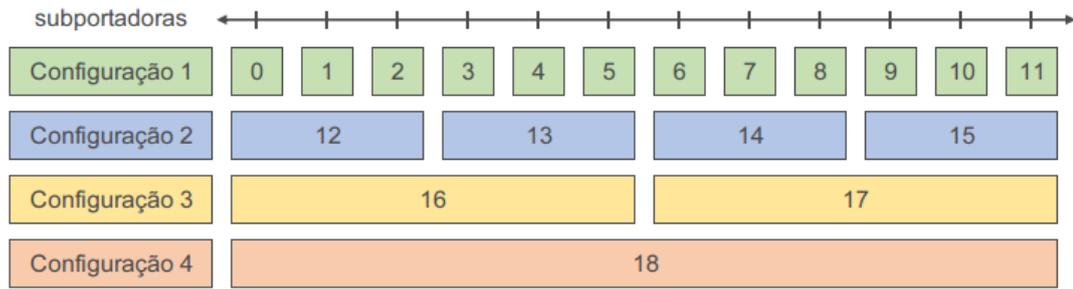
Fonte – (SCHLIENZ *et al.*, 2016).

Cada configuração resulta em diferentes tipos de URs, cada uma com diferentes características de ocupação das subportadoras e duração. Apesar dessas diferenças, todas as configurações de UR resultam na mesma quantidade de símbolos SC-FDMA, o que resulta na mesma quantidade de dados transmitidos por UR.

A determinação da configuração a ser utilizada é responsabilidade do escalonador. Esta decisão é transmitida para os dispositivos utilizando dois valores: o indicador de subportadoras ( $I_{sc}$ ) e o número de UR ( $N_{ur}$ ).

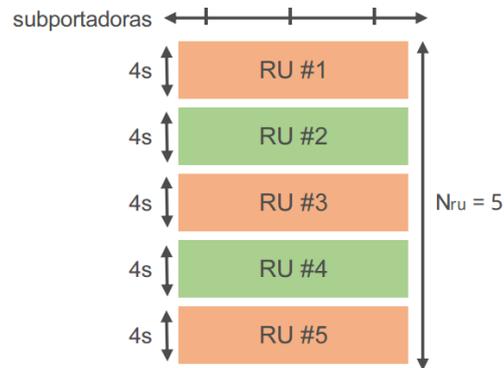
O valor  $I_{sc}$  indica quais subportadoras serão utilizados pela transmissão. Observe que esse valor também indica qual configuração de UR será utilizada. A Figura 5 ilustra os valores desse indicador. Neste trabalho, as configurações foram enumeradas para facilitar a referência.

Figura 5 – Ilustração do significado do valor  $I_{sc}$



O valor  $N_{ur}$  indica quantas UR vão ser utilizadas no eixo do tempo. A Figura 6 mostra um exemplo de uma alocação utilizando a configuração 2 e utilizando 5 RUs ( $N_{ur} = 5$ ).

Figura 6 – Exemplo de alocação de recursos NB-IoT.



No Capítulo 5 será detalhado o funcionamento dos algoritmos de alocação de recursos considerados neste trabalho e como eles foram adaptados para o padrão NB-IoT.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Um dos desafios mais tratados na literatura de M2M é o congestionamento devido à quantidade de dispositivos esperados em 2020, que é da ordem de dezenas de bilhões no total, como foi exibido na Figura 1 do Capítulo 1. Esse congestionamento exige a aplicação de estratégias capazes de diminuir desperdícios de recursos e oferecer garantias de QoS aos dispositivos. Caso contrário, os dispositivos disputariam pelos recursos compartilhados de maneira aleatória, tornando o cenário inviável.

Todas as estratégias buscam eficiência no uso do espectro eletromagnético e justiça na divisão dos recursos. Estratégias que permitem inanição de recursos devem ser usadas com parcimônia. Além disso, a má utilização de recursos resulta na necessidade de maiores faixas de frequência e maiores custos de operação.

Segundo Maia *et al.* (2016), as estratégias de controle de congestionamento têm como objetivo maximizar critérios de QoS, economia de energia, eficiência no uso do espectro, justiça e impacto sobre dispositivos convencionais. Estes critérios possuem diferentes prioridades dependendo do tipo de aplicação utilizado.

Por exemplo, as propostas que visam a economia de energia utilizam, principalmente, duas técnicas: (i) controlar a potência de transmissão utilizada pelas antenas sem fio e (ii) minimizar o tempo que os dispositivos permanecem ativos. Estas duas técnicas permitem maximizar o tempo de vida das baterias dos dispositivos e controlar o raio de cobertura das EBs. Assim, é possível controlar a quantidade de dispositivos por célula e diminuir a quantidade de dispositivos disputando por recursos.

Por fim, com a inserção dos dispositivos M2M, existem preocupações com os efeitos sobre as aplicações atuais. Os trabalhos nesta temática podem ser divididos em propostas de reservas de recursos para aplicações convencionais e propostas que determinam prioridade na alocação de recursos para aplicações convencionais, pois estes são ditos de maior prioridade.

É importante salientar que a literatura deste problema está dividida em dois âmbitos: controle de congestionamento nos recursos de controle e recursos de dados. Consideramos os recursos de controle como sendo aqueles utilizados para transmitir dados de controle, ou seja, aqueles utilizados para manter a rede e não possuem dados úteis para os usuários. Os outros são aqueles utilizados para transmitir dados dos usuários/dispositivos.

Começamos este capítulo discutindo o problema de congestionamento no plano de dados na seção 3.1, para embasar a raiz do nosso problema. Continuamos na seção 3.2 discutindo

a categoria de tecnologias conhecida como LPWAN, que apresenta comportamento e objetivos similares ao padrão NB-IoT. Finalizamos na seção 3.3 discutindo o estado da arte no contexto NB-IoT.

### 3.1 Congestionamento no plano de dados

Já foi provado por Ratasuk *et al.* (2016b) que o plano de controle NB-IoT funciona suficientemente bem para os seus objetivos de escalabilidade. Portanto, este trabalho tem como foco estudar o congestionamento que ocorre no plano de dados. O congestionamento se encontra no *uplink* devido ao destino característico dos dados M2M.

Ele ocorre devido ao funcionamento do padrão LTE ter sido projetado para as aplicações convencionais. O formato SC-FDMA pode não ser suficiente para suportar a quantidade massiva de dispositivos que utilizam primariamente os recursos de *uplink* em quantidades muito baixas (GHAVIMI; CHEN, 2015).

O artigo de Abu-Ali *et al.* (2014) mostra uma revisão extensa de alocação de recursos de *uplink* presentes na literatura, que é classificada pelo algoritmo utilizado, métrica de alocação, critério de QoS, eficiência energética, compatibilidade com padrão e compatibilidade com versões anteriores. O trabalho cita apenas a estratégia de alocação presente no trabalho de Lioumpas e Alexiou (2011) como específica para redes M2M. Esta estratégia distribui, inicialmente, os recursos para dispositivos convencionais e, depois, distribui os recursos que sobram para os dispositivos M2M. Por fim, é apresentada uma avaliação de desempenho com algumas estratégias, mas os cenários mais densos possuem apenas 50 dispositivos.

Já o trabalho de Maia *et al.* (2016) define uma estratégia de alocação de *uplink* que foca em maximizar a QoS e diminuir o impacto sobre os dispositivos convencionais. A proposta divide os recursos para que estes sejam distribuídos de maneira independente para as aplicações convencionais e aplicações M2M. Finalmente, para escalonar os recursos, são utilizadas medidas de vazão recentes e uma função que calcula a proximidade do dispositivo de alcançar os critérios de QoS desejados.

Em Soltanmohammadi *et al.* (2016) são apresentadas outras soluções para melhorar a transmissão de dados M2M. Estas soluções são classificadas em: melhorias de dispositivos localizados na borda das células, redução de *overhead*, *broadcast* cooperativo, separação de alocação de recursos, *designs* inovadores de recursos de transmissão, esquemas de acesso múltiplo e redes baseadas em contexto.

### 3.2 *Low Power Wide Area Networks*

Entre as tecnologias de comunicação disponíveis no cenário IoT, encontra-se um conjunto categorizado como Redes de Grande Alcance e Baixa Potência (*Low Power Wide Area Networks* - LPWAN). Este grupo de tecnologia é agrupado devido a diversas similaridades entre seus objetivos e especificações. O padrão NB-IoT faz parte deste grupo. A seguir é detalhado o que caracteriza este grupo (BARDYN *et al.*, 2016).

#### *O público alvo*

As similaridades começam pelo público alvo destas tecnologias. Ele é composto por dispositivos de baixa complexidade executando aplicações simples. Segundo Nolan *et al.* (2016), é esperado que esta categoria componha pelo menos 55% do mercado IoT.

#### *Uso de Estações Base*

Outra similaridade é a utilização de Estação Base (EB) como infraestrutura para os dispositivos nesta categoria. As EB permitem, dentre outras coisas:

**Diminuir a complexidade de seus dispositivos:** Explorando a capacidade de transferir as responsabilidades mais complexas para a EB, é possível que os dispositivos sejam tão baratos a ponto de serem descartáveis. Também possibilita que o consumo de bateria diminua, pois a necessidade de processamento diminui e a estação base pode controlar o ciclo de atividade.

**Utilizar os dispositivos em qualquer lugar e com maior facilidade:** A existência desta infraestrutura dedicada permite uma maior facilidade na utilização dos dispositivos. Em outras tecnologias é necessário a presença de outros dispositivos como *gateways* e *relays* para que a comunicação seja possível.

**Aumentar a área de cobertura:** Possibilita que um grande número de dispositivos seja coberto. Ou seja, os dispositivos usufruem de grandes áreas de cobertura, na ordem de km<sup>2</sup>, facilitando a utilização destas tecnologias em áreas de difícil acesso e em zonas rurais.

#### *Largura da banda reduzida*

Ao contrário de outras tecnologias que utilizam larguras de banda na escala de MHz de frequência, as tecnologias LPWAN utilizam bandas na escala de kHz. Isso resulta em

vazões reduzidas, na faixa de dezenas de kbps, e em protocolos com atrasos de transmissão mais elevados. Por outro lado, essas bandas podem aumentar o alcance do sinal devido a quantidade reduzida de ruído inerente a um sinal de largura estreita.

Segundo os conceitos apresentados na seção 2.4, pode-se perceber que o padrão NB-IoT se enquadra nesta categoria. Nas próximas seções é discutido em mais detalhes sobre duas outras tecnologias que também se enquadram: o padrão LoRa e o padrão SigFox.

### 3.2.1 Os padrões LoRa e LoRaWAN

Nesta seção, é considerado o par de padrões LoRa e LoRaWAN. O padrão LoRa descreve a camada física para dispositivos IoT, enquanto o padrão LoRaWAN descreve as camadas superiores (NOLAN *et al.*, 2016).

O padrão LoRa é de propriedade da empresa *Semtech* e seu funcionamento não é completamente aberto ao público. Já o padrão LoRaWAN é aberto e vem sendo desenvolvido pela LoRa Alliance<sup>1</sup>, composta por membros de todo o mundo, principalmente da Ásia e Europa.

O padrão LoRa descreve a utilização de um sinal estreito que é espalhado sobre uma banda maior. Essa característica torna o sinal mais resistente a ruídos e o torna mais difícil de ser interceptado e obstruído.

O sinal utiliza frequências sub-GHz não licenciadas, que se tornaram famosas recentemente com tecnologias IoT pois proveem comunicação confiável com baixa potência.

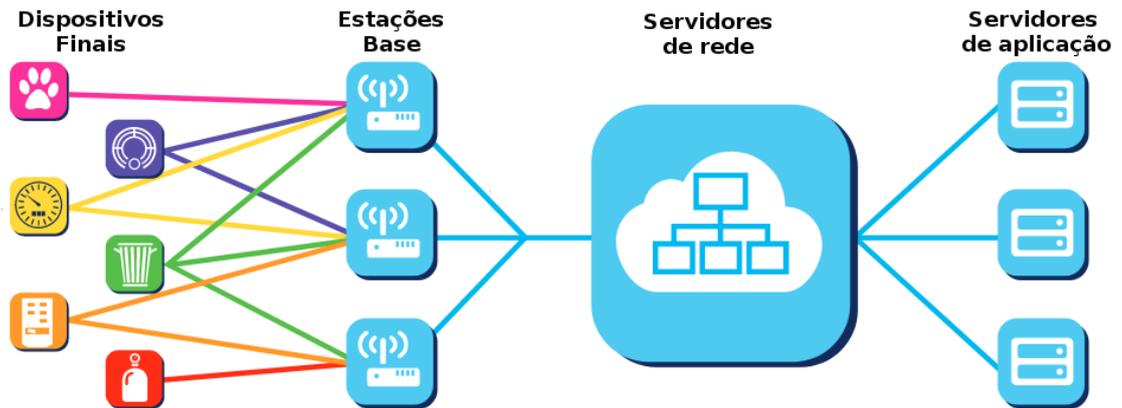
O espalhamento do sinal sobre uma banda maior pode ser feito de forma que o espalhamento seja maior ou menor. Quanto mais espalhado o sinal, menor a vazão resultante do sistema, mas resulta em um alcance maior. Portanto, existe um *trade-off* configurável entre o alcance e a vazão do sistema.

A arquitetura definida pelo LoRaWAN utiliza dispositivos LoRa de forma que os dados gerados possam ser utilizados por servidores de aplicação remotos. A Figura 7 mostra uma visão geral da arquitetura LoRaWAN.

---

<sup>1</sup> [www.lora-alliance.org](http://www.lora-alliance.org)

Figura 7 – Arquitetura LoRaWAN.



Fonte – Adaptado e traduzido do *website* [www.lora-alliance.org](http://www.lora-alliance.org).

Os dispositivos finais executam aplicações como alarmes e monitoramento. Eles possuem um módulo proprietário LoRa para realizar transmissões. Continuando, da esquerda para a direita da imagem, existem as EBs, que funcionam como concentradores e *gateways* para os dispositivos. Logo depois, existem os servidores de rede que tratam para que os dados sejam transmitidos pela internet para os servidores de aplicação, que disponibilizam estes dados para os usuários.

Nos próximos parágrafos, são discutidos outros aspectos e funcionalidades relevantes do padrão LoRaWAN.

#### *Topologia "estrelas de estrelas"*

Normalmente, um dispositivo celular se conecta a apenas uma EB, mas, no caso deste padrão, isso não é verdade. Os dispositivos utilizam a topologia conhecida como "estrela de estrelas", na qual todos os dispositivos se conectam com todas as EBs em sua vizinhança. Mais detalhadamente, o nome vem da noção de que cada EB cria uma topologia em estrela com os dispositivos em sua vizinhança, formando uma estrela por estação base.

Esta técnica é utilizada em ocasiões em que diversas EBs recebem o sinal de um mesmo dispositivo. Então, estas EBs utilizam esta redundância para verificar e corrigir a integridade daquele sinal.

Outra vantagem da utilização desta redundância é a possibilidade da localização de dispositivo utilizando técnicas de triangularização de sinal, dispensando a necessidade de módulos GPS.

### *Mecanismos de segurança*

São definidos dois níveis de segurança: rede e aplicação. Para isso é definida a utilização de criptografia Padrão de Criptografia Avançada (*Advanced Encryption Standard - AES*). Em nível de rede, os dispositivos são autenticados com o sistema. Em nível de aplicação, os dados são protegidos para prover privacidade dos usuários junto à operadora. Para alcançar esse objetivo é necessária a utilização de duas chaves, uma para cada nível. Os dados são criptografados utilizando uma chave conhecida apenas pelo dispositivo e seu servidor de aplicação, que é única para cada dispositivo LoRaWAN. A outra chave é distribuída pela rede para autenticar o dispositivo junto àquela operadora (BARDYN *et al.*, 2016).

### *Categorias de dispositivos*

Por último, discute-se aqui as diferentes classes de dispositivos descritos pelo LoRaWAN, cada uma com diferentes capacidades de *downlink* para economia de bateria. São definidas três categorias pelo padrão, chamadas de A, B e C, para representar as diferentes necessidades dos dispositivos.

A categoria A representa os dispositivos sensores com capacidade de bateria limitada, cuja única função é enviar arquivos para os servidores remotos. Por isso, ela representa dispositivos com a mínima capacidade de *downlink*. A recepção é possível apenas após uma transmissão, minimizando o tempo de atividade do dispositivo para maximizar a vida útil da bateria. O objetivo é possibilitar a confirmação de mensagens.

Por sua vez, a categoria B representa dispositivos atuadores que também possuem capacidade de bateria limitada, mas que, devido à necessidade de recepção de comandos, exigem maior capacidade de *downlink*. Assim, estes dispositivos possuem mais oportunidades de recepção, além das oportunidades após transmissão. Estas novas oportunidades de recepção se encontram em momentos agendados por meio de sinais periódicos da estação base.

Finalmente, a categoria C representa atuadores de alta prioridade e que, portanto, podem receber dados a qualquer momento. Por essa razão, eles devem permanecer ativos o tempo todo.

### 3.2.2 O padrão SigFox

O padrão SigFox define uma rede IoT proprietária com arquitetura similar a rede LoRaWAN. Porém, todas as entidades são proprietárias, exceto os servidores de aplicação (NOLAN *et al.*, 2016).

Os dados gerados pelas aplicações são transmitidos para uma *cloud*, onde são armazenados e podem ser processados, antes de serem transmitidos para os servidores de aplicação.

Outra vantagem proporcionada pelo padrão SigFox é o suporte de técnicas de redes definidas por softwares pelas EB.

Finalmente, o sinal SigFox opera em frequências não licenciadas sub-GHz com largura de banda de 100 Hz, conhecida como *ultra low band*, o que resulta em alta resistência a ruídos, baixo consumo de bateria e antenas baratas (NOLAN *et al.*, 2016).

Esta banda é dividida em 400 canais de comunicação com a estação base. Os dispositivos utilizam estes canais de maneira aleatória. Um sinal pode ser transmitido em mais de um canal para que a EB utilize os sinais redundantes para aumentar a confiabilidade do canal.

Por essa banda ser extremamente reduzida, as transmissões resultam em pouquíssimos bytes, sendo transmitidos apenas 12 bytes no *uplink* e 8 bytes no *downlink*, com 26 bytes de *overhead* de protocolo. Também não é feita confirmação de mensagens devido a essa limitação.

Este padrão também tem diferentes classes de dispositivos, mas estas estão relacionadas aos limites de transmissões e recepções do dispositivo. As classes estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Informações sobre as classes de dispositivos SigFox.

Nome da classe	Número máximo de mensagens de <i>uplink</i>	Número máximo de mensagens de <i>downlink</i>
One	2 Mensagens por dia	Nenhuma mensagem por dia
Silver	50 Mensagens por dia	1 Mensagens por dia
Gold	100 Mensagens por dia	2 Mensagens por dia
Platinum	140 Mensagens por dia	4 Mensagens por dia

Fonte – <http://www.sigfox.com>

Observe que o SigFox é bastante restritivo com relação a volume de dados. Em seu plano mais avançado, são permitidos apenas a transmissão de 1680 Bytes (140 mensagens \* 12 Bytes por mensagem) e a recepção de apenas 32 (4 mensagens \* 8 Bytes por mensagem) Bytes por dia.

### 3.2.3 LoRa vs Sigfox vs NB-IoT

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre as tecnologias LPWAN mencionadas neste trabalho: LoRa/LoRaWAN, SigFox e NB-IoT.

Tabela 6 – Comparação entre tecnologias LPWAN.

	LoRa/LoRaWAN	SigFox	NB-IoT
Largura de Banda	< 500 kHz Não licenciada	100 Hz Não licenciada	200kHz Licenciada
Payload de dados úteis	Entre 19 e 250 bytes	12 bytes no <i>uplink</i> e 8 bytes no <i>downlink</i>	Até 1000 bytes no <i>uplink</i> e até 680 bytes no <i>downlink</i>
Classes de dispositivos	Classes dependendo da necessidade de atuação e economia de bateria	Classes dependendo da quantidade de mensagens recebidas e transmitidas	Depende da estratégia de alocação de recursos escolhida
Segurança	Autenticação e Confidencialidade via criptografia AES	✗	Autenticação via cartão SIM e confidencialidade opcional
Confirmação de mensagens	Possível confirmação por transmissão	✗	Protocolo ARQ Híbrido
Abertura	Padrão LoRa proprietário e padrão LoRaWAN aberto	Completamente proprietário	Padrão totalmente aberto
Frequências Sub-GHz	✓	✓	✗
Suporte para localização	✓	✗	✗

Fonte – O autor.

Nota-se que as três tecnologias fornecem um serviço interessante para o cenário IoT. Mas, pode-se observar que o NB-IoT se mostra com capacidade de transmissão de maior volume de dados enquanto os requisitos de escalabilidade são respeitados.

Já os outros dois padrões, LoRa/LoRaWAN e SigFox, são reduzidos em relação à carga de dados capaz de ser transmitida. Neste caso, o SigFox se mostra mais restrito e ocupa uma menor banda, enquanto o LoRa/LoRaWAN é capaz de fornecer vantagens como segurança na comunicação e a localização de dispositivos. Esta restrição não é necessariamente uma desvantagem pois estas tecnologias estão dimensionadas para as aplicações *ultra-low-end*.

Finalmente, em relação aos custos, o NB-IoT é o candidato com menor custo de implantação nos casos em que a operadora em questão já possui portadoras LTE ativos, não sendo necessária a aquisição de banda de frequência e nem de hardware específico. Apenas é necessário que os protocolos NB-IoT estejam operantes nas EBs e que os dispositivos também deem suporte ao padrão.

Caso contrário, o NB-IoT, se torna mais caro pois é o único que opera em espectro

licenciado, tornando necessário a aquisição do espaço de frequência. De qualquer forma, não é esperado um alto custo das outras duas tecnologias devido a uso de banda não licenciada, a largura de banda já ser bastante reduzida e o hardware simplificado.

Na próxima subseção, apresenta-se o estado-da-arte atual na pesquisa sobre o padrão NB-IoT.

### 3.3 O estado-da-arte em Narrowband IoT

O NB-IoT não é o único padrão para aplicações M2M já definido pelo 3GPP. Como diversas categorias de dispositivos foram definidas no documento disponibilizado pelo 3GPP (2017b) para atender aos diferentes perfis de aplicações M2M, outras tecnologias foram projetadas para aplicações mais complexas do que aquelas do padrão NB-IoT. Os padrões eMTC e LTE-M são exemplos de algumas destas tecnologias (LANDSTRÖM *et al.*, 2016; ERICSSON, 2016a).

Mas, foi no trabalho (RATASUK *et al.*, 2014) que a tecnologia chamada *NarrowBand* LTE-M foi definida com comportamento e objetivo similar ao padrão NB-IoT. Em 2016, a mesma equipe propôs o trabalho Ratasuk *et al.* (2016b), que parece ser a base utilizada para definição do padrão NB-IoT.

Por ser um padrão recente, poucos trabalhos foram publicados nessa área. No *white paper* disponibilizado pela Ericsson (2016a) existe um texto introdutório que compara e justifica as tecnologias emergentes para comunicação M2M, como LTE-M e NB-IoT. Existe outra comparação entre LTE-M e NB-IoT no trabalho de Lauridsen *et al.* (2016).

Maior parte dos trabalhos encontrados na literatura focam em contextualizar e justificar o NB-IoT como tecnologia para M2M de próxima geração. Landström *et al.* (2016) mostram um texto que contextualiza o padrão NB-IoT, discutindo as vantagens e diferenças do padrão em comparação ao LTE. Guibene *et al.* (2015) é outro exemplo de artigo de introdução ao contexto de redes celulares IoT, que compara diferentes propostas para redes M2M.

Também é importante citar que avaliações de desempenho do padrão NB-IoT foram realizadas para avaliar se o padrão é capaz de cumprir todos os requisitos citados na subseção 2.4.2. Os diversos relatórios mostrando estas avaliações podem ser encontradas no site do 3GPP<sup>2</sup>. Essas avaliações são feitas por integrantes do 3GPP, como as empresas Ericsson e Intel, e apresentam resultados que constatarem que o padrão atende aos requisitos prometidos.

<sup>2</sup> <http://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg-R1-83-31259.htm>

Outros trabalhos se concentram em desenvolver a parte física do padrão, que representa a maior parte das diferenças em comparação ao LTE padrão. Wang *et al.* (2017) apresentam um texto sobre as diferenças entre os canais físicos utilizados no NB-IoT e o LTE, explicando, em detalhes, que tipo de modificações foram feitas para que os diferentes canais possam funcionar apenas no espaço de um BR.

Como mencionado anteriormente, Ratasuk *et al.* (2016b) mostram avaliações de desempenho de área de cobertura, capacidade de dispositivos, atraso de transmissão e vida de bateria. A análise de cobertura mostra que os sinais NB-IoT alcançam qualidades de canais com valores 20 dB acima da média do padrão LTE. Já a análise de capacidade mostra que o alvo de 40 mil dispositivos é alcançado com facilidade. Também é mostrado que 99% dos dispositivos alcançam o alvo de 10s de atraso máximo. Finalmente, o alvo de 10 anos de bateria pode ser alcançado e excedido em cenários de relatórios diários.

No trabalho de Yu *et al.* (2017) encontra-se uma estratégia para determinação do número de repetições de transmissões com base na qualidade de sinal sendo experimentada pelo usuário. A proposta se baseia na tese de que a adaptação de *link* NB-IoT deve ser feita em duas dimensões: qualidade do sinal e número de repetições.

No padrão LTE, o enlace é adaptado dependendo da qualidade de sinal do usuário, utilizando diferentes esquemas de codificação e modulação. Estes esquemas possuem diferentes características de perda de pacotes e vazão de dados. De maneira simples, esquemas com menor taxa de dados são utilizados em dispositivos com baixa qualidade de sinal para minimizar a perda de dados.

A proposta deste trabalho faz a decisão de maneira independente. Primeiro, é decidido o esquema de modulação e codificação e, depois, é decidido o número de decisão, com base no esquema. A decisão do esquema é feita de acordo com eventos de incremento e decremento que utilizam a taxa de erros como base. Já a decisão do número de repetições é dobrado ou reduzido pela metade quando a transmissão é bem sucedida ou não, respectivamente.

Apesar da proposta apresentar menor tempo de atividade dos dispositivos e uso de recursos, não são apresentados resultados com relação ao consumo de bateria dos dispositivos. Também não é considerada a decisão da configuração e número de UR utilizadas.

A Tabela 7 mostra de maneira resumida a comparação entre os trabalhos mencionados acima e a proposta de alocação de recursos do presente trabalho.

Tabela 7 – Comparação entre trabalhos relacionados.

	Fatores considerados durante alocação		
	Número de repetições	Número de UR	Configurações de UR
(RATASUK <i>et al.</i> , 2016b)	✗	✗	✗
(YU <i>et al.</i> , 2017)	✓	✗	✗
Nossa Proposta	✗	✓	✓

Fonte – O autor

### 3.4 Conclusões

Finaliza-se este capítulo discutindo as principais conclusões que podem ser extraídas dos trabalhos relacionados analisados.

Primeiramente, o problema de congestionamento de recursos de comunicação para dispositivos M2M é, sem dúvidas, atual e relevante. Precisoções recentes sobre a quantidade de dispositivos esperada e diversas tecnologias sendo ativamente desenvolvidas para este problema são indícios disto.

No caso do presente trabalho, o foco está em soluções baseadas em redes celulares, que permitem um maior controle sobre o meio sem fio e maior comodidade devido ao grande alcance, mas que requerem a presença de infraestrutura e espectro licenciado. Tais soluções podem ser divididas em soluções para o plano de dados, que tentam aumentar a capacidade de dados úteis da rede, e para o plano de controle, que visa diminuir os efeitos dos dados de controle sobre a rede.

Dentre as tecnologias celulares, o grupo conhecido como LPWAN se mostra interessante para o nicho de aplicações *ultra-low end*, pois ocupa uma faixa reduzida de espectro sem fio e suporta quantidades massivas de dispositivos. Foram discutidas e analisadas as tecnologias conhecidas como SigFox, LoRa e NB-IoT.

O padrão NB-IoT foi mais detalhado por ser o alvo desse trabalho. Por ser um padrão recente, poucos trabalhos foram encontrados para serem utilizados neste estudo. Maior parte destes trabalhos não propõe mudanças ou melhorias ao padrão, em vez disso, eles apresentam e comparam o NB-IoT com outros padrões LPWAN.

## 4 MODELO DO SISTEMA

Neste capítulo é descrito o sistema considerado para a realização dos experimentos do trabalho. Este capítulo é de especial importância para delimitar o escopo deste trabalho e limitar os efeitos de fatores externos aos de interesse.

Inicialmente, são detalhados os modelos de tráfego. Em seguida, são descritos os fatores e funcionalidades dos padrões LTE e NB-IoT que são considerados ou que foram desconsiderados no sistema.

### 4.1 Modelos de tráfego

Segundo Huawei Technologies e HiSilicon Technologies (2014), o tráfego NB-IoT é composto por envios de relatórios de 80 bytes a cada 2 ou 24 horas.

Mas, neste trabalho, um conjunto diferente de aplicações é considerado para que seja possível identificar a capacidade máxima do padrão e avaliar a viabilidade deste padrão com aplicações que geram mais tráfego e possuem requisitos mais restritos.

Assim, optou-se por utilizar os modelos definidos por Maia *et al.* (2016) para aplicações de *uplink* M2M. Em particular, são definidos dois tipos de aplicações: as Orientado por Tempo (*Time Driven* - TD) e Orientado por Evento (*Event Driven* - ED).

As aplicações TD emulam aplicações sensoriais que geram tráfego entre intervalos constantes. Assumindo que os diversos fabricantes e usuários utilizarão diferentes intervalos em suas aplicações, nesta proposta de mestrado, é considerado que cada dispositivo TD possui um intervalo aleatório diferente que se mantém constante durante sua atividade.

Por outro lado, as aplicações ED geram tráfego quando detectam que algum evento específico aconteceu, como, por exemplo, um paciente trocando áreas do hospital ou o abrir e fechar de um portão eletrônico. Neste trabalho, este comportamento é modelado utilizando um processo aleatório de *Poisson* (LAW *et al.*, 1991).

No que se refere às aplicações convencionais, foram consideradas as aplicações de *streaming* de vídeo, Voz sobre IP (*Voice over IP* - VoIP) e Taxa Constante de Bits (*Constant Bit Rate* - CBR). A Tabela 8 provê um resumo dos modelos de aplicações utilizados neste trabalho.

Tabela 8 – Resumo dos modelos de tráfego utilizados neste trabalho.

Aplicação	Descrição	Atraso máximo permitido
M2M TD	Relatórios de 125 Bytes gerados em intervalos constantes entre 50ms e 5s	Atraso até próximo relatório
M2M ED	Relatórios de 125 Bytes gerados por um processo de Poisson com média 0.02 relatórios por TTI	50 ms
Vídeo	Codec H.264 com 128 Kbps	150 ms
VoIP	Codec G.795	100 ms
CBR	Vazão de 128 Kbps e relatórios de 256 bytes	300 ms

Fonte – Baseada no trabalho de Maia *et al.* (2016)

Todas as aplicações são associadas a um parâmetro de QoS que determina o valor máximo de atraso permitido para um pacote ser considerado útil para o receptor. Esse atraso é calculado a partir do momento em que o pacote é gerado até o momento que o pacote é recebido. Se um pacote exceder esse atraso, ele é descartado.

Considerou-se que cada dispositivo possui apenas uma aplicação. Os dispositivos M2M estão sintonizados na portadora NB-IoT e os dispositivos convencionais estão na portadora LTE. Por fim, é considerado que as diversas aplicações coexistem no ambiente, com o fim que nosso cenário se aproxime da complexidade de disputa encontrada no mundo real.

Baseado no relatório da Ericsson (2016b) e no trabalho de Maia *et al.* (2016), este trabalho considera a divisão do total de dispositivos apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Divisão das aplicações.

Classe	Porcentagem da classe pelo total	Aplicação	Porcentagem da aplicação	
			pela classe	pelo total
M2M	70%	M2M TD	70%	49%
		M2M ED	30%	21%
Convencionais	30%	Vídeo	45%	13,5%
		VoIP	20%	6%
		CBR	35%	10,5%

Fonte – Dados baseados de Ericsson (2016b) e Maia *et al.* (2016).

## 4.2 Modelo LTE

O sistema LTE adotado neste trabalho é composto por uma estação base com um portador LTE. Esta estação base é capaz de sustentar portadores *inband* NB-IoT com espaçamento de 15 kHz.

Como mencionado na seção 2.4, é possível a implantação de diversos portadores NB-IoT e que os dispositivos sejam divididos entres estes portadores. A Tabela 10 mostra a

quantidade de portadores NB-IoT *inband* que podem ser implantados por portador LTE.

Tabela 10 – Limite de implantações de portadoras NB-IoT *inband*.

Largura de banda	Número de BR disponíveis	Quantidade limite de portadoras <i>inband</i>	Limite sobre total
1.4 MHz	6	0	0%
3 MHz	15	2	13%
5 MHz	25	4	13%
10 MHz	50	8	16%
15 MHz	75	14	18%
20 MHz	100	18	18%

Fonte – (SCHLIENZ *et al.*, 2016).

Observe que só é possível implantar portadoras *inband* em portadoras LTE com larguras de bandas com pelo menos 3MHz. Veja também que o limite de portadoras é, em média, 15% entre as diferentes configurações de largura de banda.

O objetivo deste trabalho é avaliar e aprimorar a escalabilidade do padrão NB-IoT, portanto, aqui, não são considerados os efeitos dos dados de controle como procedimentos de acesso aleatório. Também não são consideradas as funcionalidades avançadas do padrão LTE, como MIMO, CoMP e agregação de portadoras, pois estas técnicas não são o foco de estudo deste trabalho de Mestrado (GHOSH *et al.*, 2010).

### 4.3 Modelo NB-IoT

Neste trabalho de mestrado foi adotada uma versão simplificada do padrão NB-IoT. Esta versão tem como destaque a camada MAC. No entanto, leva-se em consideração as limitações da camada física para tornar a versão adotada compatível a uma versão completa. Esta versão simplificada é justificada pelo foco do trabalho ser na escalabilidade do padrão NB-IoT.

Nas próximas seções são discutidas as funcionalidades que foram adaptadas ou que foram deixadas de lado no sistema NB-IoT deste trabalho.

#### *Repetições de Retransmissões*

Como mencionado na subseção 2.4.2, o padrão define o uso de repetições de sinal para que uma transmissão seja repetida, aumentando a possibilidade que ela seja recebida pelo receptor, mesmo sob péssima qualidade de sinal.

O uso de repetições para incrementar a cobertura NB-IoT não foi considerado. Não

há uma estratégia amplamente aceita pela comunidade para a determinação do número de repetições. A única proposta encontrada durante a revisão de literatura foi discutida na seção 3.3.

Dado o desafio de modelar satisfatoriamente as repetições de retransmissões, este trabalho assume, portanto, que as transmissões não são repetidas, o que é favorável para nosso trabalho, que considera aplicações mais complexas.

### ***Dados de Controle***

Os efeitos dos dados de controle não são considerados neste trabalho. Mesmo que os dados de controle sejam capazes de afetar os recursos disponíveis para a transmissão de dados, o estudo de Ratasuk *et al.* (2016b) mostra que os dados de controle não são um problema para a escalabilidade do padrão NB-IoT.

Logo, a análise das diferentes configurações realizadas neste trabalho, ainda que mostre valores acima da capacidade real, ainda mostrará uma comparação realista das diferentes configurações.

### ***Módulo de Modulação e Codificação Adaptativa (MCA)***

No padrão LTE são definidas diversos esquemas de modulação e codificação do sinal. Estes esquemas apresentam diferentes propriedades de perda de pacotes devido aos procedimentos de modulação e codificação utilizados em cada esquema.

Os esquemas mais complexos são capazes de transmitir mais informação utilizando menos sinais, mas estes possuem taxas de perda de pacotes maiores do que esquemas menos complexos. O Módulo de MCA é responsável por determinar a codificação e modulação utilizada na transmissão de acordo com a qualidade de sinal do dispositivo de maneira adaptativa com base na qualidade de sinal aferida.

No caso do NB-IoT, devido à necessidade de diminuir os custos dos dispositivos e aumentar a vida útil de suas baterias, apenas um subconjunto dos esquemas modulação e codificação LTE estão disponíveis. Isso resulta em transmissões com menos bytes em comparação ao LTE. Sendo assim, o módulo de MCA é crucial para determinar a verdadeira capacidade do padrão NB-IoT.

Outra diferença é que, como dito na seção 2.4, o módulo também leva em consideração a quantidade de UR utilizada naquela transmissão. Quanto mais URs são utilizados pelos dispositivos, mais dados são transmitidos, independente da qualidade de sinal.

No documento gerado pelo 3GPP (2017a), é possível encontrar as tabelas que listam a quantidade de bits transmitidos por UR nas diferentes qualidades de sinais. Essas tabelas são utilizadas no presente trabalho para fazer o sistema ter uma capacidade equiparável a um sistema NB-IoT real.

### ***Espaçamento de subportadoras***

Finalmente, como discutido na subseção 2.4.3, o padrão NB-IoT é capaz de funcionar utilizando duas configurações diferentes de espaçamento de subportadoras, 15kHz e 3.75kHz. O espaçamento de 15kHz é o mesmo utilizado pelos portadores LTE, que resulta na integração sem interferências com o NB-IoT *inband*. Já o espaçamento de 3.75kHz resulta em numerações diferentes com relação ao LTE, resultando em interferências com o portador LTE.

Devido a isso, decidiu-se delimitar o escopo do estudo e concentrar a análise sobre o espaçamento de 15kHz e suas configurações *single-tone* e *multi-tone*.

## **4.4 Implementação das funcionalidades NB-IoT**

Como mencionado na seção 3.3, não foi encontrado nenhum software de simulação pronto para a análise dos tópicos de estudo deste trabalho. Por isso, foi necessária a implementação das funcionalidades NB-IoT.

Inicialmente, o módulo LTE do simulador NS3, definido por Piro *et al.* (2011a), foi considerado como base para a implementação das funcionalidades. Mas, após análise do simulador LTE-Sim, definido por Piro *et al.* (2011b), ele se mostrou com menor grau de complexidade e suficiente para a simulação do sistema considerado.

Principalmente, pelo fato de não serem considerados dados de controle no LTE-Sim. Pois, neste simulador, os protocolos de controle são executados mas estes não consomem os recursos de rádio simulados. Além das mensagens de controle serem transmitidos e processados instantaneamente, o que garante que os fluxos de controle não afetem a transmissão de dados.

Outros simuladores foram considerados mas estes se mostraram menos adequados para a nossa simulação. Como o módulo SimuLTE do simulador OMNeT++<sup>1</sup>, que se mostrou insuficiente para a implementação do NB-IoT, e os simuladores Vienna<sup>2</sup> e OPNET<sup>3</sup> que não

<sup>1</sup> [omnetpp.org](http://omnetpp.org)

<sup>2</sup> <https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/>

<sup>3</sup> <http://opnetprojects.com/opnet-lte-simulation/>

poderam ser utilizados devido a serem ferramentas pagas.

A implementação realizada para obter os resultados deste trabalho consiste em implementar o nível de acesso ao meio do padrão NB-IoT, assumindo que as funcionalidades do nível físico estão funcionais. Tal decisão reduz consideravelmente a carga de trabalho de implementação, pois a maioria das funcionalidades se encontram no nível físico.

Como mencionado na seção anterior, isso é possível devido às limitações resultantes do módulo de MCA e às tabelas presentes nos documentos do 3GPP. Com estas informações, é possível saber com exatidão a quantidade de bits que é transmitida com as diferentes configurações de recursos. Logo, o restante cabe ao escalonador, determinar a configuração a ser utilizada pelos dispositivos.

A seguir são mostrados os detalhes da implementação.

### ***Detalhes de implementação***

A maior parte da implementação se resume às classes representando o módulo de MCA, das estratégias de alocação e o gerenciador de banda NB-IoT. A Figura 8 ilustra em maiores detalhes as principais classes da implementação.

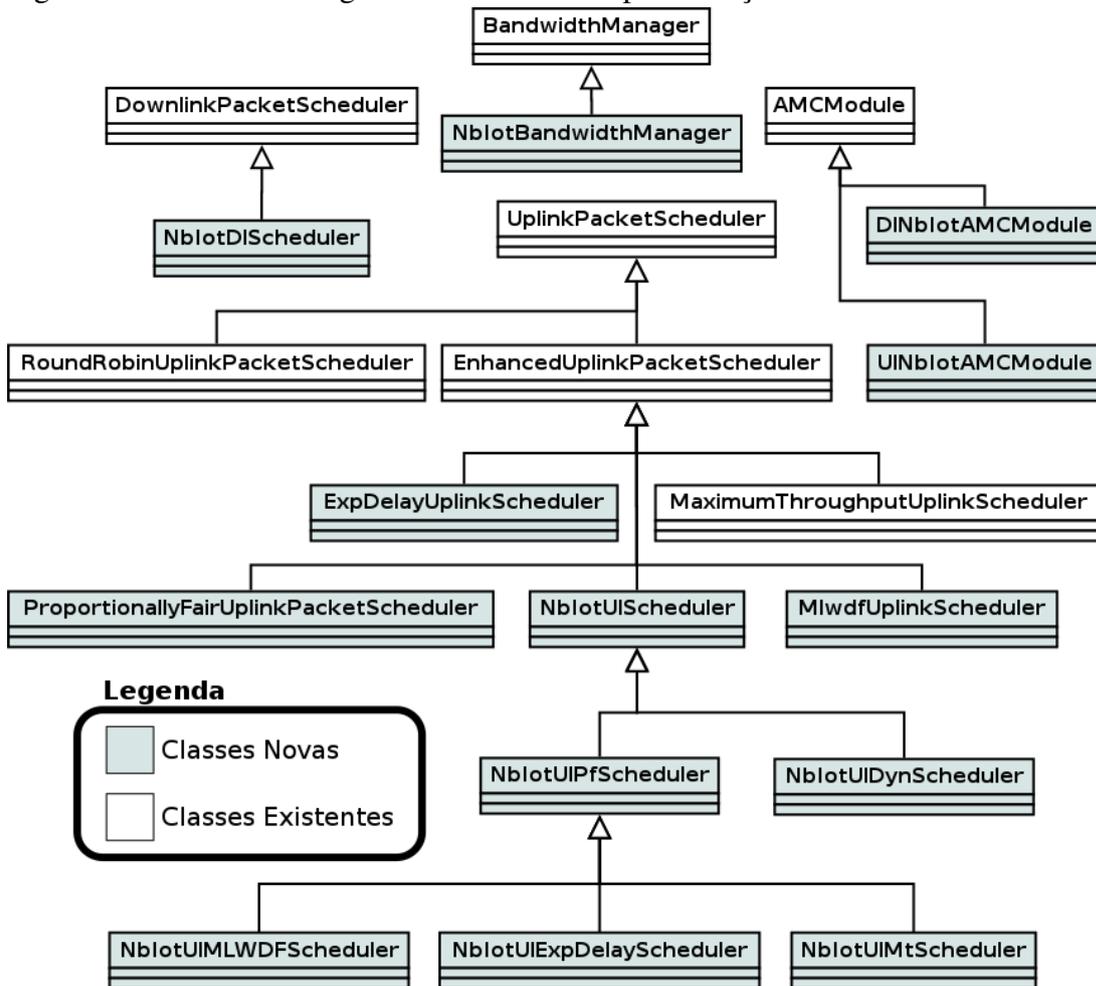
Começando pelo gerenciador de banda, esta classe é utilizada pelo LTE-Sim para determinar quantos BRs estão disponíveis nas diferentes banda, como exibido na Tabela 1. No caso deste trabalho, a classe *NbIotBandwidthManager* é utilizada para determinar quantas subportadoras estão disponíveis e para retirar o BR do portador LTE.

Continuando pelo módulo de MCA, representado pela classe *AMCModule*, no LTE-Sim, ele é utilizado para diversas conversões, além da definição do tamanho do bloco de transporte. Entre estas conversões, pode-se citar: *Signal-to-Interference plus Noise Ratio* (SINR) para Índice de Qualidade de Sinal (IQS), de IQS para índice MCA e vice versa, dentre outras conversões. Estas conversões são necessárias para determinar qual esquema de modulação e codificação será utilizado em cada transmissão.

A implementação realizada para este trabalho para o padrão NB-IoT, representada pelas classes *UINbIotAMCModule* e *DINbIotAMCModule*, utiliza as tabelas disponibilizadas pelo 3GPP para determinar as informações de tamanho dos blocos de transporte nas transmissões NB-IoT e reutiliza as tabelas de conversões da classe *AMCModule*. São duas classes utilizadas devido ao funcionamento diferenciado do *downlink* e *uplink* NB-IoT.

Finalmente, as estratégias de alocação disponibilizados pelo LTE-Sim herdam da

Figura 8 – Resumo do diagrama de classe da implementação NB-IoT.



Fonte – O autor.

superclasse *PacketScheduler*, que é base para as classes *DownlinkPacketScheduler* e *UplinkPacketScheduler*, que, por sua vez, são utilizadas como base para as estratégias de *downlink* e *uplink*, respectivamente.

Na instalação padrão atual do LTE-Sim, só estão disponíveis as estratégias de alocação *uplink Round Robin* (RR) e Vazão Máxima (*Maximum Throughput* - MT). Também foi preciso implementar as estratégias *Modified Largest Weighted Delay First* (MLWDF), Atraso Exponencial (AE) e Justiça Proporcional (*Proportional Fair* - PF) para o tráfego convencional.

Estas classes herdam da classe *EnhancedUplinkScheduler*, que implementa o algoritmo *first maximum expansion* para escalonadores de *uplink*, definido por Temino *et al.* (2008).

A classe base para os escalonadores NB-IoT é chamada *NblotUIScheduler*. Além de implementar a base para as estratégias estáticas, que serão discutidas no próximo capítulo, também implementa a estratégia NB-IoT RR.

As classes *NbIotUIPfsScheduler*, *NbIotUIExpDelayScheduler*, *NbIotUIMtScheduler* e *NbIotUIMLWDFScheduler* implementam as estratégias estáticas PF, AE, MT e MLWDF, respectivamente. Sendo que a classe *NbIotUIPfsScheduler* é utilizada como base para o algoritmo de alocação estático. Já a alocação dinâmica é implementada na classe *NbIotUIDynScheduler*.

Além das alterações e adições discutidas, outras partes do simulador tiveram que ser alteradas, porém de maneira mais simples, como a inserção de código para separação dos dispositivos entre convencionais e NB-IoT.

#### 4.5 Conclusão

O sistema de alocação deste trabalho de mestrado considera cenários simplificados, em comparação com cenários reais onde existem fatores como: interferência entre células, congestionamento de dados de controle e estratégias avançadas como MIMO e CoMP. Mas, estes fatores são desconsiderados para limitar os efeitos externos e focar no comportamento das diferentes configurações de recursos NB-IoT.

Para analisar o sistema definido, o simulador LTE-Sim foi estendido com as funções NB-IoT, pois nenhum simulador NB-IoT foi encontrado para atender as demandas deste trabalho. A implementação envolveu a criação de código com as novas funcionalidades e a modificação de código já existente para possibilitar o funcionamento das novas funcionalidades.

Estas extensões estão disponibilizadas à comunidade para que o simulador possa evoluir e possivelmente englobar todas as funcionalidades do padrão NB-IoT.

Finalmente, no próximo capítulo, são discutidos os detalhes das estratégias de alocação de recursos de *uplink* NB-IoT consideradas neste trabalho, incluindo ambos os algoritmos estáticos e a nossa proposta dinâmica.

## 5 ALOCAÇÃO DE RECURSOS NO UPLINK DA REDE NB-IOT

Este capítulo começa, na seção 5.1, com a discussão sobre o algoritmo de alocação estática de recursos onde as configurações de alocação de UR são previamente definidas pela operadora da rede e mantidas durante todo o período de atividade da célula.

Depois, na seção 5.2, é discutida a proposta de alocação onde a quantidade de URs e a configuração utilizada é decida dinamicamente com base nas condições de qualidade de sinal e atraso de pacotes da aplicação no momento da alocação.

### 5.1 Estratégia de alocação estática

Como explicado na subseção 2.4.3, o padrão NB-IoT permite a utilização de transmissões *single-tone* e *multi-tone* em seu canal de *uplink*. Estes dois modos de transmissão são discretizados em 5 configurações diferentes de Unidade de Recurso (UR), como é ilustrado na Tabela 4.

Além disso, o padrão permite a utilização de múltiplas URs em sequência no eixo do tempo e o uso de repetições de transmissões. A variável  $N_{ur}$  representa a quantidade de UR alocadas em sequência. Cabe ao escalonador de *uplink* NB-IoT determinar o valor destes 3 parâmetros.

O algoritmo estático utiliza sempre a mesma configuração de UR, valor de  $N_{ur}$  e repetições. Este algoritmo é baseado no trabalho de Ratasuk *et al.* (2016b). Como dito no Capítulo 1 e detalhado na seção 3.3, não existe uma estratégia para decisão de qual a melhor parametrização destes valores para alocação destes recursos.

Fica a cargo do administrador da rede NB-IoT decidir quais parâmetros serão utilizados pela rede. A operadora pode, por exemplo, utilizar o perfil das aplicações para definir os parâmetros, como os tamanhos dos relatórios dos dispositivos para determinar  $N_{ur}$  ou determinar o número de repetições com base na qualidade de sinal dos dispositivos.

A Tabela 4, no Capítulo 2, página 25, mostra as possibilidades de transmissão possíveis para o NB-IoT. Com estes escalonadores, os dispositivos utilizam apenas um tipo de UR por unidade de tempo, mas podem utilizar aquele UR repetidamente, dependendo da sua prioridade, ou seja, o valor de  $N_{ur}$  é igual a 1.

Como dito no Capítulo 4, nós não consideramos repetições de transmissões devido a limitação de escopo, portanto o sinal é transmitido sem ser repetido.

Finalmente, utilizando os parâmetros descritos acima e exibidos na Tabela 11, as cinco estratégias de alocação descritas na subseção 2.2.3 foram adaptadas para este contexto.

Tabela 11 – Parâmetros de alocação estática

Configuração de UR	$N_{ur}$	Repetições
Pré-determinado	1	0

Fonte – O autor

O funcionamento da técnica de alocação estática de recursos é bem simples. Inicialmente, as URs são discretizadas dependendo da configuração sendo utilizada. Então o algoritmo de alocação decide quais dispositivos vão receber cada uma das URs, com base na estratégia sendo utilizada. Os dispositivos utilizam aquela UR até o final do período da configuração utilizada, que é quando o escalonador redistribui as URs.

Por exemplo, utilizando a configuração 3 são criadas duas URs, então a cada espaço de tempo de 2 ms (a duração da configuração 3), estas URs são alocadas para dois dispositivos diferentes com base na estratégia utilizada.

Infelizmente, este tipo de alocação não considera aplicações com diferentes comportamentos e requisitos. Um exemplo desse tipo de problema seria o algoritmo de alocação estar configurado para utilizar um valor de  $N_{ur}$  elevado, o que pode ser benéfico para dispositivos que geram grandes mensagens de dados, mas pode causar desperdício de recursos caso existam dispositivos que transmitam mensagens pequenas. Outro exemplo pode ser o uso de repetições com dispositivos com boa qualidade de sinal.

A estratégia dinâmica proposta neste trabalho visa resolver problemas como este, de forma que os parâmetros de alocação sejam determinados no momento da alocação com base na condição do dispositivo em questão.

## 5.2 Proposta de alocação dinâmica

A técnica de alocação dinâmica de recursos proposta neste trabalho é apresentada a seguir. Ela calcula dois parâmetros de alocação em tempo de execução:

- **Configuração de UR:** a configuração necessária para a transmissão das mensagens com base no atraso máximo permitido para a transmissão dos pacotes;
- **Número de URs utilizadas:** calcula o valor  $N_{ur}$  necessário para que o tamanho de bloco seja suficiente para a transmissão da mensagem.

O algoritmo 1 ilustra o comportamento da nossa proposta. Como pode ser visto, a nossa proposta é independente da métrica de alocação utilizada. A variável  $dev$  representa o próximo dispositivo a ser alocado pelo algoritmo, que é o dispositivo de maior prioridade.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo de alocação dinâmica de recursos NB-IoT

---

```

1: while  $\exists$  subportadoras livres and  $\exists$  requisições de recursos do
2:   if  $\exists$  subportadoras reservadas then
3:      $dev \leftarrow$  Dispositivo com mais subportadoras reservadas
4:   else
5:      $dev \leftarrow$  Dispositivo com maior métrica
6:   end if
7:    $N_{ur} \leftarrow$  Calcule a quantidade de URs necessárias para  $dev$  {Equação 5.1}
8:    $C \leftarrow$  Calcule a configuração necessária para  $dev$  utilizando  $N_{ur}$  {Equação 5.2}
9:   if Configuração  $C$  está disponível then
10:    Aloque  $N_{ur}$  URs de configuração  $C$  para  $dev$ 
11:   else
12:    Tente reservar a configuração  $C$  para  $dev$ 
13:   end if
14: end while

```

---

Após a decisão do dispositivo que receberá recursos, o valor de  $N_{ur}$  é calculado utilizando a Equação 5.1 que tem como objetivo fazer o envio do próximo relatório utilizando apenas uma transmissão. A quantidade de dados restante no próximo relatório do usuário  $u$  é representado pela variável  $holData_u$ .

Esta equação utiliza a tabela de *uplink* do módulo de MCA, descritas na seção 4.3 e representada pela variável  $TBT_{IQS}^{N_{ur}}$ . Esta equação representa encontrar o menor valor de  $N_{ur}$  que faz o valor de  $TBT_{IQS}^{N_{ur}}$  ultrapassar a quantidade de dados necessária. Pois, assumindo a qualidade de sinal indicada por Índice de Qualidade de Sinal (IQS), a única maneira de aumentar o valor de  $TBT_{IQS}^{N_{ur}}$  é aumentar o valor de  $N_{ur}$ .

$$\min_{N_{ur}} \mid holData_u \leq TBT_{IQS}^{N_{ur}} \quad (5.1)$$

Após a determinação do valor de  $N_{ur}$ , a configuração da UR a ser utilizada é calculada utilizando a Equação 5.2. Esta equação representa a utilização da configuração ( $c$ ) que ocupa a menor quantidade de subportadoras ( $Nsc_c$ ) e é capaz de transmitir a quantidade requerida de URs sem ultrapassar o limite de atraso ( $maxDelay_u$ ) da aplicação, considerando o atraso atual

( $holDelay_u$ ) e a duração da configuração ( $Dur_c$ ).

$$\min_{N_{sc_c}} \mid (1 - \rho_u) \times maxDelay_u \geq Dur_c \times N_{ur} + holDelay_u \quad (5.2)$$

O valor  $\rho_u$  representa um parâmetro entre 0 a 1 que limita o valor de atraso máximo das aplicações. Ele é utilizado para forçar o uso de configurações de menor duração.

Finalmente, após calculados o valor de  $N_{ur}$  e a configuração a ser utilizada, é verificado se existem subportadoras suficientes para a alocação daquela configuração. Não é possível alocar configurações que ocupem menos subportadoras, pois estas excederão a restrição de atraso das aplicações.

O dispositivo só recebe estes recursos caso eles estejam disponíveis e não estejam reservados. Caso contrário, o algoritmo de alocação tenta reservar recursos para que o dispositivo seja contemplado no futuro.

### ***Reserva de subportadoras***

De acordo com o algoritmo proposto, dispositivos que requerem a utilização de configurações mais rápidas precisam de configurações com mais subportadoras. Mas a presença de muitos dispositivos que utilizam configurações *single-tone* dificultam a utilização de configurações *multi-tone*.

Isto é devido ao fato que as URs utilizam subportadoras específicas, como ilustrado na Figura 5. Então uma única transmissão *single-tone*, em qualquer subportadora, impossibilita a utilização de um quarto dos recursos na configuração 2, metade dos recursos na configuração 3 e todos os recursos na configuração 4.

Então, caso não haja mecanismos de limitação do uso do canal, as configurações 3 e 4 principalmente ficariam bloqueadas a maior parte do tempo. Caso sejam feitas infinitas transmissões com configuração 1, a configuração 4 nunca poderá ser utilizada.

Desse modo, para possibilitar a utilização de configurações *multi-tone*, principalmente as configurações com mais subportadoras, nosso algoritmo utiliza uma técnica de reserva de subportadoras.

Dada a configuração requerida como entrada, é encontrada a UR daquela configuração que se tornará disponível mais cedo. Então as subportadoras daquela UR são reservadas para o momento em que todos estejam disponíveis.

Subportadoras reservadas não podem ser alocadas por períodos de tempo que invadam o espaço de tempo reservado. Mas transmissões podem ser feitas com as subportadoras reservadas, desde que não invadam o espaço de tempo reservado. Assim, as subportadoras podem ser utilizadas por outros usuários até o momento em que serão utilizados por configurações *multi-tone*.

Dispositivos que estão com recursos reservados são selecionados com maior prioridade no passo de escolha do próximo dispositivo que receberá recursos, na linha 2 do algoritmo 1. É importante salientar que, caso as subportadoras já estejam reservadas, novas tentativas de reservá-las serão descartadas.

Esse mecanismo é importante, pois dependendo da estratégia de alocação utilizada, a prioridade do dispositivo pode mudar quando chegar o momento de utilizar a reserva das subportadoras.

### 5.3 Conclusão

Os algoritmos de alocação estática de recursos descritos neste capítulo são uma solução simples para as redes NB-IoT, mas que requerem decisões e intervenções por parte da operadora da rede. Pois, uma escolha ruim dos parâmetros de alocação pode causar péssimo desempenho da rede NB-IoT.

A solução dinâmica proposta nesta dissertação visa calcular estes parâmetros de maneira dinâmica e de forma independente para cada dispositivo, englobando diferentes comportamentos e perfis de tráfego. Nossa proposta também considera o problema de coexistência das diferentes configurações NB-IoT do tipo *single-tone* e *multi-tone* através do mecanismo de reserva de subportadoras.

No próximo capítulo será apresentada a avaliação de desempenho que foi feita por meio de simulações sistêmicas, bem como a discussão dos resultados obtidos.

## 6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo, é apresentada a avaliação de desempenho deste trabalho no contexto do padrão NB-IoT que envolve as diversas estratégias de alocação definidas na subsecção 2.2.3 e os algoritmos definidos no Capítulo 5.

Primeiramente, são definidas as métricas de desempenho apresentadas em todas as figuras subsequentes. Então, é avaliada a capacidade do padrão LTE convencional de suportar o tráfego M2M considerado no nosso trabalho. Depois, é examinado o desempenho da alocação estática no padrão NB-IoT também considerando o tráfego M2M, comparando as quatro configurações em dois cenários de requisitos de QoS diferentes. Finalmente, é feita uma análise da proposta de alocação dinâmica, avaliando os diferentes mecanismos utilizados e comparando-a com a alocação estática.

### 6.1 Métricas de avaliação de desempenho

Para avaliar o comportamento dos diferentes cenários simulados neste trabalho, diversas métricas foram calculadas e estudadas, mas, para manter a objetividade desta avaliação, serão exibidos apenas os gráficos que representam a média da taxa de entrega de dados e o índice de justiça.

Estas métricas foram escolhidas porque representam duas características importantes para redes M2M. Como dito na subsecção 2.1.2, a vazão de dados e a latência não são métricas prioritárias nestas redes, pois a quantidade de dados é reduzida e as informações podem ser adiadas, respectivamente. Todavia, é de interesse manter a taxa de entrega elevada para evitar retransmissões e a justiça para garantir que todos os dispositivos possam utilizar os recursos da rede.

A taxa de entrega é calculada de maneira agregada, somando todos os *bytes* transmitidos e recebidos pelos seus destinos e, então, calculando a porcentagem de dados recebidos sobre os dados transmitidos.

A justiça é medida utilizando o índice de justiça definido por Jain (1990), que determina um valor entre 0 e 1 que mensura a diferença entre os valores de um vetor. A Equação 6.1 exibe a fórmula utilizada neste cálculo.

$$\frac{\left(\sum_i^n x_i\right)^2}{n \times \sum_i^n x_i^2} \quad (6.1)$$

No caso da equação, o valor da métrica de Jain é calculada com base num vetor, no caso representado pelas variáveis  $x_1, x_2, x_3, \dots e x_n$ . Este vetor pode composto de qualquer tipo de métrica de desempenho, como taxa de entrega, latência, etc, para avaliar a justiça entre os dispositivos. Neste trabalho, a vazão de dados foi utilizada para mensurar a justiça de alocação de recursos entre os dispositivos.

Estas duas métricas também foram calculadas por aplicação, ou seja, no caso da taxa de entrega, é somado o total transmitido e recebido por aplicação e, no caso do índice de justiça, o vetor possui somente os valores dos dispositivos que utilizam a aplicação em questão.

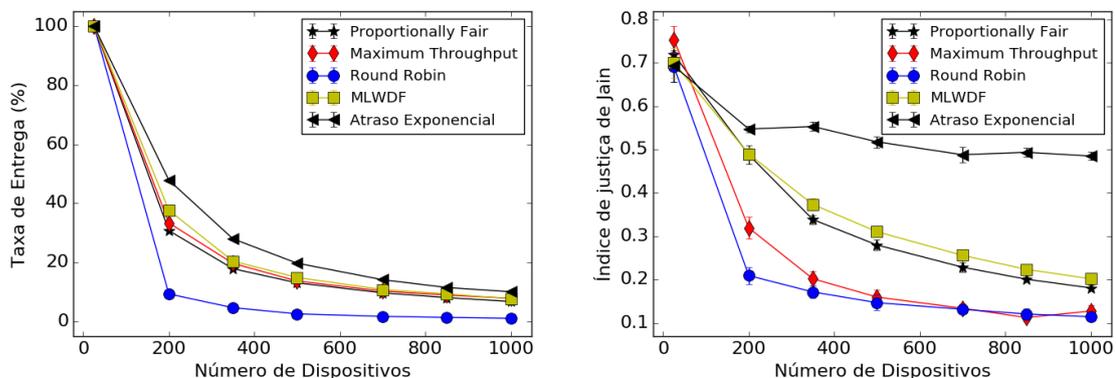
Nas próximas seções, são explorados os cenários simulados que fazem parte da avaliação de desempenho.

## 6.2 Avaliação do padrão LTE no cenário M2M

Os primeiros resultados revelam uma visão do que acontece se o cenário de aplicações esperado for implantado na arquitetura LTE.

Inicialmente, na Figura 9, é apresentado o comportamento da rede LTE para cada uma das cinco estratégias de alocação de recursos discutida na subseção 2.2.3: *Round Robin* (RR), *Maximum Throughput* (MT), *Proportional Fair* (PF), *Atraso Exponencial* (AE) e *Modified Largest Weighted Delay First* (MLWDF). Nestes cenários são encontradas todas as aplicações definidas na seção 4.1 de acordo com a divisão do total de dispositivos encontrados na Tabela 9.

Figura 9 – Desempenho agregado de todas as aplicações no sistema LTE em função do número de dispositivos



Nota-se pelo comportamento da Figura 9 que a taxa de entrega das cinco estratégias cai à medida que o número de dispositivos da rede aumenta. Esse comportamento é esperado porque os recursos disponíveis são limitados e a medida que a quantidade de dispositivos

aumenta, cada um destes dispositivos recebe menos recursos. Também pode-se perceber que a taxa de entrega se mantém em torno de 10% em cenários com mais de 700 dispositivos, exceto para a estratégia RR, que mantém uma taxa de entrega consideravelmente inferior (2%) a partir de 200 dispositivos porque a grande quantidade de dispositivos faz com os dispositivos recebam recursos entre grandes intervalos de tempo. Por outro lado, a estratégia AE apresenta a melhor taxa de entrega porque prioriza o limite de atraso, que é o principal critério de QoS.

Já no fator justiça, a estratégia AE se mostra a clara vencedora, com uma taxa constante de 0.5, mesmo com o aumento do número de dispositivos. De fato, esperava-se que as métricas MLWDF e AE resultassem em melhores desempenhos, pois estas são as únicas que consideram as restrições de atraso destas aplicações, que é o principal fator de limitação das aplicações.

Os próximos gráficos (Figuras 10 a 14) apresentam resultados de maneira separada para cada aplicação. É importante informar que os eixos horizontais destes gráficos exibem o número total de dispositivos e não o número de dispositivos daquela aplicação.

Figura 10 – Desempenho das aplicações CBR no sistema LTE em função do número de dispositivos.

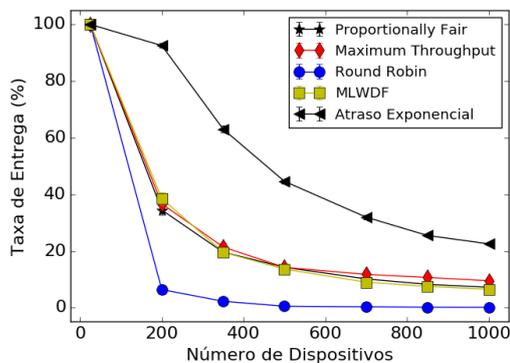


Figura 11 – Desempenho das aplicações VoIP no sistema LTE em função do número de dispositivos

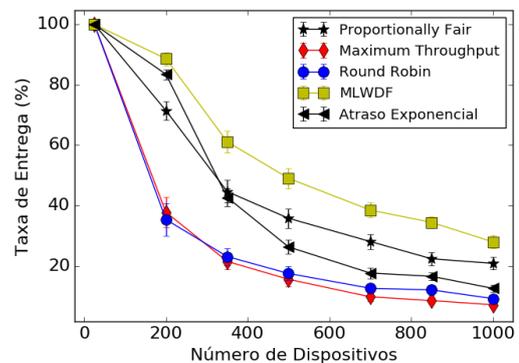


Figura 12 – Desempenho das aplicações de vídeo no sistema LTE em função do número de dispositivos.

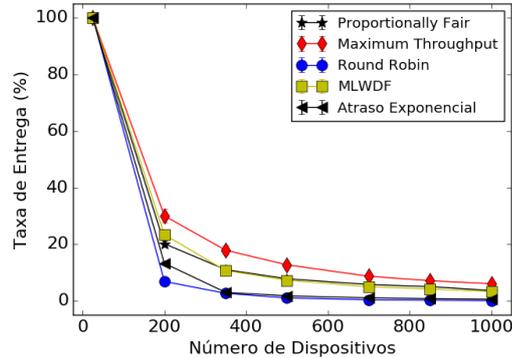


Figura 13 – Desempenho das aplicações ED no sistema LTE em função do número de dispositivos.

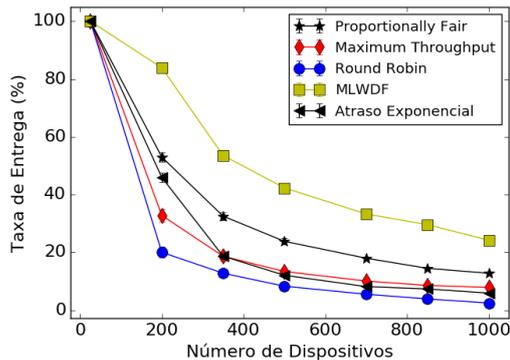
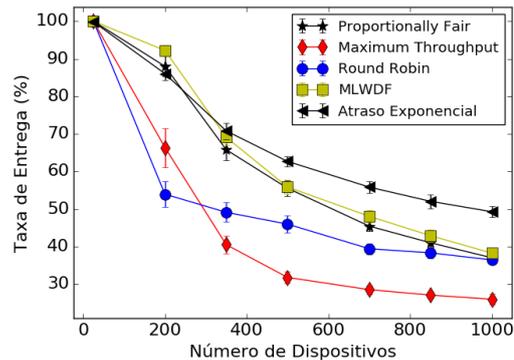


Figura 14 – Desempenho das aplicações TD no sistema LTE em função do número de dispositivos.



Observa-se que os valores de taxa de entrega decrementam até pelo menos 60%, que é o caso das aplicações TD, mas as outras decrementam até valores de pelo menos 40%. Podemos ver que as aplicações convencionais, vídeo, VoIP e CBR, apresentam baixas taxas de entrega, principalmente a aplicação de vídeo, que consome mais recursos.

Este problema pode ser amenizado se portadoras NB-IoT forem inseridas na célula. Os dispositivos M2M iriam migrar para as novas portadoras, fazendo com que o congestionamento de recursos na portadora LTE seja minimizado. No caso deste trabalho, 70% dos dispositivos migrariam para outro conjunto de portadoras, fazendo com que a portadora LTE tenha que suportar apenas 30% do total de dispositivos.

O problema é que, no caso da portadora NB-IoT ser *inband*, a quantidade de recursos para as aplicações convencionais diminui para cada portadora implantada. Isso não significa que estas portadoras *inband* interferem com a portadora LTE, pois as novas portadoras atuarão em canais ortogonais àqueles da portadora LTE. Em seguida, são investigados os efeitos de

implantar múltiplas portadoras NB-IoT *inband* em uma portadora LTE.

### 6.3 Efeito de múltiplas portadoras NB-IoT *inband* sobre uma portadora LTE

São mostrados dois cenários: uma portadora LTE configurada com banda de 3 MHz, na Figura 15, e outro cenário com portadora LTE de 10 MHz, na Figura 16. Vale ressaltar que uma portadora de 3MHz tem 15 BR e uma portadora de 10 MHz resulta em 50 BRs, como exibido na Tabela 1.

Estes gráficos tem o objetivo de mostrar o comportamento da portadora LTE caso ela seja utilizada para implantar múltiplas portadoras NB-IoT *inband*.

Nestes cenários, os dispositivos M2M seriam sintonizados nas portadoras NB-IoT enquanto os dispositivos convencionais seriam sintonizados na portadora LTE. Portanto, estas simulações incluem apenas dispositivos convencionais, uma vez que neste momento estamos interessados no comportamento da portadora LTE. Estes dispositivos seguem a divisão listada na Tabela 9 para a classe de dispositivos convencionais.

Figura 15 – Taxa de entrega das aplicações convencionais em portadora LTE com largura de banda de 3 MHz em cenários com múltiplas portadoras NB-IoT

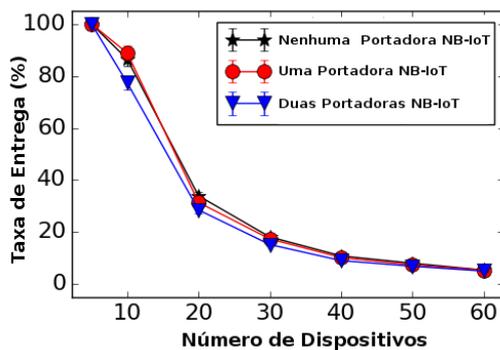
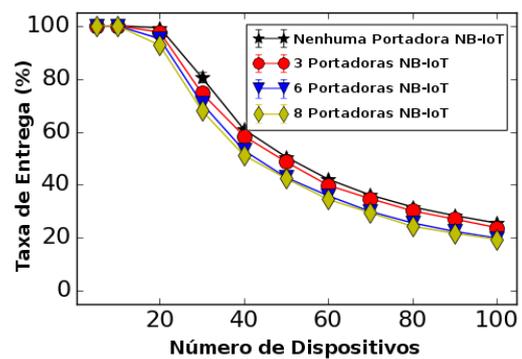


Figura 16 – Taxa de entrega das aplicações convencionais em portadora LTE com largura de banda de 10 MHz em cenários com múltiplas portadoras NB-IoT



É possível ver que a taxa de entrega da portadora LTE não é afetada de maneira relevante pela implantação de portadoras NB-IoT até o limite da banda. Este resultado é utilizado para defender a utilização de NB-IoT *inband* como uma solução que não afeta o comportamento das aplicações convencionais.

Agora é possível avaliar a viabilidade do padrão NB-IoT suportar essas aplicações M2M sem a preocupação de prejudicar as aplicações convencionais que continuariam sendo

servidas pela rede LTE.

As próximas seções são focadas na nossa análise do comportamento da alocação de recursos na rede NB-IoT para aplicações M2M. Portanto, a partir deste ponto, não são simuladas mais aplicações convencionais, pois estas estariam usando um conjunto diferente de recursos, e não causaria nenhuma interferências com as aplicações M2M. Então, a quantidade de dispositivos exibida no eixo horizontal dos próximos gráficos inclui apenas os dispositivos M2M, seguindo a divisão listada na Tabela 9.

#### **6.4 Avaliação da estratégia de alocação estática**

Esta análise do comportamento da alocação estática é feita em dois cenários diferentes: o primeiro considera que as aplicações foram implantadas na portadora NB-IoT da maneira com que foram definidas e o segundo cenário considera que os requisitos de QoS das aplicações foram relaxados para que estas possam ser adaptadas à infraestrutura NB-IoT.

Vale lembrar que a enumeração das configurações utilizadas nos gráficos deste capítulo seguem o que é definido da Figura 5. Ou seja, a configuração *single-tone* com duração de 8 ms é chamada de configuração 1, a configuração *multi-tone* com 3 subportadoras e duração de 4 ms é chamada de configuração 2, a configuração *multi-tone* com 6 subportadoras e duração de 2 ms é chamada de configuração 3 e finalmente, a configuração *multi-tone* com 12 subportadoras e duração de 1 ms é chamada de configuração 4.

##### ***Aplicações M2M com requisitos de QoS restritos sobre uma portadora NB-IoT***

Começando pelo cenário onde as aplicações não foram modificadas, nós apresentamos as figuras comparando as 4 configurações de transmissão para cada escalonador considerado.

Figura 17 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia RR em função do número de dispositivos

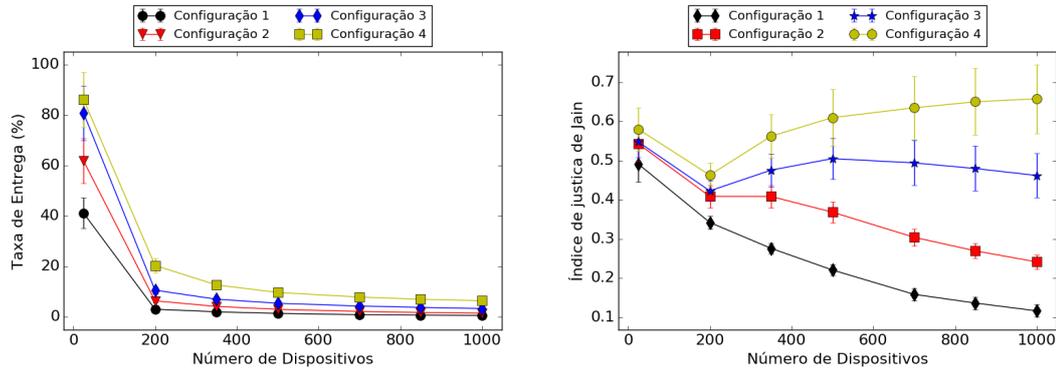


Figura 18 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia MT em função do número de dispositivos

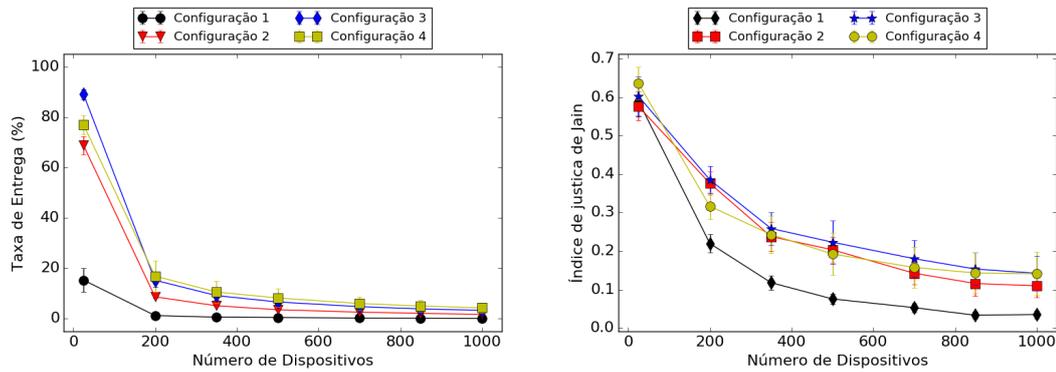
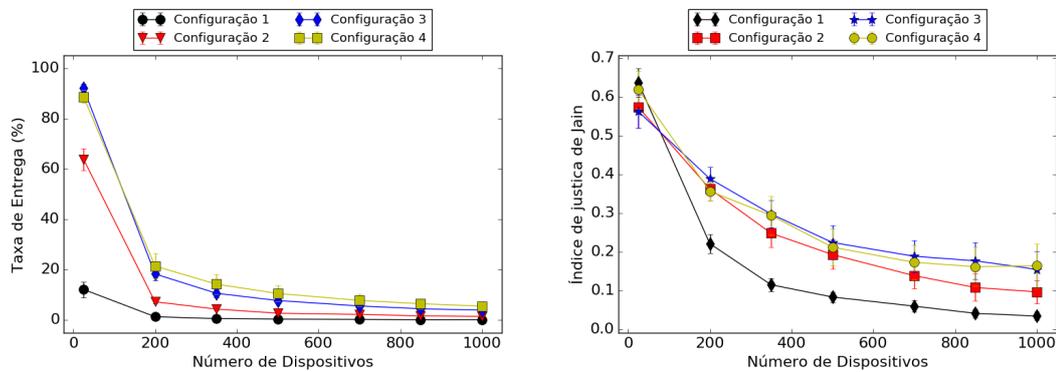


Figura 19 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia PF em função do número de dispositivos



Observe que o comportamento das estratégias RR, MT e PF são semelhantes no quesito de taxa de entrega, mas no quesito justiça, a estratégia RR se mostra diferente. Na Figura 17, é possível ver que, após um decremento inicial, as curvas crescem até certo ponto e

então voltam a descer, como é claro na curva da configuração 3, que cresce ligeiramente entre os pontos 200 e 500 do eixo horizontal e então volta a decrementar.

Este comportamento pode estar relacionado ao tamanho do ciclo de alocação da estratégia RR, que ao crescer demais, faz com que os dispositivos descartem mensagens enquanto esperam a sua vez de receber recursos.

Figura 20 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia AE em função do número de dispositivos

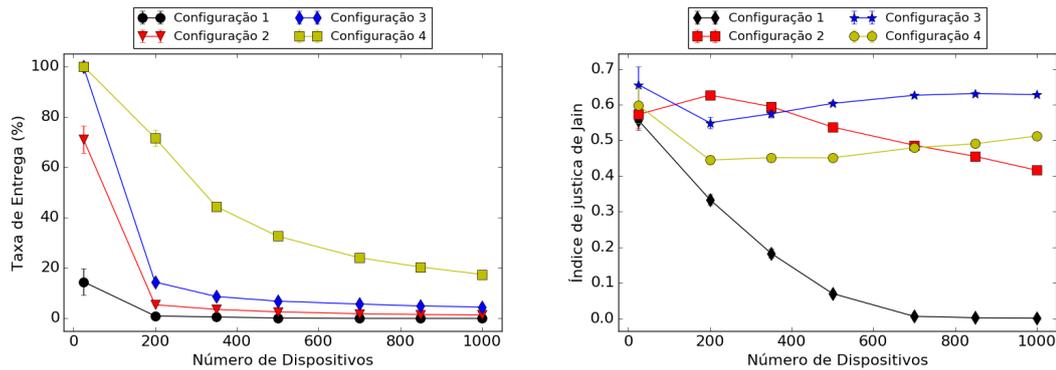
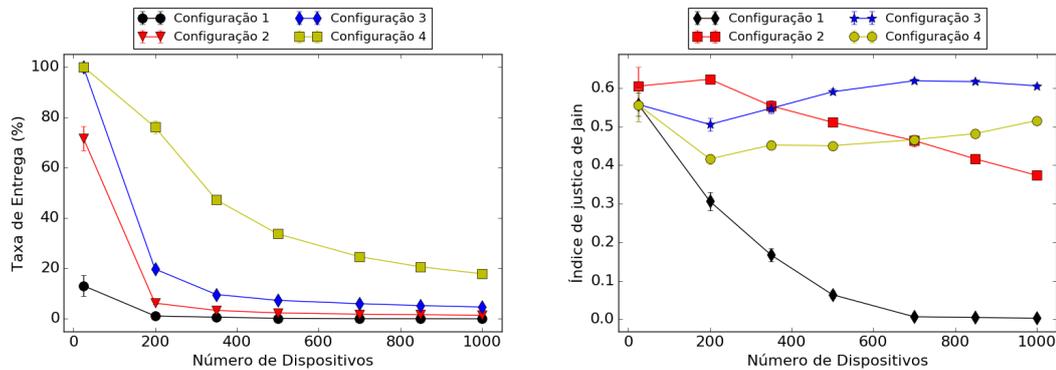


Figura 21 – Desempenho das aplicações M2M em portadora NB-IoT utilizando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos



As estratégias AE e MLWDF, nas Figuras 20 e 21, mostram comportamentos semelhantes entre si, mas podemos dizer que o desempenho é superior ao desempenho das três outras estratégias. Exceto pela configuração 1, que se mostra similar devido ao péssimo desempenho.

Novamente, é possível ver que as estratégias que consideram o atraso possuem um comportamento bem mais vantajoso se comparado com as outras estratégias, devido a estas considerarem a restrição de QoS destas aplicações.

É interessante ver que as estratégias 2 e 3 se mostram mais justas que a estratégia 4, devido a capacidade de multiplexar o canal. Mas esta desvantagem pode ser considerada irrelevante, devida a alta taxa de entrega da configuração 4 em relação às outras.

Podemos ver que nos casos mostrados até agora, as configurações com menos duração de tempo, principalmente a configuração 4, apresentam melhor desempenho. Utilizamos a Equação 6.2 para justificar a superioridade da configuração 4 para a métrica de taxa de entrega em todos os cenários. Esta equação mostra, de forma bastante simplificada, uma propriedade que deve ser verdadeira para que um pacote seja transmitido corretamente pela rede.

$$\left[ \frac{TR_u * 8}{TBT_{IQS}^{N_{ru}}} \right] \leq \left[ \frac{maxDelay_u}{DUR_c} \right] \quad (6.2)$$

O lado esquerdo da equação representa o número de transmissões que devem ser realizadas para completar a transmissão de um relatório com nossa estratégia de alocação estática. A variável  $TR_u$  representa em bytes o tamanho do relatório criado pelo usuário  $u$ , e a variável Tamanho do Bloco de Transporte ( $TBT_{IQS}^{N_{ru}}$ ) representa a quantidade de bits transmitidos por transmissão. Essa quantidade depende da qualidade de sinal, medida pelo Índice de Qualidade de Sinal (IQS) do dispositivo e o valor de  $N_{ur}$ , como discutido na seção 2.4.

Já o lado direito representa a quantidade de transmissões que podem ser realizadas utilizando uma configuração de UR específica até que o limite de atraso seja ultrapassado. A variável  $maxDelay_u$  representa o limite de atraso da aplicação sendo executada pelo dispositivo  $u$  e a variável  $DUR_c$  representa a duração de cada UR da configuração  $c$ .

Como dito, esta equação representa uma simplificação do cenário real pois estamos assumindo que a variável IQS é constante, mas a qualidade de sinal de um dispositivo é bastante variável. Estamos utilizando-a apenas para facilitar a explicação da situação.

Observe que quanto pior a qualidade de sinal, menor será o valor de  $TBT_{IQS}^{N_{ru}}$ , o que causa o aumento da quantidade de transmissões necessárias, pois  $TR_u$  é constante. Veja também que, quanto menor a variável  $maxDelay_u$ , menos oportunidades de transmissão o dispositivo terá. Finalmente, veja que quanto maior o valor de  $DUR_c$ , menos oportunidades de transmissão o dispositivo terá, pois cada transmissão ocupa uma maior faixa de tempo.

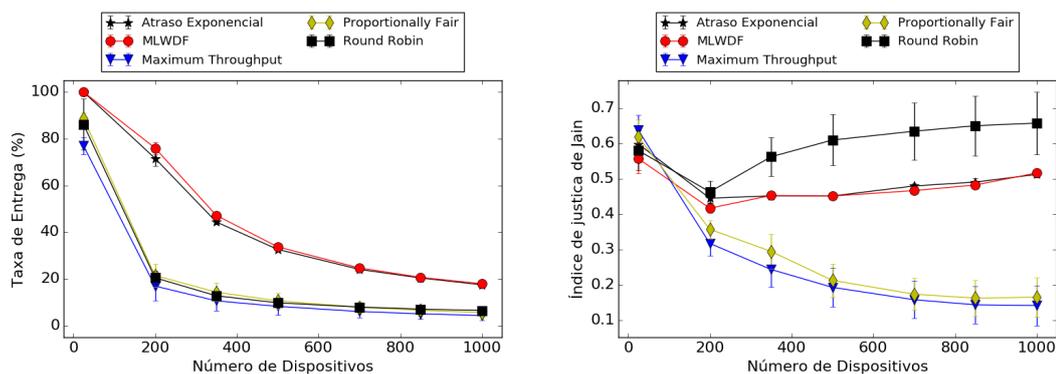
Então, com base nessa equação, os dispositivos que utilizarem configurações de maior duração de tempo, terão o lado direito da equação reduzido, o que faz com que eles precisem de um valor de  $TBT_{IQS}^{N_{ru}}$  mais elevado, adquirido pelo aumento do valor de  $N_{ru}$  ou do valor de  $IQS$ , para que o lado esquerdo da equação também diminua.

Dessa afirmação, nós extraímos uma nova informação: dispositivos com qualidade de canal ruim devem transmitir em mais URs para utilizar configurações mais demoradas, o que facilita a quebra do limite de atraso da aplicação.

Perceba então que dispositivos com configurações de baixa duração de tempo resultam em uma maior quantidade de oportunidades de transmissão, facilitando a transmissão de relatórios por dispositivos que estejam experimentando baixas qualidades de sinal. Isso justifica a melhora no desempenho à medida que a duração das URs é diminuída.

Dado que a configuração 4 apresenta melhor desempenho, nós podemos agora examinar as estratégias de aplicação que produzem os melhores resultados. Na Figura 22 nós vemos uma comparação das estratégias utilizando a configuração 4.

Figura 22 – Comportamento em função do número de dispositivos das estratégias de alocação utilizando a configuração de UR 4 em portadora NB-IoT



Veja que as estratégias que consideram o atraso apresentam altas taxas de entrega, pois este é o principal requisito de QoS. Mas com relação ao índice de justiça, a estratégia RR apresenta clara vantagem, apesar do intervalo de confiança elevado, pois com a configuração 4, o problema do grande ciclo de alocação visto na Figura 17 é atenuado pois a duração das URs é muito pequeno.

Consideramos a estratégia MLWDF e AE como sendo as que apresentam melhor desempenho de maneira geral pois apresentam desempenho muito superior a critério de taxa de entrega e a pequena diferença a nível de justiça pode ser desconsiderada com base no desempenho da outra métrica.

Focamos agora nos gráficos da taxa de entrega e justiça da aplicações ED e TD nas Figuras 23 e 24. Estes são os resultados para a estratégia de alocação MLWDF.

Figura 23 – Comportamento das aplicações ED em portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos

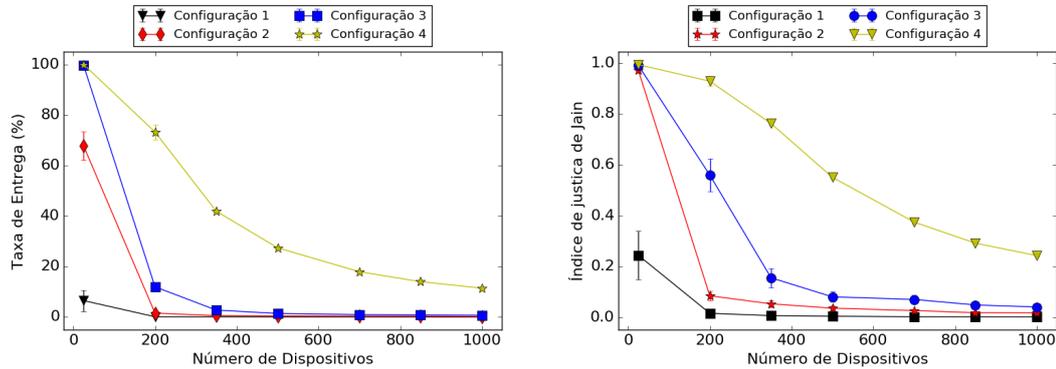
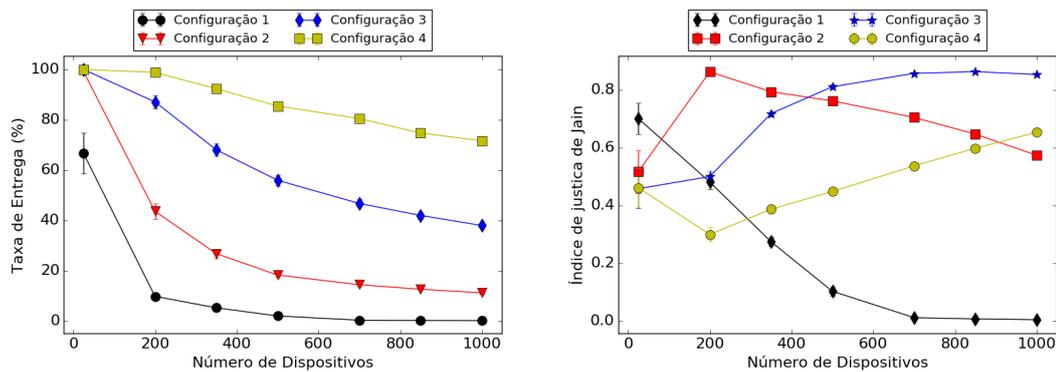


Figura 24 – Comportamento das aplicações TD em portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos



Observe que, com relação à métrica de taxa de entrega, o comportamento das aplicações ED é similar ao comportamento agregado, isto é devido ao fato do tráfego ED compor maior parte do tráfego, portanto, possui um impacto maior sobre o comportamento total do sistema. Já o comportamento TD é interessante, pois mostra taxas de entrega elevadas com a configuração 4, mesmo com 1000 dispositivos, pois, em média, transmite bem menos dados.

Outro comportamento interessante pode ser encontrado nas curvas de justiça. As aplicações ED alcançam melhor justiça à medida que diminuimos a duração das URs, o que mostra que as configurações rápidas dividem melhor o tráfego aleatório.

Com relação às aplicações TD, vemos que cargas de até 400 dispositivos, a configuração 2 traz mais justiça, e a partir disso, a configuração 3 se torna mais interessante, mas a tendência é que a configuração 4 se torne melhor se aumentarmos mais a quantidade de dispositivos. Isso mostra que a multiplexação de canais traz mais justiça, mas esta justiça deteriora com o aumento de dispositivos.

Este comportamento pode ser atribuído ao fato destas configurações permitirem a multiplexação da portadora NB-IoT, facilitando a divisão do canal, e possuírem uma taxa de entrega elevada o suficiente para esta aplicação, que em média transmite poucos dados.

Podemos ver que as aplicações M2M podem ser implantadas numa portadora NB-IoT e alcançar taxas de entrega de 20% em cenários congestionados, o que não pode ser interessante para alguns dispositivos. Mas este baixo desempenho está relacionado às aplicações ED, pois as aplicações TD alcançam taxas de aproximadamente 80% em situações de congestionamento.

Este comportamento é esperado pois as aplicações TD são similares às aplicações *ultra-low-end* definidas como alvo para este padrão. Podemos dizer então que, neste cenário, apenas uma portadora NB-IoT pode ser suficiente para suportar o cenário esperado para estas aplicações M2M TD.

Segundo nossos resultados, para que o padrão NB-IoT seja capaz de suportar as aplicações ED seriam necessários pelo menos 5 portadoras NB-IoT. Pois, como mostrado na Figura 23, cada portador NB-IoT é capaz de entregar 20% do tráfego ED.

Isso totaliza a necessidade de 6 portadoras NB-IoT para suportar este tráfego. Pois, como mostrado na Figura 24, uma única portadora NB-IoT é capaz de entregar 80% do tráfego de dados TD, o que pode ser suficiente para os dispositivos. Um ou duas portadoras extras poderiam ser utilizadas para garantir uma taxa de entrega de 100%.

Para implantar essa quantidade de portadoras NB-IoT *inband*, seria necessário utilizar uma portadora LTE de pelo menos 10 MHz, mas portadoras menores podem ser utilizadas caso as portadoras NB-IoT sejam implantadas no modo *guardband* ou *standalone*.

Na próxima seção, iremos descrever um cenário que pode ser considerado para facilitar a aplicabilidade do padrão NB-IoT para o tipo de tráfego considerado.

### ***Aplicações M2M com requisitos de QoS relaxados sobre uma portadora NB-IoT***

Nesta seção, consideramos a situação onde os dispositivos utilizam este tipo de aplicação através do padrão NB-IoT e estão dispostos a relaxar seus requisitos de QoS para se igualarem aos requisitos das aplicações NB-IoT, detalhados na subseção 2.4.2.

Visto que não estamos modificando o comportamento das aplicações e nem o comportamento das estratégias de alocação, iremos exibir nesta seção apenas os gráficos relacionados as estratégias PF e MLWDF, pois estes representam os dois subconjuntos de comportamentos exibidos na seção anterior.

Figura 25 – Comportamento das aplicações M2M sob QoS relaxado na portadora NB-IoT considerando estratégia PF em função do número de dispositivos

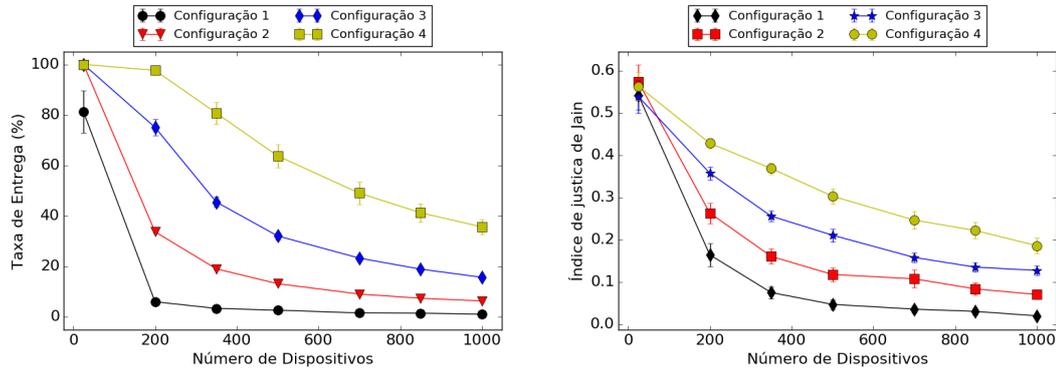
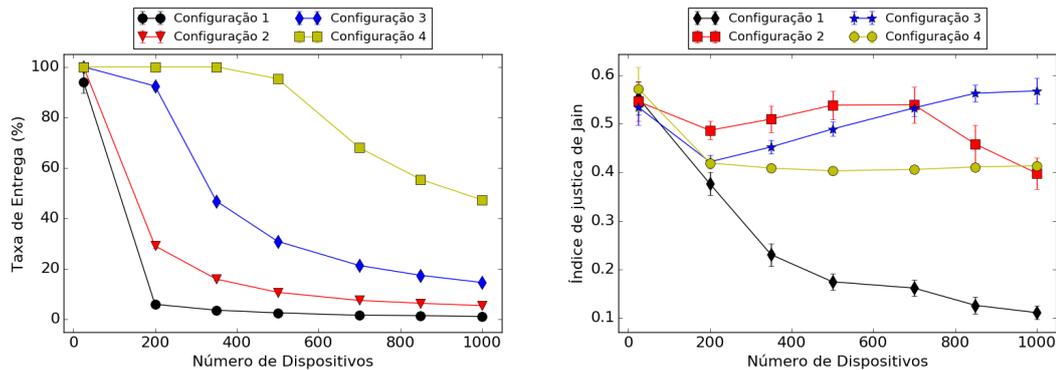


Figura 26 – Comportamento das aplicações M2M sob QoS relaxado na portadora NB-IoT considerando estratégia MLWDF em função do número de dispositivos



Veja que o comportamento é similar ao visto na outra seção, mas com taxas de entrega bem melhores, como é esperado devido ao relaxamento dos requisitos de QoS. Observe que a configuração 4 com o algoritmo MLWDF, apresentado na Figura 26, adquire os melhores resultados de taxa de entrega, alcançando taxas próximas a 100% em cenários de 500 dispositivos e alcançando taxas de aproximadamente 50% com 1000 dispositivos.

Nas figuras 27 e 28 nós vemos novamente o comportamento das aplicações ED e TD separadamente com o escalonador MLWDF.

Figura 27 – Comportamento das aplicações ED sob cenário de atraso relaxado em função do número de dispositivos

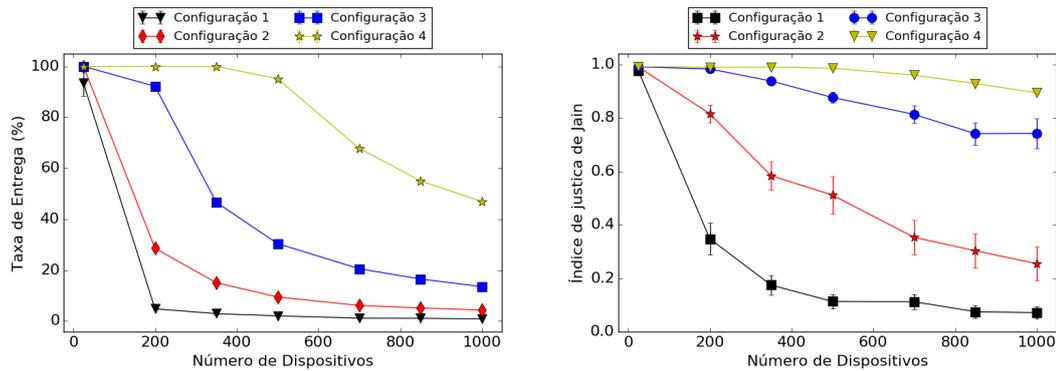
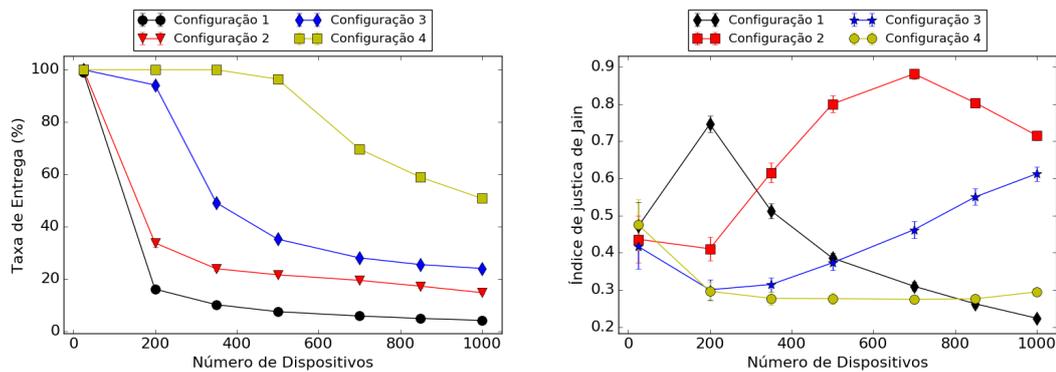


Figura 28 – Comportamento das aplicações TD sob cenário de atraso relaxado em função do número de dispositivos



Observe que o comportamento da métrica de taxa de entrega dos dois tipos de aplicações varia consideravelmente com relação ao cenário ilustrado nas Figuras 23 e 24. Agora, as duas taxas de entrega se equipararam, as taxas das aplicações ED subiram em até 20% nos pontos mais congestionados e as taxas das aplicações TD desceram em até 40%.

Este comportamento está relacionado às aplicações ED, pois estas geram mais tráfego e, neste caso, diminuíram a quantidade de recursos disponíveis para as aplicações TD, fazendo com que as duas se equiparassem.

Com relação à métrica de justiça, podemos ver que as curvas se diferenciam bastante entre as duas aplicações. É possível ver uma melhora constante no índice de justiça entre aplicações ED à medida que a duração das URs é diminuída na Figura 27. É possível alcançar taxas de justiça próximas de 100% com aplicações ED, mas o nível de justiça encontrado nas aplicações TD é bem baixo com a configuração de melhor taxa de entrega.

Observe, na Figura 28, um comportamento muito mais similar ao encontrado na

Figura 24. É possível ver que até a configuração 1 oferece mais justiça em um pequeno intervalo do eixo horizontal, apesar desta mostrar uma taxa de entrega muito baixa.

Com estes resultados, podemos dizer que é possível suportar o tráfego M2M com apenas 4 portadoras, 2 para as aplicações ED e 2 para as aplicações TD. Pois ambas as aplicações apresentam valores de 60% de taxa de entrega com uma portadora NB-IoT, então utilizando duas portadoras para cada aplicação, pode ser suficiente para suportar todo o tráfego. Então, com o relaxamento dos requisitos de latência, pode-se diminuir a quantidade mensurada na seção anterior em 2 portadoras.

Com isso, nós finalizamos nossos gráficos sobre a alocação estática. Na próxima seção são discutidos os resultados de simulação da alocação dinâmica.

## 6.5 Avaliação da proposta de alocação dinâmica

Nesta seção, o comportamento da proposta dinâmica, descrita na seção 5.2, é examinado com base em 3 componentes do nosso algoritmo. Estes são: a determinação da configuração utilizada, o cálculo do valor  $N_{ur}$  e o parâmetro  $\rho_u$ .

Nestes cenários, são utilizadas as aplicações com requisitos de QoS restritos. Pois, esta define o cenário esperado para o mundo real, enquanto o cenário de QoS relaxado é teórico e foi utilizado neste trabalho para examinar a viabilidade destas aplicações no padrão NB-IoT.

São analisados os efeitos do cálculo de  $N_{ur}$  ativado ou não. Este estando desativado, o valor de  $N_{ur}$  será sempre 1. Também é examinado o efeito de reduzir a escolha da configuração para apenas as configurações 3 e 4. Então, finalmente, são examinados os efeitos de valores diferentes para a variável  $\rho_u$ .

O algoritmo MLWDF para decisão do dispositivo a ser escolhido para alocação, pois esta foi a técnica que melhor se portou nos cenários apresentados até este momento. As Figuras 32, 29, 31 e 30 mostram os resultados utilizados para esta análise.

Figura 29 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de  $N_{ur}$  desativado e cálculo de configuração ativado

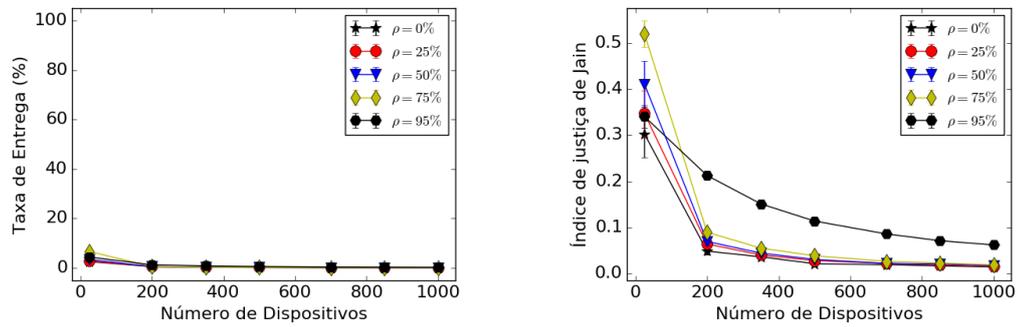


Figura 30 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de  $N_{ur}$  ativado e cálculo de configuração ativado

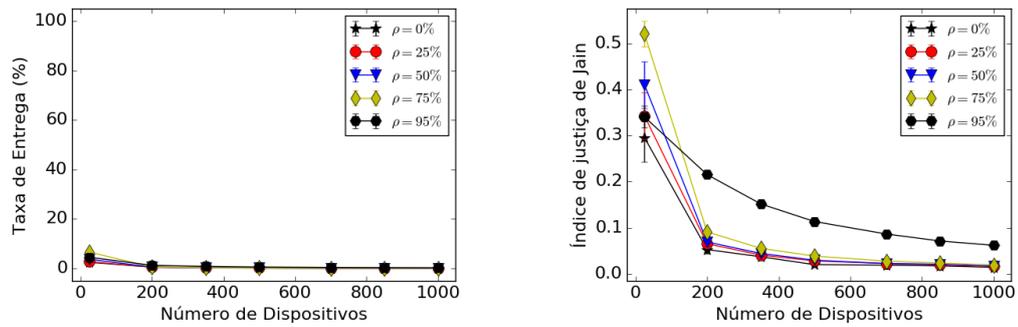


Figura 31 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de  $N_{ur}$  ativado e cálculo de configuração reduzido

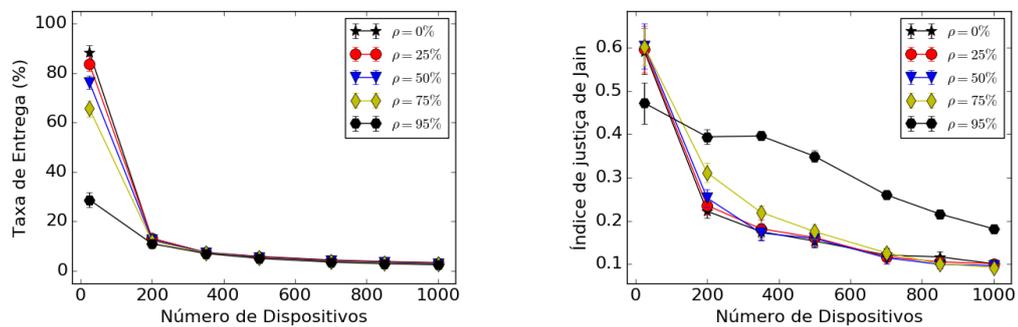
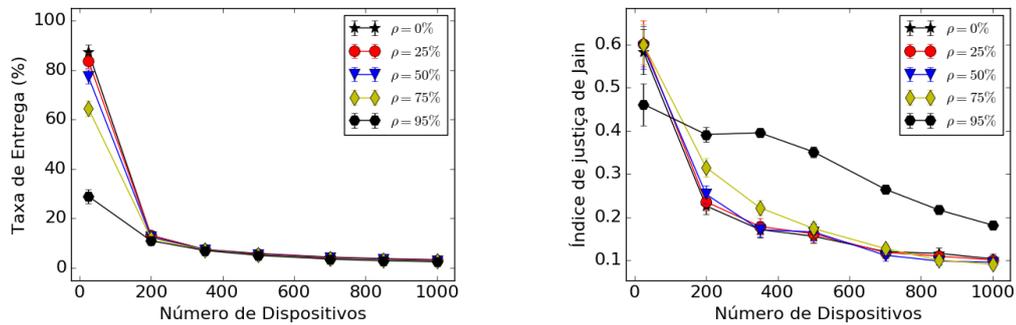


Figura 32 – Desempenho da proposta dinâmica em função do número de dispositivos com cálculo de  $N_{ur}$  desativado e cálculo de configuração reduzido



Observe que o cálculo de  $N_{ru}$  não afeta de maneira significativa o desempenho do sistema, conforme pode ser visto nas Figuras 29 e 30 e nas Figuras 31 e 32. Como definido anteriormente, na Equação 5.1, este cálculo determina a quantidade de URs necessária para a transmissão dos dados.

No contexto da Equação 6.2, este cálculo faz com que a variável  $TBT_{IQS}^{N_{ru}}$  se aproxime do valor da variável  $TR_u$ , o que resulta no lado esquerdo da equação se aproximar de 1. Este é o valor mínimo que o lado esquerdo da equação pode assumir sem que haja desperdício de recursos, pois valores menores que 1 indicariam que o foi feito uma transmissão com mais UR do que o necessário.

Em contrapartida, o valor  $N_{ru}$  estático pode resultar em valores maiores para o lado esquerdo da equação. O que deveria dificultar com que a equação se torne válida, piorando o desempenho geral do sistema. Mas de acordo com os resultados, nós vemos que este efeito não é visível no nosso sistema.

Segundo a métrica de taxa de entrega, também é possível ver que o parâmetro  $\rho_u$  também tem pouco efeito sobre o comportamento da rede. Exceto em cenários com poucos dispositivos, onde a variável  $\rho_u$  mostra efeitos negativos.

Veja que o valor de  $\rho = 95\%$  proporciona maior justiça entre os dispositivos, mas isto está atrelado ao baixo desempenho do sistema, já que em média, os dispositivos não estão conseguindo transmitir suas mensagens.

Também é possível ver que ao reduzirmos a decisão de configuração para selecionar apenas entre as configurações 3 e 4, os dispositivos alcançam um desempenho bem melhor do que aquele resultante do uso de todas as configurações, como pode ser observado nas Figuras 30 e 31, por exemplo.

Isso está atrelado ao melhor desempenho das configurações de pequena duração, como vimos na seção 6.4. Mesmo aumentando a multiplexação do canal, utilizando as configurações 1 e 2, estas possuem um desempenho tão baixo que o sistema como um todo sofre.

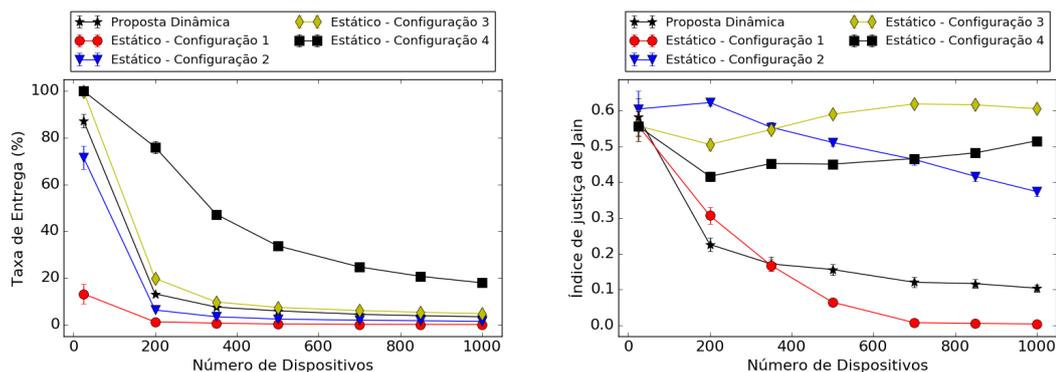
Concluimos que o uso das configurações mais longas não é interessante, mesmo que estas permitam uma maior multiplexação do canal. Também é visto que o uso da variável  $\rho_u$  não é interessante pois esta prejudica o funcionamento do sistema, e que o cálculo do valor de  $N_{ur}$  não possui um efeito visível no sistema.

## 6.6 Alocação estática vs dinâmica

Finalmente, foi feita a comparação entre a estratégia estática e a estratégia dinâmica. Nos gráficos das figuras abaixo, são exibidas as curvas que representam os melhores resultados de ambas as modalidades.

Para a alocação estática, são mostrados os cenários de cada configuração onde o escalonador MLWDF foi utilizado. Para a alocação dinâmica, foram escolhidos os valores associados aos cenários cuja seleção de  $N_{ur}$  está ativada, a seleção de configurações está reduzida e o valor de  $\rho_u$  é igual a zero.

Figura 33 – Desempenho da alocação estática vs dinâmica com ambas aplicações M2M em função do número de dispositivos



Observe que a estratégia estática utilizando a configuração 4 se mostra muito superior a proposta dinâmica. Em ambas as métricas, mesmo sendo capaz de multiplexar o canal, a estratégia dinâmica não alcança taxas de justiça superiores a estratégia 4.

Esse comportamento pode estar relacionado as aplicações M2M consideradas neste trabalho. Pois, estas aplicações possuem a vazão maior e os requisitos de atraso mais limitados, enquanto as aplicações esperadas para o NB-IoT possuem vazão bem menores e requisitos de

atraso bem menos rígidos . Então, com base na Equação 6.2, estas aplicações se comportarão melhor utilizando configurações mais curtas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais do trabalho. Inicialmente são discutidas as conclusões finais na seção 7.1. Então, na seção 7.2, é apresentada a produção bibliográfica gerada por este trabalho. São citadas as limitações deste trabalho na seção 7.3. Finalmente, as expectativas de trabalhos futuros são expostas na seção 7.4.

### 7.1 Conclusões desse trabalho

Este trabalho examina as peculiaridades da alocação de recursos de rádio no padrão NB-IoT, examinando diversas estratégias de alocação de recursos neste padrão e propondo nova estratégia de alocação que considera a situação momentânea do dispositivo para alocar recursos para o mesmo.

No Capítulo 3 é possível ver que a literatura na área de NB-IoT é bastante limitada e a alocação de recursos de rádio em portadoras NB-IoT é pouco explorada.

Então, no Capítulo 4, é definido um sistema que considera os fatores fundamentais deste contexto e é apresentada a implementação realizada para viabilizar a simulação deste sistema.

Assim é possível definir, no Capítulo 5, dois algoritmos diferentes para a realização da alocação destes recursos, os algoritmos estático e dinâmico. O algoritmo estático foi definido com base no que é encontrado na literatura existente e o algoritmo dinâmico foi proposto por este trabalho como uma nova alternativa.

Com base em simulações, realizadas neste trabalho e apresentadas no Capítulo 6, chegamos às seguintes conclusões:

- O NB-IoT é uma solução válida para o tráfego M2M considerado neste trabalho, caso sejam utilizadas múltiplas portadoras;
- Unidades de recurso NB-IoT de curta duração resultam em melhores taxas de entrega, mas, em cenários com poucos dispositivos, as outras configurações conseguem alcançar maior justiça;
- A estratégia de alocação dinâmica proposta neste trabalho apresenta desempenho pior que a estratégia estática que usa a configuração de recursos com menor duração.

Finalmente, respondendo a questão de pesquisa definida na introdução: O uso do algoritmo estático se mostrou superior quando utilizada a configuração 4. As taxas de entrega

se mostram claramente superiores e o índice de justiça se mostram levemente inferiores à configuração mais justa, como mostrado na Figura 33.

## 7.2 Produção bibliográfica

Os resultados referentes à alocação estática de recursos de rádio em portadoras NB-IoT e a comparação das configurações de transmissão foram compiladas em um artigo.

Este artigo foi aceito como artigo completo no XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT) que foi realizada em São Pedro, SP nas datas de 3 à 6 de setembro de 2017. Abaixo apresentamos a referência completa do trabalho:

JUAÇABA NETO, R; BEZERRA, E; OLIVEIRA, C. Performance Analysis of Resource Unit Configurations for M2M Traffic in the Narrowband-IoT System. **XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**, São Pedro, SP, 2017, 5 p. Disponível em <http://www.sbrt.org.br/sbrt2017/anais/1570362027.pdf>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.

## 7.3 Limitações desse trabalho

Nosso trabalho e proposta conta com algumas limitações de escopo, são elas:

- Não foram considerados todos os aspectos do NB-IoT, como o tráfego de controle e repetição de transmissões;
- Não foi analisado o comportamento das aplicações definidas nos documentos 3GPP para serem público alvo do NB-IoT, optou-se por avaliar aplicações M2M de maior complexidade.

## 7.4 Perspectivas para trabalhos futuros

Como trabalho futuro nós pretendemos avaliar outras estratégias de alocação dinâmica, bem como realizar as mesmas simulações com o tráfego de dados definido pelo 3GPP para o padrão NB-IoT. Assim, esperamos verificar se o comportamento se mantém com o tráfego diferenciado.

Pretendemos também incluir o uso de repetições no nosso estudo para adquirir um algoritmo que englobe todos os aspectos de alocação de recursos NB-IoT. Segundo o trabalho de Yu *et al.* (2017), esta estratégia deve levar em consideração o limite de atraso da aplicação, bem

como a qualidade do canal daquele usuário.

Uma possível abordagem para este algoritmo é o desenvolvimento de uma meta-heurística que utilize possua diferentes comportamentos dependendo do modelo de tráfego do dispositivo. Isso pode ser interessante devido as diferentes aplicações encontradas neste contexto, uma com comportamento aleatório e outra com comportamento constante.

## REFERÊNCIAS

- 3GPP. *TS 36.213 - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures. V14.2.0.* [S.l.], 2017.
- 3GPP. *TS 36.306 - User Equipment (UE) Radio Access Capabilities. V14.2.0.* [S.l.], 2017. v. 0, n. Release 14.
- ABU-ALI, N.; TAHA, A.-E. M.; SALAH, M.; HASSANEIN, H. Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced : Tutorial , Survey and Evaluation Framework. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 16, n. 3, p. 1239–1265, 2014.
- AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 1553-877X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7123563>>.
- ALLIANCE, Z. IEEE 802.15. 4, ZigBee standard. **On <http://www.zigbee.org>**, 2009.
- AMEIGEIRAS, P.; WIGARD, J.; MOGENSEN, P. Performance of the M-LWDF scheduling algorithm for streaming services in HSDPA. In: **IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004.** [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 999–1003 Vol. 2. ISSN 1090-3038.
- ASADI, A.; WANG, Q.; MANCUSO, V. A survey on device-to-device communication in cellular networks. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 16, n. 4, p. 1801–1819, jan 2014. ISSN 1553877X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6805125>>.
- BARDYN, J. P.; MELLY, T.; SELLER, O.; SORNIN, N. Iot: The era of lpwan is starting now. In: **ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference.** [S.l.: s.n.], 2016. p. 25–30.
- CHEN, M.; WAN, J.; LI, F. Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, v. 6, n. 2, p. 480–497, 2012. ISSN 19767277.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband.** [S.l.]: Academic press, 2013.
- ERICSSON. **Cellular networks for Massive IoT – enabling low power wide area applications.** 2016. 1–13 p. Disponível em: <[https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp\\_iiot.pdf](https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iiot.pdf)>.
- ERICSSON. **Mobility Report. On The Pulse of the Networked Society.** [S.l.], 2016. 2–5 p. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-june-2016.pdf>>.
- GHAVIMI, F.; CHEN, H. H. M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: Architectures, service requirements, challenges, and applications. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 17, n. 2, p. 525–549, 2015. ISSN 1553877X.
- GHOSH, A.; RATASUK, R.; MONDAL, B.; MANGALVEDHE, N.; THOMAS, T. Lte-advanced: next-generation wireless broadband technology [invited paper]. **IEEE Wireless Communications**, v. 17, n. 3, p. 10–22, June 2010. ISSN 1536-1284.

GOZALVEZ, J. New 3GPP Standard for IoT. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 11, n. 1, p. 14–20, 2016. ISSN 15566072.

GSM. 3gpp low power wide area technologies. 2016.

GUIBENE, W.; NOLAN, K. E.; KELLY, M. Y. Survey on clean slate cellular-iot standard proposals. **Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Se**, p. 1596–1599, 2015.

HUAWEI. **NB-IOT - Enabling New Business Opportunities**. 2015. Disponível em: <<http://www.huawei.com/minisite/4-5g/img/NB-IOT.pdf>>.

Huawei Technologies; HiSilicon Technologies. **GP140681 - Traffic model for Cellular IoT**. Ljubljana, Slovenia, 2014.

JAIN, R. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990.

JERMYN, J.; JOVER, R. P.; MURYNETS, I.; ISTOMIN, M.; STOLFO, S. Scalability of machine to machine systems and the internet of things on lte mobile networks. In: **2015 IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–9.

KIM, J.; LEE, J.; KIM, J.; YUN, J. M2M service platforms: Survey, issues, and enabling technologies. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 16, n. 1, p. 61–76, 2014. ISSN 1553877X.

KOLDING, T. E.; PEDERSEN, K. I.; WIGARD, J.; FREDERIKSEN, F.; MOGENSEN, P. E. High speed downlink packet access: WCDMA evolution. **IEEE Vehicular Technology Society News**, v. 50, n. 1, p. 4–10, 2003.

LANDSTRÖM, S.; BERGSTRÖM, J.; WESTERBERG, E.; HAMMARWALL, D. NB-IoT: a sustainable technology for connecting billions of devices. **Ericsson Technology Review**, p. 1–12, 2016. Disponível em: <[https://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson\\_review/2016/etr-narrowband-iot.pdf](https://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson_review/2016/etr-narrowband-iot.pdf)>.

LAURIDSEN, M.; KOVÁCS, I. Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M.; HOLST, S. Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area. In: **Vehicular Technology Conference, 2016 IEEE 84th**. [S.l.: s.n.], 2016.

LAW, A. M.; KELTON, W. D.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1991. v. 2.

LIOUMPAS, A. S.; ALEXIOU, A. Uplink scheduling for Machine-to-Machine communications in LTE-based cellular systems. In: **2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 353–357. ISSN 2166-0077.

MAIA, A. M.; VIEIRA, D.; CASTRO, M. F. de; GHAMRI-DOUDANE, Y. A fair QoS-aware dynamic LTE scheduler for machine-to-machine communication. **Computer Communications**, Elsevier B.V., v. 0, p. 1–12, 2016. ISSN 01403664. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140366416300718>>.

MATHEUS, B. G. **Análise sobre o impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade no desempenho de protocolos de roteamento para redes veiculares**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Computação, Fortaleza-CE, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17469>.

MCDERMOTT-WELLS, P. What is bluetooth? **Potentials, IEEE**, IEEE, v. 23, n. 5, p. 33–35, 2004.

MENDELSON, G. All you need to know about power over ethernet (poe) and the ieee 802.3 af standard. **Internet Citation,[Online] Jun**, 2004. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/1d01/e0e693028663074b1bf3beca52c2b469887c.pdf>>.

MINERVA, R.; BIRU, A.; ROTONDI, D. Towards a definition of the internet of things (iot). **IEEE Internet Initiative**, n. 1, 2015.

NOLAN, K. E.; GUIBENE, W.; KELLY, M. Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things. In: **2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 439–444.

NOVO, O.; BEIJAR, N.; OCAK, M.; KJÄLLMAN, J.; KOMU, M.; KAUPPINEN, T. Capillary networks - bridging the cellular and IoT worlds. In: **Internet of Things (WF-IoT), 2015 IEEE 2nd World Forum on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 571–578.

PALATTELLA, M. R.; DOHLER, M.; GRIECO, A.; RIZZO, G.; TORSNER, J.; ENGEL, T.; LADID, L. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 34, n. 3, p. 510–527, 2016. ISSN 0733-8716.

PIRO, G.; BALDO, N.; MIOZZO, M. An lte module for the ns-3 network simulator. In: ICST (INSTITUTE FOR COMPUTER SCIENCES, SOCIAL-INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING). **Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques**. [S.l.], 2011. p. 415–422.

PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAPOZZI, F.; CAMARDA, P. Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 60, n. 2, p. 498–513, 2011. ISSN 0018-9545.

PRASAD, A.; NETWORKS, N.; KUNZ, A.; LABORATORIES, N. E. C.; PAPAGEORGIU, A.; LABORATORIES, N. E. C. Recent Trends in IoT / M2M related Standards. **Research gate**, n. February, 2016.

RATASUK, R.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A.; VEJLGAARD, B. Narrowband LTE-M system for M2M communication. **IEEE Vehicular Technology Conference**, 2014. ISSN 15502252.

RATASUK, R.; MANGALVEDHE, N.; KAIKKONEN, J.; ROBERT, M. Data Channel Design and Performance for LTE Narrowband IoT. p. 0–4, 2016.

RATASUK, R.; VEJLGAARD, B.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A. NB-IoT system for M2M communication. In: **2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 428–432.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A. M.; CELES, C. S. F. S.; NETO, J. B. B.; PERES, B. S.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. A. F. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática**. [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>.

SCHLIENZ, J.; RADDINO, D.; SCHLIENZ, J.; RADDINO, D. **Narrowband Internet of Things Whitepaper**. Rofde & Schwarz, 2016. 42 p. Disponível em: <[https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma266/1MA266\\_0e\\_NB\\_IoT.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf)>.

SHELBY, Z.; HARTKE, K.; BORMANN, C. The constrained application protocol (CoAP). 2014. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc7252>>.

SOLTANMOHAMMADI, E.; GHAVAMI, K.; NARAGHI-POUR, M. A Survey of Traffic Issues in Machine-to-Machine Communications over LTE. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4662, n. c, p. 1–1, 2016. ISSN 2327-4662. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7416135>>.

TEMINO, L. A. M. R. de; BERARDINELLI, G.; FRATTASI, S.; MOGENSEN, P. Channel-aware scheduling algorithms for sc-fdma in lte uplink. In: **IEEE. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on**. [S.l.], 2008. p. 1–6.

WANG, Y.-P. E.; LIN, X.; ADHIKARY, A.; GROVLEN, A.; SUI, Y.; BLANKENSHIP, Y.; BERGMAN, J.; RAZAGHI, H. S. A primer on 3gpp narrowband internet of things. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 55, n. 3, p. 117–123, 2017.

XIAO, Y. IEEE 802.11 n: enhancements for higher throughput in wireless LANs. **Wireless Communications, IEEE**, IEEE, v. 12, n. 6, p. 82–91, 2005.

XU, J.; YAO, J.; WANG, L.; MING, Z.; WU, K.; CHEN, L. Narrowband internet of things: Evolutions, technologies and open issues. **IEEE Internet of Things Journal**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017.

YU, C.; YU, L.; WU, Y.; HE, Y.; LU, Q. Uplink Scheduling and Link Adaptation for Narrowband Internet of Things Systems. **IEEE Access**, PP, n. 99, p. 1, 2017. ISSN 2169-3536.