

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GERSON ALBERTO LEIRIA NUNES

**REDUÇÃO DE SINALIZAÇÃO E
AGENDADOR DE RECURSOS
PERIÓDICOS PARA REDES
INDUSTRIAIS M2M**

Porto Alegre
2019

GERSON ALBERTO LEIRIA NUNES

**REDUÇÃO DE SINALIZAÇÃO E
AGENDADOR DE RECURSOS
PERIÓDICOS PARA REDES
INDUSTRIAIS M2M**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre
2019

GERSON ALBERTO LEIRIA NUNES

**REDUÇÃO DE SINALIZAÇÃO E
AGENDADOR DE RECURSOS
PERIÓDICOS PARA REDES
INDUSTRIAIS M2M**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS
Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Bartolomeu Ferreira Uchôa-Filho, UFSC
Doutor pela Universidade de Notre Dame – Notre Dame, Estados Unidos da América

Prof. Dr. Cristiano Bonato Both, UNISINOS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. João César Netto, UFRGS
Doutor pela Universidade Católica de Lovaina – Lovaina, Bélgica

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre, junho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que me educou e sempre me apoiou nos momentos mais difíceis da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, pela confiança em mim depositada e por ter acreditado na minha capacidade de conduzir esta tese até sua conclusão. Quero agradecer aos meus colegas de aula pela amizade e pelo espírito de cooperação.

Gostaria de deixar um agradecimento especial à minha esposa, Elisa Girotti Celmer, por me apoiar e compreender toda a dificuldade que é fazer um curso de doutorado, bem como à minha corretora da norma culta da língua portuguesa, Profa. Nilza Girotti Celmer, por sua competência.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento ao Prof. Dr. Alexandre Balbinot por suas excelentes e empolgantes aulas, pelos ensinamentos educacionais e profissionais que foram transmitidos de forma exemplar.

Um forte abraço a todos que colaboraram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Devido à introdução de novas funcionalidades e aplicações M2M (*Machine-to-Machine*) na indústria, novos dispositivos precisarão ser conectados às redes de comunicação existentes, coexistindo com os atuais. As novas tecnologias de comunicação móvel, que ainda estão em processo de padronização, prometem cumprir com os requisitos de comunicação exigidos pelos sistemas de automação industrial. Portanto, esta tese tem como principal contribuição analisar a comunicação industrial M2M, sua viabilidade, implantação, características, limitações e se é adequada para os cenários, requisitos e exigências industriais. Além disso, também é realizado o desenvolvimento de um algoritmo de agendamento para dispositivos que necessitam de recursos periódicos de rede. Esse algoritmo tem o objetivo de reduzir a sinalização de rede, aumentar a capacidade de transmissão de dados, ou ainda, aumentar o número de dispositivos operantes na rede industrial. Os métodos propostos são validados usando uma estrutura de simulação LTE-A e métricas de rede tais como: atraso e jitter as quais são usadas para comparar o desempenho da abordagem proposta com os atuais agendadores de última geração. Os resultados mostram que a aplicação do agendador de recursos cíclicos e o esquema de redução de sinalização juntos podem melhorar a função de utilização do sistema bem como a satisfação dos usuários.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica, Redes industriais, Automação e Controle, comunicação M2M, Simulador, Redes móveis, comunicação M2M, redes industriais, algoritmo de agendamento, redução de sinalização.

ABSTRACT

Due to the introduction of new M2M (Machine-to-Machine) functionalities and applications in the industry, new devices will need to be connected to existing communication networks, coexisting with current ones. The new mobile communication technologies, which are still in the standardization process, promise to comply with the communication requirements demanded by industrial automation systems. Therefore, this thesis has as its main contribution to analyze the M2M communication, its feasibility, implantation, characteristics, limitations and if it is adequate for the scenarios, requirements and industrial needs. In addition, it is also developed a scheduling algorithm for devices that use periodic network resources. This algorithm aims to reduce network signaling, increase data transmission capacity, or increase the number of devices operating in the industrial network. The proposed methods are validated using a LTE-A simulation framework and network metrics such as delay and jitter, which are used to compare the performance of the proposed approach with the current state-of-the-art schedulers. The results show that the application of the cyclic resource scheduler and the signaling reduction scheme together can improve the system's utilization function as well as user satisfaction.

Keywords: Simulator, Mobile networks, M2M communication, Industrial networks, scheduling algorithm, signaling reduction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Crescimento dos usuários móveis.	19
Figura 2 –	Crescimento do volume de dados.	20
Figura 3 –	Redução de investimento da comunicação sem fio M2M.	22
Figura 4 –	Sistema de comunicação sem fio relacionado a pirâmide de automação. . .	25
Figura 5 –	Evolução entre os Releases 6 e 8 do 3GPP.	30
Figura 6 –	Arquitetura da rede LTE.	32
Figura 7 –	Visão geral dos domínios M2M padronizados pelo ETSI.	34
Figura 8 –	Exemplo das funções de densidade do tempo de transmissão.	37
Figura 9 –	Percentual de pacotes recebidos ao longo tempo.	38
Figura 10 –	Exemplo de funções de distribuição do tempo de atualização.	39
Figura 11 –	Estrutura genérica do quadro do sistema LTE-A.	41
Figura 12 –	Estrutura FDD do quadro do sistema LTE-A.	42
Figura 13 –	Estrutura TDD do quadro do sistema LTE-A.	42
Figura 14 –	Diferentes configurações do quadro TDD do sistema LTE-A.	43
Figura 15 –	Recursos de rede do sistema LTE-A.	45
Figura 16 –	Recursos de rede do sistema LTE-A com MIMO.	45
Figura 17 –	Oportunidades dadas pelo agendador WRR.	50
Figura 18 –	Arquitetura M2M híbrida 4G e 5G.	54
Figura 19 –	Cenário de simulação com 19 ERB e casas inteligentes.	56
Figura 20 –	Comparação de taxa de dados de células entre sistemas de uma antena, múltiplas antenas e mmWave.	56
Figura 21 –	Comparação da taxa de dados da célula para uma aplicação de acesso fixo com múltiplas antenas.	57
Figura 22 –	Crescimento das tecnologias de comunicação de curto e médio alcance. . .	58
Figura 23 –	Constantes fisiológicas em tempo real.	58
Figura 24 –	Novas tecnologias que aumentam o desempenho das redes de forma inteli- gente.	59
Figura 25 –	Uma visão futura da infraestrutura das operadoras de telecomunicações. . .	60
Figura 26 –	Novas tecnologias que aumentam o desempenho das redes de forma inteli- gente.	61
Figura 27 –	Comparação da média de pacotes de sinalização de rede em enlaces LTE e 5G. .	61
Figura 28 –	Função de utilidade do sistema M2M.	63
Figura 29 –	Função de utilidade do sistema em relação ao número de usuários da rede M2M.	64
Figura 30 –	Cenário da aplicação de monitoramento M2M.	65
Figura 31 –	A arquitetura do sistema M2M.	65
Figura 32 –	O processo de agendamento.	66

Figura 33 – Classificação de técnicas de agendamento.	67
Figura 34 – Topologia de comunicação <i>multi-hop</i>	69
Figura 35 – Alocação de usuários H2H e M2M.	69
Figura 36 – Atraso médio para os usuários H2H e M2M.	70
Figura 37 – Esquema de agendamento <i>Fuzzy</i>	73
Figura 38 – Regras fuzzy para alocação de recursos.	73
Figura 39 – Módulo de agendamento semi-persistente.	75
Figura 40 – Utilização de recursos de 4 algoritmos semipersistentes.	75
Figura 41 – Taxas de transmissão dos agendadores.	76
Figura 42 – Percentual de pacotes que extrapolaram o prazo máximo de latência.	77
Figura 43 – Percentual de alarmes que extrapolaram o prazo máximo de latência.	77
Figura 44 – Camadas de rede M2M em aplicações industriais.	78
Figura 45 – Arquitetura de referência das aplicações industriais M2M.	78
Figura 46 – Fluxograma do algoritmo proposto por (MENG <i>et al.</i> , 2017).	80
Figura 47 – Crescimento da latência de acordo com o aumento do volume de dados.	81
Figura 48 – Crescimento da latência de acordo com o aumento do número de usuários.	81
Figura 49 – Relação entre SNR e o número de repetições com diferentes tamanhos de recursos (YU <i>et al.</i> , 2017).	82
Figura 50 – Comparação dos recursos consumidos.	82
Figura 51 – Sistema de sinalização de pacotes de dados padrão e otimizado com repetição.	83
Figura 52 – Conceito básico de agendamento semipersistente.	84
Figura 53 – Principais entidades envolvidas no agendamento semipersistente na ERB.	84
Figura 54 – Capacidade VoIP para diferentes números de canais de controle.	85
Figura 55 – Densidade de probabilidade cumulativa do número de usuários agendados por intervalo de tempo de transmissão.	85
Figura 56 – Densidade de probabilidade cumulativa da latência dos usuários.	86
Figura 57 – Arquitetura heterogênea do sistema M2M.	86
Figura 58 – Algoritmo de agendamento proposto por (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b).	87
Figura 59 – Função de utilidade do sistema para classes de tráfego com atraso homogêneo.	88
Figura 60 – Função de utilidade do sistema para classes de tráfego com atraso heterogêneo.	88
Figura 61 – <i>Jitter</i> para diversos algoritmos de agendamento.	89
Figura 62 – Comunicação M2M para monitoramento de turbinas eólicas.	92
Figura 63 – Comunicação M2M para monitoramento de parque de tanques.	92
Figura 64 – Comunicação M2M para monitoramento de cabeças de perfuração de petróleo.	93
Figura 65 – Mapeamento das rajadas de dados dos usuários.	94
Figura 66 – Mapeamento cíclico das rajadas de dados dos usuários.	95
Figura 67 – Rajadas cíclicas de dados oriundas dos sensores.	95
Figura 68 – Sinalização para a alocação periódica.	97
Figura 69 – Algoritmo de alocação de recursos cíclicos.	98
Figura 70 – Função de utilidade das aplicações sensíveis ao atraso.	101
Figura 71 – Função de utilidade das aplicações tolerantes ao atraso.	102
Figura 72 – SINR e o posicionamento dos sensores M2M.	104
Figura 73 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.	105
Figura 74 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.	106
Figura 75 – Percentual médio de redução de sinalização no Uplink.	107
Figura 76 – <i>Jitter</i> médio dos dispositivos M2M.	108
Figura 77 – Função de utilidade do sistema.	110

Figura 78 – Latência média dos dispositivos M2M.	110
Figura 79 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.	111
Figura 80 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.	111
Figura 81 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.	113
Figura 82 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.	114
Figura 83 – Percentual médio de redução de sinalização no Downlink.	115
Figura 84 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.	116
Figura 85 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Benefícios do uso de comunicação sem fio.	24
Tabela 2 –	Requisitos de tempo das aplicações industriais.	26
Tabela 3 –	Evolução do <i>releases 9</i> ao <i>release 12</i> do 3GPP.	31
Tabela 4 –	Possíveis configurações do <i>subframe</i> especial	43
Tabela 5 –	Tabela comparativa dos trabalhos relacionados	90
Tabela 6 –	Parâmetros do simulador LTE-A.	104
Tabela 7 –	Parâmetros do simulador LTE-A.	112

LISTA DE ABREVIATURAS

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
ACA	Acesso Compartilhado Autorizado
ACK	<i>Acknowledge</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CI	Circuito Integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CoRE	<i>Constrained REstful Environments</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
CRBRA	<i>Collision Resolution Based Random Access</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects</i>
ED	<i>Event Driven</i>
DwPTS	<i>Downlink Pilots Time Slot</i>
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ERB	Estação Rádio Base
ERBs	Estações Rádio Base
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
ETU	<i>Extended Typical Urban</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>

FPS	<i>Fixed Priority Scheduler</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GP	<i>Guard Period</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
H2H	<i>Human-to-Human</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HeNB	<i>Home eNodeB</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Networks</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HTC	<i>Human Type Communication</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IMS	<i>Internet Protocol Multimedia Subsystem</i>
IoE	<i>Internet of Everything</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union Telecommunication</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long-Term Evolution Advanced</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIESM	<i>Mutual Information Effective SNR Mapping</i>
MIMO	<i>Mutiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i>
MTC	<i>Machine-Type Communication</i>
MTCd	<i>Machine-Type Communication Device</i>
MTCds	<i>Machine-Type Communication Devices</i>
MTCG	<i>Machine-Type Communication Gateway</i>
MTCGs	<i>Machine-Type Communication Gateways</i>
MEXT	<i>Mobility EXTensions for IPv6</i>
MWS	<i>Max Weight Scheduler</i>
NACK	<i>Negative Acknowledge</i>
NBLA	<i>Narrow Band Link Adaption</i>

NRT	<i>Non-Real Time</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCS	<i>Priority Class Scheduling</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistants</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PHICH	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PU	<i>Periodic Updates</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Services</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RANs	<i>Radio Access Networks</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RATs	<i>Radio Access Technologies</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RBs	<i>Resource Blocks</i>
RE	<i>Resource Element</i>
REs	<i>Resource Elements</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
ROLL	<i>Routing over Low-Power and Lossy networks</i>
RT	<i>Real Time</i>
SAEGW	<i>System Architecture Evolution Gateway</i>
SCFDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCL	<i>Service Capability Layer</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SDMA	<i>Space-Time Division Multiple Access</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>

SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio</i>
SMS	<i>Short Messaging Service</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
SON	<i>Self-Organizing Networks</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
TIC	<i>Tecnologia de Informação e Comunicação</i>
TICs	<i>Tecnologias de Informação e Comunicação</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TSG	<i>Technical Specification Group</i>
UE	<i>User Equipament</i>
UEs	<i>User Equipaments</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UPC	<i>Uplink Power Control</i>
UpPTS	<i>Uplink Pilots Time Slot</i>
WAN	<i>Wireless Area Network</i>
WANs	<i>Wireless Area Networks</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WFS	<i>Weighted Fair Sharing</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WPANs	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WRR	<i>Weighted Round Robin</i>
ZMQ	<i>ZeroMQ Message Transport Protocol</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Problema de pesquisa	19
1.1.1	Hipótese	20
1.1.2	Motivação	20
1.1.3	Justificativa	21
1.2	Comunicação M2M em aplicações industriais	21
1.2.1	Vantagens no uso de redes de comunicação sem fio	23
1.2.2	Preocupações com a implantação de sistemas sem fio	23
1.2.3	Redes de comunicação em automação industrial	23
1.2.4	Redes sem fio de sensores e atuadores	25
1.2.5	Requisitos da automação sem fio	26
1.2.6	Limitações dos sistemas de comunicação no contexto industrial	27
1.3	Objetivos	27
1.3.1	Objetivos específicos	28
1.4	Organização do texto	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	A evolução das redes móveis	29
2.2	Comunicação M2M	33
2.2.1	Organizações de padronização	34
2.2.2	Requisitos das aplicações industriais	36
2.3	Estrutura do quadro de comunicação 4G	40
2.3.1	Estrutura do quadro tipo LTE-A FDD	41
2.3.2	Estrutura do quadro tipo LTE-A TDD	41
2.4	Recursos de rede	44
2.5	Sinalização de rede	46
2.6	Canais de sinalização e controle	46
2.6.1	Canais de sinalização <i>Downlink</i>	47
2.6.2	Canais de sinalização <i>Uplink</i>	47
2.7	A importância dos algoritmos de agendamento	48
2.7.1	<i>Priority Class Scheduling</i>	48
2.7.2	<i>Max-Weighted Scheduling</i>	49
2.7.3	<i>Weighted Round Robin</i>	50
2.7.4	<i>Weighted Fair Scheduling</i>	51

3	TRABALHOS RELACIONADOS	53
3.1	M2M e as redes LTE-A	53
3.2	M2M e os Algoritmos de agendamento	62
4	PROPOSTA DE REDUÇÃO DE SINALIZAÇÃO E ALGORITMO DE AGENDAMENTO	91
4.1	Visão geral da proposta	91
4.2	Proposta de redução de sinalização	93
4.3	Proposta de agendador de recursos periódicos	96
5	VALIDAÇÃO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	99
5.1	O simulador de rede LTE-A	100
5.2	Simulações para os cenários sugeridos	102
5.2.1	Parâmetros de simulação do canal <i>uplink</i>	103
5.2.2	Resultados de simulação para o canal <i>uplink</i>	104
5.2.3	Parâmetros de simulação do canal <i>downlink</i>	112
5.2.4	Resultados de simulação para o canal <i>downlink</i>	113
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
	REFERÊNCIAS	120
	APÊNDICE A ALGORITMOS DE AGENDAMENTO	127
A.1	Agendador <i>Weighted Round Robin</i>	127
A.2	Agendador <i>Weighted Fair Scheduling</i>	128
A.3	Agendador <i>Priority Class Scheduling</i>	129
A.4	Agendador <i>Max Weighted Scheduling</i>	130
A.5	Agendador de recursos periódicos	131

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de automação industrial e de manufatura avançada possuem demandas crescentes de aquisição de dados, máquinas, robôs móveis, mas também novas tecnologias que auxiliam na comunicação entre as máquinas dentro do ambiente fabril. Nesse contexto, o uso de sistemas de comunicação M2M (*Machine-to-Machine*) surge como opção de comunicação móvel sem fio, interessante para atender essas demandas do chão de fábrica.

Devido aos avanços e à miniaturização dos CI (Circuitos Integrados) e dos equipamentos de comunicação, houve a possibilidade do desenvolvimento de sensores baratos que podem ser utilizados em diferentes configurações e topologias de rede. Essas tecnologias, interagindo em conjunto, passaram a chamar a atenção das comunidades acadêmica e industrial que estão tentando tirar proveito dessas tecnologias emergentes, a fim de melhorar ainda mais os produtos e serviços prestados que as utilizam.

Um sistema de automação industrial pode ser composto de vários tipos de sensores, permitindo assim o enobrecimento de informações fornecidas, tornando melhor a precisão de coleta de dados do ambiente monitorado. Desse modo, as informações fornecidas, pelos nós de detecção estática, podem ser complementadas com a inclusão de sensores sem fio mais sofisticados (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002).

De acordo com (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a), nos últimos anos, as comunicações M2M tornaram-se populares devido às várias aplicações inteligentes industriais, comerciais e residenciais, tais como: automação industrial, redes inteligentes, residências inteligentes e outros. Dessa forma, as atuais soluções de QoS existentes para redes de voz não podem ser importadas diretamente para as redes M2M, e novas classes de tráfego de QoS precisam ser criadas.

Segundo (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a), no paradigma da comunicação M2M, há grande quantidade de dispositivos conectados a uma rede industrial a qual possui um número elevado de pacotes com carga de dados pequena como característica de tráfego. Portanto, devido a essas características da rede, fez-se necessário criar um novo conjunto de classes de tráfego relacionadas aos restritos requisitos de QoS, latência, jitter e prioridade das aplicações industriais.

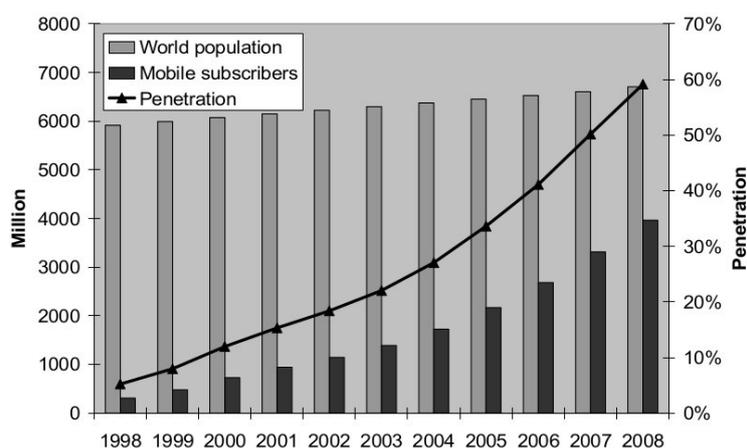
As classes de tráfego M2M baseiam-se no tamanho da carga útil de dados e nos requisitos de

atraso de pacotes das diferentes aplicações industriais. Uma das formas de avaliar o desempenho das redes que possuem tais requisitos é através da função de utilidade a qual avalia se o pacote é válido e útil dentro da tolerância ao atraso da aplicação.

Em virtude desses exclusivos e restritos requisitos da comunicação industrial M2M, torna-se tarefa essencial desenvolver esquemas de otimização de sinalização e alocação de recursos, os quais considerem a topologia da rede M2M, as características exclusivas das classes de tráfego e o QoS geral do sistema – todos fazem parte do foco dessa pesquisa.

Segundo (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014), o número de dispositivos móveis aumentou ao longo dos anos: o primeiro bilhão de usuários foi ultrapassado em 2002, o segundo em 2005, o terceiro em 2007 e o quarto no final de 2008. Segundo a Figura 1, há mais de um bilhão de novos dispositivos todo ano. Seguindo essa progressão, atualmente, a penetração das redes móveis sem fio em todo o mundo está próximo a 90 % da população mundial.

Figura 1 – Crescimento dos usuários móveis.



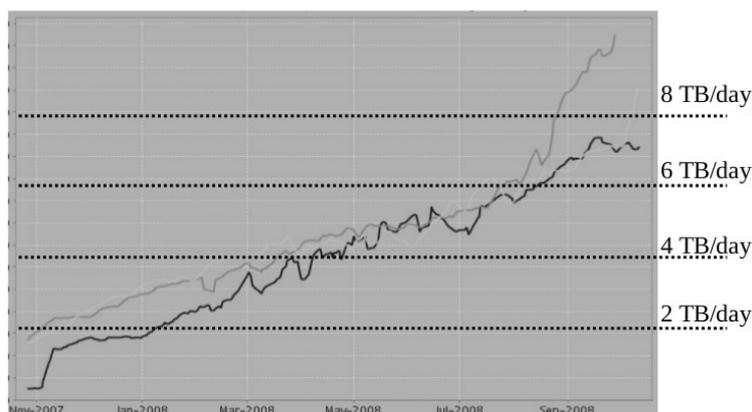
Fonte: (HOLMA; TOSKALA, 2009)

Segundo (HOLMA; TOSKALA, 2009), o crescimento do volume de dados aumentou e tornou-se necessário também aumentar a capacidade de transmissão de dados dos rádios. Em suma, a introdução da transmissão de dados de alta velocidade mudou o perfil de utilização das redes móveis que, antes, eram dominadas por pacotes de voz e, agora, passaram a ser dominadas por pacotes de dados. A Figura 2 apresenta as estatísticas de uma operadora durante 12 meses. Percebe-se que o volume de dados de *downlink* são terabytes por dia. Esse crescimento rápido de dados mostra que os usuários finais aderiram o acesso à banda larga móvel.

1.1 Problema de pesquisa

O foco principal desta pesquisa é abordar um dos grandes problemas encontrado nas redes de comunicação sem fio, que consiste na otimização das mensagens de sinalização com o gerenciamento da rede. Esse tráfego pode afetar diretamente o desempenho geral da rede, em especial, com um aumento significativo do número de dispositivos nela presentes.

Figura 2 – Crescimento do volume de dados.



Fonte: adaptada de (HOLMA; TOSKALA, 2009)

A definição do problema de pesquisa é dada pelas seguintes perguntas: Seria possível melhorar o desempenho da rede de comunicação sem fio M2M via redução de sinalizações de rede? Seria possível melhorar o gerenciamento de recursos de rede explorando o comportamento periódico de transmissão de dados dos dispositivos M2M ativos nas redes industriais?

1.1.1 Hipótese

Com base no problema de pesquisa descrito na subseção acima, desenvolve-se, então, uma hipótese de otimização das mensagens de sinalização da rede. A criação de um esquema de redução das mensagens de sinalização da rede que explore o comportamento periódico dos dispositivos M2M. Além disso, para fins de otimização do uso de recursos disponíveis na rede industrial, propõe-se a criação de um algoritmo de agendamento para esses dispositivos que possuem demandas cíclicas.

A proposta desenvolvida, nesta tese, envolve comunicação de dados entre dispositivos M2M no contexto industrial. Realizam-se melhorias nos algoritmos de agendamento de pacotes e sinalização de rede visando atender as demandas periódicas de dados dos sensores.

1.1.2 Motivação

A principal motivação deste trabalho está relacionada a sistemas de comunicação de dados M2M e o desafio de se aplicar essas propostas de melhorias de comunicação nas redes móveis 4G e 5G em cenários e aplicações industriais.

Garantir a qualidade de serviços (QoS) nas redes de comunicação M2M é um problema, pois quanto mais requisitos funcionais, maior será o consumo energético. Dessa maneira, deve ser realizado um balanceamento dos parâmetros mais importantes, mas o sucesso desse balanceamento depende, fundamentalmente, das soluções de *hardware*, *software*, comunicação e gerenciamento. Conforme (ROHDE; PUTZKE; WIETFELD, 2013), (DANIEL *et al.*, 2011) e (MIKÓ; NÉMETH, 2015), devem ser considerados, ainda, os custos, a área de cobertura e a

longevidade da rede.

1.1.3 Justificativa

Um dos principais desafios de pesquisa de comunicações sem fio M2M industriais é garantir que os sistemas de automação operem e mantenham um bom desempenho, com seus demais sistemas de supervisão de forma integrada, adaptável, robusta e tolerante a falhas. Esta proposta de tese vislumbra atuar na resolução de problemas relacionados à transmissão de dados nas redes M2M industriais e, para isso, pretende investigar se as atuais tecnologias de comunicação móvel são capazes de atingir as exigências das normas internacionais (IEC, 2014) e (IEC, 2015) para os cenários industriais sugeridos.

Adaptar e reconfigurar o sistema (*hardware*, sensores e comunicadores) é uma questão que pode ajudar a melhorar a transmissão de dados e atingir os requisitos das aplicações e serviços oferecidos pelos sistemas de automação. Atualmente, há algumas lacunas na comunicação sem fio M2M, problemas que podem afetar o processo de encaminhamento de dados. Por isso, existe a necessidade de que se estude as redes móveis com diferentes densidades de nós fixos e móveis, para tentar identificar e resolver os problemas de conectividade, robustez e confiabilidade.

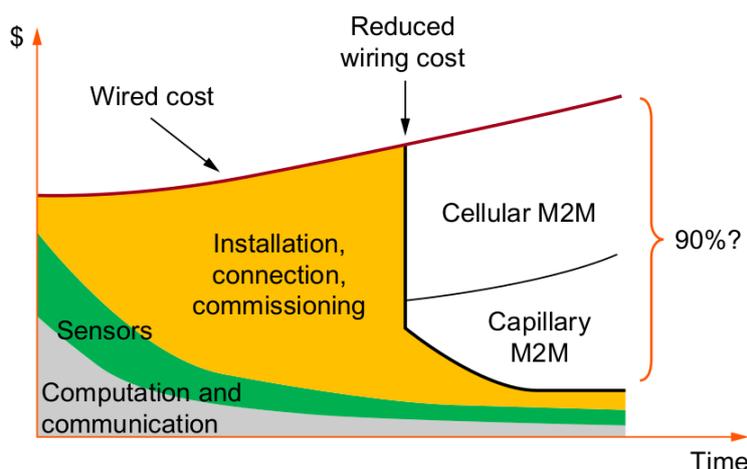
A comunicação sem fio M2M conecta sensores, atuadores, máquinas e objetos, gerando oportunidades de mercado e novas aplicações que estão diretamente relacionadas à conectividade desses dispositivos. Este mercado, por sua vez, é impulsionado por desenvolvimentos macroeconômicos que dependem da disponibilidade das referidas redes M2M. Conforme dito por (GARBIÉ, 2016) e (LU *et al.*, 2016), a mudança da comunicação para o formato sem fio torna possível a redução de custos e um rápido retorno do investimento. De acordo com a Figura 3, os avanços nessa tecnologia – que vão desde o fabricante de circuitos integrados a prestadores de serviços – são um grande impulso para o mercado e a indústria.

A Figura 3 apresenta a evolução dos custos de sistemas cabeados, considerando reposição, manutenção e inserção de novos cabos e conectores, bem como concentradores de cabos e os dispositivos finais. Ela também apresenta a evolução de custos dos sistemas de comunicação M2M sem fios, onde é possível perceber que os custos com novas infraestruturas de cabos, conectores, concentradores e cabeamento estruturado, praticamente, desaparecem. Em longo prazo, os custos se reduzem muito, além disso fazem com que o sistema M2M possua maior escalabilidade e facilidade de expansão.

1.2 Comunicação M2M em aplicações industriais

De acordo com (JESCHKE *et al.*, 2017), (ETSI, 2011) e (RATASUK *et al.*, 2015), processos industriais, tais como: refinarias, grandes usinas de processamento, controle de processos de alta confiabilidade, controle remoto de braços robóticos e veículos não tripulados, distribuição de energia elétrica e sistemas inteligentes de transporte são exemplos de casos de uso passíveis de serem executados, através dos sistemas de comunicação móvel sem fio de quinta geração.

Figura 3 – Redução de investimento da comunicação sem fio M2M.



Fonte: adaptada de (GARBIÉ, 2016)

Alguns desses exemplos que exigem comunicação com confiabilidade, baixa latência e alta disponibilidade são chamados de MTC (*Machine-Type Communication*) de missão crítica.

A comunicação M2M compõe uma grande parte dos novos tipos de serviços e casos de uso que os sistemas 5G irão prover. Do ponto de vista da tecnologia de comunicação sem fio, a MTC pode ser dividida em duas categorias principais: a mMTC (*massive Machine-Type Communication*) que está relacionada à conectividade de um grande número de dispositivos de baixo custo e baixo consumo energético e o MTC de missão crítica que é projetado para permitir controle e automação, em tempo real, de processos dinâmicos em vários campos, conforme (JESCHKE *et al.*, 2017) e (ETSI, 2011).

Segundo (IEC, 2014), a confiabilidade refere-se à capacidade de garantir transmissões de mensagens bem sucedidas dentro de um orçamento de latência definido. Os requisitos de confiabilidade variam entre os diferentes serviços MTC com um número massivo de dispositivos ou de missão crítica. A disponibilidade do sistema precisa garantir que, de acordo com as aplicações, não estejam em paralisação, quando forem solicitados.

Conforme (IEC, 2015), os sistemas de comunicação com fio têm sido amplamente implantados em automação industrial por um longo tempo. Embora os sistemas de comunicação sem fio não substituam todos os sistemas de comunicação com fio existentes, eles têm características especiais que os sistemas com fio não possuem.

Essas características podem proporcionar um enorme benefício para os sistemas de automação industrial, mas trazem novas preocupações, também, a serem resolvidas antes das implantações práticas. Portanto, as diferenças essenciais entre sistemas de comunicação sem fio e sistemas de comunicação com fio devem ser bem reconhecidas do ponto de vista de vantagens e preocupações.

1.2.1 Vantagens no uso de redes de comunicação sem fio

A propriedade mais essencial dos sistemas de comunicação sem fio é, naturalmente, que eles não precisam de fios para conectar os nós de comunicação uns com os outros. Esta característica não só economiza custo com fios, mas também pode reduzir o custo e o tempo de instalação do sistema de comunicação. Esta propriedade por si só permite novas aplicações, tais como um sistema de monitoramento para análise de processos e identificação de problemas, conforme apresentado nos casos de uso da tabela 1. Do mesmo modo, existem aplicações de comunicação com fios que são tecnicamente viáveis, mas não são práticas por razões econômicas, por exemplo, enlaces de longa distância para atender apenas alguns pontos de medição.

Uma vez que os sistemas de comunicação sem fio podem ser implantados em equipamentos móveis ou rotativos, eles devem, presumivelmente, ser usados para novas aplicações que não poderiam ser concebidas com sistemas de comunicação com fio. Equipamentos móveis sem fio, manuseados por trabalhadores de campo, é outra aplicação eficaz.

Os sistemas sem fio não devem ser vistos como um substituto geral para o cabo, mas, quando usados de forma direcionada, eles fornecem vantagens significativas em uma infinidade de aplicações industriais, se comparados aos sistemas conectados por cabo. Tais sistemas proporcionam benefícios qualitativos – maior facilidade de uso ou maior flexibilidade durante a instalação –, assim como benefícios quantificáveis - custos menores de instalação e manutenção –, conforme apresentado na tabela 1.

1.2.2 Preocupações com a implantação de sistemas sem fio

Embora os sistemas sem fio ofereçam a vantagem de não exigir instalação de fios, sua implementação coloca novos desafios. A mídia sem fio não possui um confinamento bem definido nem um confinamento visível. Portanto, o caminho e as características de propagação do rádio dependem fortemente das condições ambientais e a interferência de rádio pode vir de qualquer direção.

Múltiplos sistemas de comunicação sem fio precisam compartilhar um espaço comum como meio de comunicação. Uma banda de frequências particular não pode ser utilizada no mesmo espaço ao mesmo tempo por múltiplos sistemas de comunicação. Esta questão precisa ser resolvida, mantendo os requisitos para automação industrial.

Além disso, as colisões ocorrem no receptor, enquanto o transmissor é tipicamente incapaz de detectar que o receptor correspondente possui colisões.

1.2.3 Redes de comunicação em automação industrial

Existem muitos tipos de áreas de aplicação, onde sistemas de comunicação sem fio podem ser utilizados em automação industrial. Essas áreas de aplicação podem ser categorizadas por dois aspectos. Um aspecto é a camada de planta, em que o sistema de comunicação sem fio é implantado e o outro aspecto é o tipo de indústria, no qual o sistema é implantado.

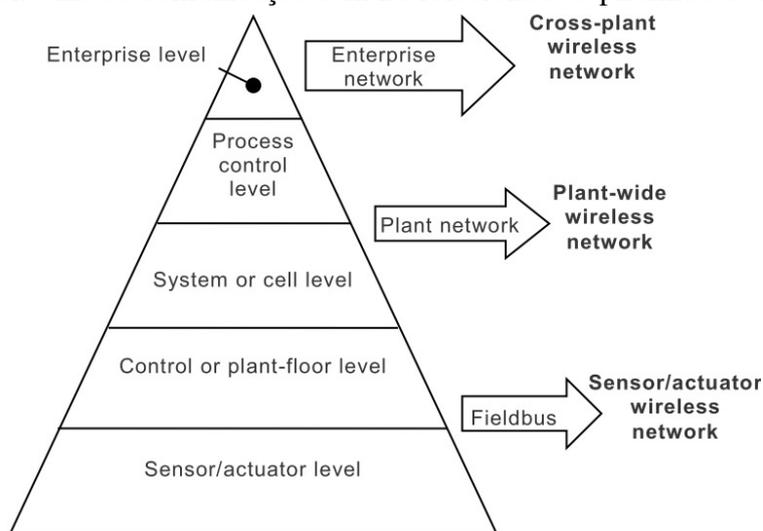
Tabela 1 – Benefícios do uso de comunicação sem fio.

Aplicações	Benefícios	Benefícios para o operador
Monitoramento de pontos de medição	Não há cabos de dados e, muitas vezes, não há cabos de energia no lado do dispositivo de campo.	* Pode ser ampliado facilmente;
Monitoramento de estações de medição móveis	Não há necessidade de instalação e remoção de cabos temporários.	Maior disponibilidade;
Máquinas de indexação rotativa, trocadores de ferramentas	Sem pontos defeituosos causados por condutores ou plugues soltos ou com defeito.	Maior flexibilidade;
Detecção de sinal em toda a planta	Conexão de sensores que são distribuídos ou difíceis de alcançar, bem como rápida conversão.	Maior qualidade do processo e do produto devido a sensores adicionais;
Monitoramento de corrosão, de solda de tubulação, vazamento e vibrações	Fiação física do sensor é impraticável (como ao longo de um tubo elevado 5m a 10m de altura).	Economia de custos durante a instalação e operação.

Fonte: adaptada de (IEC, 2014).

Em casos individuais, os requisitos, vantagens e benefícios dos sistemas sem fios são altamente dependentes da aplicação em consideração. É aconselhável, por isso, dividi-los em campos de aplicação. Isto permite comparações adequadas entre diferentes sistemas sem fios, e também soluções com fios. As redes de comunicação, para automação industrial, podem ser organizadas em torno da clássica pirâmide de automação apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Sistema de comunicação sem fio relacionado a pirâmide de automação.



Fonte: (IEC, 2014).

De acordo com (IEC, 2014) e (ETSI, 2011), as diferentes redes de comunicação são:

- *Cross-plant wireless network*: redes com um baixo número de componentes, com dispersão espacial grande e volumes de dados médios, para manutenção, monitoramento e controle remoto.
- *Plant-wide wireless networks*: redes com um número médio de componentes, com dispersão espacial limitada e volumes de dados que podem variar de pequenos a grandes, dependendo dos requisitos da aplicação.
- *Sensor/actuator wireless network*: redes baseadas em nós de sensores e atuadores operando no campo com pacotes de dados pequenos e um número muito alto de dispositivos.

A fase do ciclo de vida da instalação (comissionamento, manutenção, operação, etc.), em que o aplicativo sem fio é usado, também deve ser considerada, já que, possivelmente, tem requisitos específicos.

1.2.4 Redes sem fio de sensores e atuadores

De acordo com (IEC, 2014), a rede sem fios é, frequentemente, ligada através de *gateways* (conversores de protocolo) a outras redes, fibra ótica, por exemplo, pois se faz necessário

transferir dados de muitos dispositivos e com uma latência baixa. Diversas redes sem fio estabeleceram-se na automação industrial devido aos diferentes requisitos para automação de fábrica e automação de processo. Embora as redes de sensores e atuadores dentro da automação industrial geralmente usem um grande número de pequenos pacotes de dados em distâncias curtas com altas taxas de dados, o aspecto mais importante para os processos de automação é a transmissão sem fio segura em longas distâncias.

Para uma rede sem fio de sensores e atuadores, existem apenas alguns padrões de protocolo, até agora, que permitem interoperabilidade dos dispositivos de diferentes fabricantes. Os protocolos costumam usar padrões baseados em IEEE 802.15.4 (BURATTI *et al.*, 2011), como WirelessHART (CHEN; NIXON; MOK, 2010), (MÜLLER *et al.*, 2016), (WINTER *et al.*, 2016), WIA-PA (LIANG *et al.*, 2011), ISA100.11a (SEN, 2014) ou ainda protocolos proprietários. Os laços de controle são implementados na camada sensor / atuador. Por esta razão, latência de tempo é um parâmetro crucial a este nível. Os requisitos de tempo (latência, precisão de sincronização) podem ser muito rigorosos.

1.2.5 Requisitos da automação sem fio

De acordo com (IEC, 2014), (IEC, 2015) e (ETSI, 2011), os processos de automação possuem algumas características, tais como: periodicidade, dados baseados em eventos, taxas de dados em torno de 200 Kbits/s, baixa variação do atraso (*jitter*) e alta densidade de dispositivos. A tabela 2 apresenta uma comparação entre as aplicações industriais e seus requisitos técnicos de tempo.

Tabela 2 – Requisitos de tempo das aplicações industriais.

Aplicações industriais	Latência típica
Automação não crítica, por exemplo: sistemas empresariais	20 s
Gerenciamento de automação, por exemplo: fabricação, automação fabril	2 s
Automação geral, por exemplo: processos, usinas geradoras de energia	0, 2 s
Automação de tempo crítico, por exemplo: Atuadores sincronos	0, 01 s

Fonte: adaptada de (IEC, 2014).

Segundo (IEC, 2015), todos os sistemas envolvidos na automação industrial apresentam algumas restrições, por exemplo, o tempo de resposta, isto é, o tempo entre a entrada (estímulo) e a requerida saída (resposta), incluindo a disponibilidade de todas as saídas associadas. Obviamente, quão rápido o tempo de resposta tem que ser, dependerá das características da planta controlada.

Nas tarefas reguladoras, a latência possui prazo de entrega, tais prazos podem ser extrapolados devido ao *jitter* (variação do atraso). Já nas tarefas sequenciais, os atrasos retardam o funcionamento da planta, possivelmente, além do que a planta pode tolerar. Claramente, o atraso e *jitter*, devido à rede sem fio, deve ser menor que o valor limite capaz de afetar a estabilidade

ou o comportamento do processo que está sendo controlado. Além disso, a sincronização de tempo entre dispositivos sem fio pode ser necessária. A sincronização de tempo evita a perturbação mútua das comunicações e a utilização de marcas de tempo, adicionadas aos dados transmitidos, permitem que o comportamento temporal de uma estação seja desacoplado do atraso e *jitter* de comunicação. A sincronização de tempo pode ser conseguida alocando-se recursos de transmissão a estações, fazendo com que todos sigam uma agenda de transmissão de mensagens temporais. Implantada dessa forma, a sincronização de tempo é benéfica para evitar colisões, para ter um tempo de resposta correto e um aproveitamento melhor dos recursos de rede.

Se as aplicações industriais exigirem resultados em um tempo restrito, então o sistema de automação industrial deverá apresentar um comportamento temporal determinístico, caracterizando-se como sistemas de tempo real. Consequentemente, um sistema de comunicação, utilizado nesse sistema de automação industrial, deve fornecer a transferência de dados eficaz dentro dos limites de tempo, incluindo as retransmissões necessárias para corrigir erros de transmissão.

1.2.6 Limitações dos sistemas de comunicação no contexto industrial

A maioria dos padrões de comunicação sem fio industriais, atualmente, operam em bandas ISM (900 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz), as quais, muitas vezes, estão sobrecarregadas. O problema de coexistência de sistemas de comunicação requer planejamento de frequência, pois a interferência cocanal pode impossibilitar a garantia de QoS. Alguns desses sistemas de comunicação sem fio, tais como: *Zigbee*, *Bluetooth*, *WirelessHART* são baseados em tempos de latência entre 10 a 50 ms, e isso impossibilita que determinadas aplicações apresentadas sejam realizadas, em virtude de a latência ser muito alta para certas aplicações industriais. Além disso, a tendência é que essa latência aumente de forma linear com o volume de dados e de forma exponencial com o número de dispositivos, conforme apresentado nas Figuras 47 e 48 da Seção 3.2.

Algumas das seções anteriores detalham os requisitos e deixam claro que há sérias limitações de latência, *jitter*, taxas de dados, largura de banda e número de dispositivos conectados para as atuais tecnologias de comunicação M2M de quarta geração. As existentes tecnologias 3G não são capazes de cumprir com muitos dos requisitos das aplicações e cenários industriais pesquisados ao longo deste trabalho. Assim, faz-se necessário que seja realizada uma avaliação de desempenho das novas tecnologias de comunicação sem fio LTE-A dentro do contexto das aplicações industriais e cenários alvo.

1.3 Objetivos

Investigar e melhorar o desempenho da comunicação M2M industrial que utiliza os padrões de redes móveis LTE-A. Otimizar a forma de interação dos sensores industriais com a finalidade de adequar-se aos requisitos funcionais dos sistemas de comunicação industrial conforme (IEC,

2014) e (IEC, 2015). Utilizar um simulador para obter informações a respeito de todo o sistema de comunicação sem fio, sua viabilidade, desempenho e demais métricas de rede tais como: latência, *jitter*, percentual de sobrecarga de sinalização, utilização dos quadros, função de utilidade do sistema e outras.

1.3.1 Objetivos específicos

A tese tem como principais objetivos:

- Desenvolver algoritmos de agendamento de recursos, com a finalidade de melhorar o desempenho da rede;
- Desenvolver um esquema de redução de sinalizações de rede para dispositivos que demandem recursos periódicos;
- Validar os resultados do sistema de comunicação industrial simulado, garantindo confiabilidade estatística dos processos simulados.

1.4 Organização do texto

Este texto está organizado em seis partes. O Capítulo 1 é formado pela introdução. O Capítulo 2 comenta a revisão bibliográfica a respeito dos assuntos relacionados à pesquisa: comunicação M2M, redes móveis e os requisitos da comunicação industrial. No Capítulo 3, são apresentados os principais trabalhos relacionados à área. Explicita-se, no Capítulo 4, os métodos propostos de redução de sinalização e de agendamento periódico. No Capítulo 5, realiza-se a validação da proposta, além de mostrar e analisar os resultados de simulação. Por fim, expõem-se as conclusões e os trabalhos futuros a respeito do tema no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados assuntos relacionados à evolução das redes móveis, comunicação M2M, agendadores de recursos, sinalização de rede e sistemas de comunicação móvel. Os principais tópicos são: sinalização e agendadores de recursos de rede uma vez que se pretende avaliar o desempenho, os benefícios e as limitações de tais tecnologias em cenários industriais.

2.1 A evolução das redes móveis

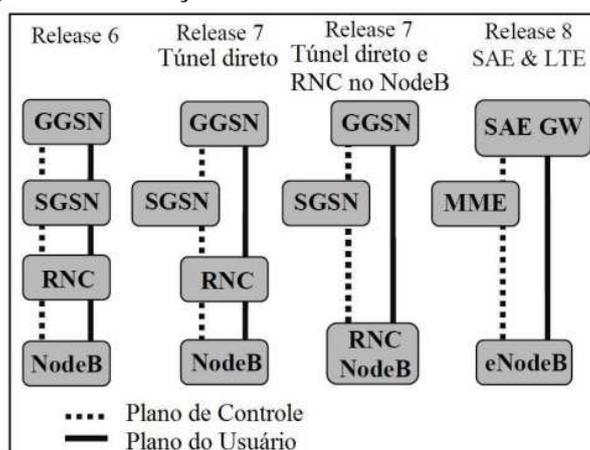
Segundo (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014), o desenvolvimento das redes móveis inicia-se na chegada do GSM em meados de 1990. Nessa época, os dispositivos apresentavam capacidade de processamento de dados significativamente inferior quando comparados aos atuais. Além desse fato, a RAN (*Radio Access Network*) possuía uma largura de banda limitada. Porém, com o passar dos anos, a arquitetura e as tecnologias de redes evoluíram, ocasionando também a evolução dos dispositivos móveis com a finalidade de acompanhar esse processo evolutivo.

De acordo com (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014), algumas das metas de evolução da RAN tais como: a redução da latência, o aumento de taxas de transmissão e a busca por uma arquitetura mais simples abriram oportunidades de aprimoramentos das redes móveis. A Figura 5 apresenta resumidamente a evolução da arquitetura de rede entre os *releases* 6 ao 8 do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

De acordo com (HOLMA; TOSKALA, 2009), o *release 6*, percebe-se que os elementos responsáveis pela comutação de pacotes, conexão com outras redes e gerência de recursos de rede são, nessa ordem, o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), SGSN (*Serving GPRS Support Node*) e RNC (*Radio Network Controller*), os quais suportam os planos de controle e do usuário. Segundo (HOLMA; TOSKALA, 2009), já no *release 7*, nota-se que o SGSN não comporta o plano de usuário e fornece suporte, exclusivamente, ao plano de controle, enquanto que as funcionalidades do RNC passam a ser realizadas pela *NodeB*.

(HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014) mostra que, no *release 8*, são definidos novos elementos da arquitetura de rede. O MME (*Mobility Management Entity*) torna-se responsável pela sinalização, incluindo funcionalidades de segurança e mobilidade dos dispositivos registrados na

Figura 5 – Evolução entre os Releases 6 e 8 do 3GPP.



Fonte: (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014)

rede LTE. O SAEGW (*System Architecture Evolution Gateway*) – combinação de S-GW (*Serving Gateway*) e P-GW (*Packet Data Network Gateway*) –, definido para o suportar o eNodeB (*Evolved NodeB*) e plano do usuário no EPC (*Evolved Packet Core*). Essa arquitetura é responsável pela gestão de mobilidade, retransmissões, compressão e protocolos de rádio. Observa-se que as mudanças do *release 8* sucederam na redução do número de elementos da arquitetura e, portanto, nós da rede. Esse tipo de melhoria de desempenho estrutural foi capaz de atingir uma redução da latência geral da rede LTE (OLSSON *et al.*, 2009).

A arquitetura de uma rede móvel LTE pode ser dividida em 3 partes, conforme a Figura 6: UE (*User Equipment*), E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), e EPC (*Evolved Packet Core*).

Além das alterações na arquitetura da rede móvel, o *release 8* definiu técnicas de transmissão de dados em que os receptores e os transmissores podem estar equipados com múltiplas antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e as técnicas de múltiplo acesso SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) para o *uplink* e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para *downlink*. Essas evoluções permitiram taxas de transmissão de dados mais elevadas em comparação ao *release 7* e uma considerável redução da latência (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014).

Um passo importante na evolução do sistema de comunicação móvel LTE ocorreu no *release 10*, também conhecido como *LTE-Advanced*. Essa versão ampliou e aprimorou a tecnologia de acesso por rádio LTE em vários aspectos. A técnica de CA (*Carrier Agregação*) foi um dos recursos definidos que ajudaram a proporcionar avanços tais como: a possibilidade do uso de espectro fragmentado, aumento da largura de banda e, portanto, maiores taxas de transferência de dados quando comparado com as *releases* anteriores. A Tabela 3 apresenta, de forma resumida, as principais características que foram propostas pelos *releases* de 9 até 12.

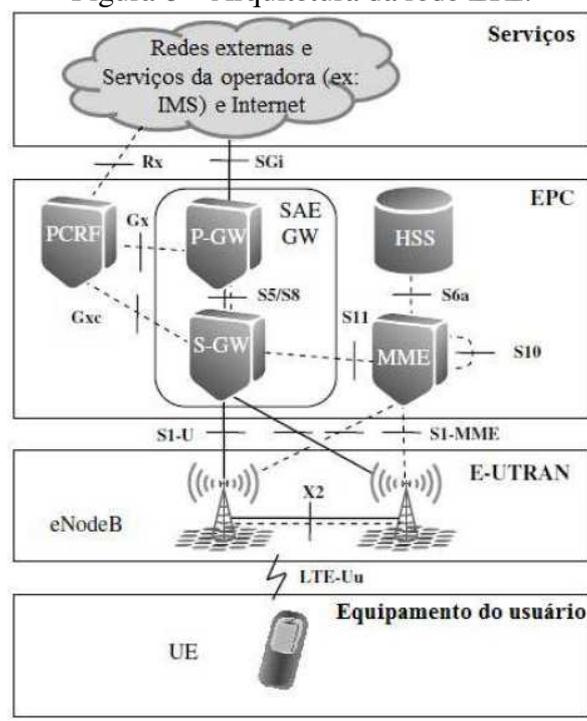
As especificações propostas no *release 13* tendem a atender as expectativas crescentes da experiência dos usuários da rede LTE em termos de latência, confiabilidade e taxas de dados,

Tabela 3 – Evolução do *releases 9* ao *release 12* do 3GPP.

Versão	Data de lançamento	Características principais
<i>Release 9</i>	Outubro de 2009	<p>HeNB (Home eNodeB).</p> <p>Otimização do canal de acesso aleatório.</p> <p>Entrega eficiente de um mesmo conteúdo multimídia para vários destinatários.</p> <p>Serviços de identificação e localização de um dispositivo móvel</p>
<i>Release 10</i>	Fevereiro de 2011	<p>Taxas de 3Gb/s <i>downlink</i> e 1,5Gb/s <i>uplink</i>.</p> <p>CA (<i>Carrier Aggregation</i>) - combinação de até 5 portadoras e largura de banda de até 100 MHz.</p> <p>Transmissão com múltiplas antenas: até 8 no <i>downlink</i> e 4 no <i>uplink</i>.</p> <p>HetNets (Heterogeneous Networks): células de tamanhos variados.</p> <p>Melhorias de desempenho nas bordas devido ao controle coordenado de interferência entre as estações rádio base.</p>
Release 11	Julho de 2012	<p>Melhorias nas técnicas de CA, MIMO e controle e coordenação de interferência entre as células.</p> <p>Novas bandas de frequência.</p> <p>Transmissão e recepção multiponto: comunicação simultânea com várias células.</p>
Release 12	Março de 2015	<p>Operações com <i>small cells</i>.</p> <p>Configuração de CA <i>inter-band</i> para <i>uplink</i>.</p> <p>Novas técnicas de recepção para <i>macrocells</i>.</p> <p>Interatividade entre LTE e WiFi.</p>

Fonte: adaptada de (HAIDINE; EL HASSANI, 2016)

Figura 6 – Arquitetura da rede LTE.



Fonte: adaptado de (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014)

que são alguns dos desafios na evolução do LTE. Além disso, não apenas altas taxas de dados são desejáveis, mas a disponibilidade do uso de dados com baixa latência em qualquer lugar. Nesse âmbito, a expansão para novos casos de uso e aprimoramentos do *release 13* incluem:

- Melhorias na técnica de CA.
- Melhorias na técnica de múltiplas antenas (MIMO).
- Redução da latência.
- Expansão do MTC (*Machine Type Communication*).

Numa aplicação M2M, há de se esperar que uma quantidade considerável de dispositivos se comunique utilizando a rede móvel LTE e, segundo (HAIDINE; EL HASSANI, 2016), há uma tendência que essa quantidade aumente, simultaneamente, com a evolução das *releases* do LTE.

De acordo com (HAIDINE; EL HASSANI, 2016), a tecnologia MTC baseia-se na ideia de que as máquinas possam se comunicar diretamente sem intervenção humana. Assim, essa tecnologia possibilitaria aplicações tais como: controle automático de processos, sensoriamento remoto, monitoramento de segurança, rastreamento de ativos da empresa entre outros.

Hoje em dia, a comunicação MTC torna-se acessível até mesmo para alguns dispositivos que, há alguns anos, não foram projetados com essa finalidade, tais como: veículos, televisores, medidores de água, energia elétrica, gás encanado, e esses exemplos tendem a aumentar. Essa demanda remete ao conceito de IoE (*Internet of Everything*) e à perspectiva de criação de um

ambiente mais inteligente e numa sociedade mais conectada e com dados acessíveis. Fato esse que se encaminha através do aumento do número de sensores e máquinas presentes na rede móvel.

De acordo com (HOLMA; TOSKALA; REUNANEN, 2016), com a expansão de dispositivos MTC, é possível que alguns deles sejam instalados em lugares com cobertura deficiente. Dessa maneira, o *release 13* padronizou uma nova categoria de dispositivos que necessita de largura de banda reduzida, e que propõe melhorias na cobertura da rede de dispositivos MTC. Em termos de largura de banda, o *release 13* tinha como objetivo permitir que os dispositivos operassem em qualquer banda LTE, por isso, a fim de melhorar a cobertura, buscou aprimorar em 15dB o alcance do sinal dos dispositivos MTC tolerantes a atrasos, viabilizando o acesso das operadoras a tais dispositivos mesmo em condições precárias de comunicação. Essas melhorias foram possibilitadas mediante técnicas de repetição adicional, controle de potência e algumas simplificações nos canais de controle e sinalização (JOVOVIĆ; FORENBACHER; PERIŠA, 2015).

Segundo (HAIDINE; EL HASSANI, 2016), há evoluções em cada novo *release* lançado. Percebe-se, claramente, que são propostas inovações e melhorias dos serviços e recursos existentes nas novas releases que estão sendo projetadas. Dessa forma, o sistema de comunicação móvel LTE vem evoluindo e tem consolidado a sua capacidade, eficiência e serventia como plataforma social de comunicação que fornece comunicação de dados para qualquer usuário e demais dispositivos M2M.

2.2 Comunicação M2M

De acordo com (ANTON-HARO; DOHLER, 2014), a comunicação M2M refere-se a tecnologias que permitem aos sistemas, tanto com fio quanto sem fio, comunicarem-se com outros dispositivos que possuam a mesma habilidade. Tal comunicação foi, originalmente, obtida com uma rede remota de equipamentos transmitindo informação coletada do chão de fábrica a fim de ser monitorada, analisada, podendo ser, depois, utilizada por algum outro dispositivo, por exemplo, um controlador.

A comunicação M2M permite a conectividade entre máquinas de forma autônoma, confiável e econômica. Essa conectividade foi alcançada por meio de fios, principalmente, no contexto do controle industrial e automação, mas algumas opções sem fio, que apareceram nos últimos anos, oferecem vantagens comerciais notáveis, contudo também sofrem falhas. Embora o impacto sobre as economias e as sociedades, em todo o mundo, seja indiscutível, as tecnologias, que facilitam essa conectividade, recentemente, começaram a ser padronizadas.

De acordo com (CAO; JIANG; HAN, 2016), a escolha de soluções com fio versus sem fio é debatida na indústria M2M. Os produtos sem fio são atraentes, quando comparados aos cabeados, por sua relativa facilidade de implantação. Contudo as soluções com fio podem garantir cobertura em locais de difícil acesso para o rádio. O principal desafio para soluções

M2M sem fio, em comparação com a cabeada, é o consumo de energia e o custo do rádio contra o custo dos cabos de comunicação, concentradores e a manutenção deles.

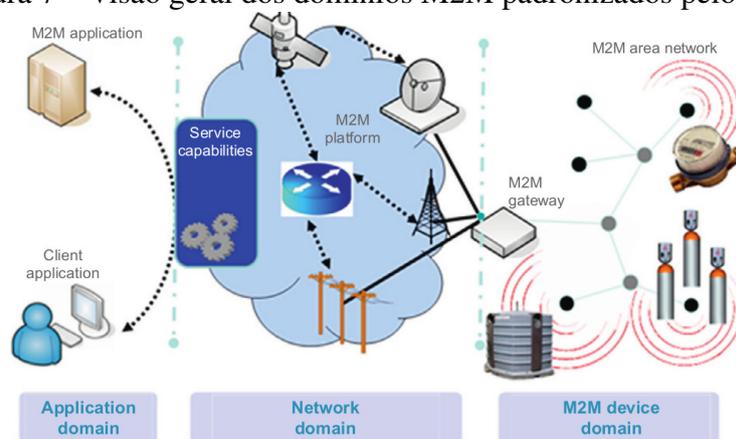
Os serviços M2M têm requisitos diferentes. Uma única solução padronizada, para todos os requisitos de consumo de energia, alcance, mobilidade e outros, é a chave para a escolha bem-sucedida que garante a meta de custo para a solução M2M do mercado de massa. As soluções para implantação em grupos isolados são baseadas em redes pessoais sem fio (WPAN), como *ZigBee*, *Bluetooth* e *6LoWPAN*. Atualmente, soluções baseadas em tecnologias de comunicação móvel sem fio (redes celulares), como as desenvolvidas pelo 3GPP, possivelmente, serão mais adequadas aos serviços M2M que exigem mobilidade e uma ampla abrangência de comunicação.

2.2.1 Organizações de padronização

O ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) produz padrões globais de TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação), incluindo tecnologias móveis, fixas, convergentes, rádio, internet e *broadcast*. No ETSI, a maior parte do trabalho de padronização na área M2M é conduzida dentro do comitê técnico de comunicação M2M.

O comitê técnico foi criado, em 2009, com o objetivo de garantir que os serviços M2M, implantados em todo o mundo, sejam interoperáveis. A Figura 7 fornece uma visão geral da arquitetura M2M do ETSI, junto com os domínios previstos, nomeadamente, aplicação, rede e dispositivo (RAYES; SALAM, 2017).

Figura 7 – Visão geral dos domínios M2M padronizados pelo ETSI.



Fonte: (CAO; JIANG; HAN, 2016)

Segundo (RAYES; SALAM, 2017), o comitê técnico ETSI define uma camada de capacidade de serviço ou SCL (*Service Capability Layer*) sobre as camadas de conectividade. Desse modo, para o domínio de rede, utiliza as tecnologias móveis existentes, tais como: redes 2G, 3G, LTE e LTE-A, outras redes fixas ou por satélite. Da mesma forma, para o domínio da rede de área M2M, depende-se da disponibilidade de tecnologias de comunicação sem fio de curto alcance, como 802.11a/b/g/n/ac, *ZigBee*, *Bluetooth* ou ainda PLC (*Power Line Communications*). A ETSI lançou, em 2012 e 2013, a primeira e segunda versões, respectivamente, do seu padrão

M2M. As principais especificações desta norma são: a descrição dos requisitos de serviço, a arquitetura funcional e as interfaces de comunicação.

O 3GPP é responsável pelo desenvolvimento e manutenção do GSM (*Global System for Mobile Communications*), do UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e suas evoluções LTE e LTE-A, assim como, é responsável pelas especificações do IMS (*Internet Protocol Multimedia Subsystem*). Portanto, o 3GPP é o principal órgão de padronização mundial, no que diz respeito à definição das comunicações móveis M2M. Diferentemente do ETSI, o 3GPP lida com sistemas e protocolos específicos. Um elevado número de grupos de trabalho, por exemplo, o TSG (*Technical Specification Group*) para RAN (*Radio Access Network*), ou seja, o grupo de especificação técnica para as redes de acesso por rádio contribui, muito ativamente, para as otimizações relacionadas à comunicação M2M em redes LTE e LTE-A. A priorização de tópicos e atividades é discutida em itens de aperfeiçoamentos de sistemas para comunicação tipo de máquina.

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) introduziu diversas melhorias, em sua interface aérea, para sistemas de acesso sem fio de banda larga (isto é, IEEE 802.16), a fim de suportar aplicativos M2M mais eficazmente. Com essa finalidade, duas emendas (IEEE 802.16p e 802.16.1b) foram desenvolvidas pelo grupo de tarefas M2M do IEEE 802.16. Complementarmente, o grupo de trabalho IEEE 802.15 para WPAN desenvolve padrões para redes sem fio de curto alcance compostas, por exemplo, de assistentes digitais pessoais (PDAs), telefones celulares e, em geral, dispositivos móveis e de computação. Em particular, um dos grupos investiga soluções de taxa de dados baixa, com duração de bateria de vários meses a vários anos e muito baixa complexidade. Os adendos *e*, *g* e *k* do IEEE 802.15.4 são, particularmente, relevantes para as comunicações M2M e atingiram maturidade a partir de 2014.

Já no setor de padronização do ITU-T (*International Telecommunication Union Telecommunication*), o grupo de trabalho, relacionado à camada de serviço M2M, foi criado em 2012 e finalizado em 2013. Ele foi responsável pelo estudo dos requisitos e especificações de uma camada comum de serviços M2M, protocolos e aspectos de API (*Application Programming Interface*). A estratégia era reutilizar o máximo possível o que já foi especificado por outras organizações de padronizações. No entanto, essa camada de serviço é destinada a suportar diferentes domínios de aplicação, tais como: *smart grids*, cibermedicina e automação industrial.

O comitê de engenharia de comunicações de dispositivos inteligentes da TIA (*Telecommunications Industry Association*) é encarregado de desenvolver padrões de interface para comunicação de eventos e informações entre sistemas M2M e dispositivos inteligentes, aplicações e redes.

Finalmente, o estudo conduzido por vários grupos de trabalho da IETF (*Internet Engineering Task Force*) é relevante para os sistemas M2M. Esses grupos abordam aspectos das chamadas redes capilares, ou seja, além do *gateway* M2M na arquitetura do ETSI, incluem os grupos de trabalho relacionados a ROLL (*Routing over Low-Power and Lossy networks*), CoRE (*Constrained REstful Environments*), MEXT (*Mobility EXTensions for IPv6*) e outros assuntos das redes

WPAN.

Durante este capítulo, algumas dessas tecnologias propostas pelas organizações de padronização serão discutidas em seções posteriores, onde os aspectos técnicos relacionados às redes móveis LTE-A serão apresentados. Destacam-se os trabalhos, em curso, das principais organizações de padronização que estão desenvolvendo diferentes alternativas que devem ser consideradas tanto pela academia quanto pela indústria.

2.2.2 Requisitos das aplicações industriais

As capacidades de uma rede de comunicação industrial são especificadas através de indicadores e métricas. Os indicadores são usados para identificar se os dispositivos envolvidos estão atendendo aos requisitos da aplicação. Segundo (IEC, 2014), introduzir indicadores de desempenho que dizem respeito à rede de comunicação, é considerada uma boa prática para aplicações de automação industrial.

Os parâmetros característicos que representam os indicadores de desempenho são especificados em (ETSI, 2011), (IEC, 2014) e (IEC, 2015). Os valores ou intervalos de valores dos parâmetros que permitem avaliar a rede de comunicação em relação ao tempo e à capacidade de coexistência são os seguintes:

- Tempo de transmissão;
- Tempo de atualização - *jitter*;
- Taxa de transmissão de dados.

Para esses parâmetros característicos, devem ser utilizados valores estatísticos para descrever os requisitos ou caracterizar um sistema de comunicação sem fio. Os parâmetros estatísticos relevantes são um valor médio ou a moda para especificar o centro, o desvio padrão ou um percentil 95 %, para especificar a variação do parâmetro característico.

A especificação e avaliação de sistemas de comunicação sem fio é o tema de atividades de pesquisa, em andamento, que inclui parâmetros como disponibilidade, sincronização e tempo de recuperação de redundância. O objetivo é o desenvolvimento de medida para uma aplicação orientada, independente da tecnologia sem fio, especificação quantitativa de requisitos de comunicação da aplicação e uma avaliação de soluções de comunicação sem fio.

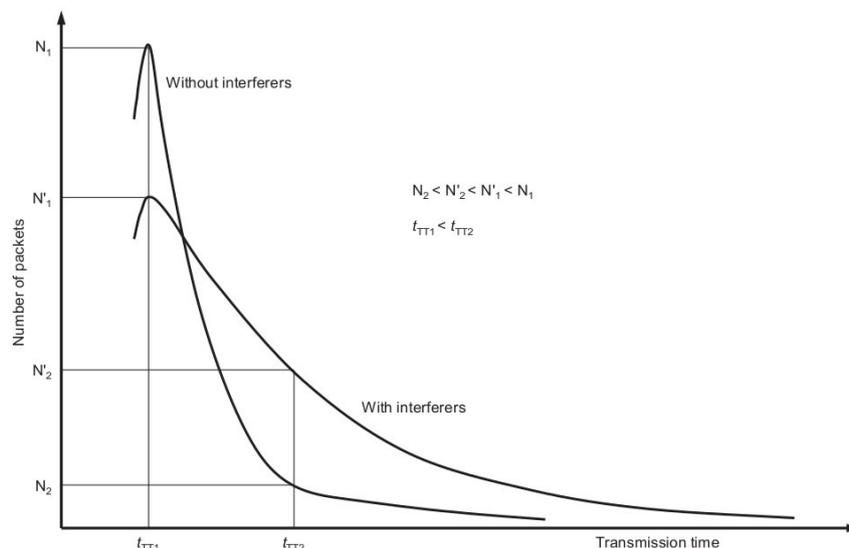
2.2.2.1 Tempo de transmissão

O tempo de transmissão é um instrumento adequado, para avaliar a coexistência em termos de aplicação de automação com transferência de eventos. Um bom exemplo é a transmissão de uma mudança de estado em um sensor. O tempo de transmissão é uma variável aleatória que representa o intervalo desde o início da entrega do primeiro *byte* de dados de um produtor até à entrega do último *byte* de dados na interface de comunicação de um consumidor. Isso é

importante, porque os tempos de transmissão dependem altamente das condições externas de transmissão na comunicação sem fio.

A Figura 8 exemplifica as funções de densidade dos tempos de transmissão de soluções de rádio resultantes de medições com um grande número de amostras. As funções de densidade representam o número de pacotes necessários a um determinado tempo de transmissão.

Figura 8 – Exemplo das funções de densidade do tempo de transmissão.



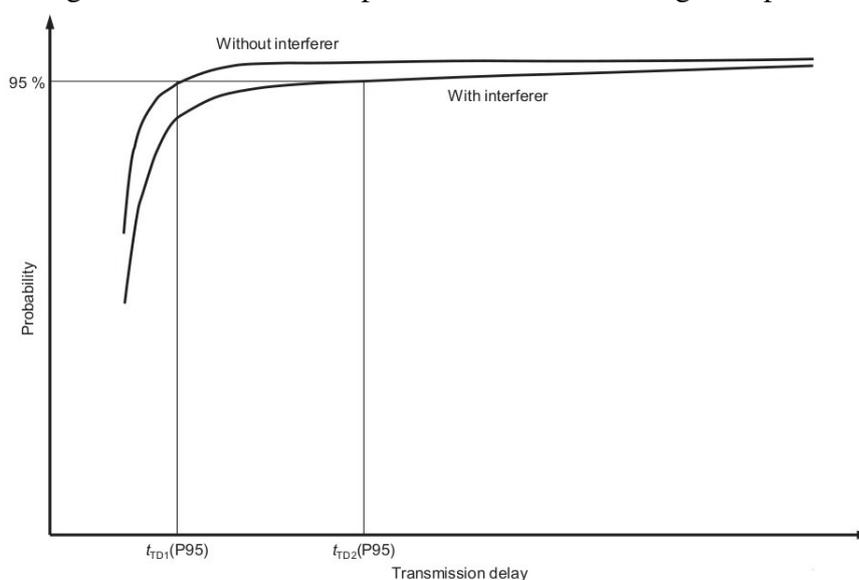
Fonte: (IEC, 2015)

Normalmente, o número de pacotes com um tempo de transmissão maior, por exemplo t_{TT2} , aumenta de $N2$ para $N2'$, se outras soluções sem fios interferirem. Por outro lado, o número de pacotes com um tempo de transmissão menor, por exemplo t_{TT1} , diminui de $N1$ para $N1'$, se outras soluções sem fios interferirem. As causas podem ser, por exemplo, tempos de espera para um meio livre ou retransmissões devido a perdas de pacotes.

A Figura 9 mostra um exemplo das funções de distribuição do tempo de transmissão. As duas curvas mostram o número de pacotes recebidos que chegam dentro de um determinado tempo de transferência.

Na determinação metrológica dos valores de tempo de transmissão, o parâmetro estatístico pode ser determinado a partir da amostra. As alterações nos parâmetros estatísticos, dependendo da presença de outras aplicações de rádio, são uma medida da força de influência na solução de rádio. Para essa avaliação relativa, os parâmetros de distribuição são instrumentos adequados, por exemplo, o percentil. O percentil $P95$ é um valor comum (ver Figura 9). Em 95 % de todas as transmissões esse valor não é excedido. A experiência mostra que o valor $P95$ é um compromisso sensato entre o tamanho da amostra exigida e as informações significativas. Outros parâmetros de distribuição estatística podem, no entanto, ser consultados. Esses parâmetros de distribuição (por exemplo percentil $P95$) não são idênticos ou relacionados à eficiência da planta.

Figura 9 – Percentual de pacotes recebidos ao longo tempo.



Fonte: (IEC, 2015)

Seria necessário um valor máximo de tempo de transmissão, para obter um resultado absoluto na coexistência, comparando esse valor de tempo com um limite requerido pela aplicação. No entanto, o valor máximo de uma determinada medição não é equivalente ao tempo de transmissão máximo absoluto. O valor máximo medido tem uma certa probabilidade que pode ser calculada, caso as equações funcionais das curvas, na Figura 8 e 9 sejam conhecidas. A confiabilidade do cálculo depende do tamanho da amostra da medida em que as equações funcionais são baseadas.

Além disso, o valor máximo para o tempo de transmissão pode ser avaliado, analiticamente, levando para todos os segmentos de tempo o valor máximo. Este valor máximo não é adequado para avaliar a coexistência, porque, nesse caso, para os segmentos de tempo influenciados por outras aplicações de rádio, o valor máximo deve ser tomado também.

O atraso de acesso médio deve ser considerado no tempo de transmissão. A unidade deste parâmetro deve ser em segundos.

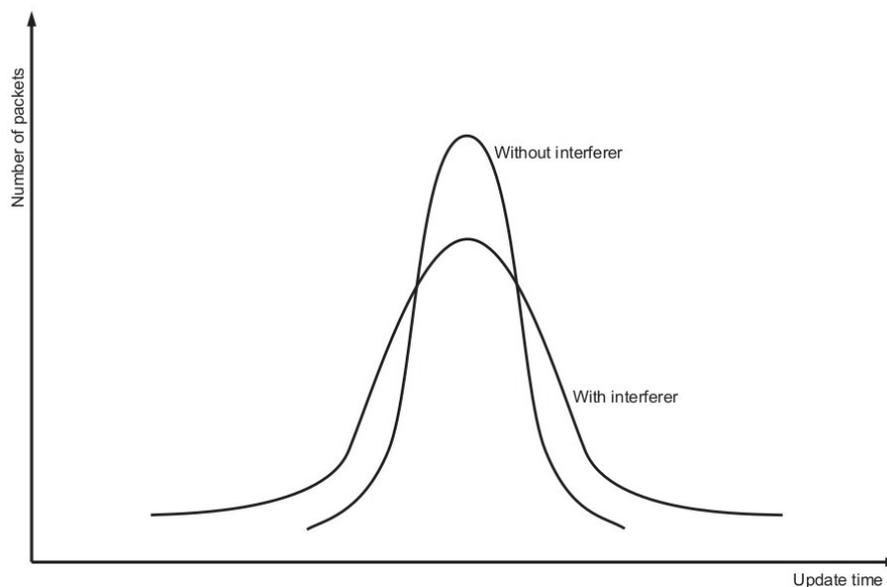
2.2.2.2 Tempo de atualização - jitter

O tempo de atualização é o intervalo entre a entrega do último *byte* de dados do pacote de um produtor, a partir da interface de comunicação de um consumidor para a aplicação de automação, até a entrega do último *byte* de dados do seguinte pacote do mesmo produtor. Ele pode ser usado para avaliar casos de automação com transferência cíclica. A transferência cíclica de um sistema de monitoramento pode servir de exemplo.

Os sinais interferentes resultam em distribuição do tempo de transmissão. A coexistência permanece, enquanto os pacotes transmitidos mantêm um valor limite para a distribuição do tempo de atualização, dado pela aplicação de automação. O tempo de atualização é uma variável aleatória. A Figura 10 mostra um exemplo de funções de distribuição do tempo de atualização.

O desvio padrão pode ser consultado como um parâmetro da distribuição, a fim de verificar, relativamente, o comportamento do tempo de atualização de uma aplicação de rádio.

Figura 10 – Exemplo de funções de distribuição do tempo de atualização.



Fonte: (IEC, 2015)

Um intervalo máximo do tempo de atualização, chamado de *jitter*, seria necessário para conseguir um resultado absoluto na coexistência, comparando esse valor de tempo com um limite exigido pela aplicação. No entanto, a extensão máxima de uma determinada medição não é equivalente à extensão máxima absoluta do tempo de atualização. A extensão máxima tem uma certa probabilidade que pode ser calculada, se as equações funcionais das curvas da Figura 10 forem conhecidas. A confiabilidade do cálculo depende do tamanho da amostra da medida em que as equações funcionais são baseadas. A unidade desse parâmetro deve ser segundos.

2.2.2.3 Taxa de transmissão de dados e largura de banda

A taxa de transferência de dados é o número de *bytes* de dados utilizáveis, transferidos dentro de um consumidor, a partir da interface de comunicação para a aplicação por unidade de tempo. Essa taxa é relevante para a transferência de grandes quantidades de dados (por exemplo, a transmissão de enormes conjuntos de dados de parâmetros para unidades ou o *download* de programas em dispositivos de campo complexos). Para avaliar a coexistência, pode-se utilizar o valor médio de uma série de medições, em comparação com um valor dado pela aplicação de automação.

Para compreender os requisitos de largura de banda e taxa de *bits* é útil definir o modelo de entrega de dados — isto é, características de tráfego — de um sistema de comunicação sem fios utilizado na automatização industrial. Geralmente, são utilizados dois modelos de entrega de dados diferentes:

- Dados cíclicos (periódicos ou temporizados). Aqui os dados provenientes ou indo para o

campo têm um comportamento cíclico, mostrando, assim, requisitos de largura de banda bem definidos, tanto determinista quanto previsível. Além disso, a atualização cíclica dos dados é um parâmetro importante, uma vez que os dados mais recentes tornam obsoleto o antigo, ou seja, o tempo de vida é curto. Esse modelo é usado para o controle, onde os dados relativos às quantidades de entrada de controle são adquiridos, periodicamente, todos ao mesmo tempo e depois despachados antes do próximo passo.

- Dados acíclicos (aperiódicos ou desencadeados por eventos). Esse tipo de tráfego, que abrange todas as camadas da planta, quase sempre é gerado por eventos autônomos, por exemplo, alarmes. Podem existir rajadas de eventos que exigirão um serviço prioritário, para permitir a solução dos acontecimentos mais críticos. Claramente, existe uma relação estrita entre a largura de banda disponível, a taxa de bits real e o desempenho de temporização da solução de comunicação sem fios.

Segundo (ETSI, 2011) e (IEC, 2014), para resolver uma grande parte dos problemas das aplicações de automação industrial, é indispensável ter um espectro dedicado disponível com pelo menos 76 MHz de largura de banda, mas esse espectro não precisa necessariamente ser contíguo. Essa quantidade de espectro é baseada na suposição de um número típico de dispositivos por planta e um tráfego de dados típico. O tráfego de dados típico para transmissão cíclica e acíclica de dados pode, por exemplo, combinar vários canais para atingir, pelo menos, essa largura de banda de 76 MHz.

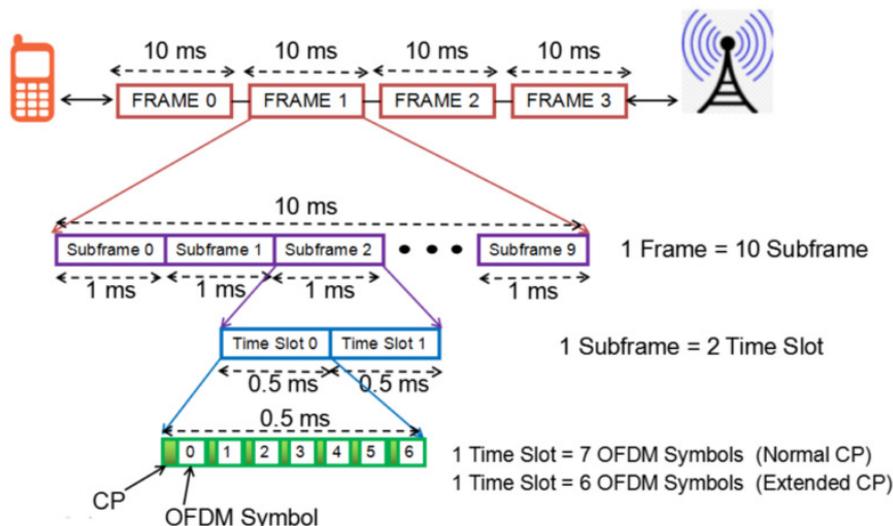
O espectro pretendido de 76 MHz de largura de banda deve estar disponível acima de 1,4 GHz, a fim de reduzir o impacto de radiadores não intencionais, tais como máquinas de soldar a arco, para permitir a cobertura de grandes áreas e garantir baixo custo e disponibilidade de rádio. Vários canais (na ordem de dez) devem estar disponíveis para assegurar robustez ao sistema contra a presença de interferências e outras soluções de comunicação sem fio colocadas. O número real de canais disponíveis depende não só da taxa de *bits*, mas também das técnicas de acesso aos canais, dos esquemas de modulação e codificação. Por exemplo, os sistemas de salto de frequência são baseados num elevado número de canais de faixa estreita, enquanto que as técnicas de sequência direta de espalhamento espectral baseiam-se em alguns canais de banda larga.

2.3 Estrutura do quadro de comunicação 4G

De acordo com (KREHER; GAENGER, 2010), a estrutura do quadro de comunicação do sistema LTE-A é dividido em 10 *subframes* com duração de $1ms$, totalizando $10ms$. Um *subframe* também é a unidade mais importante de escalonamento junto com o canal de controle físico, o PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) é encontrado nos três primeiros símbolos OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) de cada *subframe*. Além disso, os *subframes* são divididos em dois *slots* de $0,5ms$, isso significa que temos 20 *slots* em um quadro

e um *slot* é composto por 7 símbolos OFDM. A Figura 11 mostra a estrutura genérica de um quadro de rádio.

Figura 11 – Estrutura genérica do quadro do sistema LTE-A.



Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

As estruturas de quadros para o sistema de comunicação móvel LTE-A diferem entre os modos FDD (Frequency Division Duplex) e TDD (*Time Division Duplex*), pois há diferentes requisitos na segregação dos dados transmitidos. Nas duas subseções a seguir são apresentados esses tipos de estrutura de quadros para o sistema de comunicação móvel LTE-A.

2.3.1 Estrutura do quadro tipo LTE-A FDD

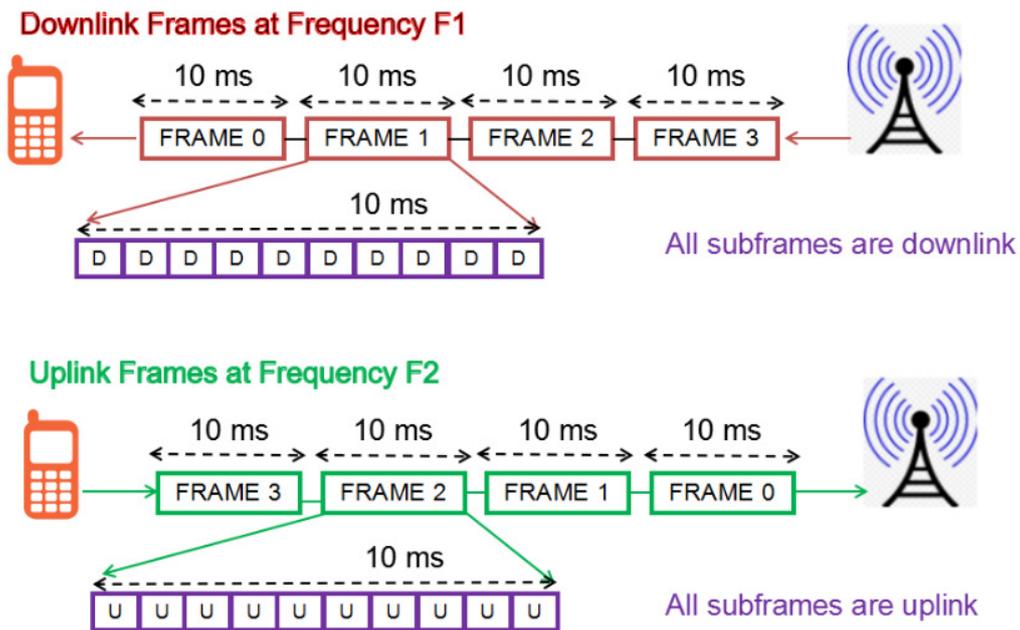
A estrutura de quadro do tipo FDD forma um sistema *full duplex*, isto significa que o envio e o recebimento de dados ocorrem ao mesmo tempo, porém em frequências diferentes. A Figura 12 mostra um quadro do tipo FDD (Frequency Division Duplex) com 10 *subframes downlink* em uma faixa de frequências F1 e outros 10 *subframes uplink* em uma faixa de frequências F2, ambos ocorrendo simultaneamente.

Esse formato de quadro é o mais eficiente, quando se fala das métricas de latência, *jitter* e taxas de transmissão, pois os usuários não precisam esperar períodos de tempo predefinidos, para que possam enviar ou receber dados, o que ocorre nos casos de divisão por tempo (TDD).

2.3.2 Estrutura do quadro tipo LTE-A TDD

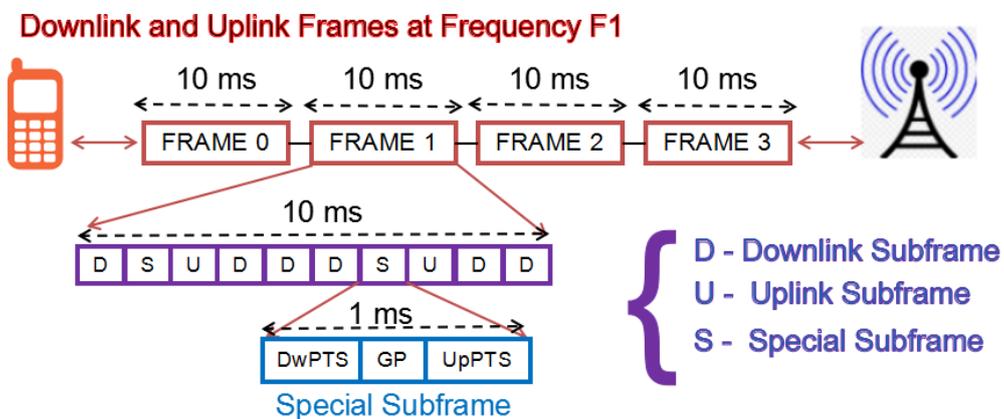
Na estrutura de quadro do tipo TDD, a transmissão é dividida no domínio do tempo, isso significa que, em um momento, ou o *subframe de downlink* ou *uplink* é transmitido. A Figura 13 mostra um quadro do tipo TDD (Time Division Duplex) com 10 *subframes*, em que parte deles são de *downlink*, *uplink* ou possuem uma função especial.

Figura 12 – Estrutura FDD do quadro do sistema LTE-A.



Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

Figura 13 – Estrutura TDD do quadro do sistema LTE-A.



Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

Devido aos *subframes downlink* e *uplink* não ocorrerem ao mesmo tempo, o sistema LTE-A definiu diferentes configurações possíveis para a estrutura de quadro TDD. Assim, o sistema pode optar por ter mais *subframes downlink* ou *uplink* de acordo com a sua necessidade. A Figura 14 mostra as diferentes configurações que podem ocorrer em um quadro do tipo TDD (*Time Division Duplex*).

Figura 14 – Diferentes configurações do quadro TDD do sistema LTE-A.

Uplink–downlink configuration	Downlink–uplink switch-point periodicity (ms)	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

S = Switching point.

Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

Um *subframe* especial ocorre quando há transição entre *subframes* *downlink* para *uplink*. Ele é dividido em três partes:

- DwPTS (*Downlink Pilots Time Slot*)
- GP (*Guard Period*)
- UpPTS (*Uplink Pilots Time Slot*)

Essas três partes do *subframe* especial são fundamentais para sincronização e identificação da posição dos *subframes*. Essas partes do *subframe* especial possuem comprimentos configuráveis, que são apresentados pela Tabela 4 .

Tabela 4 – Possíveis configurações do *subframe* especial

Configuração	Número de símbolos OFDM / <i>subframe</i>		
	DwPTS	GP	UpPTS
0	3	10	1
1	9	4	1
2	10	3	1
3	11	2	1
4	12	1	1
5	3	9	2
6	9	3	2
7	10	2	2
8	11	1	2
9	6	6	2

Fonte: adaptada de (HOLMA; TOSKALA; TAPIA, 2014)

2.4 Recursos de rede

O sistema de comunicação móvel LTE-A define e divide o canal de comunicação em subportadoras físicas OFDM. Os sistemas OFDM modulam todos os dados no domínio da frequência nas suas subportadoras. Uma subportadora modulada, define um recurso ou RE como a menor unidade lógica do espectro LTE-A. Uma subportadora ou RE tem uma largura de banda de 15 KHz no modo normal e estendido. Todos os canais físicos LTE-A usam REs para modular os dados. Cada RE do canal compartilhado de dados utiliza um esquema de modulação que varia de QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) até 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), conforme designado pelo processo de programação da estação rádio base também chamada de eNB.

Os REs carregam um número variável de bits de dados devido à ordem de modulação, mas também em virtude da codificação aplicada. Os esquemas de codificação são usados para tornar a transmissão de dados mais robusta contra erros de transmissão. Eles adicionam redundância à informação transmitida, o que aumenta a probabilidade de o receptor recuperar a informação livre de erros. Esse conjunto de esquemas de codificação e modulação é chamado de MCS.

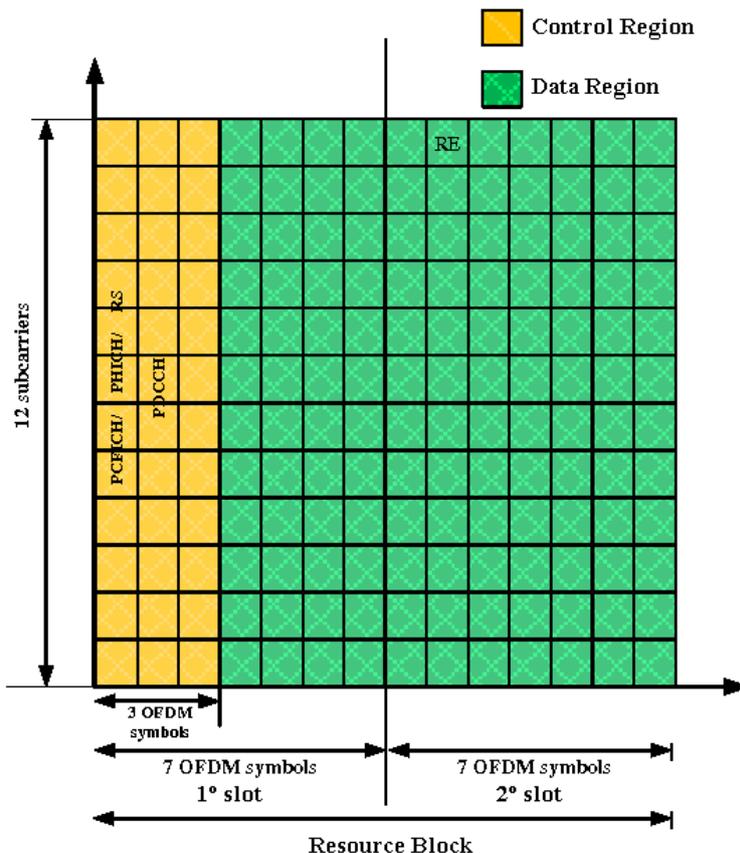
O menor recurso de dados usado pelo algoritmo de agendamento é definido como um RB. Portanto, a transmissão mínima do usuário agendada nos canais compartilhados é um RB. Um RB consiste em 12 REs adjacentes no eixo de frequência, conseqüentemente, ele possui uma largura de banda de 180 kHz, já que um RE tem 15 kHz de largura. Numa perspectiva de tempo, um RB possui o período de um *subframe* que engloba 1ms de duração e está dividido em dois *slots* de 0,5 ms. São transmitidos 14 símbolos OFDM ao decorrer de um *subframe*, portanto um RB é formado por 12 REs ao longo desses 14 símbolos, totalizando 168 REs. Já um *slot* é formado por 12 REs ao longo de 7 símbolos OFDM, ou seja, metade do tamanho de um RB, conforme apresentado pela Figura 15.

O sistema LTE-A permite que os dispositivos possuam mais de uma antena de transmissão e recepção. A adição dessas antenas caracteriza uma técnica espacial denominada MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Dessa forma o sistema LTE-A aumenta sua capacidade de transmitir RBs, quando antenas extras são adicionadas. A Figura 16 mostra a área bidimensional (frequência e tempo) de um RB para 1, 2 e 4 antenas.

Os sinais de referência são necessários para o processo de estimativa de canal que possui como um de seus objetivos ajudar a corrigir a distorção de canal no receptor. Cada antena de transmissão possui um conjunto de sinais de referência específico, quando ocorrem transmissões que utilizam múltiplas antenas, esses conjuntos não podem se sobrepor. Esses conjuntos podem ser observados nas cores, vermelho, azul, amarelo e verde na Figura 16.

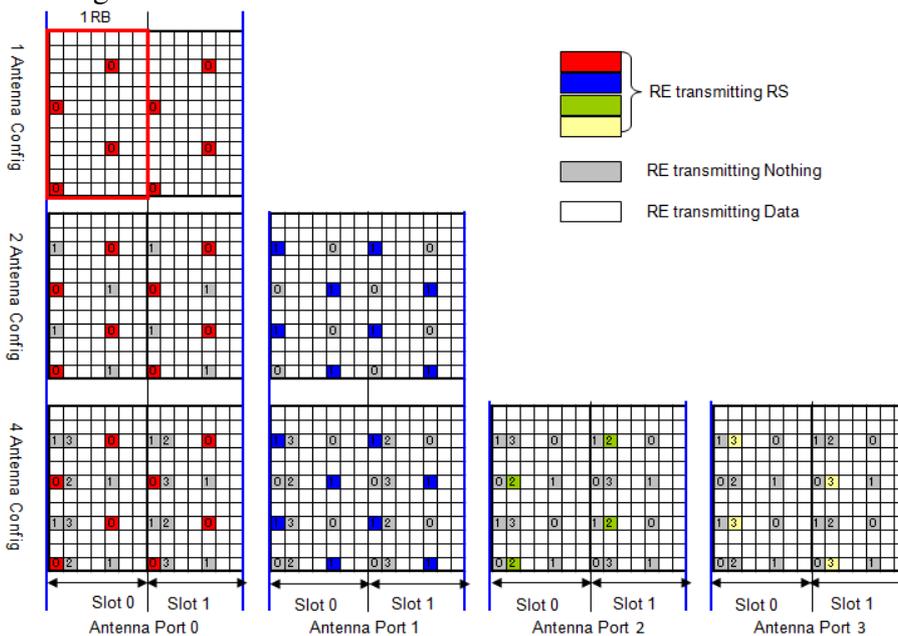
O receptor precisa conhecer as condições de propagação de cada antena de transmissão para usufruir plenamente dos ganhos espaciais do MIMO. Portanto, um sinal de referência é transmitido, individualmente, de cada antena de forma completamente independente e todas as outras antenas de transmissão não transmitem quaisquer sinais nesses REs.

Figura 15 – Recursos de rede do sistema LTE-A.



Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

Figura 16 – Recursos de rede do sistema LTE-A com MIMO.



Fonte: (KREHER; GAENGER, 2010)

2.5 Sinalização de rede

Segundo (PROAKIS; SALEHI, 2008), a sinalização é a troca de informações entre dispositivos envolvidos na rede que configura, controla e encerra cada transmissão de dados. Esse tipo de sinalização também pode ser considerada uma pequena sobrecarga de dados, mas que se faz necessária para que a transmissão seja executada com sucesso. A sinalização, normalmente, ocorre dentro do próprio quadro de comunicação (*frame*), ou seja, está no mesmo canal que os demais dados transmitidos. Na maioria das tecnologias de comunicação digital existentes, a sinalização possui local predefinido, dentro do quadro de comunicação, reservado para as finalidades de configuração e controle das transmissões de dados. Alguns exemplos são:

- Espaços reservados para CQI (*Control Quality Information*) que enviam dados relativos à SNR dos usuários, dentro do quadro de comunicação, com a finalidade de configurar os esquemas de modulação e codificação dos usuários, elevando assim, automaticamente, a robustez de transmissão em casos de baixa SNR.
- Espaços reservados para mapeamento de dados, os quais indicam a posição das rajadas de dados dos usuários no quadro de comunicação.
- Espaços reservados para HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) definidos para confirmação de falha ou recebimento da rajada de dados.
- Espaços reservados para que os usuários, conectados à rede de comunicação sem fio, possam requisitar transmissão de dados.

Conforme (PROAKIS; SALEHI, 2008) e (RAPPAPORT, 2010), nos sistemas de comunicações de múltiplo acesso sem fios, o conjunto de recursos de canal, por exemplo, os *time slots* ou *resource data unit* (conjunto de subportadoras em um intervalo de tempo), são compartilhados por todos os usuários conectados, isto é, os dispositivos móveis que estão associados a uma ERB particular. A alocação e agendamento eficiente desses recursos de canal são muito importantes, pois impactam diretamente a utilização dos recursos de canal e a QoS que pode ser percebida pelos usuários do sistema.

Os próprios sistemas de comunicação organizam os recursos. A cada usuário pode ser atribuído um número diferente de recursos baseando-se em quanta informação eles têm para enviar e também em que tipo de condição de canal encontram-se. A camada física controla isso, através da sinalização, que é responsável por agendar os recursos de acordo com as requisições de transmissão realizadas pelos usuários.

2.6 Canais de sinalização e controle

Esta seção descreve os canais de sinalização e controle do sistema LTE-A, os quais estejam diretamente interligados ao sistema de agendamento de dados dos dispositivos da rede. Esses

canais de sinalização e controle ocorrem tanto em *subframes downlink* – transmitidos pelas ERBs como em *subframes uplink* – transmitidos pelos dispositivos presentes na rede 4G. Entretanto, os canais de controle e sinalização *downlink* possuem diferentes finalidades, quando comparados aos canais de sinalização e controle *uplink*.

2.6.1 Canais de sinalização Downlink

Dentro dos *subframes downlink* observam-se, principalmente três canais de sinalização e controle que estão diretamente envolvidos com o agendamento de recursos de rede.

2.6.1.1 Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)

Esse canal tem a finalidade de indicar o formato do canal de controle, isto é, informa aos dispositivos da rede sobre o formato e tamanho da região de controle que está sendo transmitido no *subframe* atual. Indica o número de símbolos OFDM iniciais no *subframe* utilizados para o PDCCH, o qual tem seu tamanho variável e pode ocupar 1, 2 ou 3 símbolos OFDM. A informação no PCFICH é essencial, porque os dispositivos da rede não possuem informação prévia a respeito do tamanho da região de controle e sinalização.

2.6.1.2 Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

O principal canal de controle e sinalização do sistema LTE-A é o PDCCH e o objetivo deste é transportar as informações de agendamento codificadas como DCI (Downlink Control Information). O DCI não apenas transmite as atribuições dos RBs e seus tipos de atribuição, mas também outras informações necessárias para o mapeamento, transmissão e recepção de dados. Essas informações são, por exemplo, o tamanho e localização dos RBs agendados para os usuários nos *subframes downlink* e *uplink*, a MCS dos RBs agendados para cada usuário, instruções de controle de potência para transmissão do canal de controle do *uplink* e outros.

2.6.1.3 Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)

Este canal de controle e sinalização HARQ (*Hybrid automatic repeat request*) é utilizado para confirmar o recebimento ACK (*Acknowledge*) ou não recebimento NACK (*Negative Acknowledge*) das transmissões de *uplink* de um dispositivo.

2.6.2 Canais de sinalização Uplink

2.6.2.1 Physical Uplink Control Channel (PUCCH)

Esse canal do *uplink* fornece várias informações de sinalização de controle que incluem a capacidade de transmitir: solicitações de recursos *uplink*, confirmação de recebimento de pacotes via HARQ, indicador matricial de pré-codificação usado com transmissões MIMO, indicador de qualidade de recepção (CQI) e também indicação de classificação.

2.7 A importância dos algoritmos de agendamento

De acordo com (PINEDO, 2016), o agendamento é um método capaz de organizar as tarefas e os recursos necessários para completar um trabalho. Na computação, normalmente, os trabalhos são definidos como processamento ou transmissão de dados. Nos sistemas de comunicação, os algoritmos de agendamento são implementados com a finalidade de garantir alguns critérios tais como: equidade, distributividade e eficiência, permitindo que vários usuários compartilhem os recursos de rede, a fim de que todos possam atingir a qualidade de serviço desejada. Assim, os algoritmos de agendamento são de fundamental importância para a realização dos trabalhos de transmissão de dados em um sistema de comunicação.

Segundo (PINEDO, 2016), os principais objetivos dos algoritmos de agendamento são:

- atingir o tempo de resposta requisitado;
- alcançar a taxa de dados requisitada;
- minimizar as oscilações e variações de atraso;
- manter razoável equidade entre as diferentes classes de tráfego;
- alocar e distribuir recursos com eficiência.

Os algoritmos de agendamento podem visar a um ou mais desses objetivos, por exemplo: minimizar o tempo de resposta, maximizar a equidade (distribuição de recursos para os dispositivos), ou maximizar a taxa de dados. Porém, na prática, essas metas geralmente entram em conflito (por exemplo, taxa de dados e latência), portanto, um agendador implementará um compromisso adequado. A preferência é medida por qualquer uma das preocupações acima mencionadas, dependendo das necessidades e objetivos dos serviços presentes na rede industrial. Cabe salientar que em ambientes industriais, como sistemas de monitoramento, os algoritmos de agendamentos devem garantir que os dispositivos sejam atendidos de acordo com os requisitos de tempo e *deadline*.

Nas subseções seguintes, serão apresentados alguns algoritmos de agendamento estado da arte utilizados como referência na comparação com o algoritmo de agendamento periódico proposto, o qual será descrito em seções posteriores. Os algoritmos de agendamento estado da arte foram escolhidos com base nas pesquisas e metodologias de (ERPEK; ABDELHADI; CLANCY, 2015), (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a), (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c), (PINEDO, 2016) e (SHAJIAH; ABDELHADI; CLANCY, 2017) e demais trabalhos correlatos que serão discutidos no capítulo posterior.

2.7.1 *Priority Class Scheduling*

O agendador PCS (*Priority Class Scheduling*) delimita prioridades fixas para as classes de tráfego, implicando, conforme (PINEDO, 2016), que os usuários com classe de tráfego de

maior prioridade sejam atendidos antes e, possivelmente, substituam outras classes de tráfego de menor prioridade. Para esse agendador, uma requisição é definida pelos seus requisitos temporais, não por sua importância ou sua integridade. Daí, presume-se que as classes de tráfego possuam requisitos de tempo previamente conhecidos. As demandas são periódicas com períodos conhecidos, porém cada classe de tráfego possui demandas independentes umas das outras, assim, definindo o modelo de tráfego periódico.

No entanto, esse esquema de agendamento precisa contornar sua vulnerabilidade quanto às classes de maior prioridade causarem bloqueio de agendamento nas demais classes: uma vez que a prioridade é dada para os usuários das classes de tráfego com prioridade mais alta, os demais usuários de menor prioridade podem esperar uma quantidade indefinida de tempo (preempção). Os dispositivos M2M da classe de tráfego ED (*Event Driven*) possuem transmissões esporádicas, aperiódicas e um *deadline* máximo de chegada, o qual deve ser respeitado. Essas demandas são solucionadas usando um método dinâmico que monitora o tempo das solicitações. Desse modo, cria-se um coeficiente de envelhecimento responsável por incrementar, gradualmente, a prioridade das demandas menos privilegiadas que continuam em espera na fila, garantindo, assim, que todas as demandas sejam atendidas.

2.7.2 *Max-Weighted Scheduling*

Segundo (PINEDO, 2016), o algoritmo MWS (*Max-Weighted Scheduling*) realiza um procedimento para agendar as demandas de dados numa rede de comunicação, visando maximizar a taxa de dados total, latência ou alguma outra métrica da rede. Isto é, ele prioriza e agenda os fluxos de dados que possuem maior peso primeiro. Caso a prioridade seja a taxa de dados, os dispositivos que possuem melhores condições de canal e SNR terão uma MCS capaz de transmitir mais dados num mesmo RB, consumindo assim, menos RBs por quantidade de dados transferida.

Em sistemas de comunicação móvel como o LTE-A, utiliza-se o MWS para aproveitar as condições de canal favoráveis para fazer melhor uso das condições de rádio disponíveis. O agendamento, nesse caso, tenta alcançar a máxima taxa de dados, algo que pode ser tentador nesse contexto, especialmente, quando esse é o objetivo da aplicação estudada. No entanto, o agendamento MWS que maximiza a taxa de transferência de dados nem sempre é desejável. Esse tipo de agendamento, dependendo das condições de canal, deve ser usado com cuidado.

Se houver grandes diferenças entre os pesos de cada usuário, o que em geral é o caso sobretudo em redes sem fio, os recursos podem ser atribuídos, em sua maioria, para um pequeno conjunto de usuários com condições privilegiadas de canal. Se houver muitos dispositivos ativos na rede, a maior parte deles deverá aguardar até que os de maior peso não tenham mais dados para transmitir e, dessa forma, sofrerão um agravamento de atraso, taxa de dados, satisfação e certamente perda da QoS.

Uma política de agendamento MWS pode ser tentadora, já que otimizaria a utilização de recursos de toda a rede, mas, provavelmente, não seria aquela mais justa com todos os

usuários, pois os níveis de satisfação e QoS da maior parte dos usuários permaneceria abaixo dos requisitos esperados. Além disso, supostamente, alguns dispositivos enfrentariam problemas de intermitência nas suas transmissões.

2.7.3 *Weighted Round Robin*

Segundo (PINEDO, 2016), o algoritmo de agendamento WRR (*Weighted Round Robin*) percorre a fila de requisições fornecendo, por sua vez, recursos de rede proporcionais ao peso (W_k) definido para cada classe de tráfego k . Se a quantidade total de recursos de rede é conhecida por N , uma classe de tráfego receberá W_k oportunidades dentro desses N recursos, ou seja, receberá uma quota de tamanho relativo W_k/N . A quota mínima é obviamente $1/N$ e a máxima é N/N . Portanto, o peso de cada classe de tráfego k pode ser indicado pela equação 1:

$$\frac{W_1}{N} + \frac{W_2}{N} + \dots + \frac{W_k}{N} = 1 \quad (1)$$

A otimização do agendamento é dada pelo conjunto de pesos ponderados de forma não preemptiva, ou seja, quando não há dispositivos ativos numa determinada classe de tráfego k , sua parcela de recursos é distribuída, proporcionalmente, de acordo com os pesos W_k das demais. Então, utilizando o agendador WRR, as requisições de dados tendem a terminar em ordem decrescente de W_k .

A Figura 17, na qual cada dígito 1 representa uma oportunidade de transmissão para um dispositivo daquela classe de tráfego k , ajuda a compreender o agendador WRR. A próxima questão a ser resolvida refere-se ao peso de cada classe de tráfego. A pesquisa de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2018) sugere que os pesos do algoritmo WRR sejam calculados por meio das equações 2 e 3:

Figura 17 – Oportunidades dadas pelo agendador WRR.

		Traffic classes W_i/N quotas			
RESOURCE BLOCKS		$1/15$	$2/15$	$4/15$	$8/15$
1	.....	0	0	0	1
2	.....	0	0	1	0
3	.....	0	0	0	1
4	.....	0	1	0	0
5	.....	0	0	0	1
6	.....	0	0	1	0
7	.....	0	0	0	1
8	.....	1	0	0	0
9	.....	0	0	0	1
10	.....	0	0	1	0
11	.....	0	0	0	1
12	.....	0	1	0	0
13	.....	0	0	0	1
14	.....	0	0	1	0
15	.....	0	0	0	1

Fonte: adaptada de (PINEDO, 2016)

$$C_k = \left(1 - \frac{D_k T_k}{\sum_{j=1}^k D_j T_j}\right) \quad (2)$$

$$W_k = \frac{C_k N}{\sum_{j=1}^k C_j} \quad (3)$$

sendo D_k o tempo máximo de atraso tolerado, T_k o tamanho médio dos pacotes e k o número total de classes de tráfego, percebe-se que essa sugestão define que, quanto menores forem o tamanho médio do pacote e o tempo máximo de atraso tolerado, maior será o peso da classe de tráfego.

2.7.4 *Weighted Fair Scheduling*

De acordo com (JOUTSENSALO *et al.*, 2003) e (PINEDO, 2016), o algoritmo de agendamento WFS (*Weighted Fair Scheduling*) pode garantir que as requisições ativas obtenham um serviço diferenciado de acordo com o peso de cada classe de tráfego. As filas de requisições são organizadas de forma justa e ponderada baseadas no peso de cada classe de tráfego. A principal vantagem desse agendador é ser rápido, confiável e fácil de implementar. O WFS segue estes critérios principais:

- Filas dedicadas para cada fluxo, onde os pacotes são organizados reduzindo o atraso e o *jitter* na fila;
- Alocação de largura de banda de forma justa entre todas as requisições, reduzindo o atraso de agendamento e garantindo a QoS.

Para fins de agendamento, no WFS, o comprimento da fila não é medido em requisições, mas no tempo que levaria para transmitir todas as requisições da fila. O WFS adapta o número de requisições e aloca quantidades iguais de largura de banda para cada uma. Requisições de pacotes pequenos, que geralmente são fluxos interativos (sensores e controladores), recebem um serviço melhor, porque não precisam de muita largura de banda. Eles precisam ter um atraso baixo, porque os pacotes menores têm um prazo de tempo menor. Isso, de certa forma, está de acordo com as aplicações industriais as quais são foco dessa pesquisa.

O WFS manipula n fluxos é configurado com um peso W_k para cada fluxo. Então, o fluxo F_k alcançará uma taxa média de dados dada pela equação 4:

$$F_k = \frac{W_k R}{(W_1 + W_2 + \dots + W_n)} \quad (4)$$

sendo R a taxa de dados do enlace. A maioria dos agendadores de justiça proporcional tenta manter a QoS para todos os dispositivos presentes na rede. Se uma determinada classe de tráfego possuir requisitos muito restritos, um limite de atraso ou *jitter* podem ser estabelecidos. Os pesos do algoritmo WFS são calculados utilizando as equações 5:

$$W_k = \left(1 - \frac{D_k R_k}{\sum_{j=1}^k D_j R_j}\right) \quad (5)$$

em que D_k é o tempo máximo de atraso tolerado, R_k a taxa de dados mínima da classe e k o número total de classes de tráfego, percebe-se que esse algoritmo define que quanto menores forem a taxa de dados mínima e o tempo máximo de atraso tolerado, maior será o peso da classe de tráfego.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta tese envolve muitos conceitos diferentes, mas, principalmente, redes industriais sem fio de quarta geração (LTE-A), agendamento e M2M. Então, a metodologia, para a revisão da literatura, foi dividida em partes. Primeiramente, fez-se uma varredura sobre livros e trabalhos que utilizam M2M e redes de comunicações sem fio LTE-A para transmissão dos dados. Depois, pesquisou-se sobre o que tem sido desenvolvido e melhorado no âmbito da redução de sinalização nas redes M2M e algoritmos de agendamento periódico. As pesquisas foram realizadas empregando as seguintes bases de dados: *Google Scholar*¹, *Scopus*² e periódicos da CAPES³. O refinamento da pesquisa levou em conta publicações e autores com um grande número de citações, assim como, a nota do *webqualis* da publicação e a relevância das revistas e conferências na área de pesquisa.

A Tabela 5, localizada no final do capítulo, resume os trabalhos relacionados, pesquisados nas bases de dados. Há uma descrição básica dos problemas que os trabalhos referenciados abordam. Outros artigos importantes para a formação do conhecimento também foram utilizados na construção do capítulo anterior (Fundamentação Teórica), mas alguns desses não foram incluídos na respectiva tabela, pois não estavam diretamente relacionados com os objetivos de pesquisa.

3.1 M2M e as redes LTE-A

Pesquisas como as de (BOCCARDI *et al.*, 2014) e (RATASUK *et al.*, 2015) descrevem as tecnologias que podem levar a alterações do projeto de infraestrutura e suas componentes disruptivas: arquiteturas centradas em dispositivo, ondas milimétricas, múltiplas antenas, dispositivos inteligentes e suporte nativo para comunicações M2M. As ideias principais de cada tecnologia são descritas, juntamente, com seu potencial impacto sobre as redes 5G. Esses trabalhos da mesma forma mostram que provavelmente um conjunto destas soluções tornem-se a base da comunicação 5G. Além disso, (BOCCARDI *et al.*, 2014) e (RATASUK *et al.*, 2015) fazem uma avaliação da capacidade de comunicação dos dispositivos M2M, usando simuladores de

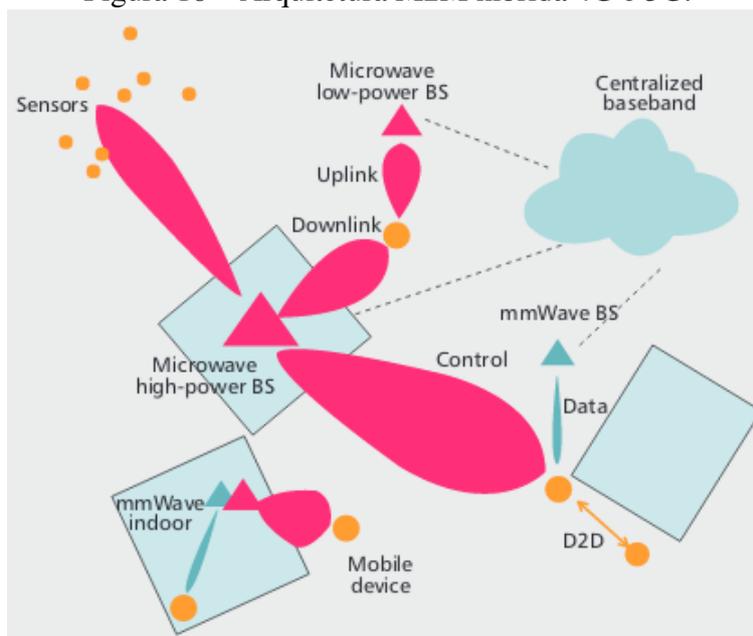
¹<http://scholar.google.com/>

²<http://www.scopus.com/>

³<http://www.periodicos.capes.gov.br/>

comunicação móvel LTE. A Figura 18 mostra uma arquitetura M2M híbrida 5G que usa 4G como auxiliar. A visão dessa arquitetura mostra que um dispositivo pode se comunicar, através de múltiplos fluxos de dados oriundos de nós heterogêneos. Em outras palavras, o conjunto de enlaces que fornece conectividade a um determinado dispositivo, em uma determinada sessão de comunicação, deve ser adaptados a esse dispositivo e sessão específicos, de acordo com suas condições de rádio.

Figura 18 – Arquitetura M2M híbrida 4G e 5G.



Fonte: (BOCCARDI *et al.*, 2014)

Esses trabalhos analisam e preveem o desempenho de QoS e alocam de forma adaptável largura de banda sem fio apropriada para acomodar mais sessões dos dispositivos sem degradação de QoS. Eles descrevem alguns dos grandes problemas apresentados nas atuais redes M2M, tais como:

1. Transmissão em massa
2. Confiabilidade insuficiente
3. Prioridade de acesso a rede
4. Consumo de energia
5. Mobilidade
6. Endereçamento de um grande número de dispositivos
7. Transmissão com controle de tempo

8. Grandes taxas de dados
9. Transmissões tolerantes a falhas
10. Latência extremamente baixa
11. Transmissão intermitente

Esses trabalhos também mencionam que é necessário desenvolver novas tecnologias, interfaces de comunicação, arquitetura de rede e plataformas que se adaptem ao crescimento e às necessidades das aplicações M2M.

Conforme visto, pela ampla gama de usos, o setor industrial precisa de uma solução M2M escalável e econômica que irá suportar uma variedade de aplicativos e dispositivos M2M. O acesso à rede deteriora-se, quando o número de dispositivos cresce, e o aumento dos dispositivos M2M representa grande preocupação para a capacidade da rede. Nesse sentido, esses trabalhos apresentam a possibilidade de utilização de uma arquitetura de comunicação híbrida como alternativa de solução. A arquitetura proposta suporta diferentes tipos de protocolos sem fio, já presentes no mercado, além das *small-cells* com ondas milimétricas o que poderia auxiliar na capacidade da rede, na eficiência espectral e na implantação de novos dispositivos e serviços.

A Figura 19 apresenta um cenário urbano de simulação relacionado a casas inteligentes que possuem dispositivos M2M. Nessa figura cada ERB (Estação Rádio Base), é representada por um ponto verde. Essa ERB possui três setores que são representados pelos hexágonos. Dentro de cada um deles existem dispositivos que são representados pelos pontos vermelhos. Segundo (BOCCARDI *et al.*, 2014), a solução confiável adequada envolverá a combinação de várias tecnologias dentro do 4G, 5G, bem como WPANs. Algumas dessas tecnologias de comunicação sem fio que estão sendo desenvolvidas, provavelmente, irão se tornar viáveis nos próximos anos, porém, elas ainda precisam ser testadas quanto ao cumprimento dos requisitos das diferentes aplicações M2M.

Relacionado a essas arquiteturas híbridas 4G e 5G presentes no trabalho de (BOCCARDI *et al.*, 2014) as Figuras 20 e 21 apresentam resultados da simulação de uma comparação de antena única, múltiplas antenas e o uso de ondas milimétricas. Percebe-se uma melhora com o uso de múltiplas antenas e um salto de desempenho com o uso de ondas milimétricas.

Segundo (BOCCARDI *et al.*, 2014), sempre que os dispositivos da rede 5G estiverem com boas condições de canal, em relação os pontos de acesso *mmWave*, eles serão os enlaces escolhidos, pois além de serem mais rápidos quanto à latência, possuem maior capacidade de transmissão de dados. Percebe-se na, Figura 21, que os enlaces *mmWave* que tem um maior número de antenas de transmissão apresentam um percentual maior de taxa de dados transmitidos.

Segundo as conclusões do trabalho de (RATASUK *et al.*, 2015), futuras pesquisas podem incluir a avaliação do desempenho dos sistemas de comunicação 5G, com um grande número de dispositivos M2M, tentando descobrir quais as limitações de tais sistemas. Os autores

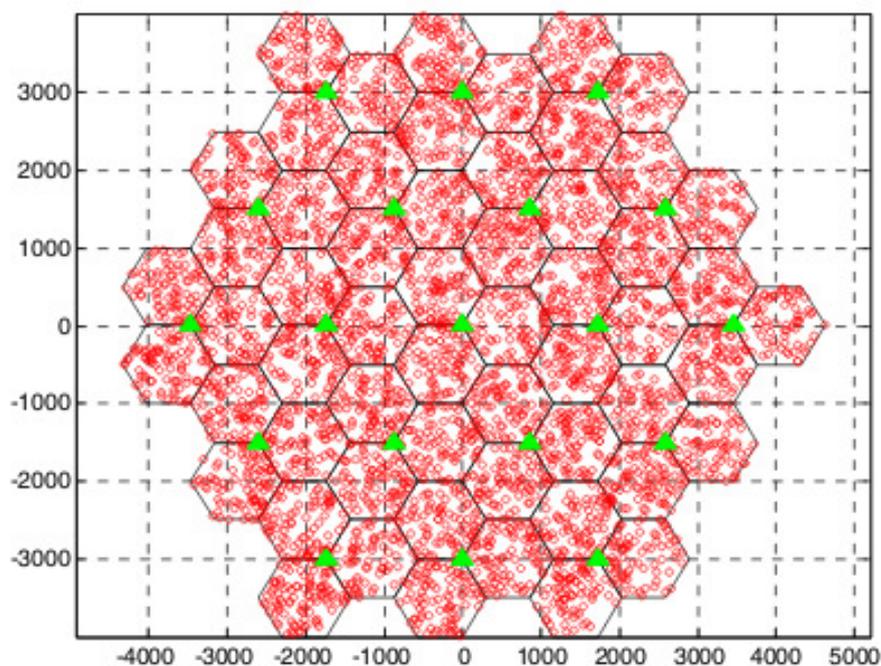
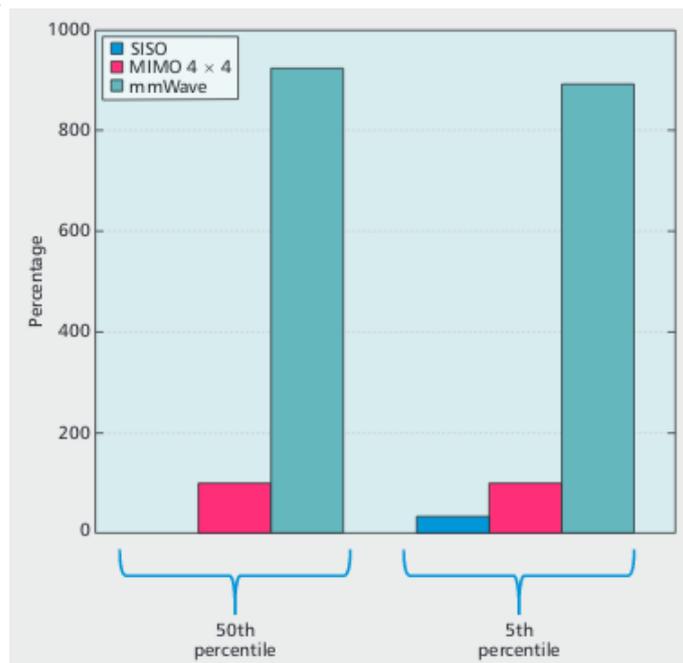


Figura 19 – Cenário de simulação com 19 ERB e casas inteligentes.

Fonte: (RATASUK *et al.*, 2015)

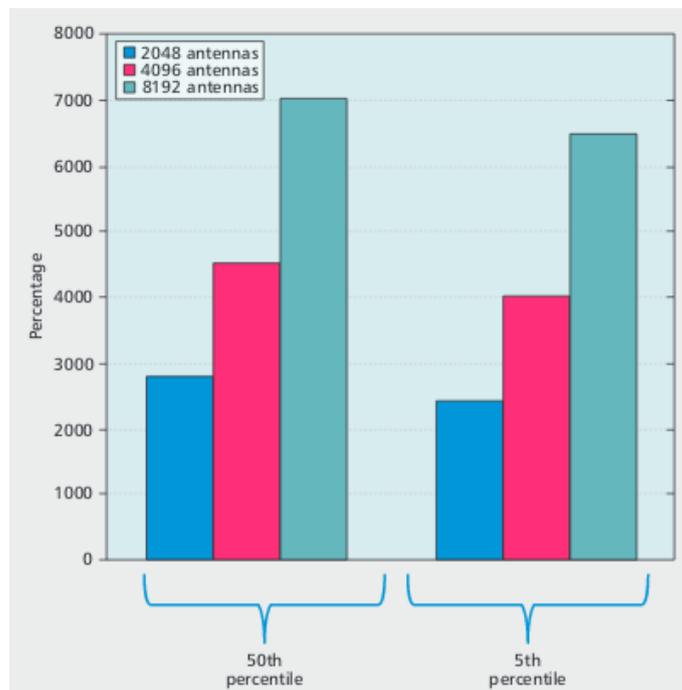
ênfatisam que as avaliações, para os dispositivos M2M, baseadas em simulações mais realistas e os modelos de tráfego de comunicação seriam interessantes áreas de futuras pesquisas.

Figura 20 – Comparação de taxa de dados de células entre sistemas de uma antena, múltiplas antenas e mmWave.



Fonte: (BOCCARDI *et al.*, 2014)

Figura 21 – Comparação da taxa de dados da célula para uma aplicação de acesso fixo com múltiplas antenas.



Fonte: (BOCCARDI *et al.*, 2014)

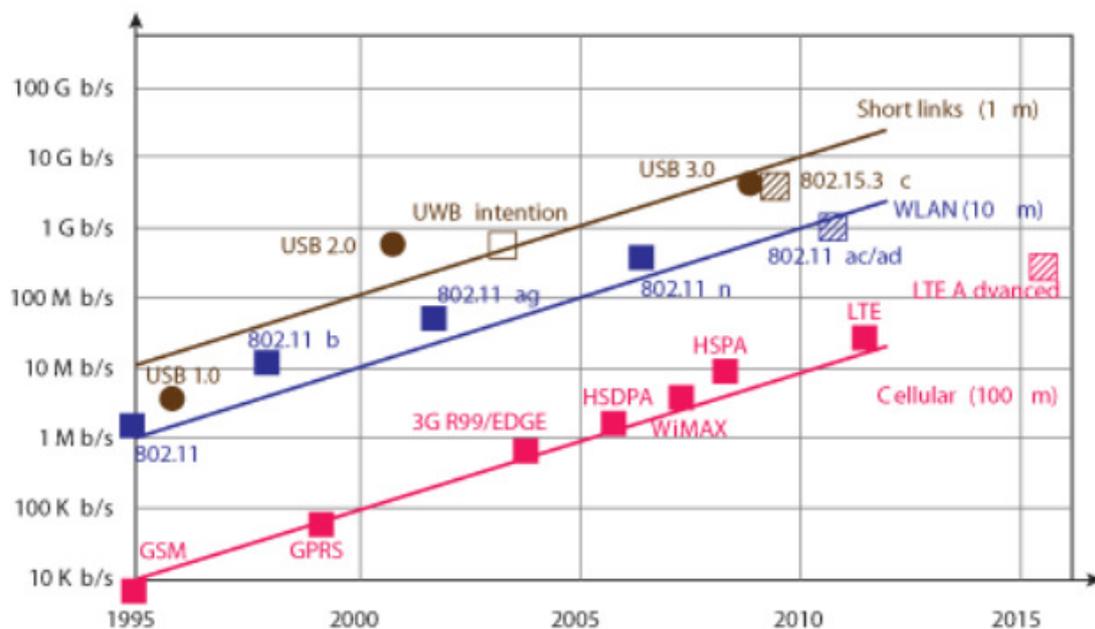
Esses trabalhos são relevantes para o problema de pesquisa pois demonstram que a tendência é a criação de arquiteturas híbridas, redes de 5G com apoio da rede 4G e demais tecnologias de comunicação industrial sem fio trabalhando em conjunto. Além disso é demonstrado que as novas tecnologias MIMO, instalação densa de *small cells* e a utilização de ondas *mmWave* possuem maior capacidade de transmissão de dados que aquelas arquiteturas que utilizam apenas uma única antena.

Os trabalhos de (FETTWEIS, 2012) e (FETTWEIS; ALAMOUTI, 2014) indicam que seria viável projetar um sistema 5G que possa atender a esses diferentes requisitos e que se diferencie muito do 4G atual, tais como: altas taxas de dados, baixa latência e vários tipos de acesso interligados. Afirma ainda que esse novo sistema vai mudar a nossa vida, impactando os aspectos das áreas de aplicação, tais como: saúde, segurança, tráfego, educação, esportes, jogos e energia. O resultado seria um grande salto nas comunicações sem fio de hoje para um paradigma que redefinirá nossas futuras redes residenciais, móveis e industriais.

Esses trabalhos mostram uma visão de crescimento das tecnologias de comunicação de curto e médio alcance, conforme a Figura 22. Essa Figura apresenta constantes de tempo fisiológicas sensoriais dos seres humanos, conforme a Figura 23, onde a menor latência é dada pela detecção tátil (na ordem de 1 ms). O volume de dados exigido pelo crescente número de usuários é um dos desafios que serão encontrados, ao tentar superar essa ordem de latência, mantendo a qualidade de comunicação.

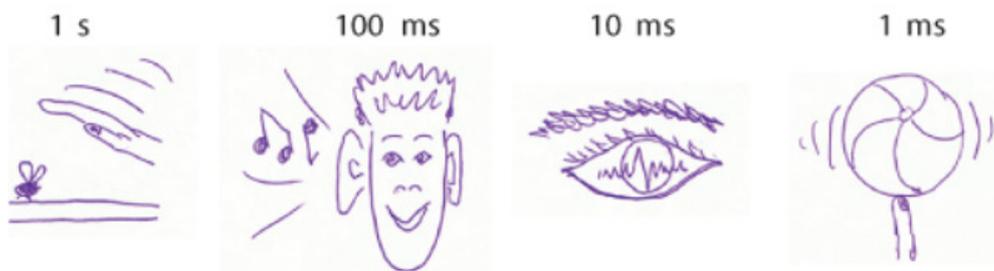
As pesquisas de (FETTWEIS; ALAMOUTI, 2014) mencionam que algumas exigências

Figura 22 – Crescimento das tecnologias de comunicação de curto e médio alcance.



Fonte: (FETTWEIS, 2012)

Figura 23 – Constantes fisiológicas em tempo real.



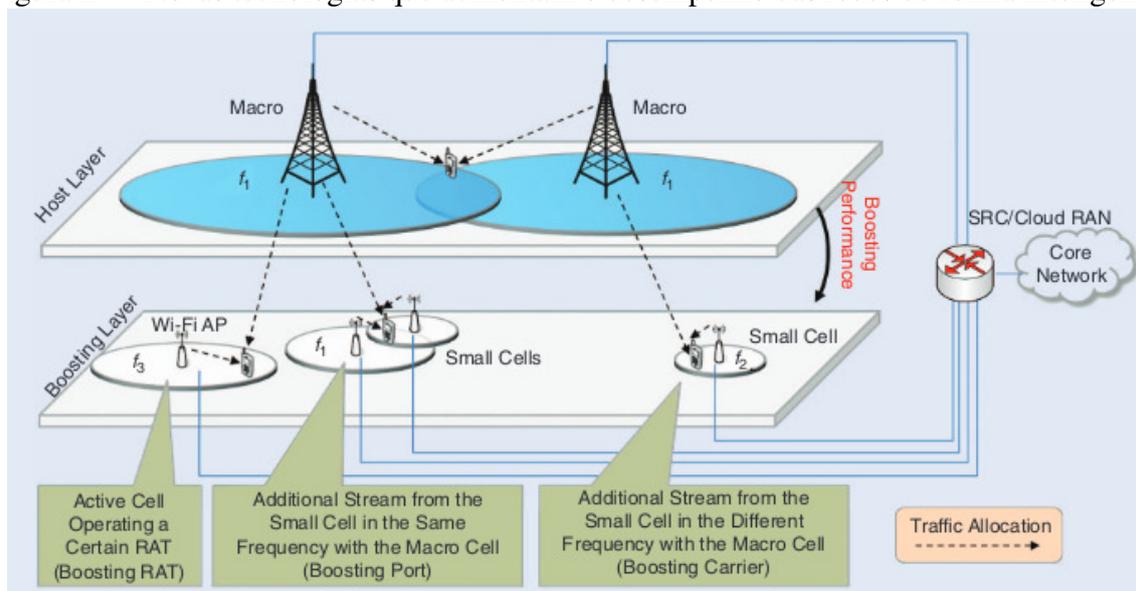
Fonte: (FETTWEIS, 2012)

de tempo real da indústria pedem uma latência abaixo de 5 ms e a maioria dos sistemas de comunicação sem fio atuais não atendem esses requisitos. Esses trabalhos demonstram que, com o aumento do número de dispositivos e aplicações M2M, há uma mudança nas exigências de comunicação sem fio. Desse modo, faz-se necessário utilizar interfaces de rádio com menor atraso e maior capacidade de transmissão de dados.

Os trabalhos de (CHIN; FAN; HAINES, 2014) e (HOSSAIN; HASAN, 2015) fornecem uma visão geral das tecnologias emergentes que podem constituir futuras redes sem fio 5G. Inclusive descrevem alguns problemas de pesquisa que essas tecnologias apresentam, os quais são muito similares aos descritos nas seções posteriores por outros pesquisadores. Os pesquisadores, acima mencionados, acreditam que as futuras redes sem fio 5G serão uma combinação de diferentes tecnologias e o maior desafio será fazer com que todas trabalhem juntas.

O trabalho de (DEMESTICHAS *et al.*, 2013) forneceu uma visão geral da inteligência da rede móvel 4G e 5G, levando em conta o contexto complexo de operação e requisitos essenciais, tais como QoE (*Quality of Experience*), eficiência energética, eficiência de custo e eficiência de recursos. De acordo com esses pressupostos, esse trabalho apresenta um ponto de vista que pode ser caracterizado como visionário, pois essa visão envolve o sistema 4G legado e as novas tecnologias de rádio sem fio. As Figuras 24 e 25 apresentam a introdução de inteligência em infraestrutura heterogêneas, o que é essencial para fortalecer as operadoras de telecomunicações. Complementarmente, esse trabalho sugere que a implantação do 5G poderia ser feita de forma gradual, através de atualizações de *software*, desde que as operadoras de telecomunicações estejam dispostas a investir em equipamentos e arquiteturas reconfiguráveis.

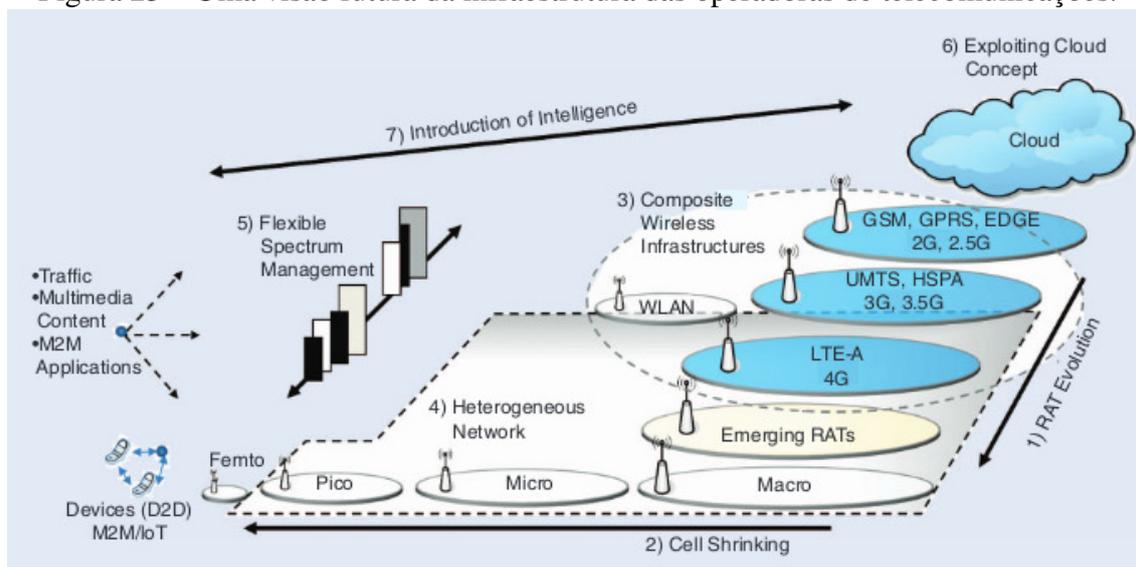
Figura 24 – Novas tecnologias que aumentam o desempenho das redes de forma inteligente.



Fonte: (DEMESTICHAS *et al.*, 2013)

As pesquisas de (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016) e (ALI; HOSSAIN; KIM, 2017) apresentam diversas características desafiadoras para a tecnologia LTE e LTE-A, tais como:

Figura 25 – Uma visão futura da infraestrutura das operadoras de telecomunicações.



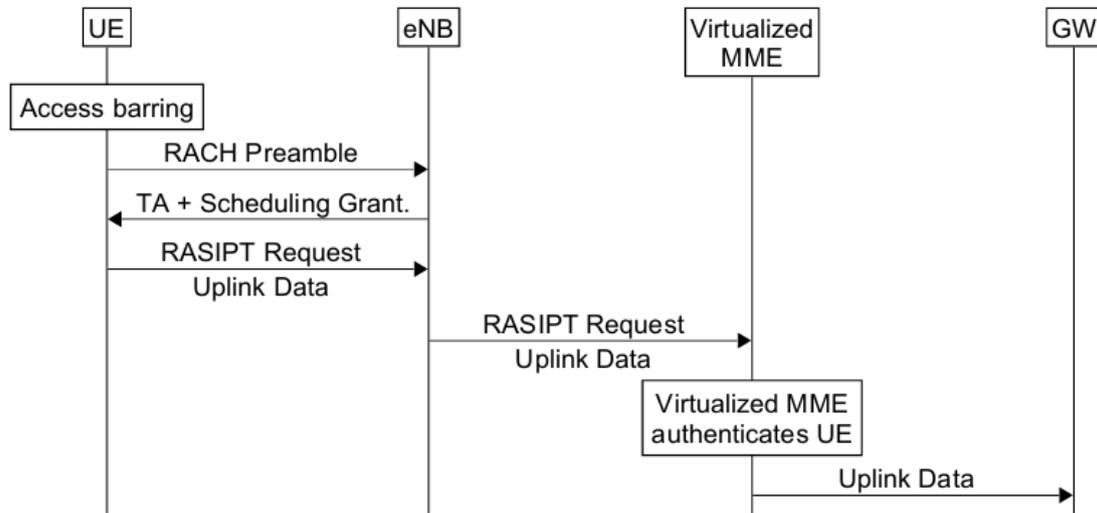
Fonte: (DEMESTICHAS *et al.*, 2013)

tamanho da carga útil, periodicidade de transmissão, eficiência de energia e requisitos de QoS. Em particular, o gerenciamento eficiente dos canais de acesso aleatório para aplicações com um número massivo de dispositivos M2M é um dos desafios mais críticos. Quando há tentativas massivas de acesso aleatório, a probabilidade de colisão aumenta drasticamente e, assim, o desempenho do acesso aleatório LTE-A degrada-se acentuadamente.

As pesquisas de (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016) apresentam resultados de uma avaliação do impacto de sinalização das comunicações M2M nas redes celulares. Um novo procedimento chamado RASIPT (*Random Access-based Small IP packet Transmission*) é proposto, simplificando a transmissão de pacotes de dados e reduzindo a carga de sinalização gerada pelas solicitações de transmissão. Nessa avaliação é indicado que o esquema LTE não é eficiente para suportar implementações volumosas de comunicações M2M, pois as solicitações de serviço geram uma quantidade excessiva de sinalização e colisão nos canais de acesso aleatório. Para este fim, (ALI; HOSSAIN; KIM, 2017) propõe um modelo chamado CRB-RA (*Collision-Resolution-Based Random Access*) para controlar o acesso aleatório reduzindo a colisão para aplicações que tenham um número massivo de dispositivos M2M sobre redes LTE-A.

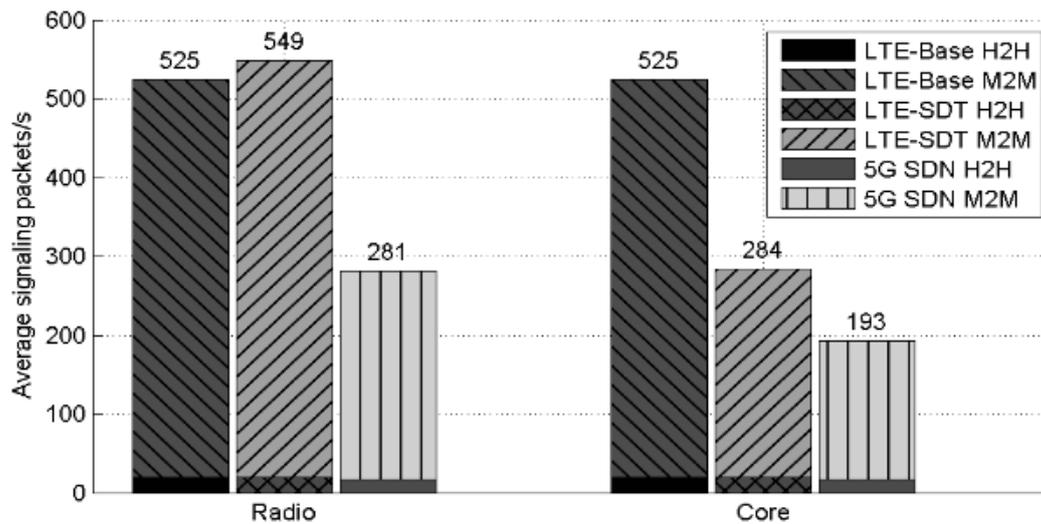
Esses novos mecanismos de sinalização, propostos para as comunicações M2M, foram apresentados, conforme a Figura 26, e os resultados de simulação, presentes na Figura 27, demonstram que o esquema proposto tem melhor desempenho quanto ao número de pacotes de sinalização e solicitação de rede. Nesse artigo é descrito o quanto a sinalização de rede pode ser reduzida (rádios e núcleos de rede). A Figura 27 apresenta uma comparação das redes 4G com as redes 5G, em relação à média de pacotes de sinalização. Pode-se perceber que as redes 5G possuem uma média menor de sinalização de rede tanto nos acessos de rádio quanto nos núcleos de rede.

Figura 26 – Novas tecnologias que aumentam o desempenho das redes de forma inteligente.



Fonte: (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016)

Figura 27 – Comparação da média de pacotes de sinalização de rede em enlaces LTE e 5G.



Fonte: (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016)

Mesmo que o sistema proposto e os resultados apresentados pelo trabalho de (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016) sejam promissores, não são fornecidos muitos detalhes a respeito de como isso é implementado no simulador. Não são apresentados os algoritmos e as mudanças realizadas no simulador de rede 4G NS-3⁴. Nesse trabalho um cenário fixo foi simulado, sem variações do número dispositivos (80 dispositivos móveis e 480 dispositivos M2M), o que, nesse caso, pode comprometer o entendimento do tamanho do desempenho, quando há uma demanda menor ou maior na rede simulada. Além disso, (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016) e (ALI; HOSSAIN; KIM, 2017) lidam com o problema de acesso aleatório, que é um dos desafios a ser encarado nas redes M2M com quantidades massivas de dispositivos, esse não é o foco do problema de pesquisa abordado, o qual preocupa-se muito mais com o gerenciamento de recursos de rede para os cenários e aplicações industriais M2M, de forma a garantir que os requisitos de latência, *jitter* e QoS sejam cumpridos.

3.2 M2M e os Algoritmos de agendamento

As pesquisas de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a) estudam o desempenho de latência para o canal *uplink* M2M dos sensores conectados num CLP (Controlador Lógico Programável) dentro de cenários de automação industrial. O tráfego do canal *uplink* pode ser classificado como PU (*Periodic Updates*) e ED (*Event Driven*). Os pacotes de dados dos diferentes tipos de sensores são periódicos, sincronizados pelo CLP e precisam ser processados de acordo com um requisito de latência pré-especificado pela aplicação industrial. Sob outra perspectiva, os pacotes de dados da classe de tráfego ED são aleatórios e destinados a alarmes que, dependendo da criticidade da aplicação, precisam ser processadas rapidamente. Para manter os requisitos de QoS, os estudos de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a) modelam a utilidade do sistema para as classes de tráfego PU e ED separadamente usando funções sigmoidais de latência, as quais foram utilizadas nesta tese com o intuito de avaliar a satisfação dos usuários presentes nas redes M2M.

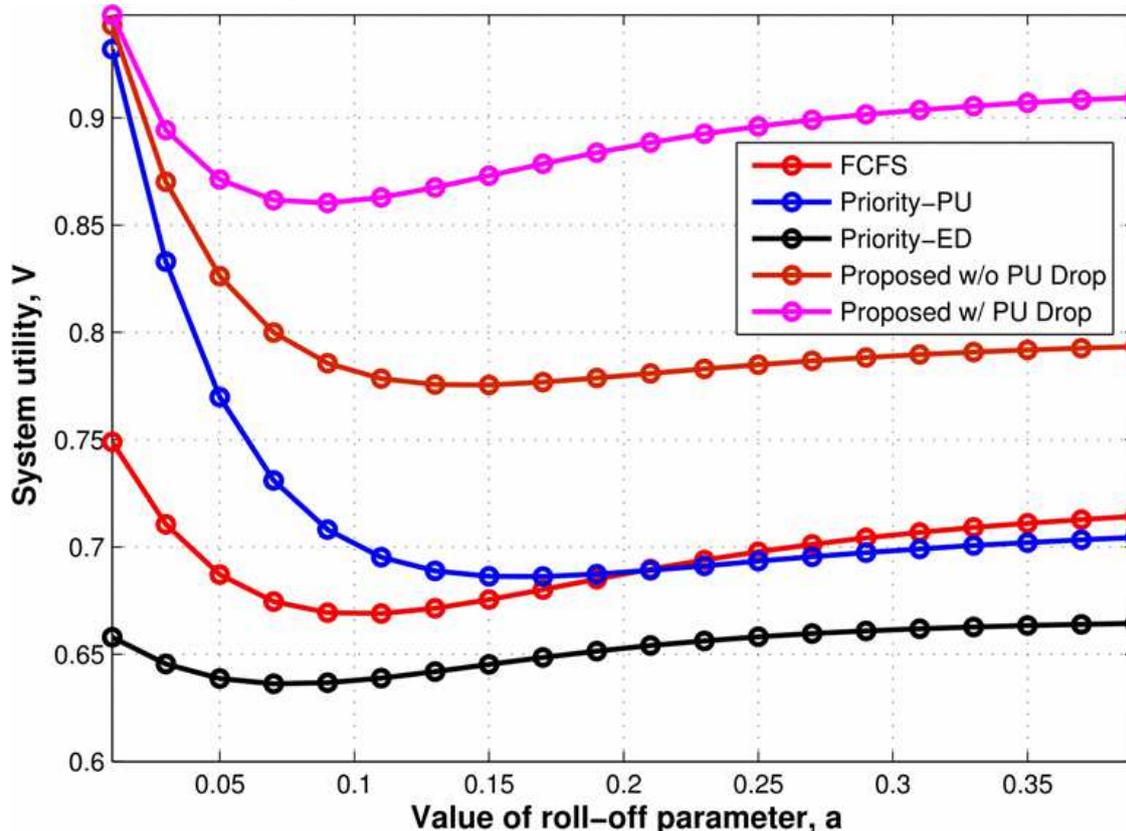
O trabalho de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a) visa a maximizar a utilidade geral do sistema e, ao mesmo tempo, ser proporcionalmente justo com as classes de tráfego PU e ED. Para esse fim, é proposto o desenvolvimento de um novo agendador de pacotes *online* chamado de *QoS-aware* que dá prioridade para a classe de tráfego ED, desde que isso também atenda os requisitos de latência dos sensores PU. Esse trabalho também identifica que à medida que a quantidade de dispositivos presentes na rede aumenta, há a necessidade de descarte de pacotes PU que não cumprem o *deadline*. Essa é uma abordagem um pouco arriscada e audaciosa, porém, reduz o congestionamento da rede M2M e melhora a função de utilidade geral do sistema.

As pesquisas de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a) usam a metodologia baseada em simulações de rede, para comparar e avaliar o desempenho do agendador proposto com os

⁴<https://www.nsnam.org/>

demais algoritmos de agendamento estado da arte. Por fim, nos resultados, o algoritmo proposto supera os demais existentes em vários cenários de simulação. As Figuras 28 e 29 expõem os resultados obtidos pelo algoritmo *QoS-aware* comparado a alguns agendadores estado da arte.

Figura 28 – Função de utilidade do sistema M2M.

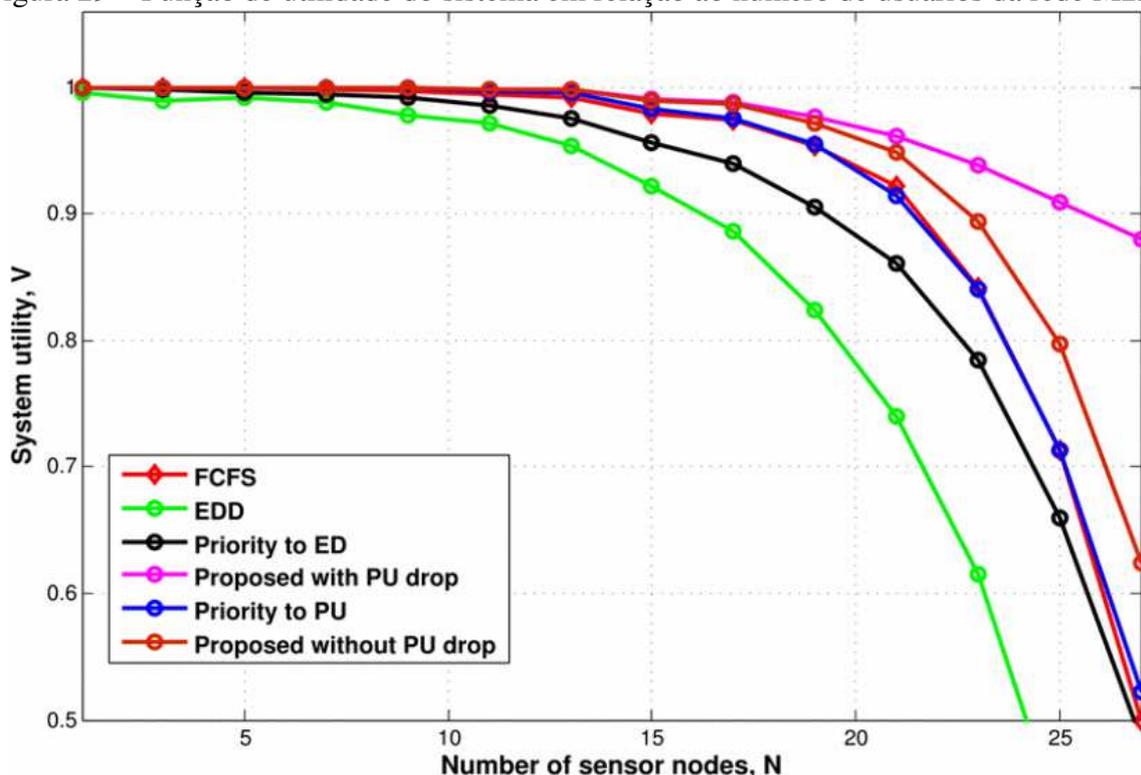


Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a)

Essa referência foi de suma importância para a compreensão de diversos conceitos tais como: a metodologia de validação fundamentada em simulações, as diferentes classes de tráfego, os algoritmos que se baseiam em diferentes métricas de QoS, a satisfação dos dispositivos M2M que se utilizam da função de utilidade do sistema, a importância do cumprimento dos requisitos de latência nas aplicações industriais e outros. Porém, a formulação do modelo do sistema é analítica e descrito por equações e distribuições estatísticas para as filas de pacotes. Nessas equações são realizadas algumas simplificações que consideram fixos os tamanhos dos recursos ocupados pelos pacotes dentro do sistema de comunicação, e é sabido que isso não ocorre dessa forma, nos sistemas de comunicação sem fio reais, devido à variação de MCS dos dispositivos presentes na rede. Durante a apresentação dos resultados (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a) também não revela qual é o simulador utilizado nas suas simulações de rede M2M.

A pesquisa de (ABRIGNANI *et al.*, 2018) apresenta uma abordagem para programar o tráfego M2M do canal *uplink* sobre redes LTE com implantação densa de *small-cells* na iluminação pública de uma grande avenida para aplicações de cidade inteligente. As *small-cells* operam com reutilização de frequência e a interferência intercelular é um ponto crítico a ser gerenciado.

Figura 29 – Função de utilidade do sistema em relação ao número de usuários da rede M2M.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a)

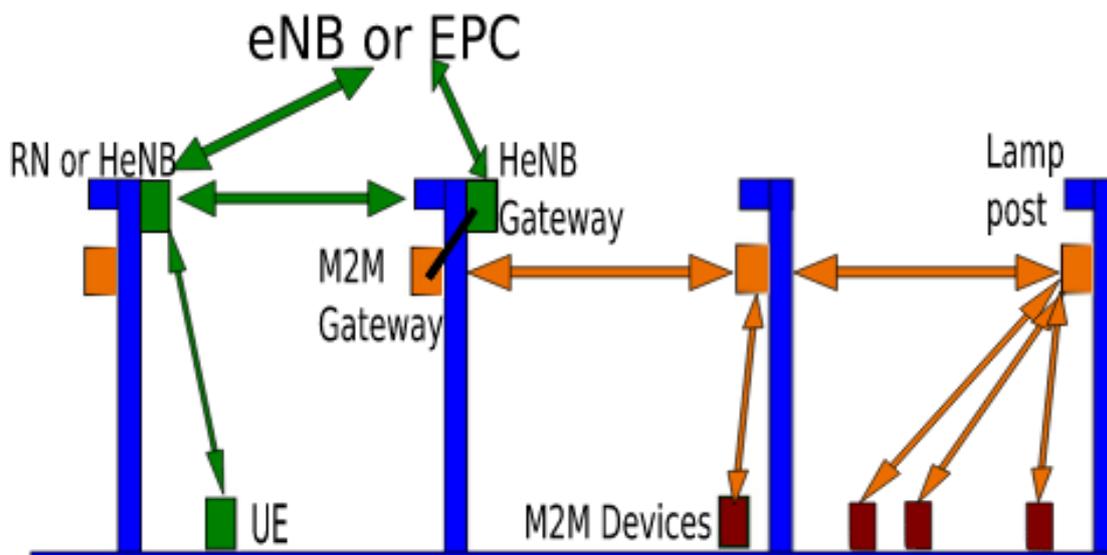
A meta principal dessa pesquisa é resolver um problema de otimização multiobjetivo, para maximizar o rendimento geral, maximizar o uso de recursos de rádio e minimizar a interferência. Vista a complexidade desse problema, a solução é proposta através de uma função heurística.

O trabalho de (ABRIGNANI *et al.*, 2018) utiliza um simulador *NS-3*, compatível com LTE-A, que implementa a pilha geral de protocolos. Além disso, suporta a eficácia do algoritmo proposto para as aplicações de monitoramento de tráfego e vigilância por vídeo que formam o cenário do trabalho, conforme apresenta a Figura 30.

Observa-se que a pesquisa de (ABRIGNANI *et al.*, 2018) possui uma aplicação interessante dentro das possibilidades de uso da tecnologia M2M, porém está destinada a cenários urbanos com implantação densa de *small-cells*. Esse tipo de cenário de atuação e aplicação não se assemelha às demandas atuais das redes M2M da indústria, principalmente em relação à grande quantidade de dados de vigilância por vídeo a serem transmitidos, à arquitetura da rede *multi-hop* e ao reuso de frequência que costuma ser evitado na indústria, pois o acréscimo de interferência intercelular ocasiona maior consumo de energia tanto nas ERBs quanto nos dispositivos da rede.

O trabalho de (OUAISSA; AB, 2018) apresenta a alocação de recursos e o agendamento como um dos principais desafios enfrentados pelas comunicações M2M em redes LTE-A, mantendo os requisitos de QoS para esses dispositivos. Esse tipo de tráfego M2M possui características únicas de acordo com a aplicação; geralmente consiste em um grande número de pequenos pacotes de dados, com atrasos específicos, gerados por um número potencialmente

Figura 30 – Cenário da aplicação de monitoramento M2M.

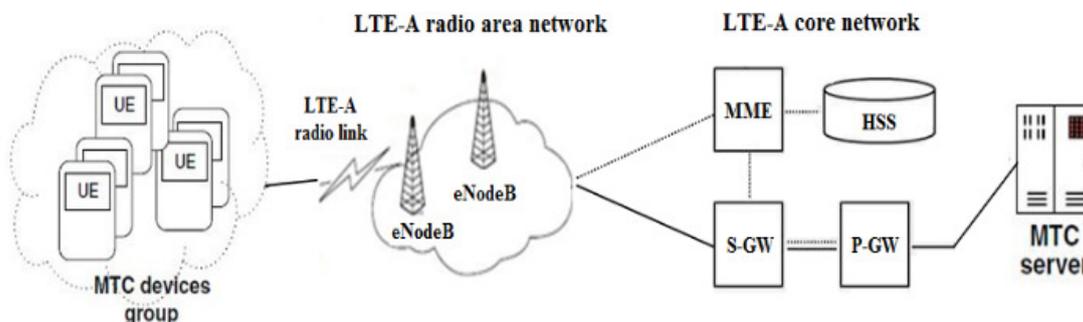


Fonte: (ABRIGNANI *et al.*, 2018)

grande de dispositivos competindo por recursos de rede.

Esse trabalho apresenta a arquitetura de um sistema de comunicação sem fio M2M através da Figura 31, que é dividida em três partes principais: os dispositivos MTC, a rede de comunicação e o servidor MTC. Dispositivos M2M são terminais que fornecem informações, muitas vezes, em tempo real. A arquitetura de rede consiste em duas partes: a rede de acesso por rádio terrestre (LTE-A) e o núcleo principal da rede. Todo o núcleo da rede usa a tecnologia IP. Essa pesquisa afirma que os dados oriundos da rede M2M, geralmente, são classificados em dois tipos: orientados a eventos ou alarmes e aqueles que são oriundos de tarefas de monitoramento periódico. Segundo (OUAISSA; AB, 2018), as redes LTE-A foram projetadas para suportar a comutação de pacotes com mobilidade contínua, provisionamento de QoS e latência mínima.

Figura 31 – A arquitetura do sistema M2M.



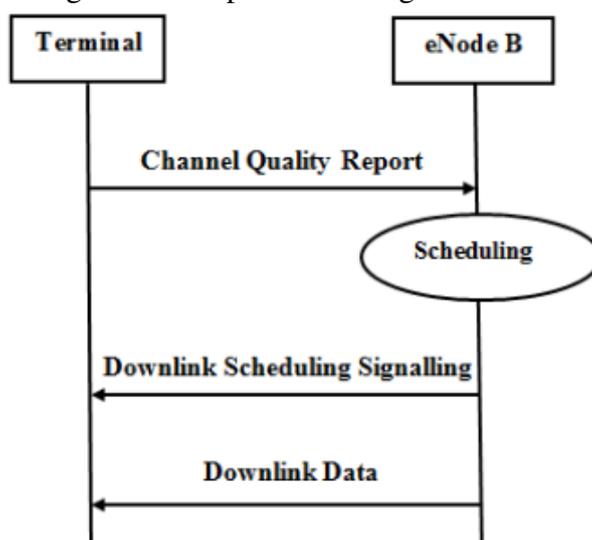
Fonte: (OUAISSA; AB, 2018)

O trabalho de (OUAISSA; AB, 2018) salienta que o indicador de qualidade do canal do usuário é importante para a ERB na realização das tarefas de agendamento conforme apresentado na Figura 32. O agendador aloca os recursos dos usuários com base nesse indicador, nos

requisitos de QoS e na justiça entre os usuários. Porém o agendamento baseado em garantia de QoS lida com diferentes exigências tais como: atraso, *jitter* e garantia de taxa de dados.

Tal estudo de (OUAISSA; AB, 2018) possui aspectos positivos tais como: a apresentação da arquitetura de rede M2M sobre a tecnologia LTE-A, a descrição de como o processo de agendamento ocorre no canal de comunicação *downlink*, sua proposta de agendamento para o canal de *downlink* priorizando determinadas classes de tráfego. Mas esse trabalho não é aplicado à indústria, não leva em consideração as exigências de latência e *jitter* dos cenários e aplicações industriais e tampouco é executado para um grande número de dispositivos M2M.

Figura 32 – O processo de agendamento.

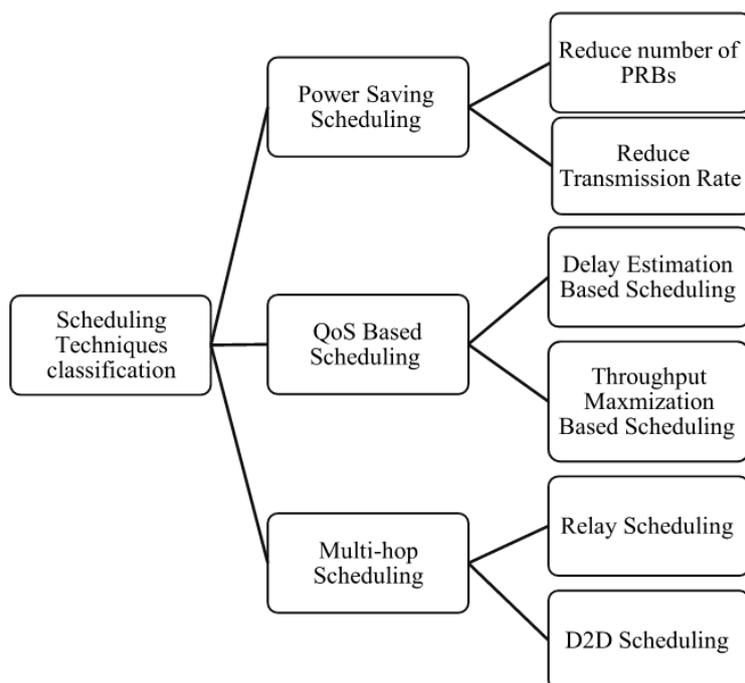


Fonte: (OUAISSA; AB, 2018)

As definições de classificação das técnicas de agendamento descritas no trabalho de (MEHA-SEB *et al.*, 2016) são de suma importância para a identificação do tipo de técnica de agendamento procura-se empregar. A Figura 33 exhibe a classificação das técnicas de agendamento e percebe-se que o agendamento baseado em QoS enquadra-se em um dos temas promissores de pesquisa. A existência de diferentes tipos de dispositivos M2M com diferentes tarefas e diversas aplicações cria a necessidade de suportar vários requisitos de QoS. Uma consequência típica é que se espera que o tráfego M2M seja diferente de outro tráfego gerado a partir de aplicativos H2H (*Human-to-Human*) em termos de tamanho de carga útil e taxa de tráfego.

A rede LTE-A deve ser capaz de suportar o tráfego M2M e fornecer o tratamento adequado de QoS conforme os requisitos da aplicação industrial. Geralmente, essas aplicações podem ser categorizadas como de tempo real ou convencionais. Porém, algumas delas possuem certas restrições de latência (atraso limitado). As limitações da técnica de escalonamento no *uplink* estão, normalmente, relacionadas com a latência. No escalonamento dos recursos do canal *uplink*, o agendador está localizado na ERB e aloca os recursos com base nos relatórios que recebe dos dispositivos ativos na rede M2M. Esses relatórios, comumente, não fornecem informações da latência de cada pacote. Consequentemente, isso resulta na dificuldade de suportar a QoS.

Figura 33 – Classificação de técnicas de agendamento.



Fonte: (MEHASEB *et al.*, 2016)

Por exemplo, os algoritmos de agendamento podem ser projetados para alto rendimento, justiça, baixo atraso de pacotes e baixa taxa de descarte de pacotes. O escalonador deve considerar as exigências dos dispositivos para satisfazer seus requisitos de QoS, enquanto mantém uma alocação eficiente (e às vezes justa) de recursos de rede. Portanto, de acordo com (MEHASEB *et al.*, 2016), os agendadores de pacotes devem considerar aspectos, como:

- **Restrição de contiguidade:** Refere-se à alocação contígua para todos os recursos alocados a um único dispositivo no domínio de frequência.
- **Relatórios de CQI (*Channel Quality Information*):** Eles fornecem a ERB informações sobre as condições do canal por dispositivo para executar o agendamento dependente do canal com a finalidade de obter a maximização da taxa de transferência.
- **Justiça/Equidade:** Este é um parâmetro importante no agendamento. O agendamento dependente de canal absoluto não considera a distribuição de recursos de rádio entre todos os dispositivos que solicitam serviço. Isso significa que dispositivos distantes que possuem condições ruins de canal sofrerão interrupções se a imparcialidade for ignorada.
- **Parâmetros de QoS de todos os dispositivos ativos:** como atraso, taxa de erro de pacote, taxa de bits garantida e outros.
- **Status do Buffer:** O agendador deve estar ciente da quantidade de dados em buffer em cada dispositivo e por quanto tempo permaneceu na fila de transmissão por meio de registradores de estado de *buffer*.

- **HARQ:** O escalonador dá alta prioridade aos pacotes que precisam ser retransmitidos de acordo com os relatórios de HARQ.
- **Restrição de MCS:** blocos de recursos alocados são forçados a usar a mesma MCS.
- **Limitações de Transmissão de Potência de Uplink:** As restrições de transmissão de energia impõem limitações no número de recursos alocados por dispositivo, o que torna o processo de agendamento *uplink* um problema de otimização de energia.

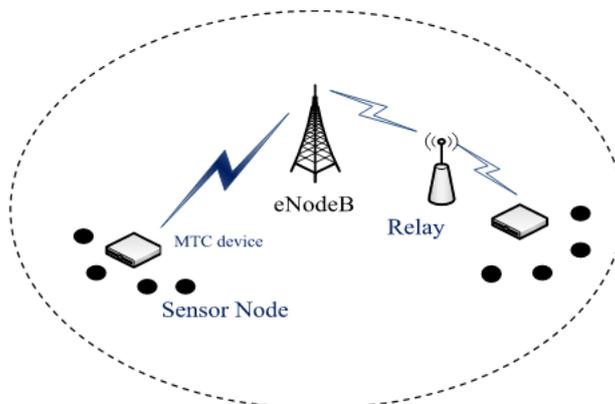
Além disso, a pesquisa de (MEHASEB *et al.*, 2016) apresenta novos desafios da alocação de recursos de redes M2M que, com a utilização das topologias *multi-hop*, intenta otimizar a eficiência energética dos dispositivos, conforme exibidos pela Figura 34. Essa referência auxilia na compreensão de classificação e apresenta um panorama dos diferentes tipos de agendadores *uplink*, ao longo das linhas de eficiência de energia, dos parâmetros de QoS relacionados a comunicações M2M, da comunicação *multi-hop* e escalabilidade. Percebe-se que o objetivo principal dessa pesquisa é lançar uma visão mais apurada dos requisitos e técnicas de agendamento previstos para as comunicações M2M sobre redes LTE-A. Isso, principalmente, devido ao fato de que o tráfego M2M deve ser considerado significativo para o tráfego geral das redes LTE-A, 5G e além.

A pesquisa de (ALQAHTANI, 2018) propõe uma alocação de recursos baseada em tempo com reconhecimento de atraso com um modelo de enfileiramento baseado em prioridade, projetado especialmente para a rede LTE-A híbrida, incluindo dispositivos M2M e usuários H2H. O agendamento de recursos fornece a maior prioridade para a comunicação H2H, em contraste com o M2M que recebe a menor prioridade. A alta taxa de chegada dos usuários H2H resulta em intermitência generalizada das transmissões dos dispositivos M2M, portanto faz-se necessário que os usuários H2H repassem alguns de seus recursos para os dispositivos M2M, atrasando os usuários do H2H, desde que não prejudique acentuadamente a QoS deles.

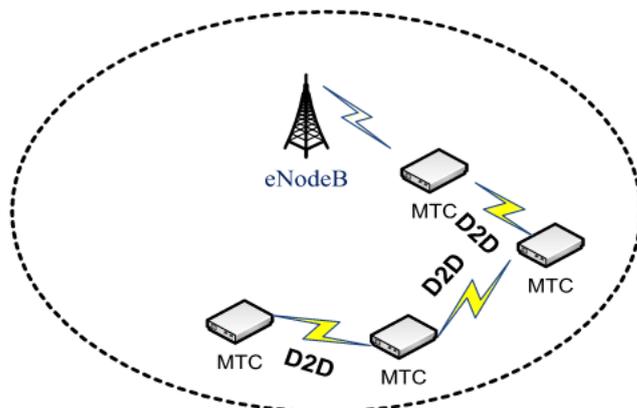
A Figura 35 apresenta os esquemas propostos em (ALQAHTANI, 2018). A prioridade dos usuários do H2H é relaxada, atrasando-os na rede LTE-A até o nível que não tenha um impacto negativo na qualidade dos usuários do H2H. Então, além de proteger os usuários do H2H, os esquemas propostos podem aumentar a utilização do uso de recursos M2M e reduzir o tempo médio de espera dos dispositivos. Além disso, os resultados mostram que os esquemas propostos oferecem melhor desempenho M2M, enquanto controlam o nível de QoS para os serviços de H2H conforme Figura 36.

A proposta de (ALQAHTANI, 2018) apresenta melhorias de desempenho para as aplicações M2M enquanto controlam o nível de QoS para os serviços de H2H, porém esse sistema de controle considera que a rede é híbrida e que os usuários H2H tem prioridade em relação aos M2M. Os cenários de simulação não são industriais e a metodologia de avaliação do problema é analítica, ou seja, não é executada em um simulador LTE-A reconhecido no meio acadêmico. Portanto, percebe-se que diversas considerações foram ignoradas, tais como: os modelos de

Figura 34 – Topologia de comunicação *multi-hop*.



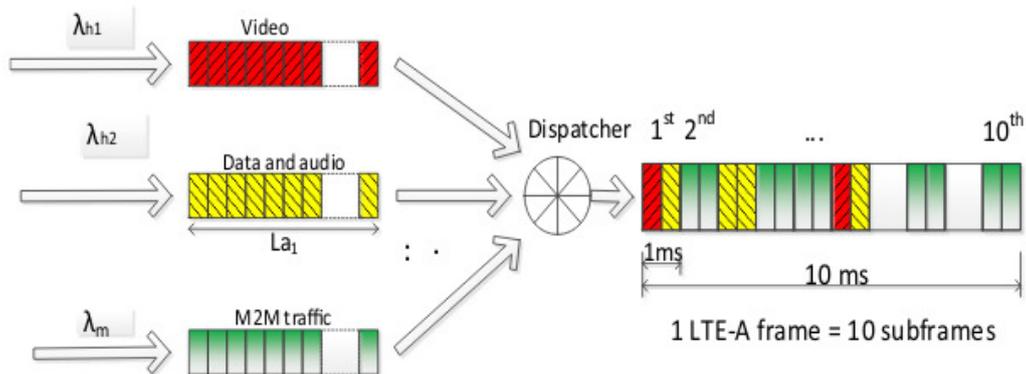
(a) Single-hop Communication and Multi-hop Communication using Relay Node



(b) Multi-hop Communication using D2D

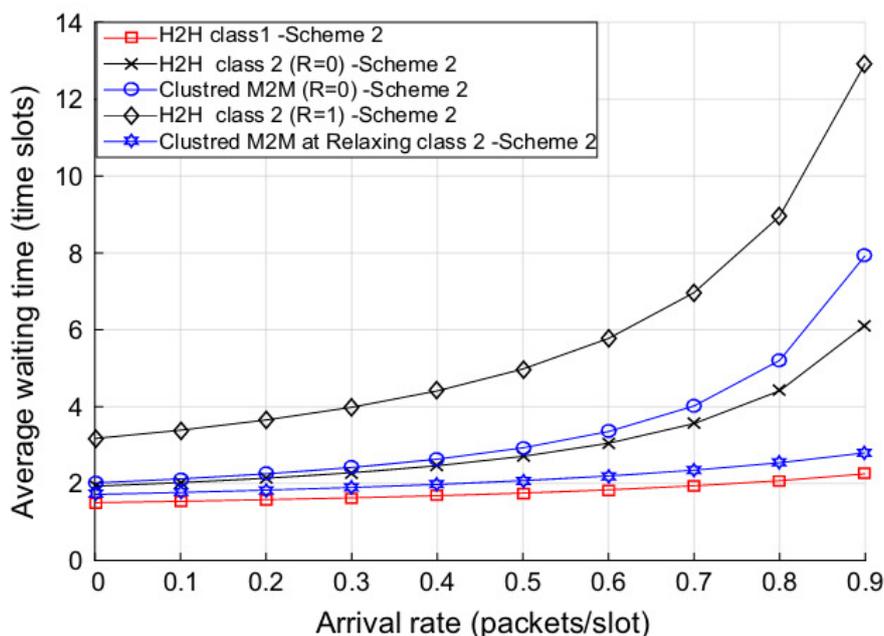
Fonte: (MEHASEB *et al.*, 2016)

Figura 35 – Alocação de usuários H2H e M2M.



Fonte: (ALQAHTANI, 2018)

Figura 36 – Atraso médio para os usuários H2H e M2M.



Fonte: (ALQAHTANI, 2018)

transmissão de cada classe de tráfego, a mobilidade simulada dos dispositivos, a criação de pacotes que utilizam mais de um RB (*Resource Block*). Além disso, não fica claro qual o formato do quadro utilizado, se o sistema simulado é *macrocell* ou *multihop*, e além disso, nesse trabalho foi estipulada uma taxa de dados de 25 Mbits/s para os quadros LTE-A. Uma limitação de comunicação que não é usual, caso utilizasse os simuladores conhecidos na literatura.

Segundo (GILUKA *et al.*, 2018), uma vez que as redes celulares são otimizadas para suportar comunicação H2H (por exemplo, chamadas de voz, SMS, MMS e Internet), a incorporação da comunicação M2M pode afetar a QoS das classes de tráfego H2H. Além disso, o grande número de dispositivos M2M causa uma sobrecarga de sinalização significativa no núcleo da rede e na RAN (*Radio Access Network*). No LTE-A, o procedimento de conexão dos dispositivos ao *gateway* envolve várias mensagens de sinalização trocadas entre o dispositivo e a rede.

De acordo com (GILUKA *et al.*, 2018), os dispositivos M2M geram principalmente tráfego com baixo volume dados, portanto, seria incoerente ter uma troca de mensagens de sinalização rigorosa para enviar poucos *bytes* de dados. Então surge a proposta chamada *delay aware*, ou seja, um algoritmo de agendamento de recursos de rádio com o objetivo de suportar o tráfego M2M no canal *uplink* que cause efeitos mínimos sobre a QoS do tráfego *uplink* do usuários H2H. Nessa pesquisa as classes de tráfego M2M são categorizadas da seguinte forma:

1. Classe 1: aplicações intolerantes ao atraso e pequenos pacotes de dados (alarmes, emergência ou RT (*Real Time*)).
2. Classe 2: aplicações que requerem garantia mínima da taxa de dados (voz e áudio).

3. Classe 3: aplicações tolerantes ao atraso e grande volume de dados (monitoramento por vídeo).
4. Classe 4: aplicações tolerantes ao atraso e pequenos pacotes de dados (monitoramento de sensores).

A classificação do tráfego M2M é interessante e demonstra as principais aplicações onde são utilizadas. O algoritmo de agendamento proposto em (GILUKA *et al.*, 2018) é baseado no PCS (*Priority Class Scheduler*) e prioriza as classes de tráfego H2H em detrimento das M2M. As simulações foram realizadas no simulador 4G NS-3⁵, o cenário utiliza uma arquitetura de rede com uma ERB única, há uma proporção de 3/7 de usuários H2H para dispositivos M2M e não é realizada uma comparação entre o algoritmo proposto e os demais algoritmos de agendamento estado da arte. Isso dificulta na identificação dos possíveis ganhos relativos às métricas de comunicação.

A pesquisa de (GADALLAH; AHMED; ELALAMY, 2017) descreve que a alocação de recursos de rede deve ser feita através de agendamento de pacotes utilizando o canal de dados compartilhados. O agendamento é, em vista disso, uma técnica fundamental para garantir alta eficiência espectral enquanto fornece a qualidade dos serviços necessária dentro de uma determinada ERB. Na maioria das vezes, o objetivo é maximizar a capacidade da ERB sem negligenciar os requisitos de QoS. Desse modo, o agendamento leva em conta os requisitos de QoS associados a cada classe de tráfego, as informações de qualidade do canal dos dispositivos, status do *buffer*, níveis de interferência, solicitação de HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) e outros. Deve-se observar que os recursos disponíveis na rede, normalmente, são divididos em um número de blocos iguais que são chamados de RBs.

(GADALLAH; AHMED; ELALAMY, 2017) afirma que o agendamento dependente de canal pode alcançar melhor desempenho alocando recursos (RBs) com base nas condições do canal utilizando algoritmos ótimos. Esse tipo de alocação dinâmica baseia-se nos relatórios de CQI que são recebidos dos usuários ativos na ERB. Cada relatório de CQI recebido é usado pela ERB para tomar suas decisões nas direções de envio de dados (*downlink*) e recebimento de dados (*uplink*). As decisões de agendamento são realizadas a cada intervalo de tempo de transmissão pelo processo de agendamento de recursos. A decisão de escalonamento depende das medidas de adaptação de enlace, SINR, que é usado para selecionar o MCS das transmissões.

O processo de agendamento opera nos domínios de tempo e frequência. Dentro do domínio do tempo não são alocados RBs, mas sim restringe-se o número de dispositivos que participarão do agendamento no domínio da frequência. A decisão no tempo é tomada com base no status do *buffer*, nos requisitos de atraso e no HARQ caso a retransmissão do pacote seja necessária. Portanto, no domínio do tempo o agendador determina a prioridade dos usuários a serem agendados, onde as retransmissões de HARQ recebem maior prioridade. Dentro do domínio da frequência, então, são atribuídos RBs, diretamente, aos dispositivos que irão transmitir de

⁵<https://www.nsnam.org/>

dados. O agendador decide como alocar os dispositivos entre os RBs disponíveis baseado nas condições do canal.

As pesquisas de (GADALLAH; AHMED; ELALAMY, 2017) discutem a necessidade de técnicas a fim de reservar recursos para comunicação M2M de emergência sobre redes LTE. Indica-se que a natureza crítica desses aplicativos exige a separação entre os recursos alocados para esses aplicativos e aqueles usados pelos demais dispositivos da rede. Uma vez que a natureza e as demandas das aplicações M2M críticas são diferentes daquelas baseadas na comunicação entre seres humanos, espera-se que os requisitos de escalonamento nos dois casos sejam diferentes. Sendo assim, utilizar um algoritmo de agendamento para esses dois tipos pode não gerar as melhores decisões de alocação de recursos.

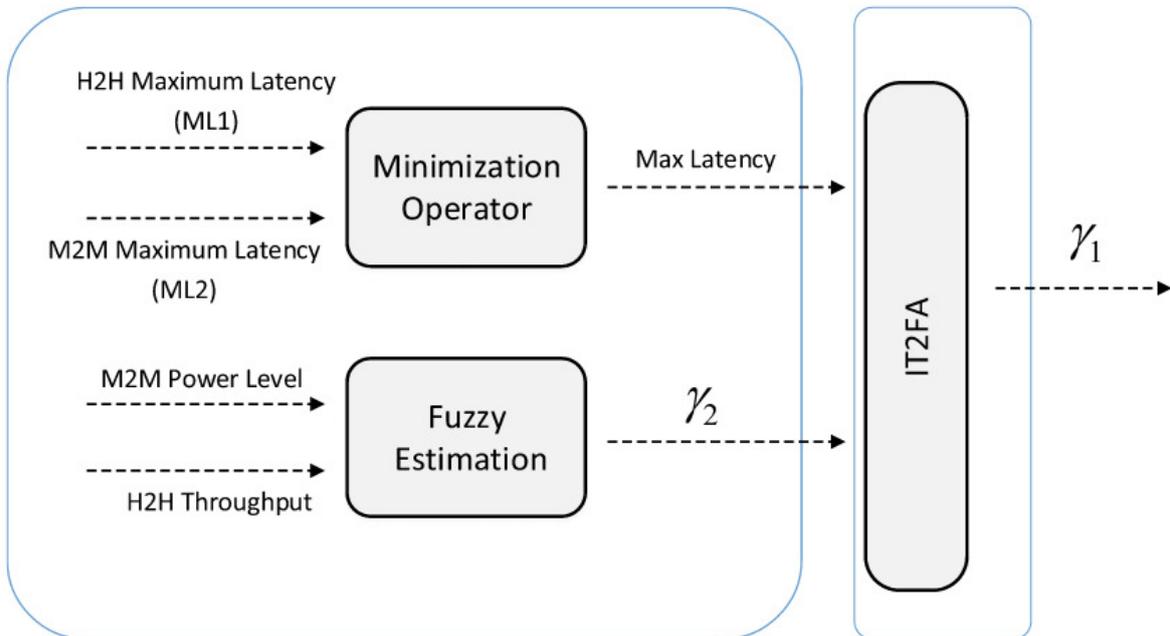
Segundo (MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018), a comunicação M2M é uma tecnologia que fornece comunicação entre máquinas e dispositivos sem intervenção humana. Um dos principais desafios é gerenciar um grande número de comunicações do tipo máquina co-existentes com as comunicações do tipo H2H. As tecnologias de comunicação 4G, devido às suas características inerentes, como alta capacidade e flexibilidade no gerenciamento de acesso a dados, são uma opção para as aplicações M2M. Nesse trabalho, um mecanismo de escalonamento inteligente de duas fases baseado na lógica *Fuzzy* é proposto para satisfazer os requisitos de QoS, garantir a alocação justa de recursos e controlar o nível de energia dos dispositivos mantendo coexistência de tráfego M2M e H2H nas redes LTE-A. O desempenho do algoritmo de agendamento proposto é avaliado baseado em simulações de rede nas quais são avaliadas várias métricas, como: atraso, *jitter*, taxa de transferência e utilização de largura de banda. O mecanismo *Fuzzy* proposto melhora a eficiência do tráfego de dados, prevendo e lidando com as incertezas da rede.

O esquema de agendamento proposto em (MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018) usa latência máxima, taxa de dados na comunicação H2H e o nível de potência de comunicações M2M como parâmetros de tomada de decisão. Basicamente, as aplicações são classificadas em RT (*Real Time*) e NRT (*Non-Real Time*), segundo o esquema proposto que a Figura 37 exhibe.

ML1 e ML2 são a latência máxima dos fluxos de H2H e M2M, respectivamente. Existe a necessidade de descobrir qual dos fluxos RT de tipo humano e máquina está no modo de emergência. Na prática, alguns aplicativos estão no modo de emergência e precisam ser transmitidos imediatamente, enquanto outros têm tempo suficiente e podem ser transmitidos posteriormente. Assim, uma das informações necessárias para decidir sobre a alocação de recursos é a latência máxima aceitável de todos os fluxos de RT.

Para atribuir recursos aos fluxos de NRT, o sistema de estimativa baseado em lógica *Fuzzy* é usado para determinar o nível de energia dos dispositivos M2M e a taxa de dados necessária dos serviços H2H, em termos do parâmetro de saída γ_2 . Este parâmetro γ_2 é denominado peso dos fluxos NRT o qual entra em competição com os fluxos RT para obter RBs. As regras do sistema de inferência para o sistema fuzzy projetado estão representadas na Figura 38.

O método apresentado por (MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018) baseia-se em um

Figura 37 – Esquema de agendamento *Fuzzy*.

Fonte: (MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018)

Figura 38 – Regras fuzzy para alocação de recursos.

Rules no.	Throughput	Power level	Output (γ_2)
1	Very low	Low	Very high
2	Low	Low	Very high
3	Medium	Low	Very high
4	High	Low	Very high
5	Very high	Low	Very high
6	Very low	Medium	High
7	Low	Medium	High
8	Medium	Medium	High
9	High	Medium	Medium
10	Very high	Medium	Medium
11	Very low	High	Medium
12	Low	High	Low
13	Medium	High	Low
14	High	High	Low
15	Very high	High	Very low

Fonte: (MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018)

controlador lógico *fuzzy* que através de suas regras tenta garantir a QoS para aplicações sensíveis ao atraso, porém não tem como foco as aplicações, os cenários e as exigências industriais. A principal preocupação do método proposto é garantir taxa de dados mínima para cada classe de tráfego sejam elas H2H ou M2M e como objetivo secundário há a redução do consumo de energia dos dispositivos M2M ativos na rede. Esse método tenta determinar inteligentemente a taxa de dados ideal para cada classe de tráfego M2M e H2H baseado em regras pré-definidas pelos autores.

O método de agendamento semipersistente proposto por (PAN; YANG; LI, 2018) é baseado em QoS, atraso de pacote, qualidade de canal, recursos demandados pelo usuário e taxa de dados média. Esse método é testado e simulado em um cenário *VoIP* usando o simulador *LTE-Sim*⁶. O conceito de alocação semipersistente para *VoIP* pode ser descrito da seguinte forma: os pacotes de voz possuem tamanhos, intervalo de tempo de transmissão e frequência similares, e por isso os dispositivos só precisam que a ERB aloque periodicamente os recursos de rede quando uma nova sessão de voz é criada. Durante um período ativo, os recursos são garantidos com a periodicidade de 20 ms. Esse tipo de agendamento com garantias periódicas reduz os recursos de rádio ocupados por um grande número de operações de sinalização de mapeamento das rajadas de dados dos usuários.

O escalonador semipersistente avalia a prioridade das classes de tráfego com base nos requisitos de latência, RBs requeridos, qualidade de canal e parâmetros de *feedback*. Dessa forma, o algoritmo de agendamento semipersistente tenta otimizar os recursos e a capacidade de transmissão de dados do sistema de comunicação sob a premissa de assegurar a justiça e equidade. Essa referência é importante, pois descreve um agendador periódico aplicado aos pacotes da classe de tráfego de *VoIP* sobre redes LTE. Esse tipo de agendador pode ser aplicado a outras classes de tráfego que possuam pacotes de dados de tamanhos e períodos de transmissão pré-determinados, tais como as aplicações de monitoramento em cenários industriais e ambientais.

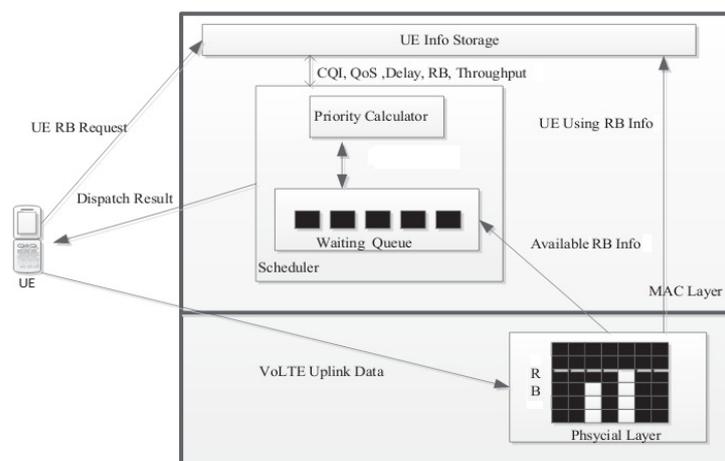
A referência de (PAN; YANG; LI, 2018) apresenta um módulo de agendamento semipersistente, conforme Figura 39, e colabora com o entendimento dos agendadores periódicos. Porém seus cenários de atuação são basicamente *uplink*, destinados aos usuários de *VoIP* sobre redes LTE. Esse método é dividido em duas partes: a primeira – o cálculo de prioridade – coleta e armazena informações dos UEs como requisições e *feedbacks*. A segunda parte chama-se módulo de alocação de recursos que – baseado nas informações fornecidas pela camada física – aloca RBs para pacotes de dados e eventos dos UEs os quais são inseridos em uma fila de espera. Se a alocação de um UE falhar devido à indisponibilidade de recursos ou devido à espera demasiada na fila, esse módulo notifica e inicia-se um novo período de agendamento que recalcula as prioridades.

Os resultados da pesquisa de (PAN; YANG; LI, 2018) mostram que, em comparação com os algoritmos tradicionais, o desempenho em relação à utilização de recursos foi aprimorado,

⁶<https://telematics.poliba.it/LTE-Sim>

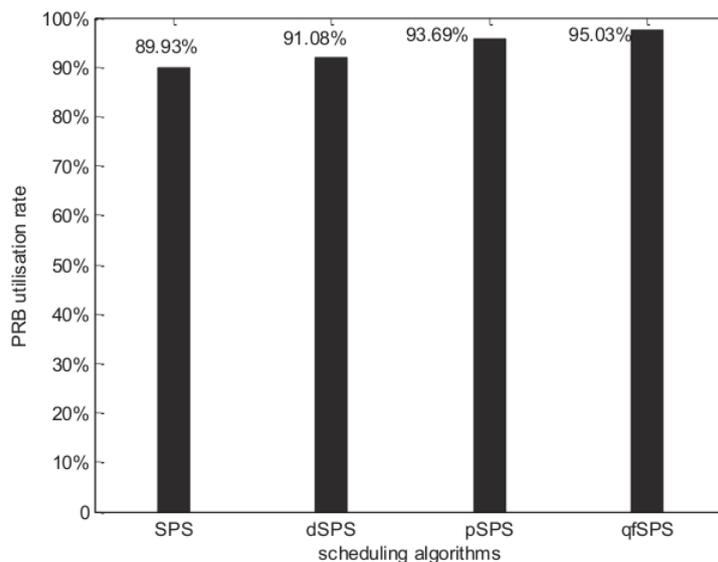
conforme Figura 40.

Figura 39 – Módulo de agendamento semi-persistente.



Fonte: adaptada de (PAN; YANG; LI, 2018)

Figura 40 – Utilização de recursos de 4 algoritmos semipersistentes.

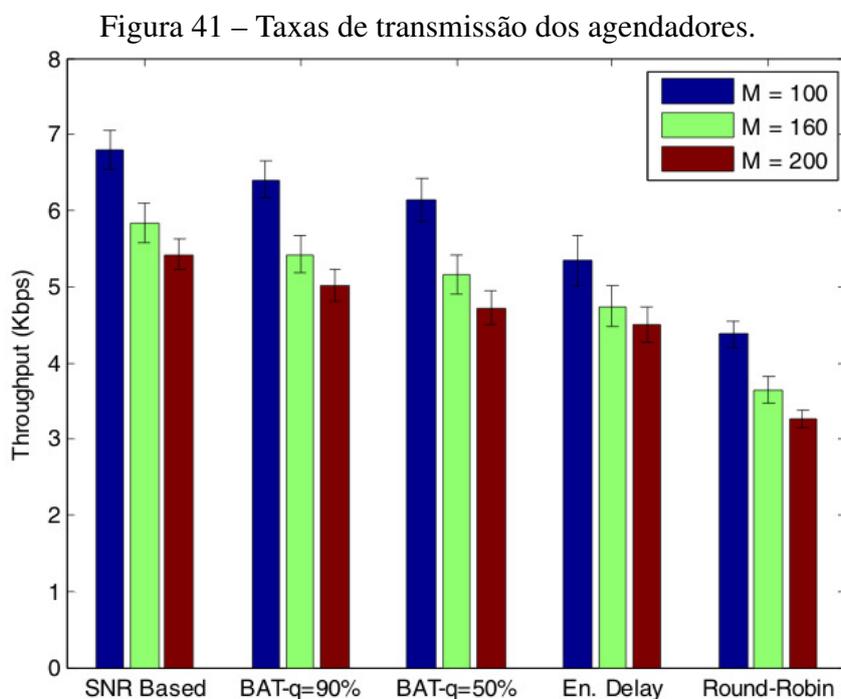


Fonte: (PAN; YANG; LI, 2018)

A taxa de utilização de recursos do algoritmo intitulado *qfSPS* é a mais alta, cerca de 5,6 % maior que a do algoritmo semipersistente tradicional. Por um lado, RBs são distribuídos para pacotes maiores primeiro, então pacotes menores ocupam os RBs restantes. Entretanto, o módulo de cálculo de prioridade *qfSPS*, que baseia-se em QoS, atraso, CQI e taxa de transferência média, foi o que obteve melhor desempenho.

O trabalho de (ELHAMY; GADALLAH, 2015) dedica-se às técnicas de agendamento M2M, propondo um algoritmo de agendamento M2M que ofereça um equilíbrio entre a taxa de transferência e os requisitos de atraso. O algoritmo proposto – chamado de BAT (*Balanced Alternating Technique*) – é adaptável às características do tráfego, pois considera os prazos do

estado do canal e do sistema, de forma ajustável, de acordo com as necessidades da rede. São realizados experimentos para comparar o desempenho da técnica proposta com a de outros agendadores que pertencem às diferentes categorias de agendadores M2M. Os cenários relatados nos experimentos de (ELHAMY; GADALLAH, 2015) apresentam diferentes números de usuários (100, 160 e 200), todos conectados a uma única ERB com a largura de banda de 5MHz, com a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e são avaliados apenas mil subframes de transmissão. Seu algoritmo BAT proposto é comparado aos algoritmos clássicos de *Round-Robin* (RASMUSSEN; TRICK, 2008), SNR Based (GRÖNKVIST; HANSSON, 2001) e o *Enhanced Delay Sensitive* (AFRIN; BROWN; KHAN, 2013). O algoritmo proposto possui um coeficiente Q ajustável que permite priorizar a taxa de transferência de dados: quanto maior o valor dele maior será a taxa de dados. As Figuras 41, 42 e 43 apresentam os resultados de taxa de transmissão, percentual de pacotes e o percentual de alarmes que extrapolaram o prazo máximo de latência, respectivamente.

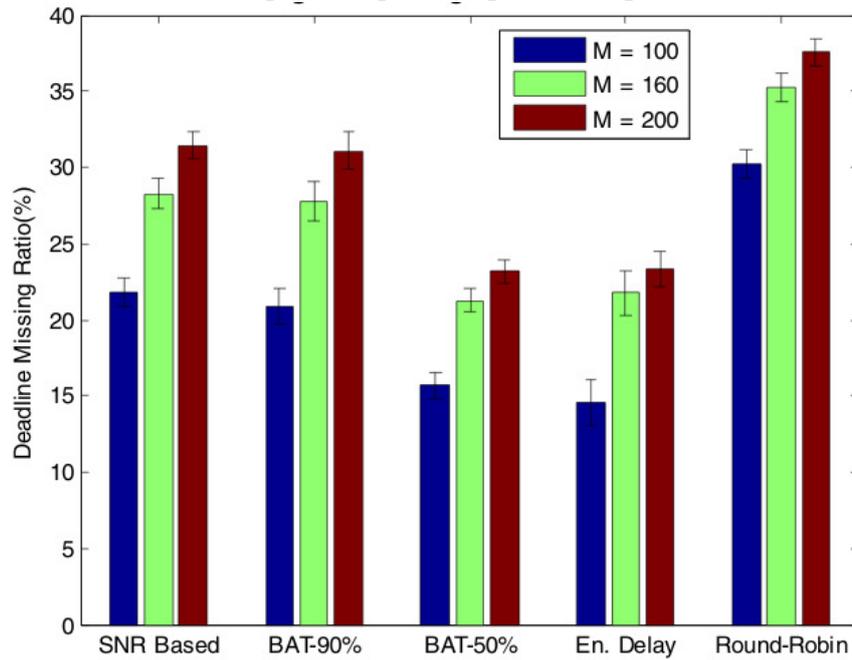


Fonte: (ELHAMY; GADALLAH, 2015)

Os resultados de (ELHAMY; GADALLAH, 2015) mostraram que o algoritmo proposto atinge, em todas as métricas que foram avaliadas, um certo equilíbrio entre as técnicas de agendamento baseadas em SNR e em latência, o que pode ser uma opção flexível para agendamento em diversas redes M2M. Entretanto, não são oferecidos muitos detalhes sobre como é realizada a implementação do algoritmo, nem sobre qual simulador de rede é utilizado e o cenário proposto não é compatível com as características de transmissão LTE-A e 5G atuais.

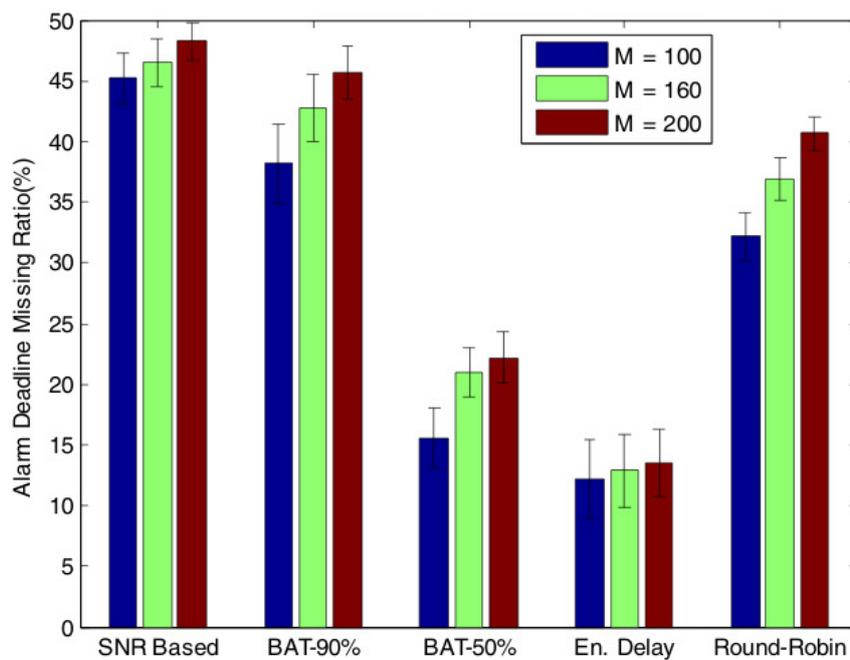
Os trabalhos de (MENG *et al.*, 2017) fazem uma investigação a respeito dos desafios enfrentados pela comunicação M2M em sistemas industriais e apresentam um mecanismo de mensagens M2M, orientado a dados, para o acesso múltiplo simultâneo em aplicações industriais

Figura 42 – Percentual de pacotes que extrapolaram o prazo máximo de latência.



Fonte: (ELHAMY; GADALLAH, 2015)

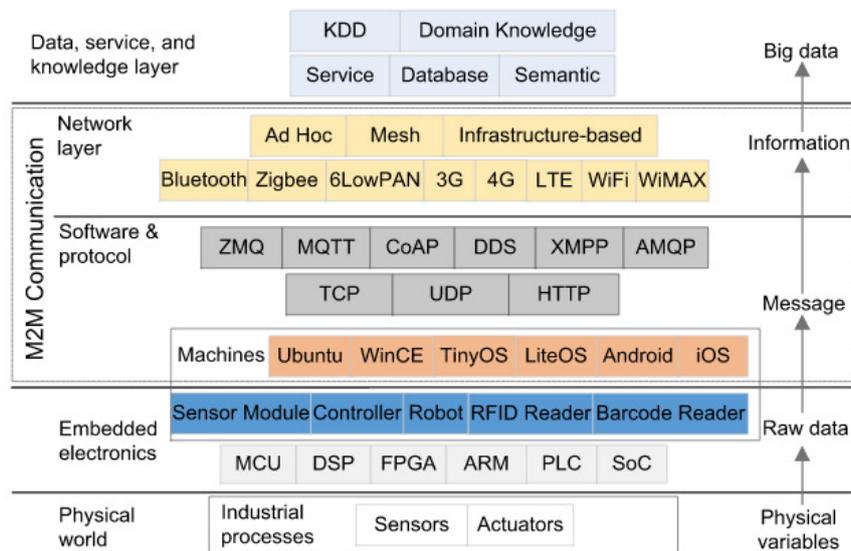
Figura 43 – Percentual de alarmes que extrapolaram o prazo máximo de latência.



Fonte: (ELHAMY; GADALLAH, 2015)

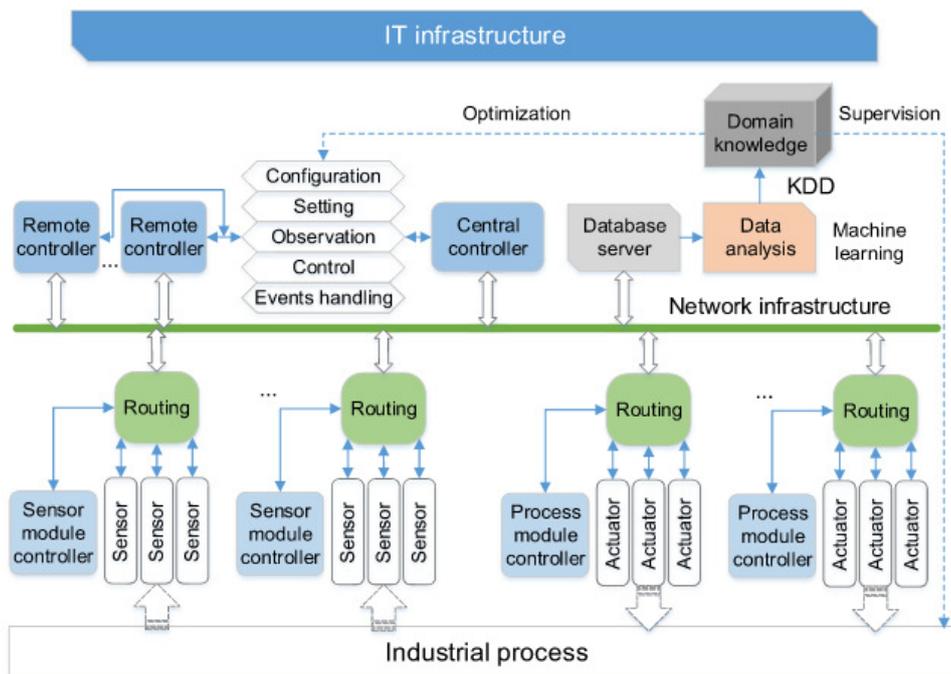
de detecção de riscos. De acordo com (MENG *et al.*, 2017), as aplicações industriais usam as camadas de comunicação descritas pela Figura 44. Uma arquitetura de rede industrial de referência é apresentada, na Figura 45, para comprovar a viabilidade da solução. A avaliação é realizada através de análises qualitativas e experimentais de um estudo de caso.

Figura 44 – Camadas de rede M2M em aplicações industriais.



Fonte: (MENG *et al.*, 2017)

Figura 45 – Arquitetura de referência das aplicações industriais M2M.



Fonte: (MENG *et al.*, 2017)

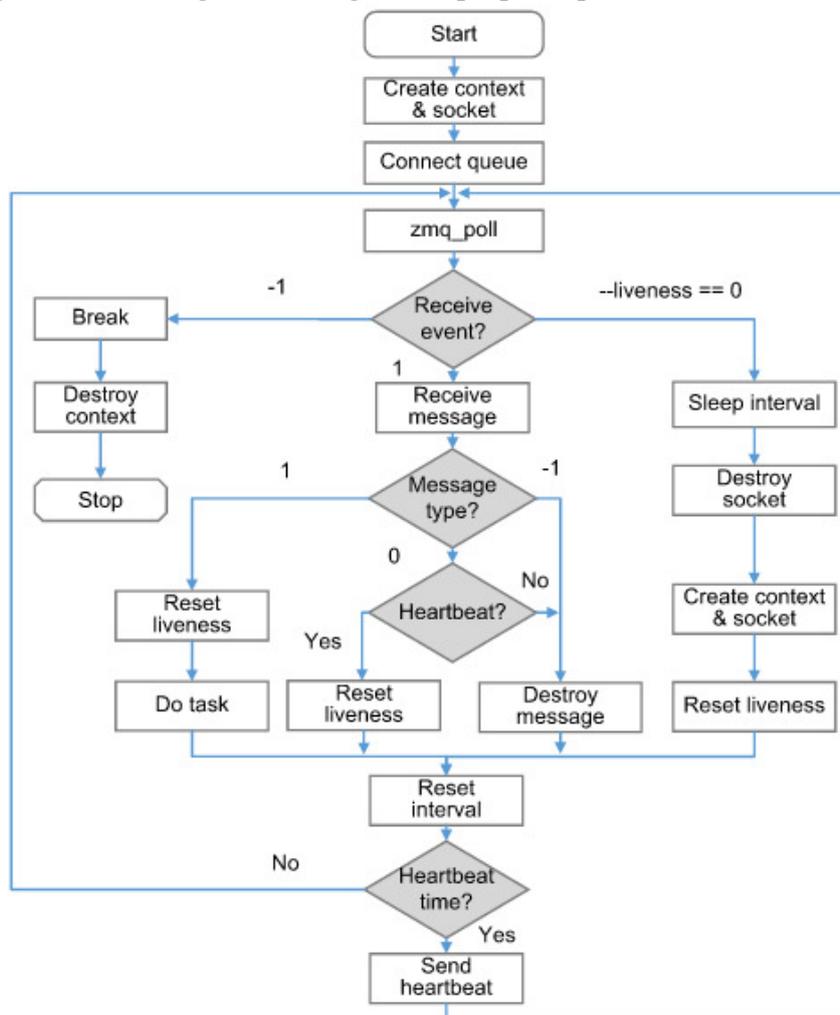
As pesquisas de (MENG *et al.*, 2017) propõem o uso de um protocolo de mensagens

assíncronas, chamado ZMTP (*ZeroMQ Message Transport Protocol*) (HINTJENS, 2013), que é orientado a mensagens entre máquinas e capaz de intervir, quando algo estiver errado, mas também é tolerante a falhas. Algumas das características desse protocolo são:

- Os recursos podem ir e vir dinamicamente e o ZMTP se reconecta automaticamente.
- O protocolo enfileira as mensagens automaticamente, quando necessário.
- Possui maneiras de lidar com filas excessivamente cheias.
- Os aplicativos falam uns com os outros sobre transportes arbitrários: TCP, multicast, em processo, interprocesso.
- Encaminha mensagens, usando uma variedade de padrões.
- Cria *proxies* para fila, encaminha ou captura mensagens com uma única chamada.
- Lida com os erros de rede de forma inteligente, reenviando pacotes automaticamente quando faz sentido.
- Faz mais transmissões com menos consumo de energia.
- Protocolo é suportado por mais de 40 linguagens de programação e múltiplos sistemas operacionais.

Então, (MENG *et al.*, 2017) propõem o uso do algoritmo descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 46. As simulações desse trabalho utilizam o *instrument control toolbox* do *Matlab 2013* e uma placa de aquisição de dados, sensores e controladores para a prova de conceito. São feitas duas avaliações básicas. A primeira com um número fixo de dispositivos, porém, variando o tamanho dos dados a serem transmitidos. Outra com tamanho fixo de dados, porém variando o número de dispositivos. Nesses dois tipos de simulações, é avaliado o que acontece com o tempo de transmissão (latência).

Figura 46 – Fluxograma do algoritmo proposto por (MENG *et al.*, 2017).

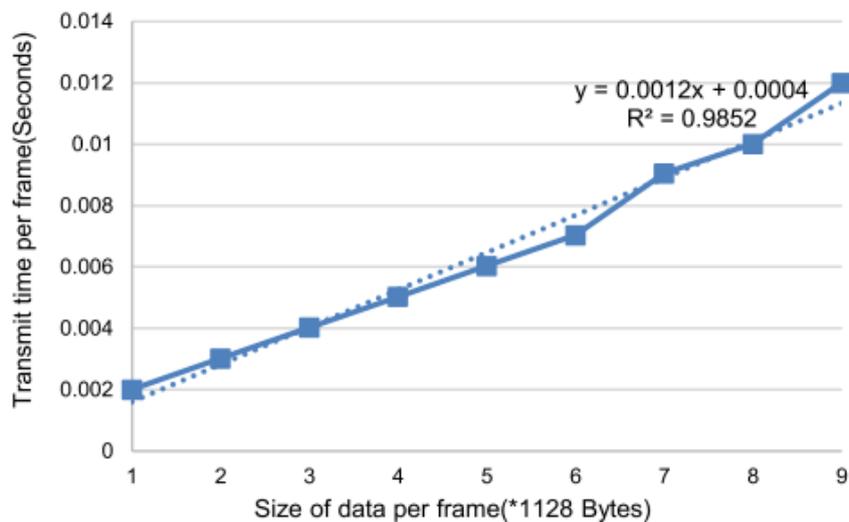


Fonte: (MENG *et al.*, 2017)

Além disso, os resultados apresentados, pela Figura 47, demonstram a tendência de que a latência aumenta de forma linear com o volume de dados; já, na Figura 48, fica evidente que a latência aumenta de forma exponencial de acordo com o aumento do número de dispositivos. A avaliação de (MENG *et al.*, 2017) afirma que há viabilidade do uso do mecanismo proposto devido à sua flexibilidade em lidar com a arquitetura de referência das aplicações industriais M2M.

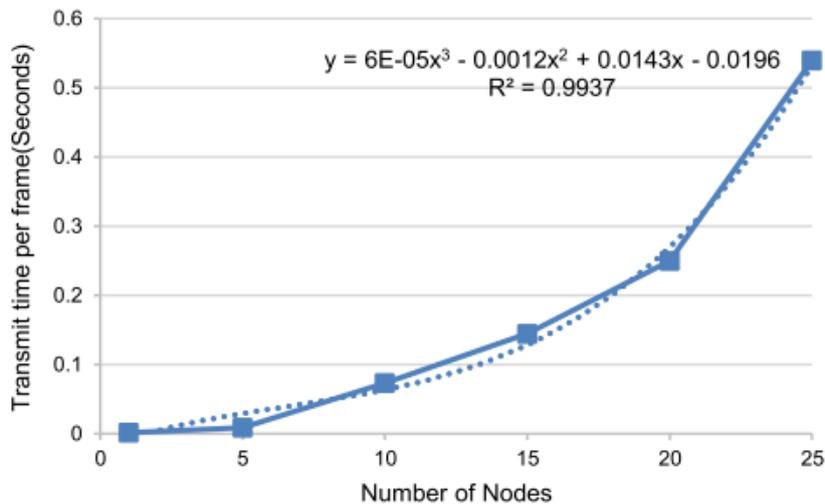
As pesquisas de (YU *et al.*, 2017) propõem-se a investigar novos esquemas de adaptação do enlace, para garantir a confiabilidade da transmissão e melhorar o rendimento dos sistemas M2M de banda estreita. O pseudocódigo do algoritmo NBLA (*Narrow Band Link Adaption*) é descrito por completo nesse trabalho. A adaptação do enlace do laço interno é projetada para lidar com a variação da taxa de erro de bloco, ajustando periodicamente o número de repetição. A adaptação do enlace do laço externo coordena a seleção do nível MCS e a determinação do número de repetição. Essas pesquisas usam simulações de *link level* para validar o desempenho do esquema de adaptação do enlace proposto. O cenário de simulação utiliza um modelo de ruído AWGN

Figura 47 – Crescimento da latência de acordo com o aumento do volume de dados.



Fonte: (MENG *et al.*, 2017)

Figura 48 – Crescimento da latência de acordo com o aumento do número de usuários.

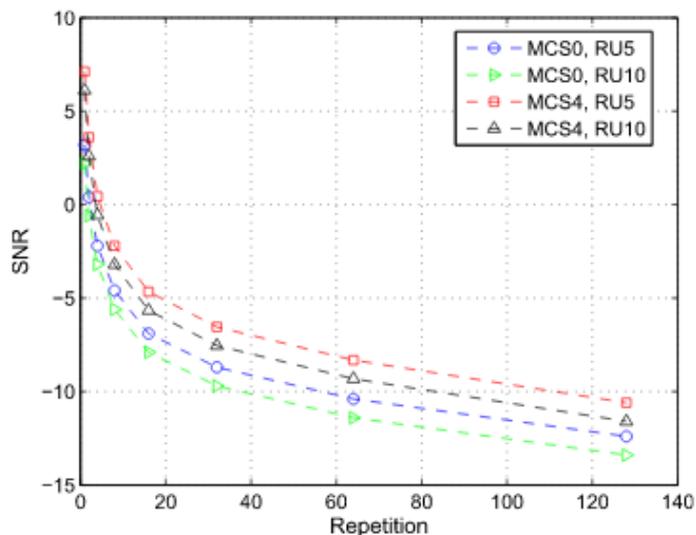


Fonte: (MENG *et al.*, 2017)

simples com uma largura de banda de 200 KHz. Centrado na frequência ISM de 900 MHz, seus blocos de transmissão utilizam mais de uma MCS. São apresentados os resultados de simulação, na Figura 49, para diferentes MCSs e tamanhos de blocos de codificação em número de recursos e também a necessidade de maior repetição dos pacotes em casos de baixa relação sinal ruído.

A proposta de (YU *et al.*, 2017) é comparada com outras duas técnicas em diferentes condições de canal dos dispositivos (boas condições, médias e ruins). A Figura 50 apresenta os resultados e pode-se perceber que o algoritmo NBLA proposto consome menos recursos de

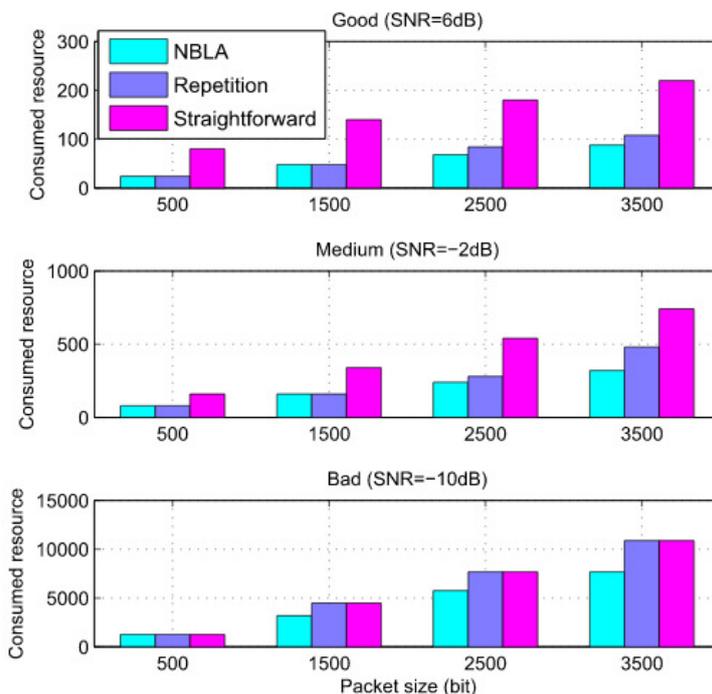
Figura 49 – Relação entre SNR e o número de repetições com diferentes tamanhos de recursos (YU *et al.*, 2017).



Fonte: (YU *et al.*, 2017)

rede, quando comparado com os demais.

Figura 50 – Comparação dos recursos consumidos.



Fonte: (YU *et al.*, 2017)

Entretanto, não é feita uma avaliação com diferentes números de dispositivos nas simulações realizadas, e nem ao menos uma descrição sobre quais cenários industriais estão em foco. Não são apresentados detalhes a respeito das condições de transmissão, tais como: perdas de percurso, ruídos gerados por reflexões do sinal, falta de linha de visada das antenas, desvanecimentos

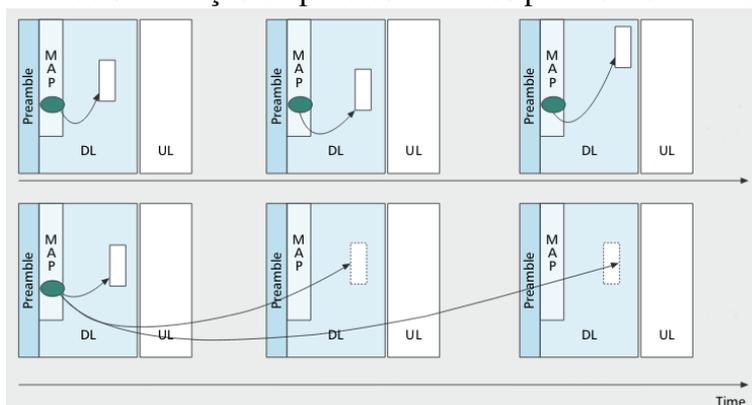
rápidos e lentos ou, ainda, desvios de frequência devido a problemas de propagação de onda. Dessa forma, fica difícil avaliar quão hostis eram os cenários simulados, já que, além disso, não são apresentados detalhes sobre qual simulador foi utilizado nas suas pesquisas.

A proposta de (DALSGAARD; MALKAMAKI, 2008) apresenta a ideia de que uma ERB configura a conexão de um dispositivo e fornece um indicador, se a alocação de recursos for cíclica. A alocação cíclica pode ser encerrada de várias maneiras, incluindo a sobregravação com uma nova alocação e/ou uma mensagem de encerramento do dispositivo e/ou pedido de reconfirmação do recurso cíclico pela ERB. São apresentados os fluxogramas da forma de agendamento que são descritos ao longo do texto, porém não são apresentados resultados de simulações que comprovem que, através do uso de sua estratégia, há ganhos significativos de desempenho.

O trabalho de (FONG *et al.*, 2008) investiga a otimização do número de usuários VoIP, através da redução na sobrecarga associada a mensagens de sinalização de rede. A Figura 51 apresenta, na parte de cima, o funcionamento padrão do sistema de sinalização, e logo abaixo a proposta de como os recursos, a serem transmitidos no *downlink*, podem ser otimizados. Esse trabalho destaca os recursos e as soluções usadas no padrão 802.16 (*Wimax*) para ampliar o tráfego de voz.

(FONG *et al.*, 2008) afirma que as melhorias projetadas na capacidade de VoIP são avaliadas através de simulação, porém nenhum detalhe do simulador, cenários e configurações de rede são fornecidos, outrossim afirma que seus aprimoramentos possuem 15 % nos ganhos da capacidade bidirecional de VoIP, porém não são apresentadas as variações desses ganhos de acordo com o crescimento do número de dispositivos. Essa pesquisa tem como foco principal os usuários que possuem o perfil de transmissão de voz.

Figura 51 – Sistema de sinalização de pacotes de dados padrão e otimizado com repetição.

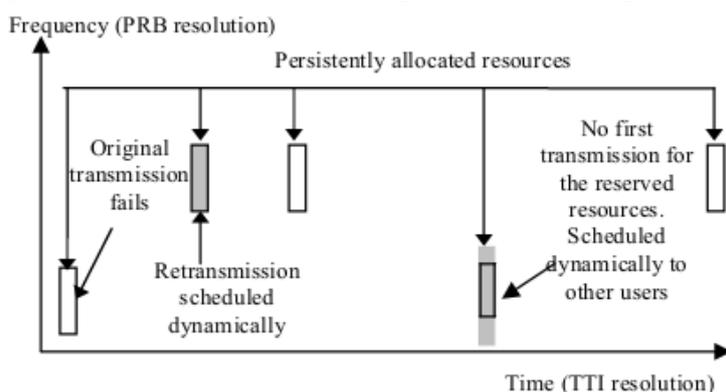


Fonte: (FONG *et al.*, 2008)

O trabalho de (FAN *et al.*, 2008) faz a proposta de algoritmo de agendamento semipersistente de pacotes e métodos de alocação de recursos que destinam-se a desempenhar papel fundamental, a fim de suportar VoIP mais eficiente de forma a ampliar sua capacidade de voz. A proposta básica dos pesquisadores é mostrada pela Figura 52 e também é explicado como funciona, ao

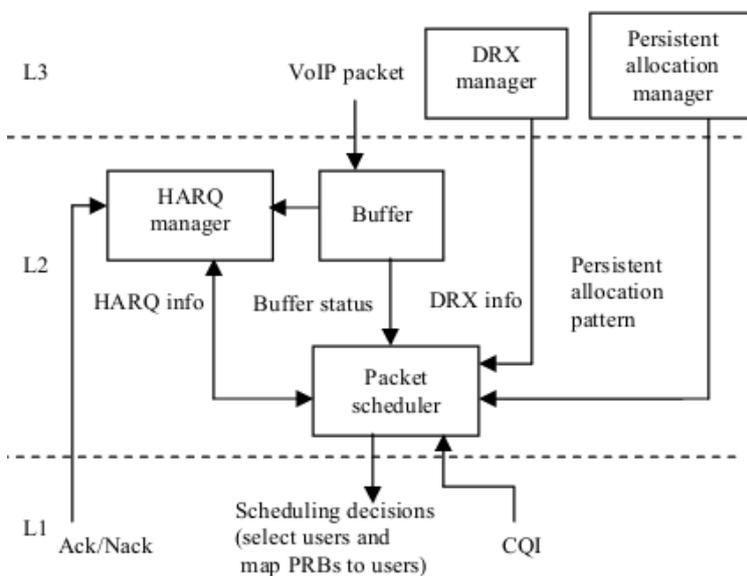
longo das três camadas de rede, o agendamento de pacotes semipersistentes evidenciado na Figura 53. Esse trabalho é bem completo e apresenta, em detalhes, todas as configurações de cenário de simulação com 19 estações rádio base. O teste é realizado para centenas de usuários de voz conectados à rede móvel. A frequência central é 2 GHz, a largura de banda do canal 5 MHz, a duração do quadro de comunicação 1 ms e o modelo urbano de canal é utilizado.

Figura 52 – Conceito básico de agendamento semipersistente.



Fonte: (FAN *et al.*, 2008)

Figura 53 – Principais entidades envolvidas no agendamento semipersistente na ERB.

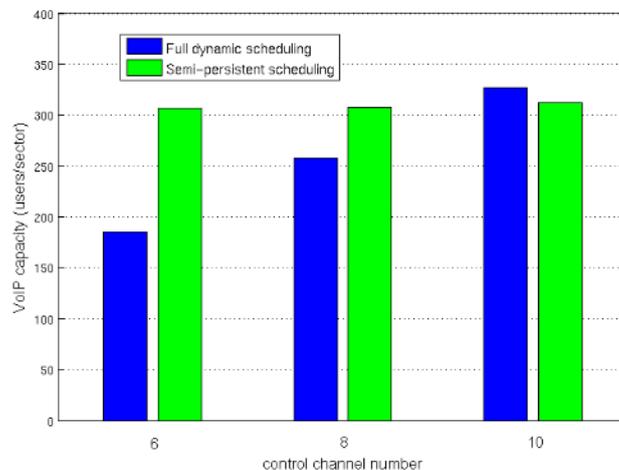


Fonte: (FAN *et al.*, 2008)

No trabalho de (FAN *et al.*, 2008), são apresentados os resultados de simulação que demonstram o aumento do número de usuários VoIP por setor. A Figura 54 apresenta o aumento do número de usuários VoIP, por setor da ERB, em relação ao número de canais de controle e sinalização disponíveis. A Figura 55 mostra que aumentou o percentual do número de usuários VoIP, agendados a cada intervalo de tempo de transmissão. Por fim, a Figura 56 apresenta a

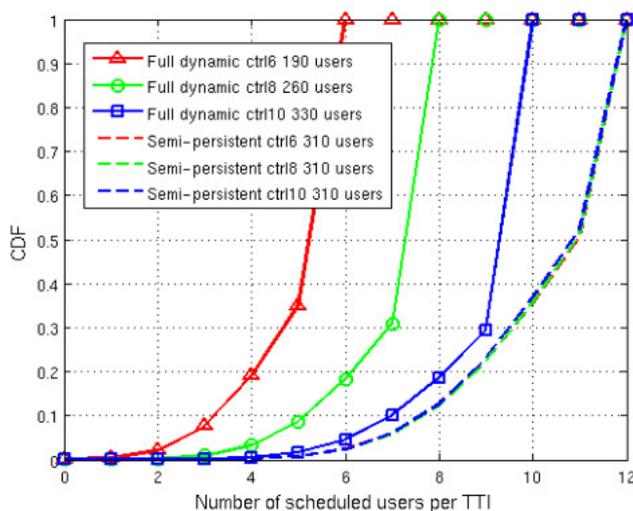
densidade de probabilidade cumulativa da latência dos usuários presentes na rede e percebe-se que a maioria dos usuários que usam o agendamento proposto possuem sua latência reduzida.

Figura 54 – Capacidade VoIP para diferentes números de canais de controle.



Fonte: (FAN *et al.*, 2008)

Figura 55 – Densidade de probabilidade cumulativa do número de usuários agendados por intervalo de tempo de transmissão.

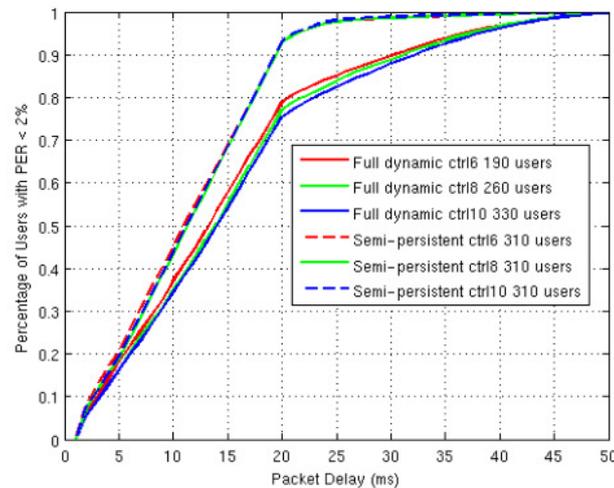


Fonte: (FAN *et al.*, 2008)

A abordagem de reserva de recursos foi proposta para protocolos de VoIP (*Voice over Internet Protocol*) em sistemas de comunicação 4G e o trabalho de (FAN *et al.*, 2008) e (MENG *et al.*, 2017) são mais completos e detalhados a respeito dos algoritmos de agendamentos. Porém o trabalho de (FAN *et al.*, 2008) concentra-se em usuários de VoIP e não em cenários industriais. Já a proposta de (MENG *et al.*, 2017) detem-se em cenários industriais, mas não em um algoritmo de agendamento de recursos de forma periódica.

Segundo (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b) e (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c), o tráfego de dados sensorial em comunicações M2M possui requisitos de atraso hetero-

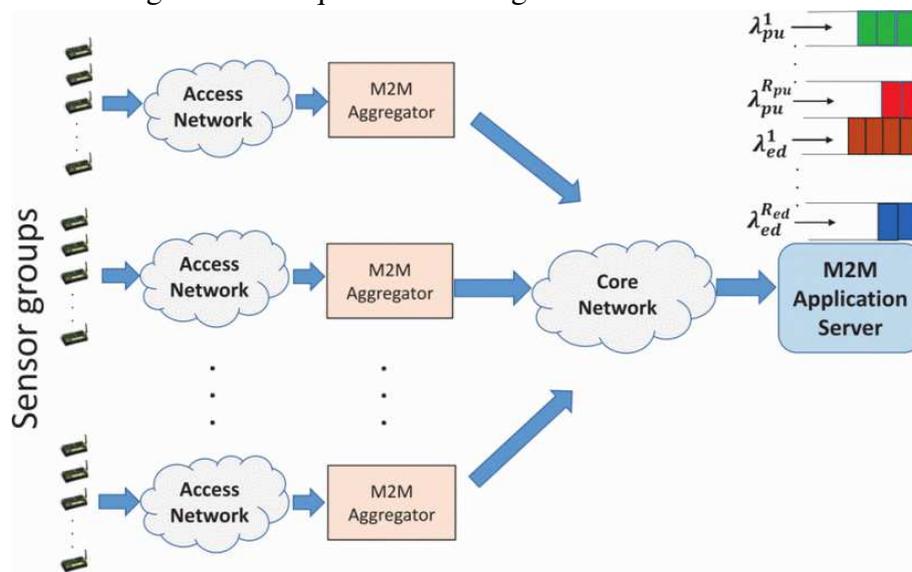
Figura 56 – Densidade de probabilidade cumulativa da latência dos usuários.



Fonte: (FAN *et al.*, 2008)

gêneos. Portanto, esse trabalho possui ênfase em avaliar o desempenho de latência dos diferentes tipos de aplicações M2M. A arquitetura de redes considera a existência de agregadores M2M, servidores de aplicação e diferentes grupos de sensores M2M conforme apresentado pela Figura 57.

Figura 57 – Arquitetura heterogênea do sistema M2M.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b)

(KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b) e (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c) classificam heterogeneamente o tráfego M2M junto ao agregador M2M. Nessa classificação pode haver mais de uma classe de tráfego de atualização periódica (oriundas de sistemas de monitoramento) ou diversas classes dirigidas por eventos (provenientes de alarmes). Os sistemas de monitoramento possuem demandas periódicas que precisam ser transmitidas e processadas em um prazo de serviço, enquanto as mensagens de alarmes são esporádicas, mas tem de ser

atendidas imediatamente, como nos casos de aplicações de tempo real ou sensíveis ao atraso. Há ainda os casos em que esses requisitos são mais flexíveis e as aplicações toleram variações da latência.

O trabalho de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b) propõe uma heurística de agendamento de pacotes proveniente de múltiplas classes de tráfego que visa a minimizar o atraso e maximizar a métrica de utilidade do sistema, tentando manter a QoS de todas classes presentes no sistema de comunicação M2M. Esse trabalho também minimiza sucessivas falhas, em caso de aplicações críticas, penalizando suas ocorrências. A Figura 58 apresenta o algoritmo proposto e através dela pode-se perceber que os pacotes que não atenderam os requisitos de latência são imediatamente removidos do sistema.

Figura 58 – Algoritmo de agendamento proposto por (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b).

Begin Algorithm:

```

while there are backlogged packets do
  Remove the failed PU packets.
  Find classes with packet delay exceeding threshold.
  if some PU classes exceed their threshold then
    Serve the PU class with highest priority among PU
    class that exceed their threshold.
  else if no PU or ED class exceed its threshold then
    Serve the ED class with overall highest priority.
  else if no PU but some ED classes exceed their threshold
  then
    Serve the ED class with highest priority among ED
    classes that do not exceed their threshold.
  else
    Continue processing the current packet in server.
  end if
end while

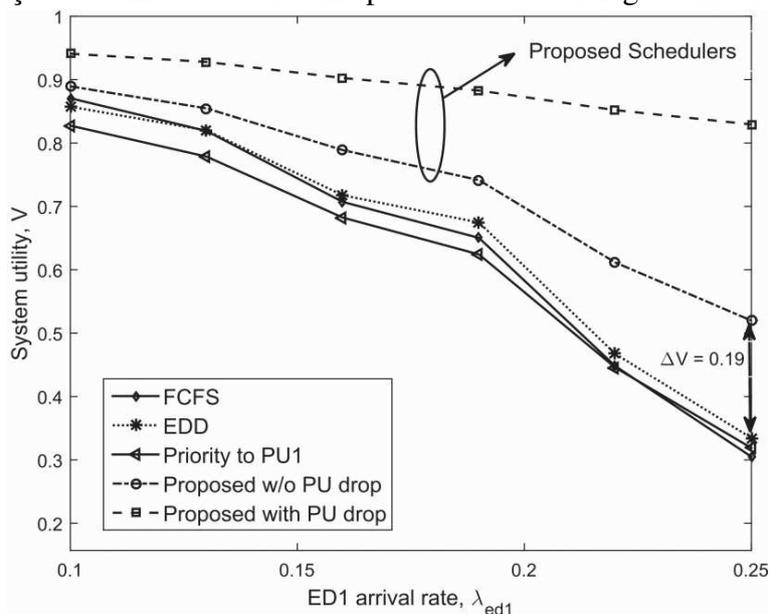
```

Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b)

Através de uma metodologia de validação que utiliza extensas simulações, o trabalho de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b), nas Figuras 59 e 60, demonstra que o escalonador proposto supera os agendadores clássicos e o intervalo de desempenho aumenta de acordo com a heterogeneidade nos requisitos de latência. Entretanto, nessa proposta de algoritmo de agendamento há uma penalidade direcionada para os casos de monitoramento periódico nas ocasiões em que sucessivas falhas de transmissão de dados ocorrem. Nessa pesquisa nota-se que a existência de diversas classes de tráfego dentro de um sistema de comunicação pode ser benéfica para algoritmos de agendamento que levem em consideração os requisitos da aplicação industrial e as métricas de rede.

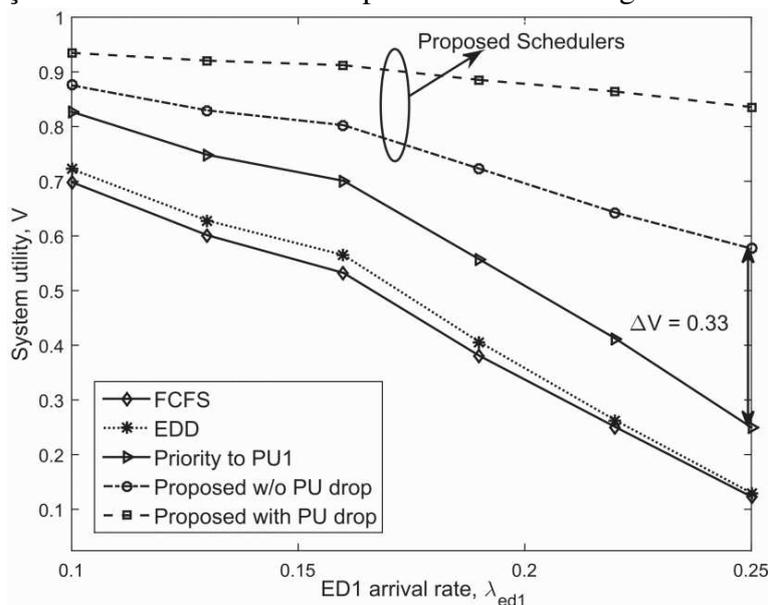
No trabalho (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c) a arquitetura da rede M2M é a mesma, porém o agendador proposto não é o algoritmo heurístico de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b). O algoritmo de agendamento proposto em (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c) leva em consideração diversas métricas, tais como: o atraso máximo tolerável

Figura 59 – Função de utilidade do sistema para classes de tráfego com atraso homogêneo.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b)

Figura 60 – Função de utilidade do sistema para classes de tráfego com atraso heterogêneo.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b)

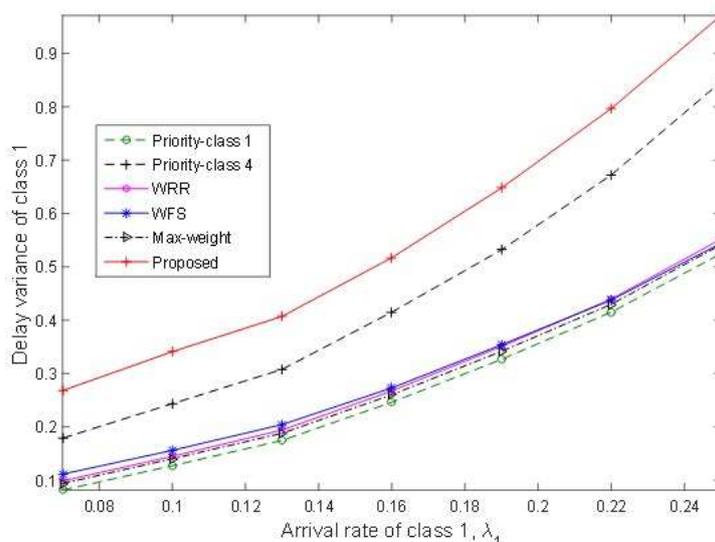
pela aplicação industrial, o *jitter*, o tamanho dos pacotes, a taxa de dados mínima exigida pela classe de tráfego, métricas de rede que remetem à melhoria da qualidade dos serviços. O agendador ideal para essa arquitetura é determinado usando um processo iterativo que tenta identificar o compartilhamento de tempo ideal entre todas as classes de tráfego e suas prioridades de forma que esse processo resulte em maior qualidade de serviços, que é medida através da função de utilidade do sistema.

Dentro dos estudos de (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c), o *jitter* (medido

pela variância da latência dos pacotes) é comparado para diferentes agendadores, conforme apresentado pela Figura 61. Portanto, (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c), dessa maneira, demonstra que a priorização do tráfego de uma determinada classe resulta em sua mínima variação de atraso. Obter uma variação do atraso menor, em geral, é um recurso desejável para políticas de agendamento. Porém isso é ainda mais importante para as aplicações sensíveis aos atrasos, quando um *jitter* alto pode fazer com que a tolerância máxima de atraso de pacotes seja excedida.

A tabela 5 apresenta uma comparação entre os trabalhos relacionados apresentados e aquilo que este trabalho busca realizar. Os trabalhos de (BOCCARDI *et al.*, 2014), (RATASUK *et al.*, 2015), (FETTWEIS, 2012), (FETTWEIS; ALAMOUTI, 2014), (CHIN; FAN; HAINES, 2014), (HOSSAIN; HASAN, 2015) e (DEMESTICHAS *et al.*, 2013) auxiliaram na formação do conhecimento das tecnologias, desafios e aplicações das redes móveis 5G. Entretanto essas pesquisas não estão na respectiva tabela, pois não se enquadram em propostas de redução de sinalização, algoritmos de agendamento e suas respectivas metodologias de validação.

Figura 61 – *Jitter* para diversos algoritmos de agendamento.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c)

Tabela 5 – Tabela comparativa dos trabalhos relacionados

Trabalho	Metodologia	Cenário	Redução de Sinalização	Simulador de rede	Algoritmo de agendamento
(ALI; HOSSAIN; KIM, 2017)	Simulações	Smart cities	Sim	Não especificado	Não
(ANDRES-MALDONADO <i>et al.</i> , 2016)	Simulações	H2H e M2M	Sim	NS-3	Não
(KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a)	Analítica e Simulações	Industrial M2M	Não	Não especificado	Baseado em QoS, latência e função de utilidade
(KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016b)					
(KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c)					
(ABRIGNANI <i>et al.</i> , 2018)	Simulações	Small cells	Não	NS3	Maximização taxa de dados
(OUAISSA; AB, 2018)	Simulações	RT e NRT	Não	LTE-Sim	Prioridade para RT, latência e perdas para NRT
(MEHASEB <i>et al.</i> , 2016)	Analítica	Multi-hop	Não	Não	Potência, QoS e Multi-hop
(ALQAHTANI, 2018)	Analítica	H2H e M2M	Não	Não utilizado	Prioridade para H2H e latência para M2M
(GILUKA <i>et al.</i> , 2018)	Simulações	H2H e M2M	Sim	NS3	Prioridade para H2H e latência para M2M
(GADALLAH; AHMED; ELALAMY, 2017)	Analítica	H2H e M2M	Não	Não utilizado	Algoritmo preditivo
(MARDANI; MOHEBI; GHANBARI, 2018)	Analítica	H2H e M2M	Não	Não utilizado	Lógica Fuzzy: latência, potência e taxa de dados
(PAN; YANG; LI, 2018)	Simulações	VoIP – LTE	Não	LTE-Sim	Baseado em QoS, latência, n° de RBs, SNR e CQI
(ELHAMY; GADALLAH, 2015)	Simulações	H2H e M2M	Não	Não especificado	Baseado em QoS, taxa de dados e latência
(MENG <i>et al.</i> , 2017)	Bancada	Industrial M2M	Não	Não utilizado	Protocolo ZeroMQ
(YU <i>et al.</i> , 2017)	Simulações	IoT	Não	Não especificado	Baseado em SNR
(DALSGAARD; MALKAMAKI, 2008)	Descritiva	VoIP	Sim	Não utilizado	Descrição da patente
(FONG <i>et al.</i> , 2008)	Simulações	VoIP – Wimax	Sim	Não especificado	Semipersistente
(FAN <i>et al.</i> , 2008)	Simulações	VoIP – LTE	Sim	Não especificado	Periódico, latência e taxa de dados mínima
Trabalho proposto	Simulações	Industrial M2M	Sim	Vienna LTE-A	Periódico, <i>jitter</i> e latência

Fonte: elaboração própria.

4 PROPOSTA DE REDUÇÃO DE SINALIZAÇÃO E ALGORITMO DE AGENDAMENTO

4.1 Visão geral da proposta

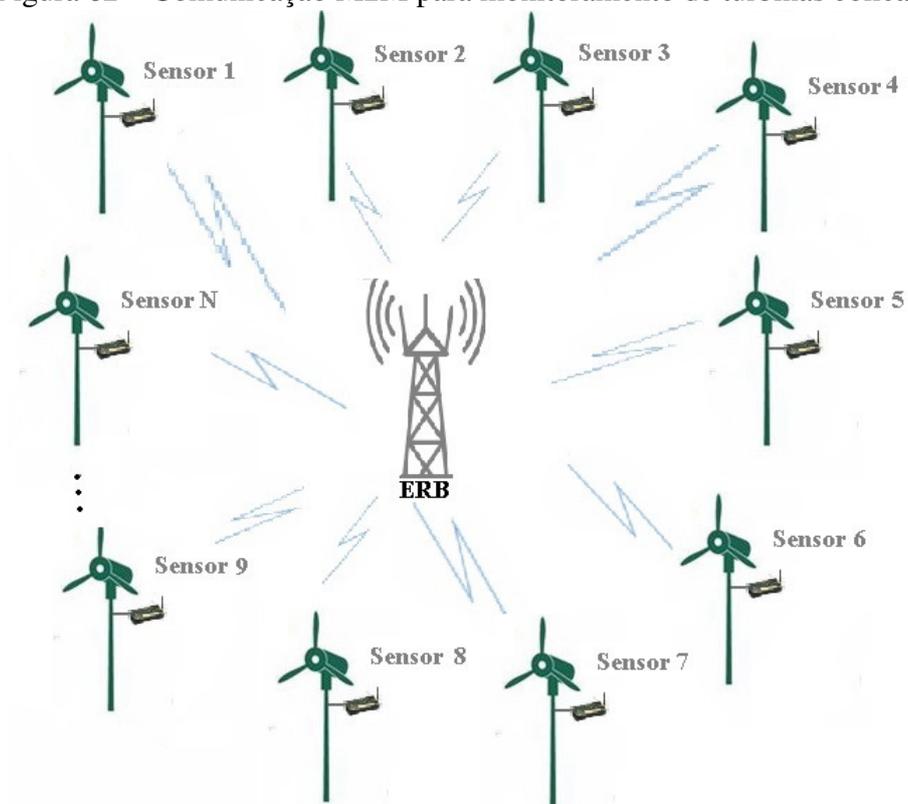
A proposta deste trabalho enfatiza a comunicação M2M industrial, no uso de técnicas de redução da sinalização e agendamento periódico com a finalidade de realizar melhorias de comunicação, pois a conectividade e a demanda dos dispositivos fixos e móveis, presentes nos sistemas de automação, necessitam usar interfaces de comunicação adequadas aos requisitos do sistema.

Dentre os principais cenários, enfatiza-se aqueles que demandam monitoramento de um grande número de sensores que estão distantes e espalhados dentro de uma área territorial considerável. As Figuras 62, 63 e 64 expõem esses cenários cujas aplicações demandam comunicação periódica com uma ERB.

No caso de uso, apresentado pela Figura 62, a aplicação se enquadra no ramo de monitoramento de turbinas geradoras de energia elétrica, as quais estão presentes nos parques eólicos nacionais. Essa aplicação baseia-se no cenário de máquinas rotativas de difícil acesso, onde o intuito da utilização da comunicação M2M é descobrir anomalias que demandem manutenção. A Figura 63 apresenta uma aplicação que abrange uma série de indústrias tais como: refinarias, grandes produtoras de adubo, petroquímicas e outras que demandem a utilização de parques de tanques para o armazenamento de matéria-prima ou produtos fabricados. Nesse estudo de caso, realiza-se, em geral, o monitoramento de fluxo, temperatura, nível e pressão dos tanques com a finalidade de evitar vazamentos de material que seja prejudicial ao meio ambiente e aos trabalhadores. Por fim, no caso apresentado pela Figura 64, nota-se que a aplicação é voltada para monitorar e controlar o volume total de produção, pois as válvulas instaladas nos poços de perfuração devem ser ajustadas de acordo com a condição indicada pelo fluxo, pressão e temperatura. A extração de petróleo utiliza diversas cabeças de perfuração e extração ao longo de uma grande área territorial e a condição de cada poço deve ser monitorada via comunicação M2M. Assim, os ajustes dessas válvulas realizam-se remotamente e a frequência de visitas físicas serão reduzidas.

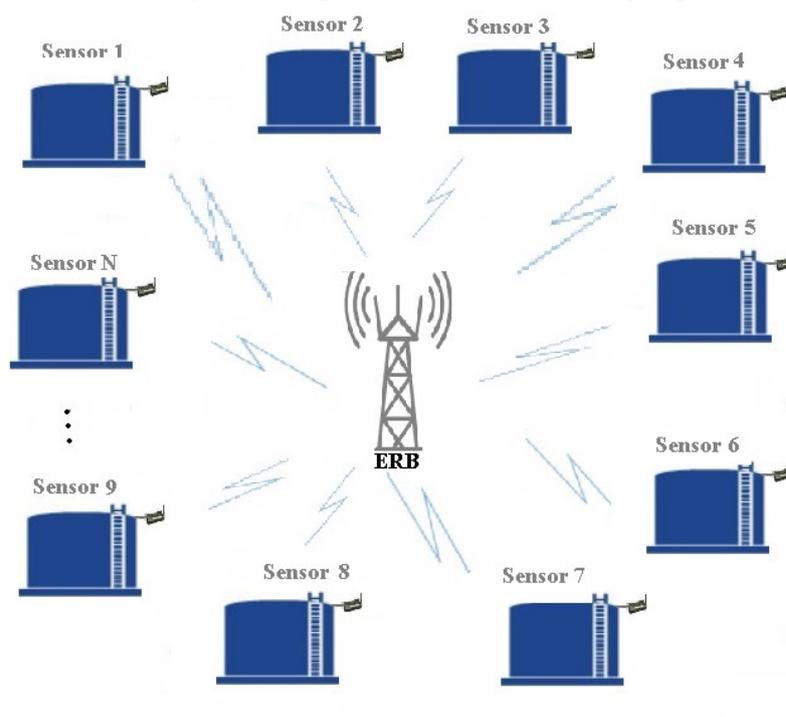
Percebe-se que nesses cenários, devido à dispersão territorial, pode haver uma ou mais ERBs

Figura 62 – Comunicação M2M para monitoramento de turbinas eólicas.



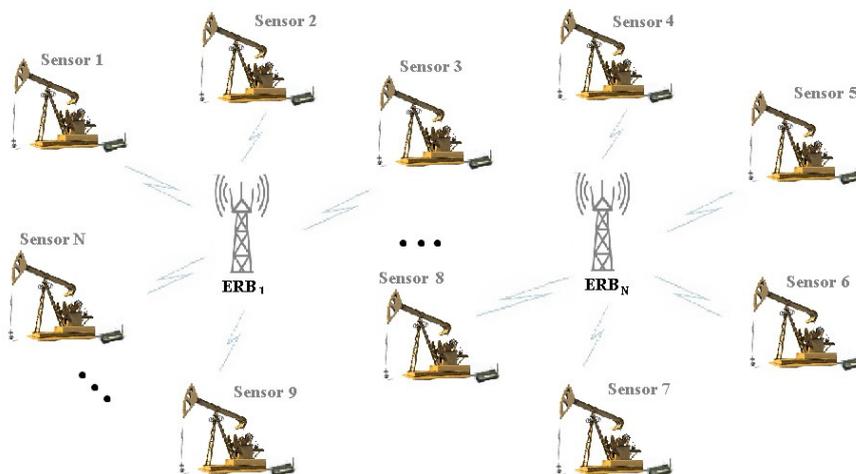
Fonte: elaboração própria

Figura 63 – Comunicação M2M para monitoramento de parque de tanques.



Fonte: elaboração própria

Figura 64 – Comunicação M2M para monitoramento de cabeças de perfuração de petróleo.



Fonte: elaboração própria

para a transmissão de dados. Porém é importante esclarecer que cada ERB realiza, individualmente, o agendamento dos dados dos dispositivos que a ela estão conectados. Entretanto, antes de qualquer transmissão de dados, os dispositivos precisam realizar o procedimento de conexão com a rede M2M. Junto a esse procedimento há um processo de autenticação e identificação da ERB com melhor SNR, a qual será escolhida para ser a provedora dos recursos de rede dos dispositivos. Portanto as mensagens de sinalização e agendamento ocorrem, individualmente, para cada usuário que está conectado em uma ERB que lhe foi designada.

4.2 Proposta de redução de sinalização

De acordo com (RAPPAPORT, 2010), em muitos sistemas de comunicação sem fio, os objetivos comuns, normalmente, incluem elevar as taxas de dados, aumentar a eficiência espectral da transmissão e obter uma cobertura melhor. Uma forma de ampliar a eficiência e taxas de dados é o uso de transmissões coordenadas multiponto (*Coordinated MultiPoint - CoMP*) que envolve a transmissão de pacotes de dados a partir de diferentes pontos de transmissão (diferentes ERBs). Assim, vários pontos de transmissão, bem como o dispositivo, precisam conhecer os detalhes de sinalização, controle e configuração para enviarem ou receberem, adequadamente, os pacotes de dados.

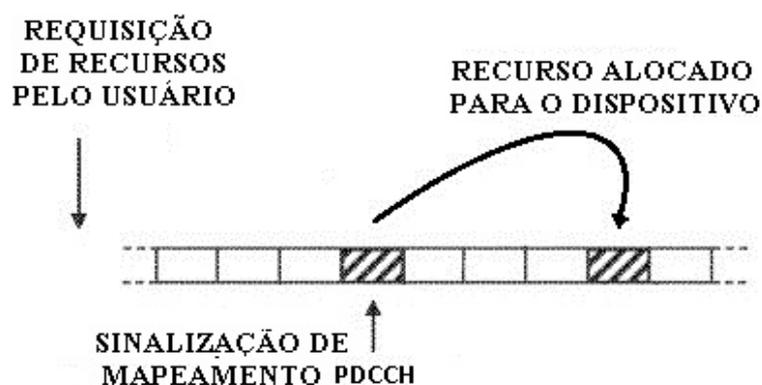
Uma hipótese de aumento da eficiência é o uso de um esquema de sinalização e controle para eventos periódicos gerados por sensores, ou outros dispositivos que possuam períodos de transmissão determinísticos. Esse esquema de sinalização e controle deve ser implementado por meio do canal PDCCH que é responsável por sinalizar, agendar e garantir recursos de forma periódica, reduzindo, assim, as mensagens de sinalização e controle da camada física.

Criar uma única mensagem de sinalização e controle é uma hipótese que reduz a sobrecarga

de requisições de transmissão frequentes, como a originada por sensores nas suas respectivas atualizações periódicas de valores. Esse tipo de abordagem de reserva de recursos periódica já foi realizada para protocolos de VoIP (*Voice over Internet Protocol*), os quais possuem tráfego de dados determinístico nos trabalhos de (HAN *et al.*, 2018), (LUNTTILA; OJALA, 2017), (DALSGAARD; MALKAMAKI, 2008), (CHO *et al.*, 2009), (FONG *et al.*, 2008) e (FAN *et al.*, 2008) em sistemas de comunicação 4G.

Normalmente, os pacotes de dados dos sensores precisam chegar ao controlador com uma certa frequência. Tais pacotes são todos do mesmo tamanho durante todo o tempo da conexão e, provavelmente, permanecerão assim por dezenas de quadros, a não ser que o dispositivo tenha alguma mudança de condição de canal que necessite alterar para outro esquema de modulação e codificação (MCS) no decorrer de suas transmissões. Portanto, a quantidade de dados necessária para a transmissão de pacotes dos sensores é quase predeterminada e cíclica, tanto nos canais de *downlink* quanto *uplink*. No entanto, no padrão atual M2M a informação de alocação é transmitida para cada *subframe*, usando a sinalização de mapeamento via PDDCH, conforme mostrado na Figura 65 a seguir. Esse tipo de alocação de dados processa-se de forma dinâmica de acordo com as requisições de transmissão, mas, dessa maneira, a sobrecarga torna-se muito grande.

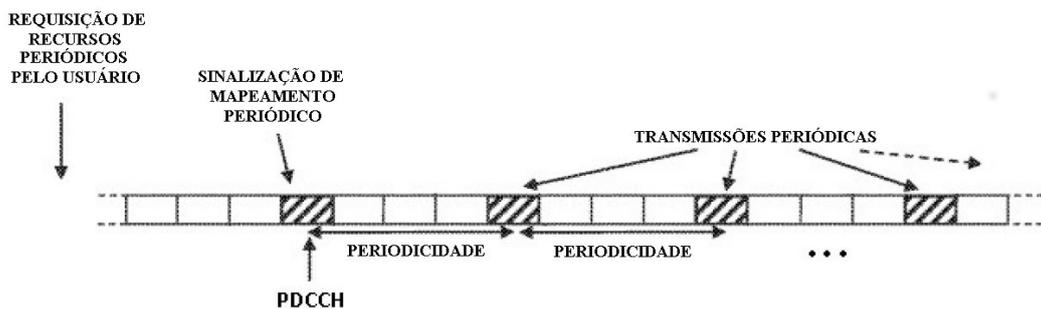
Figura 65 – Mapeamento das rajadas de dados dos usuários.



Fonte: elaboração própria

Considerando a propriedade periódica do tráfego dos sensores de uma rede industrial, surge a hipótese de que a alocação de recursos para dispositivos do tipo sensor não seja feita de forma dinâmica (em cada *subframe*). Em vez disso, a requisição de transmissão realizada no PUCCH deve ser assinalada como cíclica, portanto a sinalização e a alocação desses recursos cíclicos devem ser feitas no PDCCH, podendo ser aplicadas tanto para *downlink* quanto para *uplink*, conforme apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Mapeamento cíclico das rajadas de dados dos usuários.

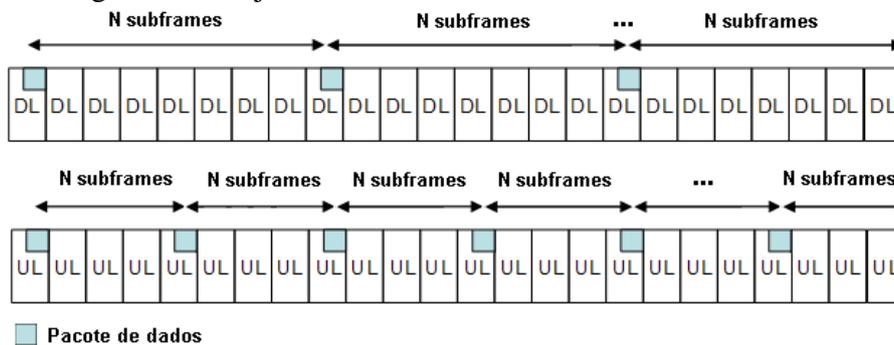


Fonte: elaboração própria

O desenvolvimento de algoritmos de agendamento de recursos, visa a otimizar as informações a respeito de que modo os recursos serão destinados, periodicamente, aos dispositivos e de que forma eles devem transmitir seus dados. Caso a redução de RBs destinados ao controle, sinalização e mapeamento das transmissões dos dispositivos se concretize; então, esses recursos poderão ser destinados, pelo agendador, aos demais dispositivos que estão ativos no sistema de comunicação.

O esquema de agendamento periódico é uma solução relevante na tentativa de ampliar a capacidade de transmissão de dados dos sensores, já que pode diminuir, significativamente, o número de RBs de sinalização, caso a quantidade de nós sensores for elevada. Essa hipótese pode reduzir, consideravelmente, a sobrecarga periódica de sinalização do mapeamento dos pacotes de dados dos usuários que está presente nos *subframes* de comunicação. Esse mapeamento aparecerá uma única vez para agendar várias transmissões destinadas a um nó sensor, reservando-lhe recursos fixos de N em N *subframes*, conforme Figura 67.

Figura 67 – Rajadas cíclicas de dados oriundas dos sensores.



Fonte: elaboração própria

A ERB deve fazer um agendamento periódico de transmissão *downlink* com um período predefinido de modo que, na primeira oportunidade, a ERB transmitiria tal atribuição periódica ao dispositivo. Essa sinalização de transmissão não será retransmitida por um longo tempo, reduzindo, assim, a sinalização de mapeamento dos pacotes de dados dos usuários no PDCCH.

Os pacotes são alocados de acordo com um ciclo de periodicidade. O ciclo é um parâmetro que pode depender de cada sensor e suas respectivas necessidades de atualização de dados dentro da aplicação industrial.

Os RBs pré-alocados de modo periódico irão conter futuros pacotes de dados para o mesmo dispositivo conectado. Por conseguinte, a sobrecarga de sinalização em mensagens de mapeamento, tanto *downlink* quanto *uplink*, existe apenas na estrutura do quadro onde o fluxo de dados do sensor começa ou termina, ou ainda, no caso de a configuração de SNR alterar-se, haverá a necessidade de reconfiguração de MCS devido à alteração de sua condição de canal.

Essas mensagens de sinalização PDCCH que antes eram transmitidas a cada *subframe*, agora para os casos de alocação de usuários com tráfego cíclico, não serão transmitidas por um longo número de *subframes*, reduzindo assim essa sobrecarga. Os recursos de dados dos sensores periódicos serão garantidos de acordo com sua taxa de atualização, que é variável de acordo com os requisitos de cada dispositivo dentro da aplicação industrial.

Combinado com essa estratégia de redução de sinalização, foi desenvolvido um algoritmo de escalonamento que controla dinamicamente os recursos que serão atribuídos aos sensores que necessitam fazer atualizações periódicas da melhor maneira. Esse esquema que visa a redução do número de mensagens de sinalização e controle é implementado no simulador de rede LTE-A, tendo por finalidade identificar qual o percentual de recursos do sistema de comunicação pode ser economizado, utilizando essa hipótese.

4.3 Proposta de agendador de recursos periódicos

O algoritmo de agendamento cíclico proposto pode ser aplicado não somente a sensores, bem como a outros serviços que também possuem características periódicas similares. Um exemplo pode esclarecer de forma prática as vantagens do método proposto: considerando um sensor que precise enviar no *uplink* um pacote de dados de tamanho fixo $T_d(n)$, suponha-se que suas mensagens de controle sejam de tamanho fixo $T_s(n)$ e o número do quadro é dado por n , então, o percentual médio ($\bar{P}_{quadros}$) de sobrecarga seria conforme a equação 6.

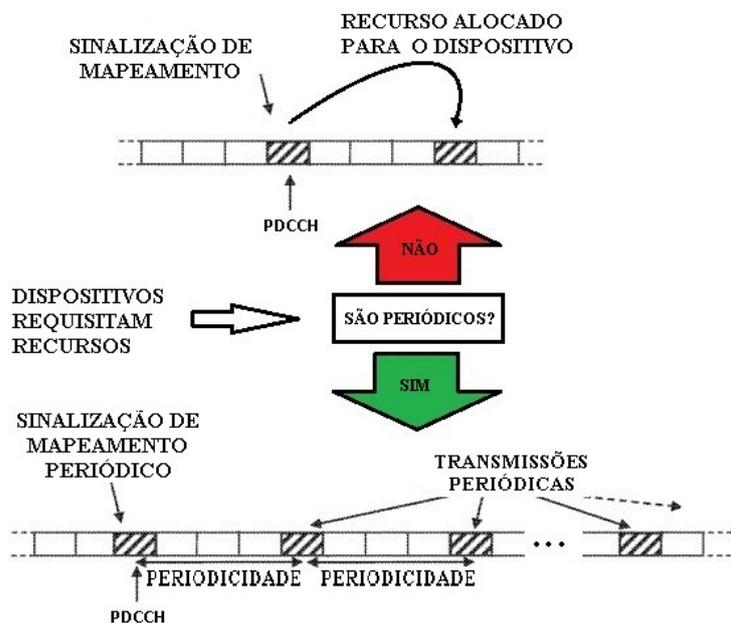
$$\bar{P}_{quadros} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{T_s(n)}{T_s(n)+T_d(n)}}{N} 100\% \quad (6)$$

Se a quantidade de sinalizações $T_s(n)$ for reduzida devido ao agendamento periódico, conforme a proposta, o sistema terá menor percentual de sobrecarga. Esses recursos reduzidos podem se transformar em dados $T_d(n)$, o que também ajuda a reduzir a sobrecarga geral do sistema.

A eficiência de transmissão para tráfego de dados periódico é melhorada graças à remoção de sobrecarga desnecessária de sinalização por quadro. Possivelmente, os demais dispositivos que não se adequam nesse tipo de transmissão periódica não serão afetados pelo algoritmo e serão agendados pelo algoritmo padrão do sistema de comunicação M2M. Os diagramas apresentados

pelas Figura 68 e Figura 69 mostram como pode ser realizada a alocação periódica em conjunto com a alocação padrão.

Figura 68 – Sinalização para a alocação periódica.



Fonte: elaboração própria

Antes de se reduzir a sinalização dos dados requisitados pelos usuários, algumas condições precisam ser verificadas, tais como: se a requisição de transmissão do dispositivo é cíclica e se o *subframe* de dados atual já possui recursos periódicos. Caso a requisição não seja cíclica, primeiro, são alocadas as rajadas que são de retransmissões, e, depois, o alocador padrão é utilizado. Entretanto, caso seja cíclica, faz-se necessário executar uma segunda verificação. No *subframe* de dados atual, caso não existam recursos periódicos, surge, então, a oportunidade para agendar recursos de forma cíclica; depois, serão feitas as alocações de retransmissões e, por fim, a alocação padrão. Porém, caso o *subframe* já contenha recursos periódicos previamente reservados, podem ocorrer três possibilidades:

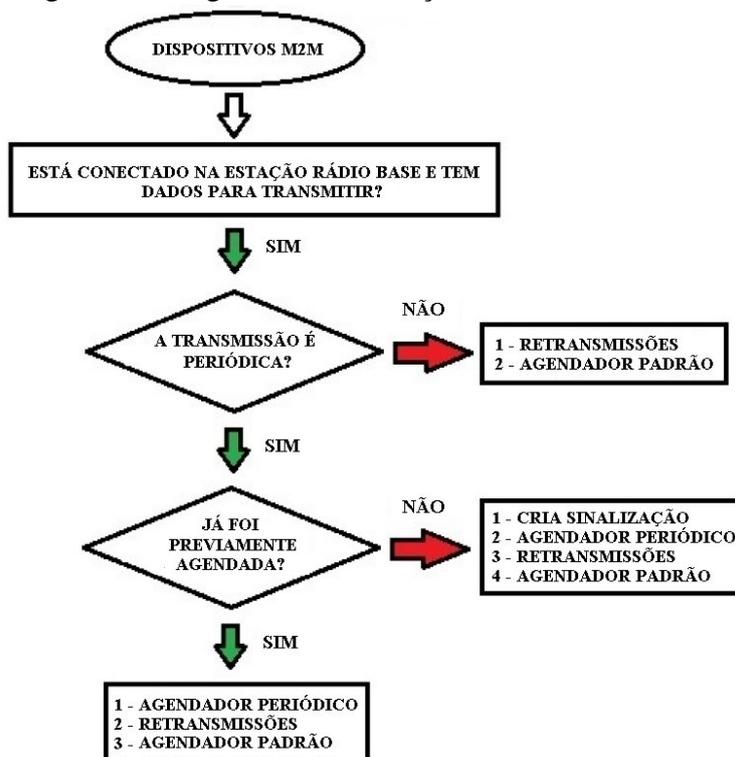
1. A MCS atual precisa ser alterada para uma mais robusta, ou seja, menos vantajosa em termos de capacidade de transmissão de *bits*. Então, os pacotes do dispositivo M2M devem ser resinalizados e reagendados;
2. A MCS atual é diferente da antiga, porém mais vantajosa em termos de capacidade de transmissão de *bits*, então, a alocação cíclica permanece como está;
3. A MCS não muda, então, a alocação não muda e não há necessidade de sinalização (melhor caso).

Devido à dinamicidade dos canais de comunicação sem fio e do movimento relativo dos próprios usuários do sistema de comunicação M2M em relação às ERBs, pode-se dizer que a

mudança de MCS dos dispositivos ativos ocorre rotineiramente, a fim de adequar e aumentar a robustez da comunicação de dados.

A Figura 69 apresenta o fluxograma básico do algoritmo desenvolvido. Fez-se necessário alterar os agendadores padrão do simulador, para que esse novo agendador de recursos cíclicos seja testado e avaliado.

Figura 69 – Algoritmo de alocação de recursos cíclicos.



Fonte: elaboração própria

De acordo com (RUPP *et al.*, 2016), as mensagens de sinalização foram modeladas no simulador LTE-A usando sinalizações compactadas, mas o tamanho dessas sinalizações pode ser diferente em cada *subframe*. Duas novas informações foram adicionadas às mensagens de sinalização: período em *subframes* e o número de recursos que devem ser reservados periodicamente em futuros *subframes* (totalizando 4 bytes). Tais informações são necessárias para empregar as técnicas de redução de sinalização e agendamento periódico. Todas essas mudanças, nas mensagens de sinalização, são implementadas no simulador LTE-A com a finalidade de suportar a reserva de RBs nos *subframes* atuais e futuros. Dessa forma, cabe ressaltar que altas variações, nas condições de canal dos dispositivos M2M, removeriam o ganho do agendador proposto uma vez que – quando um sensor PU muda sua MCS – uma nova mensagem de sinalização deve ser transmitida, mas esse pode não ser o caso usual nos cenários industriais.

O código fonte do agendador de recursos periódicos foi implementado no simulador LTE-A e encontra-se no apêndice A.5.

5 VALIDAÇÃO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo, utilizando o simulador LTE-A disponibilizado pela Universidade de Viena¹, apresenta as configurações da rede M2M sobre LTE-A, os resultados de redução de sinalização e das métricas de rede para cada um dos algoritmos de agendamento. Exibe, igualmente, a análise de dados e as conclusões para ambos os canais de comunicação *downlink* e *uplink*.

O fluxo de simulação segue a metodologia Monte Carlo a qual é eficiente para análise de dados. Essa metodologia realiza grande quantidade de cálculos com distintos conjuntos de valores aleatórios, gerados através de distribuições estatísticas. Dependendo do número de incertezas e dos intervalos especificados para as variáveis, esse modelo de simulação pode ter de executar dezenas de recálculos antes de terminar e, dessa forma, cria um intervalo confiável de valores para os resultados. Essas repetições são necessárias, para alterar os valores aleatórios das variáveis em questão, pois os computadores são máquinas determinísticas.

É preciso que os resultados dos ensaios e cenários industriais simulados sejam relevantes e estatisticamente válidos. As métricas de desempenho do sistema são apenas amostras para uma determinada simulação. O desempenho real deve ser estimado com base nessas métricas, portanto diversas simulações independentes (com diferentes sementes) foram executadas de modo que se pudesse estimar, adequadamente, os resultados de saída. Assim, cada métrica de desempenho é estimada dentro de um intervalo de confiança (com um determinado percentual para que seja estatisticamente válido). Todos os processos de validação de simuladores de comunicação móvel são descritos e explicados em detalhes no trabalho de (JERUCHIM; BALABAN; SHANMUGAN, 2006).

O *Matlab* foi empregado para desenvolver um esquema de redução de sinalização e um agendador de recursos periódicos no simulador LTE-A da Universidade de Viena. A ideia é que, a partir desse simulador, seja não só possível automatizar processos de manipulação de posicionamento dos usuários, analisar suas métricas de comunicação, mas também obter os dados relativos às transmissões feitas entre as ERBs e os dispositivos fixos e móveis da rede. Para auxílio na realização dessas tarefas, foram utilizadas bibliotecas de processamento paralelo, processamento digital de sinais, estatísticas e etc. Essas bibliotecas são importantes para a execução do pós-processamento nos resultados gerados pelo simulador LTE-A usado.

¹<https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/>

5.1 O simulador de rede LTE-A

De acordo com (RUPP *et al.*, 2016) e (TARANETZ *et al.*, 2015), o simulador LTE-A possui classes de usuários que são separadas em grupos prioritários. Esses grupos têm prioridades diferentes, parâmetros de agendamento e modelos de tráfego. Na análise de simulação, todos os sensores M2M foram definidos como classe de tráfego PU (*Periodic Update*) ou ED (*Event Driven*). Os pacotes de dados dos dispositivos M2M são formados respeitando o tamanho dos RBs, a MCS e obedecendo à quantidade de dados concedidos para cada usuário. Após esse procedimento, o agendamento periódico é realizado para o *subframe* de comunicação em questão, a fim de alocar os pacotes de usuários da maneira mais inteligente possível.

Com a intenção de validar e analisar o desempenho, foram implementados em um simulador de redes móveis LTE-A os esquemas de redução de sinalização e o agendador de recursos periódicos descritos nas Seções 4.2, 4.3 respectivamente. Esse simulador desenvolvido na Universidade de Viena (RUPP *et al.*, 2016) é implementado no *Matlab*² e todas as mudanças sugeridas foram realizadas respeitando o paradigma de programação paralela inerente a ele (ver (TARANETZ *et al.*, 2015) para mais detalhes).

O tráfego de cada sensor PU (*Periodic Update*) M2M foi modelado usando uma taxa de dados de 32 kbits/s. Os sensores PU têm seu tráfego definido por um pacote de 64 bytes a cada 2 ms. Todos os dispositivos M2M simulados usam a adaptação de enlace baseada em MCS. A MCS dos dispositivos é escolhida com base no MIESM (*Mutual Information Effective SNR Mapping*), sendo ajustada, dinamicamente, de acordo com as modificações de SNR dos dispositivos conforme (SHEN; HUANG, 2011, p. 373).

Para a realização dos experimentos, fizeram-se necessárias algumas alterações no código fonte do simulador de forma que o agendador periódico e a redução de sinalização pudessem ser executados. Com o propósito de comparar o desempenho dos usuários quanto ao agendamento, o agendador de recursos periódicos proposto e outros agendadores estado-da-arte, tais como: WRR (*Weighted Round Robin*), WFS (*Weighted Fair Sharing*) (CHANG; POURNAGHSHBAND, 2017), MWS (Max Weight Scheduler) (SQUILLANTE; VAN DE VEN, 2018) e PCS (*Priority Class Scheduler*) (PINEDO, 2016) foram implementados no simulador de comunicação móvel LTE-A da Universidade de Viena, a qual concedeu à Universidade Federal do Rio Grande do Sul licença para uso exclusivamente acadêmico, a partir do dia 22 de agosto de 2016, após procedimento de solicitação³.

Durante os experimentos realizados, foram analisadas as métricas de atraso médio, *jitter* médio e a função de utilidade do sistema, a qual se reflete na satisfação dos usuários agendados. As métricas de latência e *jitter* já estavam presentes no simulador, porém fez-se necessário implementar a métrica de utilidade do sistema definida pela equação 7. As pesquisas de (AFRIN; BROWN; KHAN, 2013), (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016a), (ANDRES-

²<https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

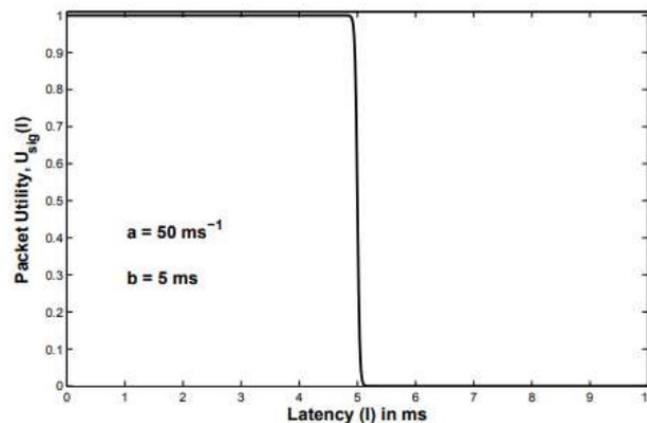
³<https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/>

MALDONADO *et al.*, 2016), (LEYVA-MAYORGA *et al.*, 2016) e (ABRIGNANI *et al.*, 2018) sugerem que a métrica de função de utilidade do sistema deve ser coletada. Essa métrica, normalmente, relaciona a satisfação do usuário com relação à percepção de QoS e pode ser usada para entender o descontentamento do usuário, ou seja, qual a quantidade de degradação do desempenho (por exemplo, latência ou *jitter*) que ele está disposto a sofrer. A função de utilidade de um sistema de gerenciamento de recursos modela a variação da satisfação do usuário de acordo com a QoS e verifica o nível de satisfação relacionado às classes dos usuários.

$$U(x) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (7)$$

sendo x uma variável aleatória que representa algum parâmetro do sistema, como a latência, cobertura ou confiabilidade, α e β definem a inclinação e o centro da curva. O parâmetro α expressa a sensibilidade do usuário à perda de QoS, enquanto β denota a região de operação aceitável. De acordo com (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016) e (ABRIGNANI *et al.*, 2018), a função sigmoidal é flexível para suportar vários requisitos de atraso, escolhendo apropriadamente os valores de α e β . Quando o valor de α é elevado e β é baixo, a função sigmoidal modela-se como um degrau (observe a Figura 70), fato benéfico para aplicações sensíveis ao atraso. Caso contrário, quando o valor de α é reduzido e β alto, a função sigmoidal tem uma transição mais suave, o que fica bom para aplicações tolerantes ao atraso, conforme apresentado na Figura 71.

Figura 70 – Função de utilidade das aplicações sensíveis ao atraso.



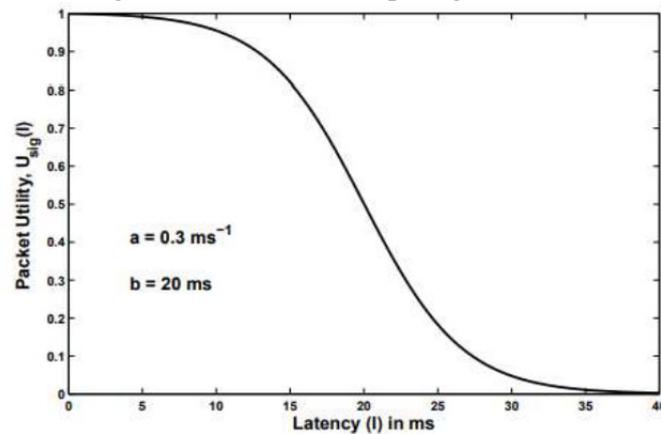
Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c)

De acordo com a pesquisa de (ANDRES-MALDONADO *et al.*, 2016), a função de utilidade do sistema para uma dada política de agendamento P é definida pela equação 8:

$$V(P) = \prod_{i=1}^R U_i^{\beta_i}(P) \quad (8)$$

em que $U_i(P)$ é a utilidade média do tráfego da i -ésima classe no estado estacionário dado pela equação 9.

Figura 71 – Função de utilidade das aplicações tolerantes ao atraso.



Fonte: (KUMAR; ABDELHADI; CLANCY, 2016c)

$$U_i(P) = U_i \left(\lim_{T_s \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^{M_i(T_s)} l_i^j(P)}{M_i(T_s)} \right) \quad (9)$$

sendo $M_i(T_s)$ o número de pacotes da classe i servido no tempo T_s e l_i^j é a latência do j -ésimo pacote da classe i , o parâmetro β_i indica a importância relativa da utilidade da classe i em relação à função de utilidade do sistema.

5.2 Simulações para os cenários sugeridos

Conforme descrito nas seções anteriores, os cenários de atuação das simulações envolvem, principalmente, as aplicações industriais de monitoramento e controle. As simulações foram parametrizadas com diversas ERBs espalhadas dentro de uma grande área territorial. Além disso, foram realizadas para diferentes quantidades de dispositivos M2M, conectados à rede LTE-A, com a finalidade de avaliar quais são as métricas que apresentaram ganhos, além de comparar e validar a proposta em relação aos agendadores estado da arte.

Esses cenários poderiam ser utilizados para diferentes aplicações, simulando redes híbridas onde há a presença de comunicação H2H e M2M simultâneas. Entretanto, o intuito da proposta é avaliar o benefício para os casos de uso e cenários industriais. Para não prejudicar a avaliação dos ganhos e melhorias dentro de aplicações industriais, decidiu-se pela não utilização de redes híbridas em que há comunicação H2H e suas respectivas classes de tráfego. Segundo os trabalhos de (FAN *et al.*, 2008), (FONG *et al.*, 2008) e (PAN; YANG; LI, 2018), as técnicas de agendamento periódico propostas podem ser aplicadas aos usuários de comunicação VoIP. Isso, com certeza, traria maior redução de sinalização, redução da utilização de recursos e, provavelmente, melhorias de qualidade para os serviços de voz.

Nas subseções a seguir, serão apresentados os parâmetros e os resultados das simulações para os canais de comunicação *uplink* e *downlink*. Nas aplicações de monitoramento, os sensores enviam seus dados de forma periódica para os controladores e esses dados são armazenados para

que seja possível haver um histórico. Além disso, o fluxo de dados do canal *uplink* será mais significativo que no canal *downlink*, uma vez que, nem sempre que os controladores estão diante de uma mensagem de dados proveniente dos sensores, tais controladores precisam enviar dados de controle para os atuadores utilizando o canal *downlink*. Portanto, a avaliação do algoritmo de agendamento periódico proposto e suas respectivas métricas, tais como: latência média, *jitter* médio e função de utilidade do sistema concentrou-se, principalmente, no canal de comunicação *uplink*. Para avaliar o desempenho, perante a redução de sinalizações de rede, foram avaliados e comparados os seguintes dados: o percentual médio de sobrecarga de sinalização, percentual médio de redução de sinalização e o percentual médio de utilização dos quadros de comunicação em ambos os canais *downlink* e *uplink*.

Para comparar e avaliar as métricas de rede, fez-se necessário acrescentar ao código fonte do simulador LTE-A os algoritmos dos agendadores estado da arte *Priority Class Scheduling*, *Max-Weighted Scheduling*, *Weighted Round Robin*, *Weighted Fair Scheduling* e o algoritmo de agendamento periódico proposto. Todos eles encontram-se, em anexo, no apêndice A.

5.2.1 Parâmetros de simulação do canal *uplink*

Nesta seção, as configurações do simulador LTE-A para a rede M2M são apresentadas usando o agendador periódico e a redução de sinalização propostos. A análise leva em consideração que o sistema de redes M2M é simulado usando o modelo ETU (*Extended Typical Urban*⁴). Os cenários descritos na Seção 4.1 possuem uma arquitetura de 57 células (19 ERBs, cada uma com 3 setores). Os dispositivos M2M da rede são alocados, aleatoriamente, dentro da área de cobertura de cada célula. Além da posição dos dispositivos, a Figura 72 apresenta a relação SINR dos dispositivos ativos ao redor da ERB central. Os demais parâmetros pertinentes para a configuração da rede LTE-A estão descritos na Tabela 6.

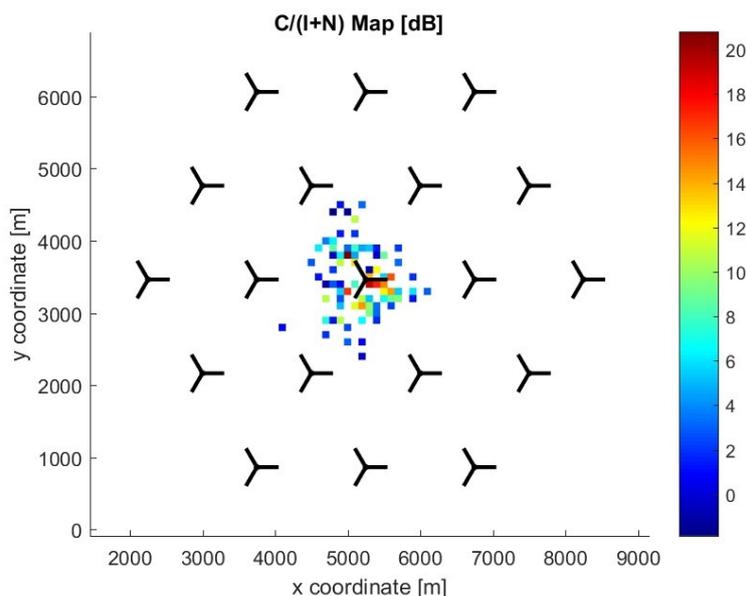
As simulações foram executadas para diferentes quantidades de dispositivos, a fim de que seja possível analisar qual é o percentual máximo de redução de sinalização que pode ser atingida, considerando a área reservada para sinalização e controle dos *subframes*. Todas essas simulações, com diferentes quantidades de dispositivos M2M, foram repetidas cinco vezes, para cada algoritmo de agendamento, obtendo assim diferentes valores de média, desvio padrão, variância, nível de confiança. Segundo (JAIN, 1990), para obter o desempenho médio de um sistema com precisão e nível de confiança, faz-se necessário utilizar a Equação 10.

$$CI[\min, \max] = \bar{x} \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

sendo CI o intervalo de confiança, \bar{x} a média, $Z_{\alpha/2}$ o coeficiente de confiança, σ o desvio padrão e n o número de amostras.

⁴https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/lte/lte_ug.pdf

Figura 72 – SINR e o posicionamento dos sensores M2M.



Fonte: elaboração própria

Tabela 6 – Parâmetros do simulador LTE-A.

Parâmetros	Valores
Canal de comunicação	<i>Uplink - FDD</i>
Distância entre ERBs	1500 m
Número de sensores	[5, 10, 20, 60, 100, 150, 300, 450]
Largura de banda	20 MHz
Reuso de frequência	3
Adaptação de enlace	MIESM
Modelo de canal	<i>Extended Typical Urban (ETU)</i>
Modelo de tráfego	<i>Fullbuffer 32 kbits/s</i>
Tamanho dos pacotes	64 bytes
Periodicidade dos pacotes	2 ms
Tamanho das simulações	4000 frames

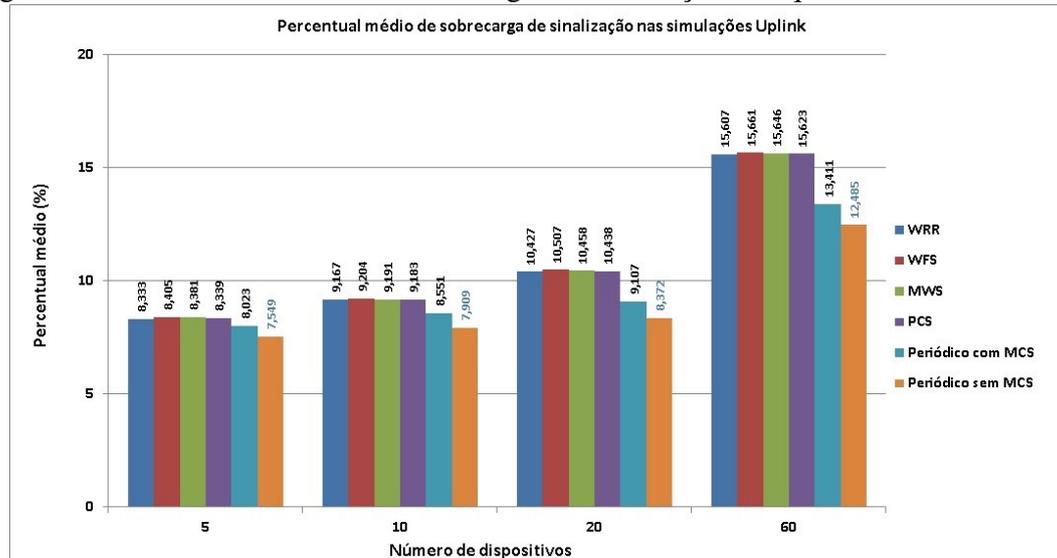
Fonte: elaboração própria

5.2.2 Resultados de simulação para o canal *uplink*

A métrica – que representa o percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação – foi definida, anteriormente, pela equação 6. Tal métrica, ao longo das simulações de rede, foi coletada para identificar o ganho de redução de sinalização, comparado ao método proposto nas circunstâncias com mudanças de MCS e sem mudanças de MCS. Os resultados simulados podem ser observados nas Figuras 73 e 74 para diferentes números de dispositivos conectados em cada setor das ERBs.

Avaliando-se, estatisticamente, essa métrica de percentual médio de sobrecarga de sinalização, para todas as simulações e algoritmos empregados no canal *uplink*, o maior desvio padrão σ obtido foi de 0,2572 %, e o menor nível de confiança obtido através da Equação 10 foi de 92,36 %. O maior desvio padrão e o menor nível de confiança ocorreram quando se simulou 450 dispositivos M2M por ERB, utilizando o algoritmo de agendamento *PCS*. A maior taxa de erros de pacotes, chamada de PER (*Packet Error Rate*), de todo esse conjunto de simulações *uplink* foi de 0,4291 %, ocorrendo, também, ao simular-se 450 dispositivos M2M por ERB, porém no momento em que se utilizou o algoritmo de agendamento *WRR*.

Figura 73 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.

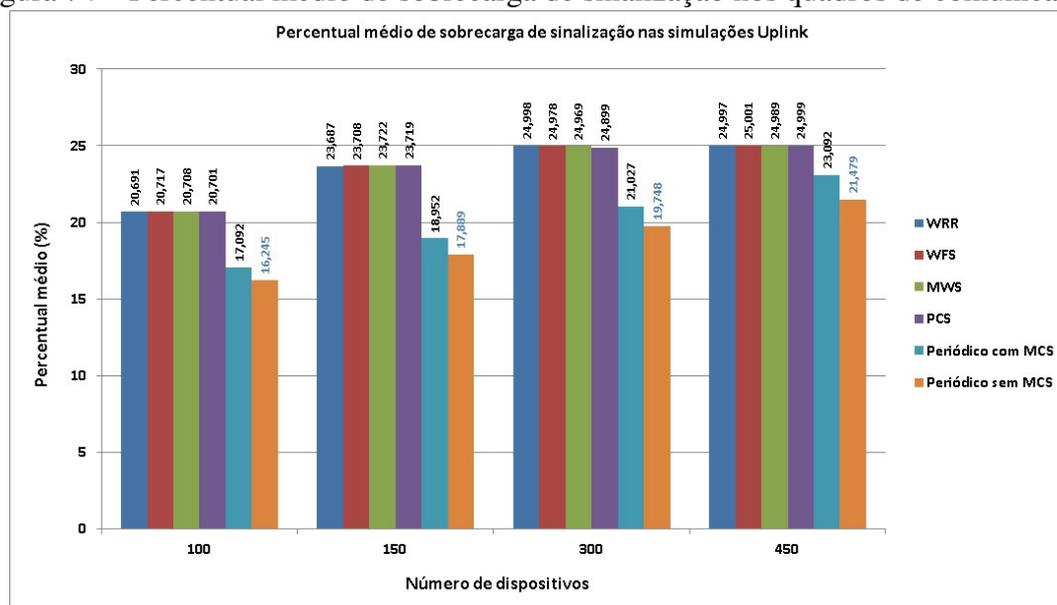


Fonte: elaboração própria

Nos quadros, a redução dos percentuais médios de sobrecarga de sinalização – após o emprego dos métodos de redução de sinalização e agendamento de recursos periódicos – pode ser observada nas Figuras 73 e 74. Note-se que essa redução aumenta de acordo com o aumento de dispositivos M2M na rede. O gráfico do agendador periódico com mudanças de MCS tem uma redução menor das mensagens de sinalização comparado ao agendador periódico sem mudanças de MCS, mas esse percentual é menor, justamente, devido às mudanças de condições de transmissão dos usuários presentes na rede. Isso causa o aumento do número de mensagens de sinalização a serem retransmitidas, indispensavelmente, toda vez que esse tipo de alteração de MCS ocorre. Essas diferenças de reduções são apresentadas na Figura 75.

Como os algoritmos de agendamento estado da arte possuem um consumo de recursos de sinalização e controle muito aproximados, realiza-se a média do percentual de sinalização de tais algoritmos. Em seguida, faz-se a subtração entre essa média e o algoritmo de agendamento em duas circunstâncias: na primeira, em que o agendador periódico é executado sem mudança de MCS, ou seja, sem a possibilidade de replicação de mensagens de sinalização; já na segunda, emprega-se o mesmo algoritmo periódico em condições normais, onde existe a possibilidade de os dispositivos mudarem de MCS, isto é, com as mudanças de MCS acontece a necessidade de a

Figura 74 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

mensagem de sinalização ser retransmitida.

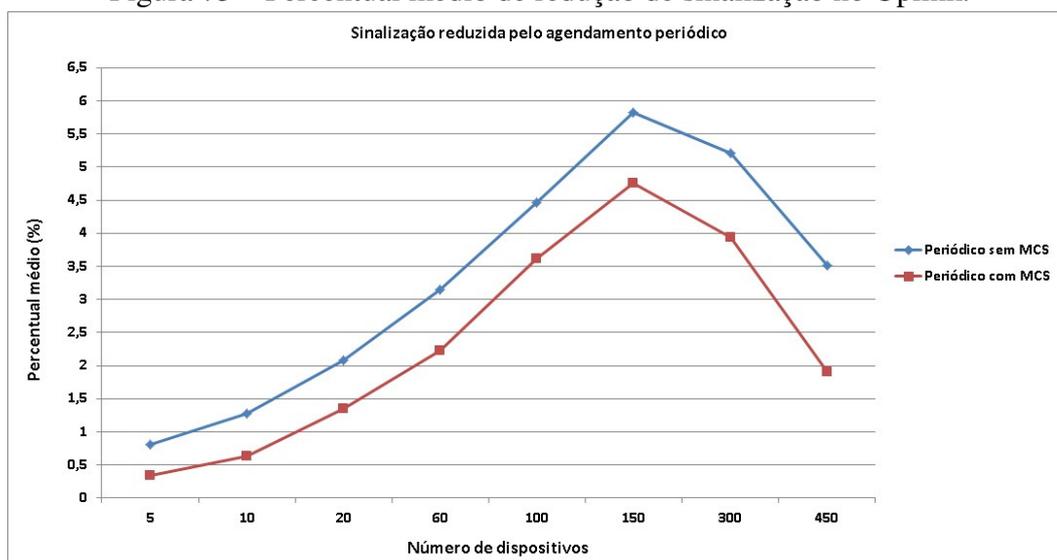
Considerando que o melhor caso ocorre onde não há mudança de MCS (curva em azul), o percentual médio de redução de sinalização aproxima-se de 6%. Dá-se isso, quando o sistema de comunicação tem cerca de 150 usuários por setor da ERB, porém, caso haja mais dispositivos ativos por setor, a redução de sinalização será de 3,5% aproximadamente. Ao ser avaliada, a situação com mudanças de MCS (curva em vermelho) aproxima-se mais da realidade, pois o percentual médio de redução de sinalização avizinha-se de 4,75%. Esse ápice ocorre no momento em que o sistema de comunicação M2M possui cerca de 150 dispositivos conectados. No entanto, quando existem mais dispositivos conectados, a redução chega perto de 2%, o que já é um ganho considerável.

No entanto, observando o resultado da Figura 75, percebe-se que as vantagens da abordagem proposta tornam-se limitadas, quando o número de dispositivos M2M do canal de comunicação de dados *uplink* excede 150 por setor da ERB. Isso ocorre devido ao esgotamento dos recursos de sinalização e controle ao atingir seu tamanho máximo – aproximadamente 25% do total – o que pode ser observado nas Figuras 73 e 74 nos casos em que há 300 e 450 dispositivos e o percentual médio de sinalização atinge esse limite.

Além de comparar o desempenho do agendamento em relação à redução de sinalização, o agendador de recursos periódicos proposto é comparado aos agendadores estado da arte: WRR, WFS, MWS e PCS explicados em seções anteriores e implementados no simulador. Durante essas simulações, também foram coletadas as métricas de atraso médio, *jitter* médio e a função de utilidade do sistema, a qual se reflete na satisfação dos usuários agendados.

Considerando a métrica de *jitter* médio dos dispositivos M2M, a comparação de desempenho do agendador de recursos periódicos proposto com outros algoritmos estado da arte é apresentada

Figura 75 – Percentual médio de redução de sinalização no Uplink.



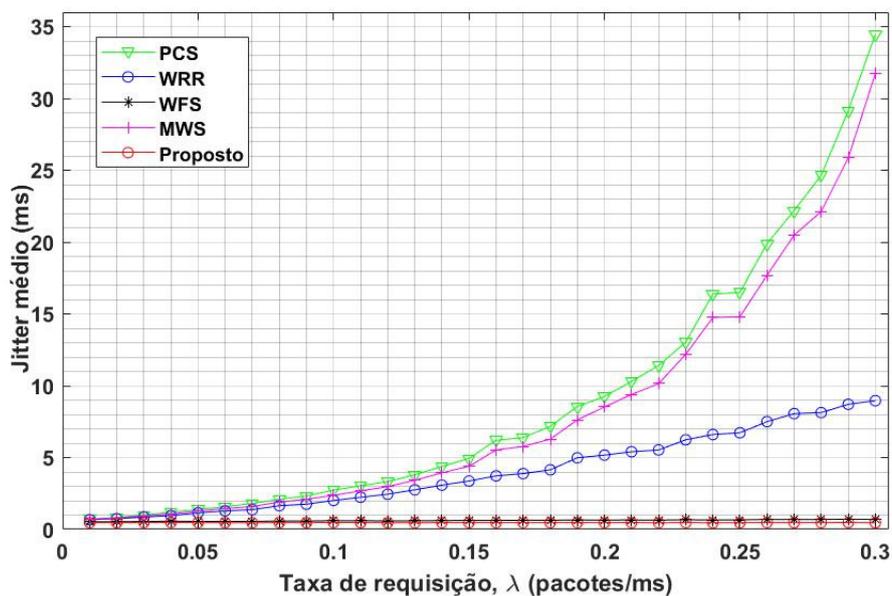
Fonte: elaboração própria

na Figura 76 e, neste caso, o agendador de recursos periódicos tem um desempenho melhor que todos os outros agendadores. Percebe-se uma grande variação do *jitter* médio nos algoritmos WRR, MWS e PCS, os únicos dois agendadores que possuem variações pequenas no *jitter* médio dos dispositivos são WFS e o algoritmo de agendamento de recursos periódicos proposto.

Avaliando-se, estatisticamente, essa métrica de *jitter* médio dos dispositivos M2M, para todas as simulações e algoritmos empregados no canal *uplink*, o maior desvio padrão σ obtido foi de 6,796 ms, e o menor nível de confiança obtido através da Equação 10 foi de 94,95 %. O maior desvio padrão e o menor nível de confiança ocorreram, quando foi simulada uma taxa de 0,3 pacotes/ms em cada dispositivo utilizando o algoritmo de agendamento PCS. Já o menor desvio padrão foi de 0,075 ms e ocorreu quando foi simulada uma taxa de 0,06 pacotes/ms em cada dispositivo M2M no algoritmo de agendamento periódico proposto (curva vermelha) que, nesta simulação, obteve um nível de confiança de aproximadamente 99,145 %.

Esse melhor comportamento justifica-se pelo fato de o agendador periódico garantir a reserva de recursos de rede de acordo com a demanda cíclica dos dispositivos. Analisando a métrica de *jitter* médio, é possível observar que o agendador proposto se comporta de maneira semelhante ao WFS que, segundo (CHANG; POURNAGHSHBAND, 2017), mantém uma imparcialidade proporcional relacionada à métrica de atraso de rede para todos os usuários.

Além disso, identificou-se que os maiores atrasos ocorrem quando se tem os canais de sinalização e/ou o quadro de comunicação totalmente ocupados. Esses casos ocorrem quando o número de dispositivos é muito elevado (300 ou 450) dispositivos por ERB. A ERB sem recursos disponíveis no quadro para sinalizar e alocar os pacotes dos dispositivos M2M necessita manter os pacotes de dados nos *buffers* aguardando por recursos para uma nova transmissão. Dessa forma, os pacotes dos dispositivos permanecem mais tempo na fila do agendador, elevando assim seus respectivos valores de variação do atraso (*jitter*), principalmente, para os algoritmos PCS,

Figura 76 – *Jitter* médio dos dispositivos M2M.

Fonte: elaboração própria

MWS e RR. Já o algoritmo proposto associado à técnica de redução de sinalização para os casos com 300 ou mais usuários ainda não esgotou sua capacidade de sinalização e de transmissão de dados no quadro, devido a isso, foi capaz de manter o jitter médio quase constante ao longo das simulações.

O agendador periódico proposto também é comparado com os demais escalonadores usando a função de utilidade do sistema, conforme representado na Figura 77. O método proposto supera, ainda, outros escalonadores em termos de função de utilidade. Esta função demonstra que não há grande degradação da satisfação dos usuários, se a demanda por recursos de rede aumentar. Comparada a outras abordagens, a função de utilidade permanece estável, por exemplo, o agendador PCS, que leva a uma pequena latência na comunicação (ver Figura 78), tem uma redução significativa em termos de função de utilidade. Tudo isso, porque o agendador PCS fornece maior prioridade de transmissão para uma classe de usuários de maneira fixa. As demais classes de tráfego desprivilegiadas, que também estão presentes na rede, percebem uma severa penalidade (ver Figura 76), fato que pode levar esses usuários a excederem seus requisitos de tempo máximo de atraso, causando insatisfação e degradação na função de utilidade do sistema. A Figura 78 mostra que o agendador de recursos periódicos proposto, em termos de atrasos médios dos dispositivos, apresenta atraso maior quando comparado com os outros agendadores, chegando a possuir um atraso cerca de 0,3 até 0,6 ms maior. No entanto, o agendador periódico tem um desempenho muito similar ao agendador WFS.

Avaliando-se, estatisticamente, a métrica de atraso médio dos dispositivos M2M, para todas as simulações e algoritmos empregados no canal *uplink*, o maior desvio padrão σ obtido foi de 0,23 ms, e o menor nível de confiança obtido através da Equação 10 foi de, aproximadamente,

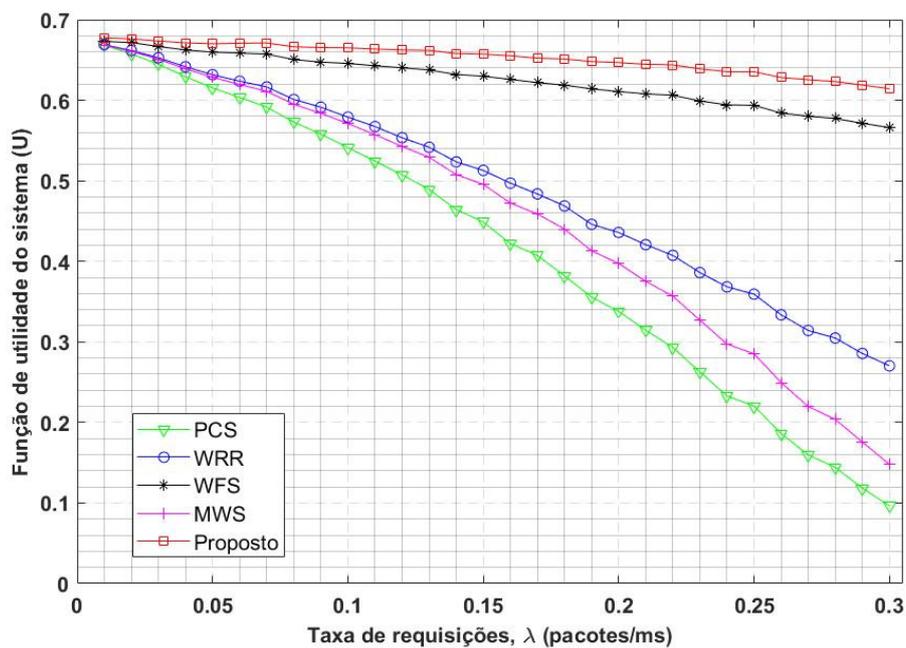
92,79 %. Esse caso ocorreu quando simulada uma taxa de 0,3 pacotes/ms em cada dispositivo utilizando o algoritmo de agendamento *WFS*. Já o menor desvio padrão foi de 0,025 ms e ocorreu ao ser simulada uma taxa de 0,03 pacotes/ms em cada dispositivo M2M no algoritmo de agendamento periódico proposto (curva vermelha) que, nesta simulação, obteve um nível de confiança de, aproximadamente, 96,28 %. A taxa de erros de pacotes, chamada de PER (*Packet Error Rate*), ao longo desse conjunto de simulações, manteve-se abaixo de 0,5 %. O atraso médio de todos os algoritmos simulados foi elevando-se aos poucos devido ao aumento no tempo de espera nos buffers de transmissão. Esse tempo de espera é agravado principalmente quando a quantidade de dispositivos é elevada ou quando a taxa de pacotes por ms dos dispositivos aumenta.

A maioria dos algoritmos de agendamento comparados levam em consideração as métricas de função de utilidade, SINR, latência, *jitter* ou taxa de dados dos dispositivos M2M presentes na rede LTE-A. Alguns desses agendadores tentam maximizar a taxa de dados dos usuários que possuem melhores condições de canal, assim como o MWS. O agendador PCS prioriza uma classe de tráfego em detrimento de outras, porém, esses dois algoritmos, MWS e PCS, maximizam apenas uma das métricas em questão, deixando a desejar em alguma das demais. Já os algoritmos de agendamento que levam em conta mais de uma dessas métricas – como WRR, *WFS* e o algoritmo proposto – e tentam igualar as oportunidades de recursos de transmissão para os usuários, apresentam melhor comportamento tanto em relação às métricas avaliadas quanto frente aos usuários. Isso acontece, principalmente, devido a esses algoritmos manterem equidade entre todos os dispositivos da rede M2M. Além disso, o algoritmo proposto reduz a quantidade total de mensagens de sinalização e reserva recursos futuros para os dispositivos que possuem a necessidade de transmissões periódicas, sendo essas as características diferenciais entre ele e todos os algoritmos comparados.

A métrica que representa o percentual médio de utilização dos quadros de comunicação foi coletada, pelo simulador LTE-A, ao longo das simulações de rede com o intuito de identificar os possíveis ganhos percentuais na utilização dos recursos de rede. As simulações comparam os algoritmos de agendamento estado da arte ao esquema redução de sinalização e agendamento periódico proposto, nas circunstâncias, com mudanças de MCS e sem mudanças de MCS. Os resultados simulados podem ser observados nas Figuras 79 e 80 para diferentes números de dispositivos conectados em cada setor das ERBs.

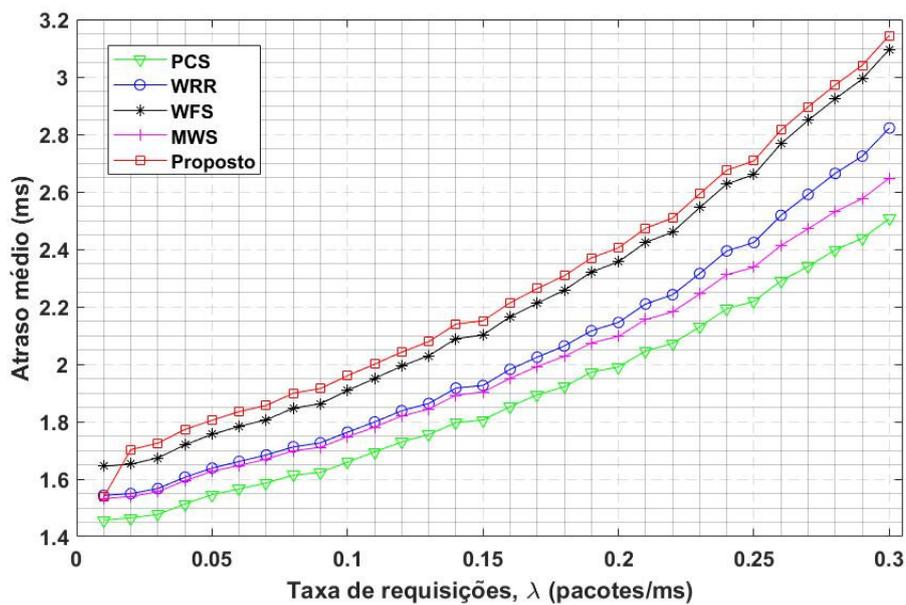
Nas Figuras 79 e 80 – após o emprego dos métodos de redução de sinalização e agendamento de recursos periódicos – percebe-se a redução dos percentuais médios de utilização dos quadros que aumenta de acordo com o crescimento de dispositivos M2M na rede. Observando os gráficos, nota-se que o agendador periódico com mudanças de MCS apresenta redução de recursos de rede um pouco menor da utilização dos quadros, chegando próximo a 3 % no cenário em que há 450 dispositivos conectados por setor. Entretanto, o agendador periódico sem mudanças de MCS – caso ótimo –, capaz de atingir a redução máxima, aproxima-se de 3,75 % na economia de recursos de rede. O percentual médio de utilização dos quadros, nesse caso, é menor, justamente,

Figura 77 – Função de utilidade do sistema.



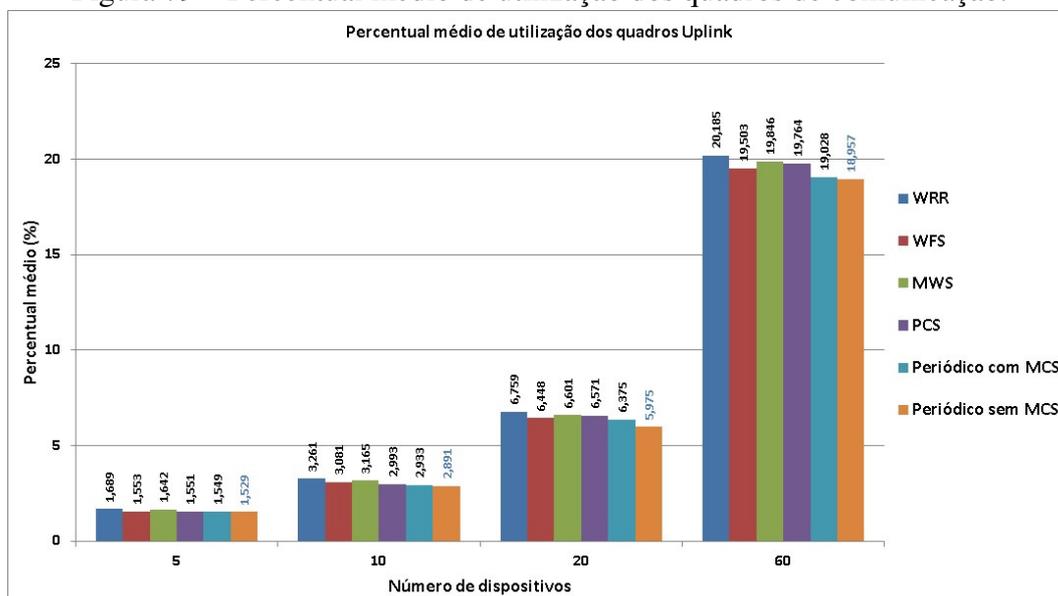
Fonte: elaboração própria

Figura 78 – Latência média dos dispositivos M2M.



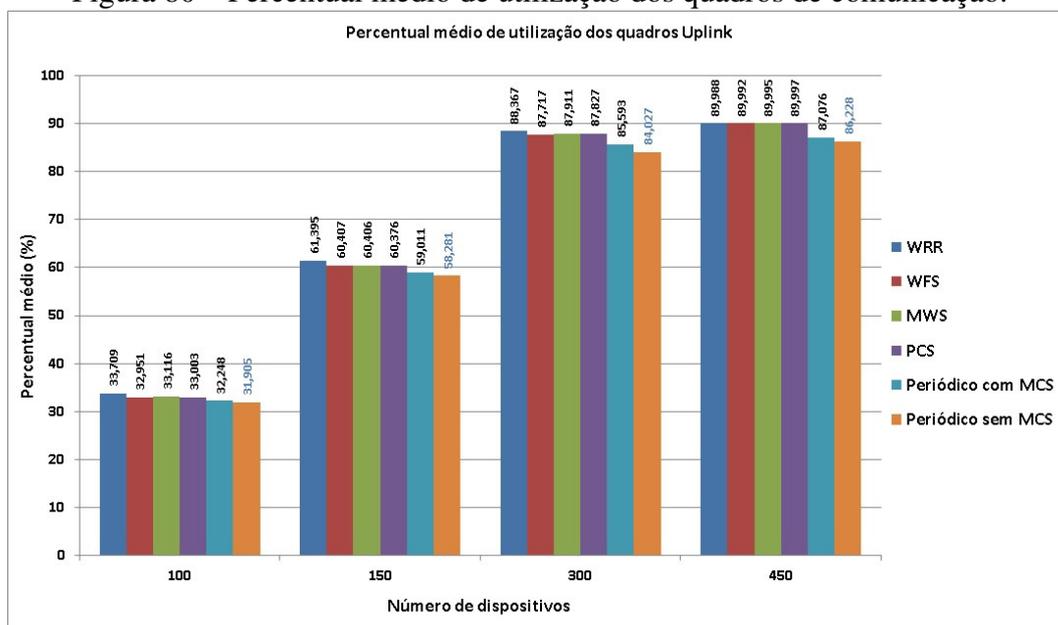
Fonte: elaboração própria

Figura 79 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

Figura 80 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

devido às mudanças de condições de transmissão dos usuários presentes na rede, o que pode causar variações no número de RBs necessário para transmissão dos dados de cada dispositivo M2M, porém esse é o caso que mais se assemelha à realidade.

Analisando os principais resultados obtidos no canal de comunicação *uplink*, percebe-se que as principais vantagens do agendador periódico proposto são: as suas capacidades de reduzir o percentual médio de sinalização e controle da rede, de reduzir o percentual médio de utilização dos quadros, de manter baixo o (*jitter*) médio dos dispositivos conectados à rede. Além disso, por efeito de sua característica de garantir, periodicamente, os recursos de rede para cada dispositivo, constata-se que houve melhora significativa, em relação à função de utilidade do sistema, o que reflete maior satisfação dos dispositivos ativos presentes na rede LTE-A.

5.2.3 Parâmetros de simulação do canal *downlink*

Nesta seção são apresentadas as configurações das simulações do canal de comunicação *downlink* para a rede M2M usando o simulador LTE-A. As simulações são realizadas numa rede com a arquitetura de 19 ERBs e cada uma possui 3 setores. Adotou-se o formato FDD para os quadros de comunicação, o reuso de frequências 3 e o modelo de canal ETU (*Extended Typical Urban*) com largura de banda de 20 MHz. Os dispositivos de rede são alocados, aleatoriamente, dentro da área de cobertura de cada setor da ERB e os demais parâmetros pertinentes à configuração da rede LTE-A estão expostos na Tabela 7.

As simulações foram executadas para diferentes quantidades de usuários, objetivando analisar qual o percentual máximo de redução de sinalização que pode ser atingida, considerando-se a área reservada à sinalização e controle dos *subframes*.

Tabela 7 – Parâmetros do simulador LTE-A.

Parâmetros	Valores
Canal de comunicação	Downlink - FDD
Distância entre ERBs	1500m
Número de sensores	[5, 10, 20, 60, 100, 150, 300, 450]
Largura de banda	20MHz
Reuso de frequência	3
Adaptação de enlace	MIESM
Modelo de canal	Extended Typical Urban (ETU)
Modelo de tráfego	Fullbuffer 32kbts/s
Tamanho dos pacotes	64 bytes
Periodicidade dos pacotes	2 ms
Tamanho das simulações	4000 frames

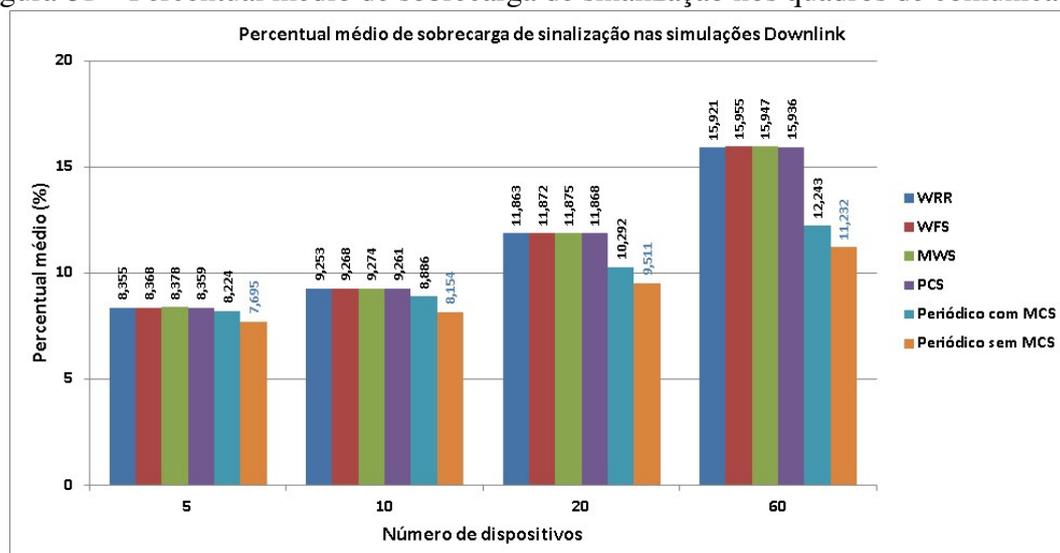
Fonte: elaboração própria

5.2.4 Resultados de simulação para o canal *downlink*

A métrica que representa o percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação foi coletada, ao longo das simulações para a rede LTE-A, com o objetivo de identificar qual percentual de redução das mensagens de sinalização pode ser atingido, ao comparar-se o método proposto, nas circunstâncias, com mudanças de MCS e sem mudanças de MCS aos demais algoritmos de agendamento. Os resultados simulados podem ser observados na Figura 81 e 82 para diferentes números de dispositivos conectados em cada setor das ERBs.

Avaliando-se, estatisticamente, essa métrica de percentual médio de sobrecarga de sinalização, para todas as simulações e algoritmos empregados no canal *uplink*, o maior desvio padrão σ obtido foi de 0,378 % e o menor nível de confiança obtido através da Equação 10 foi de 90,82 %. Esses valores de desvio padrão e nível de confiança foram observados, quando simulou-se 300 dispositivos M2M por ERB utilizando o algoritmo de agendamento *PCS*. A maior taxa de erros de pacotes, chamada de PER (*Packet Error Rate*), de todo esse conjunto de simulações *downlink* foi de 0,6307 % e ocorreu ao simular-se 300 dispositivos M2M por ERB utilizando o algoritmo de agendamento *PCS*.

Figura 81 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.

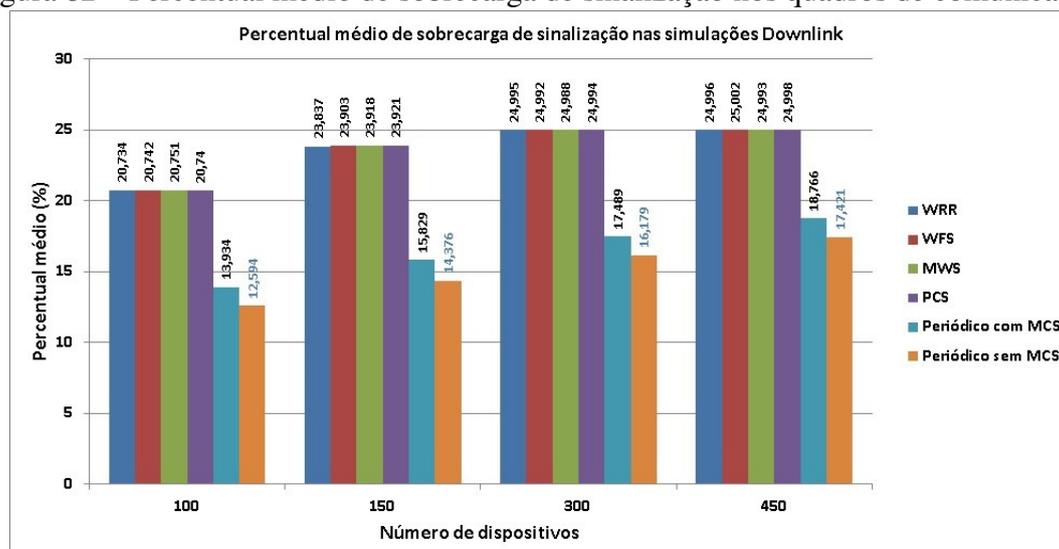


Fonte: elaboração própria

Após a adoção dos métodos de redução de sinalização e agendamento de recursos periódicos, a redução dos percentuais médios de sobrecarga de sinalização nas simulações *downlink* pode ser observada nas Figuras 81 e 82. Entende-se que a redução cresce de acordo com o aumento de dispositivos M2M na rede até um certo limite e, ao atingir uma quantidade considerável de usuários, esses ganhos percentuais voltam a diminuir novamente.

O agendador periódico sem mudanças de MCS alcança a maior redução das mensagens de sinalização, mas esse percentual torna-se maior, justamente, porque essas simulações foram configuradas, para não permitirem mudanças de condições de transmissão dos usuários presentes

Figura 82 – Percentual médio de sobrecarga de sinalização nos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

na rede. Através desse tipo de simulações, as quais tendem para o melhor caso, pode-se avaliar qual será o valor máximo da redução de sinalização e controle no canal *downlink* do sistema de comunicação LTE-A. Afinal, nessas condições descritas, jamais haverá a retransmissão das mensagens de mapeamento dos dados dos dispositivos M2M que possuem características de transmissão periódica.

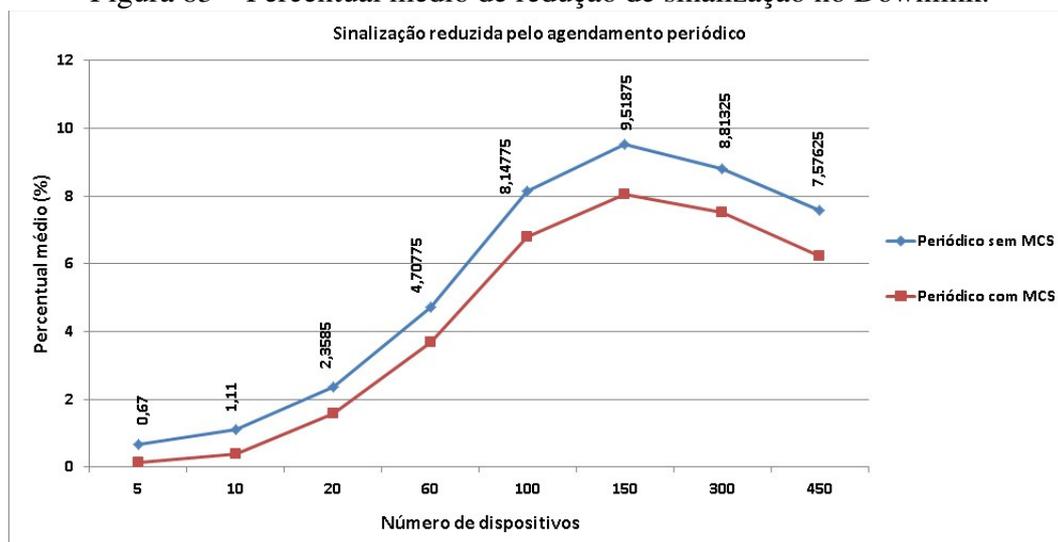
Essas diferenças de reduções são apresentadas na Figura 83, então, como os demais algoritmos de agendamento possuem um consumo de recursos de sinalização e controle muito semelhante, efetua-se a média do percentual de sinalização de tais algoritmos. A seguir, calcula-se a subtração entre essa média e o percentual médio de sinalização do algoritmo de agendamento periódico nessas duas ocasiões: a primeira, onde o agendador periódico é realizado sem mudança de MCS, ou seja, sem a possibilidade de replicação de mensagens de sinalização; a segunda, na qual emprega-se o mesmo algoritmo periódico, porém em condições normais, onde existe a possibilidade de os dispositivos mudarem suas condições de transmissão, isto é, mudanças de MCS, fazendo com que haja a necessidade de a mensagem de sinalização ser retransmitida.

Ainda na Figura 83, onde não há mudança de MCS (curva em azul), ocorre o melhor caso com percentual médio de redução de sinalização perto de 9,5%. Isso sucede, quando o sistema de comunicação reúne cerca de 150 dispositivos ativos por setor. Porém, ao surgirem mais dispositivos por setor, a redução de sinalização diminui, ficando em torno de 7,5%. Avaliando-se o caso com mudanças de MCS (curva em vermelho) – aquele mais próximo da realidade – o percentual médio de redução de sinalização acerca-se de 8%. Esse ápice acontece, quando o sistema de comunicação M2M possui mais ou menos 150 dispositivos conectados. Entretanto, cada vez que houver mais dispositivos ativos na rede, o percentual de redução das mensagens de sinalização será de 6%, aproximadamente, o que é uma redução de sinalização significativa.

No entanto, observando o resultado da Figura 75, percebe-se que os proveitos da abordagem

proposta tornam-se limitados, quando o número de dispositivos M2M do canal de comunicação de dados *uplink* excede 150 por setor da ERB. Tal fato dá-se em decorrência do esgotamento dos recursos de sinalização que atinge seu tamanho máximo de quase 25 % do total de um subframe. Isso identifica-se nas Figuras 81 e 82, nos casos onde há 300 e 450 dispositivos e o percentual médio de sinalização atinge os 25 %.

Figura 83 – Percentual médio de redução de sinalização no Downlink.



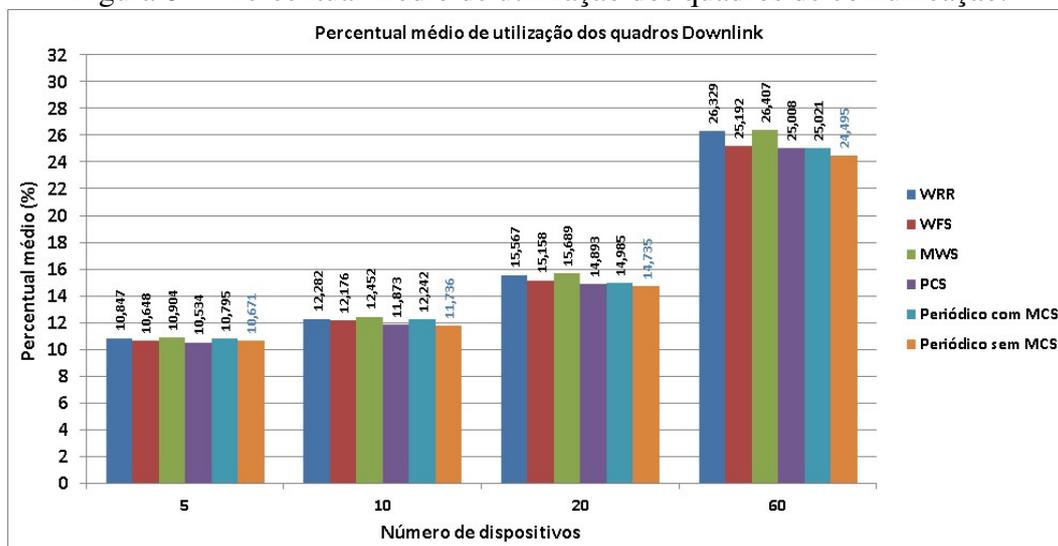
Fonte: elaboração própria

Durante a execução das simulações do canal de comunicação *downlink* para diferentes números de dispositivos conectados em cada setor das ERBs da rede LTE-A, o simulador realiza a coleta dados da métrica de utilização dos quadros, ou seja, o percentual médio de RBs do quadro de comunicação que foram utilizados para a transmissão de dados. A análise dessa métrica tem como finalidade identificar os possíveis ganhos percentuais na economia de utilização dos recursos de rede. O algoritmo de agendamento de recursos periódicos proposto é analisado, nas circunstâncias, com mudança de MCS e sem mudança de MCS e comparado com os algoritmos de agendamento WRR, WFS, MWS, e PCS. Os resultados da métrica de percentual médio de utilização dos quadros podem ser observados nos gráficos das Figuras 84 e 85.

No decurso da análise estatística da métrica de percentual médio de utilização dos quadros, para todas as simulações e algoritmos empregados no canal *downlink*, o maior desvio padrão σ obtido foi de 0,496 % e o menor nível de confiança obtido através da Equação 10 foi de 93,06 %. Esse caso ocorreu na simulação de 450 dispositivos M2M por ERB utilizando o algoritmo de agendamento *MWS*.

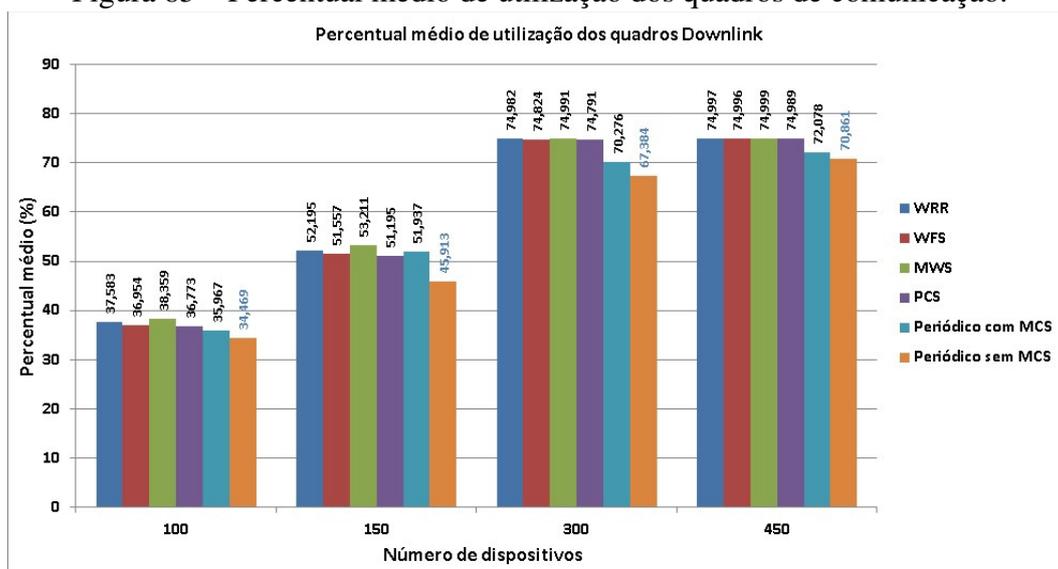
Vê-se que, após o emprego dos métodos de redução de sinalização e agendamento de recursos periódicos, há significativa redução dos percentuais médios de utilização dos quadros. Esse percentual de economia de recursos aumenta de acordo com o crescimento de dispositivos M2M na rede. Reparando-se, atentamente, nas Figuras 84 e 85, percebe-se que o agendador

Figura 84 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

Figura 85 – Percentual médio de utilização dos quadros de comunicação.



Fonte: elaboração própria

periódico com mudanças de MCS é capaz de economizar, aproximadamente, 3 % dos recursos de rede, quando existem 450 dispositivos conectados por setor em cada ERB. O percentual médio de utilização dos quadros, nesse caso, é menor devido às variações das condições de transmissão dos dispositivos da rede, causando alterações no número de RBs, destinados à transmissão dos dados de um dispositivo M2M. Por outro lado, é natural que hajam mudanças de MCS dos dispositivos graças à dinamicidade da rede. Entretanto, o agendador periódico sem mudanças de MCS – capaz de atingir a redução máxima (caso ótimo) – conseguiu, nessas simulações, reduzir até 4 % da utilização média dos recursos do quadro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese apresentou uma abordagem para reduzir a sinalização e melhorar a eficiência em cenários industriais que possuem demandas periódicas de dados e tolerância a atrasos no sistema LTE-A. As reduções de sinalização obtidas não ocorrem apenas no mapeamento das rajadas de dados dos dispositivos do canal *uplink*, mas também no canal *downlink*. Portanto, é necessário considerar que essas reduções de sinalização podem ser ainda maiores, quando o método de redução de sinalização proposto é aplicado em ambos os canais.

Através desses resultados de simulação, observou-se que o método proposto de redução de sinalização e agendamento de recursos cíclicos para dispositivos que possuem transmissões periódicas é uma boa estratégia. No pior dos casos, em que as mudanças no MCS podem ocorrer, a métrica de porcentagem média de sinalização, nos quadros, foi melhorada em 5% aproximadamente, o que também é um bom resultado. Nos melhores casos, onde não há mudança de MCS, a mesma métrica atingiu quase 10% nas simulações com 150 ou mais dispositivos ativos por setor nas ERBs.

O agendador periódico proposto obteve uma variação ínfima em termos de *jitter*, quando comparado aos demais algoritmos estado da arte. Fato que ocorre, principalmente, devido à garantia periódica de recursos de rede dada aos dispositivos M2M. Por outro lado, ao considerar-se a métrica de atraso médio, esse agendador obteve um resultado inferior, porém não tão discrepante dos outros escalonadores comparados. Essa métrica, conforme o esperado, cresceu exponencialmente de acordo com a elevação da demanda de recursos de rede pelos dispositivos M2M.

Observa-se que o agendador periódico proposto obteve um *jitter* médio menor, fato importante para a classe de tráfego ED, que é caracterizada por mensagens de alarmes que são mais sensíveis aos atrasos. Na maioria dos agendadores estado da arte o *jitter* médio é mais alto. Isso pode implicar no não cumprimento dos *deadlines* requeridos pelas aplicações industriais descritas nas normas (IEC, 2014), (IEC, 2015) e (ETSI, 2011).

Por fim, a métrica de utilidade do sistema também foi implementada e analisada para verificar o comportamento da satisfação dos dispositivos M2M em relação aos recursos de rede fornecidos. Neste caso, a redução de sinalização proposta, associada ao agendador de recursos periódicos, apresenta os melhores resultados, comparando-se com os demais agendadores. Portanto, essa

proposta evidencia-se promissora quanto ao gerenciamento da demanda periódica que surge nas aplicações M2M industriais. Decerto, essa técnica pode ser aplicada nas tecnologias de comunicação de quinta geração(5G).

Além disso, o simulador Vienna LTE-Advanced não fornece suporte para a realização de análise das mensagens de requisição de transmissão provenientes dos dispositivos nos quadros *uplink*, mas, com certeza, a redução desse tipo de mensagens de solicitação também pode ser representativa e sabe-se que, ao diminuir-se as mensagens de requisições de transmissão da rede M2M, certamente, reduz-se a energia consumida pelos dispositivos.

Como futuro trabalho, pretende-se aplicar os métodos propostos em cenários que possuam a arquitetura de rede *multi-hop*, ou seja, aqueles que possuem implantação de repetidores da ERB, cenários indoor que utilizem *small-cells*, além de cenários que utilizem as novas tecnologias *mmWave*, MIMO massivo e outras que são previstas para o sistema de comunicação móvel 5G.

O simulador LTE-A, desenvolvido na Universidade de Viena (RUPP *et al.*, 2016), permite que sejam simuladas aplicações industriais com cenários *indoor*, como nos casos de uso de automação fabril, controle de robôs ou veículos de transporte autônomos. Esses cenários e casos de uso que estão presentes nas normas (IEC, 2014), (IEC, 2015) e (ETSI, 2011) precisam de uma parametrização mais adequada e minuciosa, mas, certamente, também devem ser testados e avaliados sob a perspectiva da proposta de redução de sinalização e agendamento periódico em um futuro próximo.

Por fim, pretende-se que seja possível incorporar os métodos propostos às novas tecnologias previstas, que estão sendo padronizadas, para o sistema de comunicação móvel 5G, a fim de mensurar quais ganhos podem ser alcançados, quando se emprega o método de redução de sinalização associado ao agendador de recursos periódicos. Todavia, algumas dessas novas tecnologias pretendidas para o 5G ainda não estão presentes nos simuladores de rede atuais.

REFERÊNCIAS

ABRIGNANI, M. D. *et al.* Scheduling M2M traffic over LTE uplink of a dense small cell network. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, [S.l.], v. 2018, n. 1, p. 193, 2018.

AFRIN, N.; BROWN, J.; KHAN, J. Y. Performance analysis of an enhanced delay sensitive LTE uplink scheduler for M2M traffic. *In*: TELECOMMUNICATION NETWORKS AND APPLICATIONS CONFERENCE (ATNAC), 2013 AUSTRALASIAN, 2013. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2013. p. 154–159.

ALI, M. S.; HOSSAIN, E.; KIM, D. I. LTE/LTE-A random access for massive machine-type communications in smart cities. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 55, n. 1, p. 76–83, 2017.

ALQAHTANI, S. A. Delay-Aware Resource Allocation for M2M Communications Over LTE-A Networks. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [S.l.], p. 1–15, 2018.

ANDRES-MALDONADO, P. *et al.* Reduced M2M signaling communications in 3GPP LTE and future 5G cellular networks. *In*: WIRELESS DAYS (WD), 2016, 2016. **Proceedings** [...] [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.

ANTON-HARO, C.; DOHLER, M. **Machine-to-machine (M2M) Communications: architecture, performance and applications**. [S.l.]: Elsevier Science, 2014. (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials).

BOCCARDI, F. *et al.* Five disruptive technology directions for 5G. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 52, n. 2, p. 74–80, 2014.

BURATTI, C. *et al.* **Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems: distributed processing, mac, and connectivity**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Signals and Communication Technology).

CAO, Y.; JIANG, T.; HAN, Z. A Survey of Emerging M2M Systems: context, task, and objective. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v. 3, n. 6, p. 1246–1258, 2016.

CHANG, R.; POURNAGHSHBAND, V. Simulating Strict Priority Queueing, Weighted Round Robin, and Weighted Fair Queueing with NS-3. **International Journal on Advances in Networks and Services Volume 10, Number 1 & 2, 2017**, [S.l.], 2017.

CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A. **WirelessHARTTM**: real-time mesh network for industrial automation. [S.l.]: Springer US, 2010.

CHIN, W. H.; FAN, Z.; HAINES, R. Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. **IEEE Wireless Communications**, [S.l.], v. 21, n. 2, p. 106–112, 2014.

CHO, C. *et al.* MCS selection algorithms for a persistent allocation scheme to accommodate VoIP services in IEEE 802.16 e OFDMA system. *In*: PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, 2009 IEEE 20TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2009. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2009. p. 2122–2126.

DALSGAARD, L.; MALKAMAKI, E. M. **Apparatus, method and computer program product providing semi-dynamic persistent allocation**. US Patent App. 12/077,897.

DANIEL, K. *et al.* Cognitive agent mobility for aerial sensor networks. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 11, n. 11, p. 2671–2682, 2011.

DEMESTICHAS, P. *et al.* 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 47–53, 2013.

ELHAMY, A.; GADALLAH, Y. BAT: a balanced alternating technique for m2m uplink scheduling over lte. *In*: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING), 2015 IEEE 81ST, 2015. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

ERPEK, T.; ABDELHADI, A.; CLANCY, T. C. An optimal application-aware resource block scheduling in LTE. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (ICNC), 2015., 2015. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2015. p. 275–279.

ETSI. **ETSI TR 102 889-2 - Technical characteristics for SRD equipment for wireless industrial applications**. [S.l.]: European Telecommunications Standards Institute, 2011.

FAN, Y. *et al.* Efficient semi-persistent scheduling for VoIP on EUTRA downlink. *In*: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2008. VTC 2008-FALL. IEEE 68TH, 2008. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5.

FETTWEIS, G.; ALAMOUTI, S. 5G: personal mobile internet beyond what cellular did to telephony. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 52, n. 2, p. 140–145, 2014.

FETTWEIS, G. P. A 5G wireless communications vision. **Microwave Journal**, [S.l.], v. 55, n. 12, p. 24–36, 2012.

FONG, M.-H. *et al.* Improved VoIP capacity in mobile WiMAX systems using persistent resource allocation. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v. 46, n. 10, 2008.

GADALLAH, Y.; AHMED, M. H.; ELALAMY, E. Dynamic LTE resource reservation for critical M2M deployments. **Pervasive and Mobile Computing**, [S.l.], v. 40, p. 541 – 555, 2017.

GARBIE, I. **Sustainability in Manufacturing Enterprises**: concepts, analyses and assessments for industry 4.0. [S.l.]: Springer, 2016.

GILUKA, M. K. *et al.* On Efficient Scheduling of H2H Traffic and Reducing Signaling Overhead due to Uplink Small Data M2M Traffic in LTE-A Networks. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 103, n. 2, p. 1791–1818, Nov 2018.

GRÖNKVIST, J.; HANSSON, A. Comparison between graph-based and interference-based STDMA scheduling. *In*: ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE AD HOC NETWORKING & COMPUTING, 2., 2001. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2001. p. 255–258.

HADINE, A.; EL HASSANI, S. LTE-a pro (4.5 G) as pre-phase for 5G deployment: closing the gap between technical requirements and network performance. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION SYSTEMS AND INFORMATION SECURITY (ACOSIS), 2016., 2016. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7.

HAN, S. *et al.* **Systems and methods for semi-persistent scheduling of wireless communications**. US Patent 9,973,315.

HINTJENS, P. **ZeroMQ**: messaging for many applications. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2013.

HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

HOLMA, H.; TOSKALA, A.; REUNANEN, J. **LTE small cell optimization**: 3gpp evolution to release 13. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

HOLMA, H.; TOSKALA, A.; TAPIA, P. **HSPA+ Evolution to Release 12**: performance and optimization. [S.l.]: Wiley, 2014.

HOSSAIN, E.; HASAN, M. 5G cellular: key enabling technologies and research challenges. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 11–21, 2015.

HOWARD, A.; MATARIĆ, M. J.; SUKHATME, G. S. Mobile sensor network deployment using potential fields: a distributed, scalable solution to the area coverage problem. *In*: **Distributed Autonomous Robotic Systems 5**. [S.l.]: Springer, 2002. p. 299–308.

IEC. **IEC TS 62657-1 - Industrial communication networks - Wireless communication networks Part 1: wireless communication requirements and spectrum considerations.** [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2014.

IEC. **IEC BS 62657-2 - Industrial communication networks - Wireless communication networks Part 2: coexistence management.** [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2015.

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

JERUCHIM, M. C.; BALABAN, P.; SHANMUGAN, K. S. **Simulation of communication systems: modeling, methodology and techniques.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

JESCHKE, S. *et al.* Industrial Internet of Things. **Cham, Switzerland: Springer**, [S.l.], 2017.

JOUTSENSALO, J. *et al.* Adaptive weighted fair scheduling method for channel allocation. *In: COMMUNICATIONS*, 2003. ICC'03. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2003. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 228–232.

JOVOVIĆ, I.; FORENBACHER, I.; PERIŠA, M. Massive Machine-Type Communications: an overview and perspectives towards 5g. *In: THE 3RD INTERNATIONAL VIRTUAL RESEARCH CONFERENCE IN TECHNICAL DISCIPLINES, RCITD 2015*, 2015. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2015. v. 3.

KREHER, R.; GAENGER, K. **LTE Signaling: troubleshooting and optimization.** [S.l.]: Wiley, 2010. (IT Pro).

KUMAR, A.; ABDELHADI, A.; CLANCY, C. An online delay efficient packet scheduler for M2M traffic in industrial automation. *In: SYSTEMS CONFERENCE (SYSCON)*, 2016 ANNUAL IEEE, 2016. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

KUMAR, A.; ABDELHADI, A.; CLANCY, C. A delay efficient multiclass packet scheduler for heterogeneous M2M uplink. *In: MILCOM 2016-2016 IEEE MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE*, 2016. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 313–318.

KUMAR, A.; ABDELHADI, A.; CLANCY, C. A delay optimal MAC and packet scheduler for heterogeneous M2M uplink. **arXiv preprint arXiv:1606.06692**, [S.l.], 2016.

KUMAR, A.; ABDELHADI, A.; CLANCY, T. C. **Design and Implementation of Practical Schedulers for M2M Uplink Networks: using matlab.** [S.l.]: Springer, 2018.

- LEYVA-MAYORGA, I. *et al.* Performance analysis of access class barring for handling massive M2M traffic in LTE-A networks. *In: COMMUNICATIONS (ICC), 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON*, 2016. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- LIANG, W. *et al.* Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network. **Wireless Communications and Mobile Computing**, [S.l.], v. 11, n. 8, p. 1197–1212, 2011.
- LU, C. *et al.* Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 104, n. 5, p. 1013–1024, 2016.
- LUNTTILA, T.; OJALA, J. **Channel quality signaling for semi-persistent radio resource allocations**. US Patent App. 15/369,356.
- MARDANI, M. R.; MOHEBI, S.; GHANBARI, M. Energy and Latency-Aware Scheduling Under Channel Uncertainties in LTE Networks for Massive IoT. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 103, n. 3, p. 2137–2154, 2018.
- MEHASEB, M. A. *et al.* Classification of LTE uplink scheduling techniques: an m2m perspective. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 18, n. 2, p. 1310–1335, 2016.
- MENG, Z. *et al.* A Data-Oriented M2M Messaging Mechanism for Industrial IoT Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 236–246, 2017.
- MIKÓ, G.; NÉMETH, A. SCFDM based communication system for UAV applications. *In: RADIOELEKTRONIKA (RADIOELEKTRONIKA), 2015 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE*, 2015. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2015. p. 222–224.
- MÜLLER, I. *et al.* Energy consumption estimation for TDMA-based industrial wireless sensor networks. *In: INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN), 2016 IEEE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON*, 2016. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2016. p. 625–630.
- OLSSON, M. *et al.* **SAE and the Evolved Packet Core: driving the mobile broadband revolution**. [S.l.]: Elsevier Science, 2009.
- OUISSA, M.; AB, R. New Method Based on Priority of Heterogeneous Traffic for Scheduling Techniques in M2M Communications over LTE Networks. **International Journal of Intelligent Engineering and Systems**, [S.l.], v. 11, 12 2018.
- PAN, C.; YANG, Y.; LI, Y. A priority based semi-persistent scheduling for VoLTE. *In: IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS (ICIEA), 2018.*, 2018. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2018. p. 2539–2543.
- PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. [S.l.]: Springer, 2016.

- PROAKIS, J.; SALEHI, M. **Digital Communications**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008. (McGraw-Hill International Edition).
- RAPPAPORT, T. **Wireless Communications: principles and practice**, 2/e. [S.l.]: Pearson Education, 2010.
- RASMUSSEN, R. V.; TRICK, M. A. Round robin scheduling—a survey. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v. 188, n. 3, p. 617–636, 2008.
- RATASUK, R. *et al.* Recent advancements in M2M communications in 4G networks and evolution towards 5G. *In: INTELLIGENCE IN NEXT GENERATION NETWORKS (ICIN), 2015 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2015. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2015. p. 52–57.
- RAYES, A.; SALAM, S. Industry Organizations and Standards Landscape. *In: Internet of Things From Hype to Reality*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 257–274.
- ROHDE, S.; PUTZKE, M.; WIETFELD, C. Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v. 11, n. 7, p. 1893–1906, 2013.
- RUPP, M. *et al.* **The Vienna LTE-advanced simulators**. [S.l.]: Springer, 2016.
- SEN, S. **Fieldbus and Networking in Process Automation**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2014.
- SHAJAIAH, H.; ABDELHADI, A.; CLANCY, C. **Resource Allocation with Carrier Aggregation in Cellular Networks: optimality and spectrum sharing using c++ and matlab**. [S.l.]: Springer, 2017.
- SHEN, G.; HUANG, X. **Advanced Research on Computer Science and Information Engineering: international conference, csie 2011, zhengzhou, china, may 21-22, 2011. proceedings**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2011. n. pt. 2. (Communications in Computer and Information Science).
- SQUILLANTE, M. S.; VAN DE VEN, P. M. Max-weight scheduling across multiple timescales. **Operations Research Letters**, [S.l.], v. 46, n. 2, p. 245–250, 2018.
- TARANETZ, M. *et al.* Runtime precoding: enabling multipoint transmission in lte-advanced system-level simulations. **IEEE Access**, [S.l.], v. 3, p. 725–736, 2015.
- WINTER, J. *et al.* Analysis of a radio physical layer fault in WirelessHART networks. *In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS (I2MTC), 2016 IEEE INTERNATIONAL, 2016. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.

YU, C. *et al.* Uplink Scheduling and Link Adaptation for Narrowband Internet of Things Systems. **IEEE Access**, [S.l.], v. 5, p. 1724–1734, 2017.

APÊNDICE A ALGORITMOS DE AGENDAMENTO

A.1 Agendador *Weighted Round Robin*

```

1 function [latPU, latED] = WRR_Scheduler (Tchegada, TamMedioPacote)
2 % Implementacao do agendador WRR (Weighted Round Robin)
3 % Entradas:
4 % Tchegada : vetor de tempos - chegadas classificadas e agregadas para as classes de trafego
5 % TamMedioPacote : vetor contendo o tamanho médio de pacote de cada classe de QoS
6 % Saidas:
7 % [latPU, latED] : latencias de pacotes para cada classe de QoS usando o agendador WRR.
8
9 global b1; global b2;
10 global a1; global a2;
11 global Tser_class1; global Tser_class2;
12 global infity;
13 global numClasses;
14
15
16 estDeadline = [b1+4/a1 b2+4/a2];
17 % Quanto menor o pacote e deadline maior o peso.
18 vetQoS = ones(numClasses, 1);
19 pesos = round ( vetQoS * ((1 ./ estDeadline) ./ TamMedioPacote));
20
21 Tchegada_classe1 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 1, 1);
22 Tchegada_classe2 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 2, 1);
23
24 Tchegada_classe1 = [Tchegada_classe1; infity];
25 Tchegada_classe2 = [Tchegada_classe2; infity];
26
27 TempoAtual = 0;
28 while (1)
29     TempoMin = min([Tchegada_classe1(vetQoS(1)) Tchegada_classe2(vetQoS(2))]);
30     if TempoMin == infity
31         break ;
32     end
33     if TempoMin > TempoAtual
34         TempoAtual = TempoMin ;
35     end
36     for i=1: numClasses % loop para cada classe
37         for j=1: pesos(i) % Serve proporcionalmente ao peso da classe
38             switch i
39                 case 1
40                     if Tchegada_classe1(vetQoS(i)) > TempoAtual
41                         break
42                     else
43                         classe1(vetQoS(i)) = TempoAtual + Tser_class1(vetQoS(i));
44                         TempoAtual = classe1(vetQoS(i));
45                         vetQoS(i) = vetQoS(i) + 1;
46                     end
47                 case 2
48                     if Tchegada_classe2(vetQoS(i)) > TempoAtual
49                         break
50                     else
51                         classe2(vetQoS(i)) = TempoAtual + Tser_class2(vetQoS(i));
52                         TempoAtual = classe2(vetQoS(i));
53                         vetQoS(i) = vetQoS(i) + 1;
54                     end
55             end
56         end

```

```

57 end
58 latPU = classe1' - Tchegada_classe1(1:end - 1);
59 latED = classe2' - Tchegada_classe2(1:end - 1);
60
61 end

```

A.2 Agendador *Weighed Fair Scheduling*

```

1 function [latPU, latED] = WFS_Scheduler(Tchegada, mu, TamMedioPacote)
2 % Implementacao do agendador WFS (Weighted Fair Scheduling)
3 % Entradas:
4 % Tchegada : vetor de tempos - chegadas classificadas
5 %           e agregadas para as classes de trafego
6 % TamMedioPacote : vetor contendo o tamanho medio dos pacotes
7 % mu: taxa de servico
8 % Saidas:
9 % [latPU, latED] : latencias de pacotes para cada classe de QoS.
10
11 global a1;
12 global a2;
13 global b1;
14 global b2;
15 global Tser_class1; global Tser_class2;
16 global infnty;
17 global numClasses;
18
19 fila1 = []; fila2 = [];
20 vetQoS = ones(numClasses, 1);
21 estDeadline = [b1+4/a1 b2+4/a2];
22 Tchegada_classe1 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 1, 1);
23 estJitter1 = var(Tchegada_classe1);
24 Tchegada_classe2 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 2, 1);
25 estJitter2 = var(Tchegada_classe2);
26 Tchegada_classe1 = [Tchegada_classe1; infnty];
27 Tchegada_classe2 = [Tchegada_classe2; infnty];
28 TaxaPkt_classe1 = uint32(Tser_class1 * mu);
29 TaxaPkt_classe2 = uint32(Tser_class2 * mu);
30 pesos = round(10000 * ((1 ./ estDeadline) ./ TaxaPkt_classe1));
31
32
33 [TempoAtual, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(vetQoS(1)) Tchegada_classe2(vetQoS(2))]);
34 switch ClasseChegada
35     case 1
36         fila1 = [fila1; ones(TaxaPkt_classe1(1) - 1, 1); 0];
37     case 2
38         fila2 = [fila2; ones(TaxaPkt_classe2(1) - 1, 1); 0];
39 end
40 vetQoS(ClasseChegada) = vetQoS(ClasseChegada) + 1;
41 Tbit = 1 / mu;
42 depPtr = [1 1 1 1];
43
44 while (1)
45     for i = 1:numClasses
46         for j = 1:pesos(i)
47             switch i
48                 case 1
49                     if ~isempty(fila1)
50                         TempoAtual = TempoAtual + Tbit;
51                         while (1)
52                             [decIdx, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(vetQoS(1)) Tchegada_classe2(vetQoS(2))] - TempoAtual);
53                             if decIdx < 0
54                                 [fila1, fila2, vetQoS] = EnviaPkt(ClasseChegada, fila1, fila2, vetQoS, TaxaPkt_classe1, TaxaPkt_classe2);
55                                 else
56                                     break;
57                             end
58                         end
59                     if fila1(1) == 0 % fim dos pacotes
60                         classe1(depPtr(1)) = TempoAtual;
61                         depPtr(1) = depPtr(1) + 1;
62                     end
63                     fila1(1) = [];
64                 else
65                     break;
66                 end
67             case 2
68                 if ~isempty(fila2)

```

```

69     TempoAtual = TempoAtual + Tbit;
70     while (1)
71         [decIdx, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(vetQoS(1)) Tchegada_classe2(vetQoS(2))] - TempoAtual);
72         if decIdx < 0
73             [fila1, fila2, vetQoS] = EnviaPkt(ClasseChegada, fila1, fila2, vetQoS, TaxaPkt_classe1, TaxaPkt_classe2);
74         else
75             break;
76         end
77     end
78     if fila2(1) == 0 % fim dos pacotes
79         classe2(depPtr(2)) = TempoAtual;
80         depPtr(2) = depPtr(2) + 1;
81     end
82     fila2(1) = [];
83     else
84         break ;
85     end
86 end
87 end
88 end
89 if isempty(fila1) && isempty(fila2)
90     [TempoAtual, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(vetQoS(1)) Tchegada_classe2(vetQoS(2))]);
91     if TempoAtual == infny
92         disp('Todos pacotes enviados!');
93         break;
94     else
95         switch ClasseChegada
96             case 1
97                 fila1 = [fila1; ones(TaxaPkt_classe1(vetQoS(1)) - 1, 1); 0];
98             case 2
99                 fila2 = [fila2; ones(TaxaPkt_classe2(vetQoS(2)) - 1, 1); 0];
100         end
101         vetQoS(ClasseChegada) = vetQoS(ClasseChegada) + 1;
102     end
103 end
104 end
105 latPU = classe1' - Tchegada_classe1(1:end - 1);
106 latED = classe2' - Tchegada_classe2(1:end - 1);
107 end

```

A.3 Agendador Priority Class Scheduling

```

1 function [latPU, latED] = PriorityClass_Scheduler(prioridade, Tchegada, Tser)
2 % Implementacao do agendador Priority Class
3 % Entradas:
4 % Tchegada : vetor de tempos - chegadas classificadas
5 %             e agregadas para as classes de trafego
6 % prioridade: classe de trafego que serã priorizada
7 % Tser: Tempo de servico
8 % Saidas:
9 % [latPU, latED] : latencias de pacotes para cada classe de QoS.
10
11 global infny;
12
13 TempoAtual = 0;
14 ptr1 = 1;
15 ptr2 = 1;
16 classe1 = [];
17 classe2 = [];
18 Tchegada_prior1 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 1, 1);
19 Tchegada_prior2 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 2, 1);
20 Tchegada_prior1 = [Tchegada_prior1; infny];
21 Tchegada_prior2 = [Tchegada_prior2; infny];
22 TempoExpirado = 0;
23 Tser_class1 = Tser(Tser(:, 2) == 1, 1);
24 Tser_class2 = Tser(Tser(:, 2) == 2, 1);
25 [-, ClasseServico] = min([ Tchegada_prior1(ptr1) Tchegada_prior2(ptr2) ] );
26
27 while (1)
28     [TempoProxChegada, ClasseChegada] = min([Tchegada_prior1(ptr1) Tchegada_prior2(ptr2)]);
29     if TempoProxChegada == infny
30         break ;
31     end
32     if TempoAtual < TempoProxChegada
33         TempoAtual = TempoProxChegada;
34     end

```

```

35 switch prioridade
36     case 1
37         if TempoExpirado > Tchegada_prior1(ptr1)
38             if ClasseServico ~= 1
39                 tmp = TempoExpirado - Tchegada_prior1(ptr1);
40                 switch ClasseServico
41                     case 2
42                         ptr2 = ptr2 - 1;
43                         Tser_class2(ptr2) = tmp;
44                     end
45                 TempoAtual = Tchegada_prior1(ptr1);
46             end
47             ClasseChegada = 1;
48         end
49     case 2
50         if TempoExpirado > Tchegada_prior2(ptr2)
51             if ClasseServico ~= 2
52                 tmp = TempoExpirado - Tchegada_prior2(ptr2);
53                 switch ClasseServico
54                     case 1
55                         ptr1 = ptr1 - 1;
56                         Tser_class1(ptr1) = tmp;
57                     end
58                 TempoAtual = Tchegada_prior2(ptr2);
59             end
60             ClasseChegada = 2;
61         end
62         switch ClasseChegada
63             case 1
64                 ClasseServico = 1;
65                 TempoExpirado = TempoAtual + Tser_class1(ptr1);
66                 classe1(ptr1) = TempoExpirado; ptr1 = ptr1 + 1;
67             case 2
68                 ClasseServico = 2;
69                 TempoExpirado = TempoAtual + Tser_class2(ptr2);
70                 classe2(ptr2) = TempoExpirado; ptr2 = ptr2 + 1;
71             end
72             TempoAtual = TempoExpirado;
73         end
74         latPU = classe1' - Tchegada_prior1(1:end - 1);
75         latED = classe2' - Tchegada_prior2(1:end - 1);
76     end

```

A.4 Agendador *Max Weighed Scheduling*

```

1 function [latPU, latED] = MWS_Scheduler( Tchegada )
2 % Implementacao do agendador MWS (Max Weight Scheduling)
3 % Entradas:
4 % Tchegada : vetor de tempos - chegadas classificadas
5 %           e agregadas para as classes de trafego
6 % Saidas:
7 % [latPU, latED] : latencias de pacotes para cada classe de QoS.
8
9 global Tser_class1;
10 global Tser_class2;
11 global infnty;
12
13 ptr1 = 1;
14 ptr2 = 1;
15 Tchegada_classe1 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 1, 1);
16 Tchegada_classe2 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 2, 1);
17 Tchegada_classe1 = [Tchegada_classe1; infnty];
18 Tchegada_classe2 = [Tchegada_classe2; infnty];
19 [TempoAtual, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(ptr1) Tchegada_classe2(ptr2)]);
20 fila1 = []; fila2 = [];
21 EventoChegada = 1;
22 servico = 1;
23 while 1
24     if EventoChegada
25         switch ClasseChegada
26             case 1
27                 fila1 = [fila1; TempoAtual ptr1];
28                 ptr1 = ptr1 + 1;
29             case 2
30                 fila2 = [fila2; TempoAtual ptr2];
31                 ptr2 = ptr2 + 1;

```

```

32     end
33     EventoChegada = 0;
34 end
35 if servico
36     [maxTamFila, maxClasse] = max([length(fila1) length(fila2)]);
37     maxTamFila = maxTamFila / 2;
38     if maxTamFila == 0
39         ChegadaPkt = 1;
40     else
41         ChegadaPkt = 0;
42         switch maxClasse
43             case 1
44                 TempoPartida = TempoAtual + Tser_class1(fila1(1, 2));
45                 classe1(fila1(1,2)) = TempoPartida;
46                 fila1(1,:) = [];
47             case 2
48                 TempoPartida = TempoAtual + Tser_class2(fila2(1, 2));
49                 classe2(fila2(1,2)) = TempoPartida;
50                 fila2(1,:) = [];
51         end
52     end
53     servico = 0;
54 end
55 [TempoChegada, ClasseChegada] = min([Tchegada_classe1(ptr1) ...
56     Tchegada_classe2(ptr2)]);
57 if ~ChegadaPkt
58     [TempoAtual, indiceEvento] = min([TempoChegada, TempoPartida]);
59     if indiceEvento == 1
60         EventoChegada = 1;
61     else
62         servico = 1;
63     end
64 else
65     if TempoChegada == infity
66         break ;
67     end
68     TempoAtual = TempoChegada;
69     EventoChegada = 1; servico = 1;
70 end
71 end
72 latPU = classe1' - Tchegada_classe1(1:end - 1);
73 latED = classe2' - Tchegada_classe2(1:end - 1);
74 end

```

A.5 Agendador de recursos periódicos

```

1 function [latPU, latED] = Periodic_Scheduler(Per, MatrizOrdemPri, Tchegada, Tsim)
2
3 global Tser_class1;
4 global Tser_class2;
5 global infity;
6
7 ptr1 = 1;
8 ptr2 = 1;
9 classVet = [1 2];
10 classe1 = [];
11 classe2 = [];
12 Tchegada_classe1 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 1, 1);
13 Tchegada_classe2 = Tchegada(Tchegada(:, 2) == 2, 1);
14 Tchegada_classe1 = [Tchegada_classe1; infity];
15 Tchegada_classe2 = [Tchegada_classe2; infity];
16 NumCiclos = 1;
17 TempoExpirado = 0;
18 PerTimes = cumsum([0 Per]) * Tsim;
19 Recursos = [];
20
21 for i = 1:length(PerTimes) - 1
22     Recursos = [Recursos; PerTimes(i) PerTimes(i+1)];
23 end
24 [TempoAtual, IndServClasse] = min([Tchegada_classe1(ptr1) Tchegada_classe2(ptr2)]);
25 switch IndServClasse
26     case 1
27         TempoExpirado = TempoAtual + Tser_class1(ptr1);
28         classe1(ptr1) = TempoExpirado; ptr1 = ptr1 + 1;
29     case 2
30         TempoExpirado = TempoAtual + Tser_class2(ptr2);

```

```

31     classe2(ptr2) = TempoExpirado; ptr2 = ptr2 + 1;
32 end
33
34 while (1)
35     TChegadaVec = [TChegada_classe1(ptr1) TChegada_classe2(ptr2)];
36     [TempoProxChegada, ClasseProxChegada] = min(TChegadaVec);
37     [sortTChegadaVec, sortIndx] = sort(TChegadaVec);
38     IndicePktsTempo = sortTChegadaVec < TempoExpirado;
39     ClassVetCand = sortIndx(IndicePktsTempo);
40     TempoVetCand = sortTChegadaVec(IndicePktsTempo);
41     ProcuraRecInicio = find(Recursos(:, 1) <= mod(TempoAtual, Tsim/NumCiclos) ...
42         & Recursos(:, 2) >= mod(TempoAtual, Tsim/NumCiclos));
43     ProcuraRecFinal = find(Recursos(:, 1) <= mod(TempoExpirado, Tsim/NumCiclos) ...
44         & Recursos(:, 2) >= mod(TempoExpirado, Tsim/NumCiclos));
45     RecursosEncontrados = ProcuraRecInicio:ProcuraRecFinal;
46     if TempoProxChegada == inf
47         break;
48     end
49     preemp = 0;
50     if isempty(ClassVetCand)
51         TempoAtual = TempoProxChegada;
52     else
53         for i = 1:length(RecursosEncontrados)
54             OrdemPriAtual = MatrizOrdemPri(RecursosEncontrados(i), :);
55             TempoAtualRec = Recursos(RecursosEncontrados(i), :);
56             tmpri = TempoVetCand < TempoAtualRec(2);
57             ClasseRecAtual = ClassVetCand(tmpri);
58             for j = 1:length(ClassRecAtual)
59                 ClasseAnt = ClasseRecAtual(j);
60                 [~, IndIntersec] = intersect(OrdemPriAtual, classVet);
61                 AntePrior = IndIntersec(ClassAnt);
62                 if AntePrior < IndIntersec(IndServClasse)
63                     TmpR = TempoExpirado - max(TempoVetCand(j), TempoAtualRec(1));
64                     switch IndServClasse
65                         case 1
66                             ptr1 = max(1, ptr1 - 1);
67                             Tser_classe1(ptr1) = TmpR;
68                         case 2
69                             ptr2 = max(1, ptr2 - 1);
70                             Tser_classe2(ptr2) = TmpR;
71                     end
72                     TempoAtual = max(TempoVetCand(j), TempoAtualRec(1));
73                     ClasseProxChegada = ClasseAnt;
74                     preemp = 1;
75                     break;
76                 end
77             end
78         end
79         if preemp == 0
80             [~, IndIntersec] = intersect(OrdemPriAtual, classVet);
81             ClasseProxChegada = OrdemPriAtual(min(IndIntersec(ClassVetCand)));
82             TempoAtual = TempoExpirado;
83         end
84     end
85     switch ClasseProxChegada
86         case 1
87             IndServClasse = 1; TempoExpirado = TempoAtual + Tser_classe1(ptr1);
88             classe1(ptr1) = TempoExpirado; ptr1 = ptr1 + 1;
89         case 2
90             IndServClasse = 2; TempoExpirado = TempoAtual + Tser_classe2(ptr2);
91             classe2(ptr2) = TempoExpirado; ptr2 = ptr2 + 1;
92     end
93 end
94 latPU = classe1' - TChegada_classe1(1 : end - 1);
95 latED = classe2' - TChegada_classe2(1 : end - 1);
96 end

```