



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DANIEL ALEXANDRO RÊGO ADAUTO

**M2M-TEE: Um Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente de
Comunicação Muitos-para-Muitos para Redes de Sensores Sem Fio**

Recife

2025

DANIEL ALEXANDRO RÊGO ADAUTO

**M2M-TEE: Um Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente de
Comunicação Muitos-para-Muitos para Redes de Sensores Sem Fio**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador: Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Adauto, Daniel Alexandro Rêgo.

M2M-TEE: um Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente de Comunicação Muitos-para-Muitos para Redes de Sensores sem Fio / Daniel Alexandro Rêgo Adauto. - Recife, 2025. 124f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2025.

Orientação: Renato Mariz de Moraes.

Inclui referências e apêndices.

1. Protocolo MAC; 2. Redes de Sensores Sem Fio; 3. IEEE 802.15.4; 4. TDMA; 5. MIMO; 6. Multicanal. I. Moraes, Renato Mariz de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Daniel Alexandro Rêgo Adaauto

“M2M-TEE: Um Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente de Comunicação Muitos-para-Muitos para Redes de Sensores Sem Fio”

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.

Aprovado em: 24/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Carvalho da Cunha
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Paulo Roberto de Lira Gondim
Departamento de Engenharia Elétrica / UnB

Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes
Centro de Informática / UFPE
(orientador)

Dedico este trabalho ao meu Deus, aos meus familiares, e ao Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes por todo apoio e compreensão durante estes anos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, autor da minha vida, minha fortaleza e socorro nos momentos mais difíceis. O melhor amigo que um homem poderia ter. A Ele toda honra, glória e majestade.

À minha esposa, por compreender a minha necessidade de dedicar tempo e esforço para realizar este trabalho, e que me deu apoio nos momentos difíceis e incertos.

À minha família, em especial à minha mãe, à minha avó (in memoriam), e às minhas irmãs. Elas foram meus ombros fortes que me sustentaram durante minha trajetória de vida.

Aos meus amigos Wilton, Mailson e Diego que sempre me incentivaram a prosseguir até o fim desta trajetória. Vocês são os irmãos que eu não tive.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Renato Mariz, pela sua incrível competência em orientar-me e ensinar-me durante todos estes anos.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram nesta jornada, minha gratidão.

RESUMO

O IEEE 802.15.4 é um dos padrões mais utilizados pelas Redes de Sensores Sem Fio (RS-SFs), sendo uma das principais normas para as redes LR-WPAN. Porém, as RSSFs enfrentam alguns desafios como a subutilização dos canais de frequência, e o desperdício de energia de seus dispositivos devido à colisão de pacotes e à escuta ociosa do canal. Além disso, muitos de seus protocolos perdem a oportunidade de utilizarem técnicas como Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO) e Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes (MPTR), que poderiam proporcionar grandes vantagens tais como a redução do atraso fim a fim e o aumento da capacidade de transmissão de dados. Portanto, faz-se necessário apresentar novos protocolos que solucionem estes desafios, e que sejam compatíveis com os critérios estabelecidos pela norma IEEE 802.15.4. Alguns protocolos MAC para RSSFs garantem a troca de pacotes de dados sem colisões com a utilização de técnicas como o TDMA, ao custo de uma maior latência da rede. Este trabalho apresenta um novo Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente para Comunicação Muitos-para-Muitos (M2M-TEE) para RSSFs baseadas no padrão IEEE 802.15.4, e que permite a transmissão e recepção simultânea de múltiplos pacotes de dados sem colisão, possibilitando a diminuição do atraso fim a fim em detrimento de um aumento discreto na sobrecarga (*overhead*) para intervalos entre chegadas de mensagens maiores. O M2M-TEE funciona em ciclos de trabalho com períodos de ativação e dormência das estações. A eficiência do M2M-TEE foi avaliada e comparada com outros protocolos correlatos, sendo eles o Protocolo MAC Energeticamente Eficiente e Livre de Colisões (DyTEE), o *Sensor-MAC* (S-MAC) e o *Slotted ALOHA*. As simulações foram realizadas por meio de eventos temporais discretos com base nos indicadores de consumo de energia, vazão (*throughput*), sobrecarga e latência. Também foi apresentado um modelo de consumo de energia para o protocolo proposto. Os resultados mostraram que, para um intervalo médio entre chegadas de mensagens igual ou próximo a zero, o M2M-TEE alcançou uma vazão 4,5 vezes maior, e uma latência média por mensagem 8 vezes menor se comparado com o protocolo DyTEE. Contudo, para um intervalo médio entre chegadas de mensagens maior que 2200ms, a sobrecarga da rede é superior em relação aos demais protocolos. Como o M2M-TEE opera com fluxos simultâneos em múltiplos canais, o agendamento das transmissões torna-se mais extenso.

Palavras-chave: Protocolo MAC; Redes de Sensores Sem Fio; IEEE 802.15.4; TDMA; MIMO; Multicanal.

ABSTRACT

IEEE 802.15.4 is one of the standards most widely used by *Wireless Sensor Networks* (WSNs), and is one of the main norms for LR-WPAN networks. However, WSNs face some challenges such as underutilization of frequency channels and energy waste of their devices due to packet collision and idle listening on the channel. In addition, many of their protocols miss the opportunity to use techniques such as *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) and *Multi-Packet Transmission and Reception* (MPTR), which could provide great advantages such as reducing end-to-end delay and increasing data transmission capacity. Therefore, it is necessary to present new protocols that solve these challenges and that are compatible with the criteria established by the IEEE 802.15.4 standard. Some MAC protocols for WSNs guarantee collision-free data packet exchange using techniques such as TDMA, at the cost of increased network latency. This work presents a new *Many-to-Many Communication Multi-Channel and Timed Energy Efficient MAC Protocol* (M2M-TEE) for WSNs based on the IEEE 802.15.4 standard, which allows simultaneous transmission and reception of multiple data packets without collision, allowing a reduction in end-to-end delay at the expense of a slight increase in overhead for longer message inter-arrival intervals. M2M-TEE operates in duty cycles with station activation and dormancy periods. The efficiency of M2M-TEE was evaluated and compared with other related protocols, namely *Dynamic Timed Energy Efficient MAC Protocol* (DyTEE), *Sensor-MAC* (S-MAC) and *Slotted ALOHA*. The simulations were performed using discrete temporal events based on energy consumption, throughput, overhead and latency indicators. An energy consumption model for the proposed protocol was also presented. The results showed that, for an average message inter-arrival interval equal or close to zero, M2M-TEE achieved a throughput 4.5 times higher and an average latency per message 8 times lower when compared to the DyTEE protocol. However, for an average message inter-arrival interval greater than 2200ms, the network overhead is higher than other protocols. Since M2M-TEE operates with simultaneous streams on multiple channels, the transmission scheduling becomes more extensive.

Keywords: MAC Protocol; *Wireless Sensor Networks*; IEEE 802.15.4; TDMA; MIMO; Multi-Channel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de topologias estrela e <i>peer-to-peer</i> para LR-WPANs.	36
Figura 2 – Exemplo de uma Rede <i>Cluster Tree</i>	38
Figura 3 – Exemplo de uma estrutura <i>superframe</i>	40
Figura 4 – Diagrama temporal do protocolo <i>Sensor-MAC</i>	46
Figura 5 – Comunicação entre um receptor e diferentes transmissores do protocolo <i>Sensor-MAC</i>	48
Figura 6 – Diagrama temporal do protocolo DyTEE.	53
Figura 7 – Diagrama temporal do Momento de Sincronização (SyncM).	53
Figura 8 – Fluxograma do Período de Registro (REG) do SyncM.	55
Figura 9 – Problema do terminal escondido em um ambiente multicanal.	57
Figura 10 – Diagrama temporal do protocolo MMAC.	58
Figura 11 – Arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC.	60
Figura 12 – Nós S, D e E realizam transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes durante a Janela de Comunicação.	63
Figura 13 – Negociações de fluxos de comunicação e transmissão de dados do protocolo M2MMAC.	64
Figura 14 – Fluxograma que representa a busca de uma estação por um <i>cluster</i> no protocolo M2M-TEE. (1) Conector de entrada nas Figuras 17, 18 e 19. (2) Conector de saída para a Figura 17. (3) Conector de saída para a Figura 18.	73
Figura 15 – Exemplo do diagrama temporal no momento de sincronização (SyncM) e da transmissão de dados do protocolo M2M-TEE.	74
Figura 16 – As estações 1, 4 e 8 realizam transmissões e recepções simultâneas de pacotes no quinto <i>slot</i> de dados do exemplo do diagrama temporal do protocolo M2M-TEE.	75
Figura 17 – Fluxograma do coordenador no protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (2) Conector de entrada da Figura 14.	76
Figura 18 – Fluxograma do nó-folha no Período de Registro do protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (3) Conector de entrada da Figura 14. (4) Conector de saída para a Figura 19.	80

Figura 19 – Fluxograma do nó-folha logo após o Período de Registro do protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (4) Conector de entrada da Figura 18.	91
Figura 20 – Arquitetura de <i>hardware</i> dos blocos de transmissão e de recepção para o protocolo M2MMAC.	92
Figura 21 – Circuito do Conversor Digital-Analógico (DAC).	94
Figura 22 – Diagramas de blocos dos circuitos transmissor e receptor do protocolo M2M-TEE.	95
Figura 23 – Consumo total de energia da rede <i>versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	106
Figura 24 – Consumo médio de potência por estação <i>versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	108
Figura 25 – Porcentagem do consumo médio de energia do nó líder em relação ao consumo total do <i>cluster versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	109
Figura 26 – Vazão (<i>Throughput</i>) total da rede <i>versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	110
Figura 27 – Latência média por mensagem de carga útil (<i>payload</i>) <i>versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	112
Figura 28 – Sobrecarga (<i>Overhead</i>) da rede <i>versus</i> intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro comparativo com as principais características do M2M-TEE e dos protocolos correlatos.	64
Quadro 2 – Sequência de <i>bytes</i> do <i>Beacon Signal</i> do protocolo M2M-TEE.	79
Quadro 3 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote de solicitação de registro (RTR) e de confirmação (RACK) do Período de Registro do protocolo M2M-TEE.	80
Quadro 4 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE.	81
Quadro 5 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE para as estações que não possuem dados para transmitir.	83
Quadro 6 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE para as estações que desejam se desassociar do <i>cluster</i>	83
Quadro 7 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote <i>Broadcast</i> do protocolo M2M-TEE.	84
Quadro 8 – Sequência dos N_{agenda} <i>bytes</i> do pacote <i>broadcast</i> da Figura 15 alusivos às 27 combinações dos IDs das estações e de seus respectivos canais de recepção.	86
Quadro 9 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote <i>Broadcast</i> com tamanho mínimo do protocolo M2M-TEE.	87
Quadro 10 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote de dados do protocolo M2M-TEE.	89
Quadro 11 – Sequência de <i>bytes</i> do pacote ACK do protocolo M2M-TEE.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da Avaliação de Desempenho	105
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment</i>
ADC	Conversor Analógico-Digital
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AP	<i>Access Point</i>
ATIM	<i>Announcement Traffic Indication MAP</i>
ATIM-NACK	<i>ATIM-Negative Acknowledgment</i>
ATIM-RES	<i>ATIM-Reservation</i>
BER	Taxa de Erro de Bit
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BF	<i>Beacon Frame</i>
BI	<i>Beacon Interval</i>
BO	<i>Beacon Order</i>
BPSK	Modulação Binária por Deslocamento de Fase
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Beacon Signal</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CDMA-SIC	Acesso Múltiplo por Divisão de Código com Cancelamento Sucessivo de Interferências
CDMA-SIC	<i>Code Division Multiple Access - Successive In- terference Cancellation</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>

CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
CS	<i>Carrier Sense</i>
CSMA/CA	Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Prevenção de Colisão
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Detecção de Colisão
CTS	Clear To Send
DAC	Conversor Digital-Analógico
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DCA	Algoritmo de Agrupamento Distribuído
DCA	<i>Distributed Clustering Algorithm</i>
DMAC	Algoritmo de Agrupamento Distribuído Adaptável à Mobilidade
DMAC	<i>Distributed Mobility-Adaptive Clustering</i>
DSN	Número de Sequência de Dados
DSN	<i>Data Sequence Number</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DyTEE	Protocolo MAC Energeticamente Eficiente e Livre de Colisões
DyTEE	<i>Dynamic Timed Energy Efficient MAC Protocol</i>
ECC	Código de Correção de Erro
ED	<i>Energy Detection</i>
ENOB	Número Efetivo de <i>Bits</i>
ENOB	<i>Effective Number of Bits</i>
FCF	Campo de Controle do Pacote

FCF	<i>Frame Control Field</i>
FCS	Sequência de Verificação do Pacote
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FDA	Função de Distribuição Acumulada
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência
FFD	<i>Full-function Device</i>
FS	Sintetizador de Frequência
FS	<i>Frequency Synthesizer</i>
GTS	<i>Guaranteed TimeSlot</i>
IBSS	<i>Independent BSS</i>
IF	Frequência Intermediária
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
IFA	Amplificador de Frequência Intermediária
IFS	<i>Interframe Space</i>
ISWCS'24	<i>19th International Symposium on Wireless Communication Systems</i>
LNA	Amplificador de Baixo Ruído
LNA	<i>Low-Noise Amplifier</i>
LO	Oscilador Local
LO	<i>Local Oscillator</i>
LoS	<i>Line-of-sight</i>
LQI	<i>Link Quality Indication</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
LSB	Bit Menos Significativo

M2MMAC	Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos
M2MMAC	<i>Many-to-Many Communication Multichannel MAC Protocol</i>
M2M-TEE	<i>Many-to-Many Communication Multi-Channel and Timed Energy Efficient MAC Protocol</i>
M2M-TEE	Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente para Comunicação Muitos-para-Muitos
MAC	Controle de Acesso ao Meio
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MISO	Múltiplas Entradas e Única Saída
MISO	<i>Multiple-Input Single-Output</i>
MLME	<i>MAC Sublayer Management Entity</i>
MMAC	Protocolo MAC Multicanal para Redes <i>Ad Hoc</i>
MMAC	<i>Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks</i>
MPTR	Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes
MPTR	<i>Multi-Packet Transmission and Reception</i>
MU-MIMO	MIMO com Detecção de Múltiplos Usuários
MU-MIMO	<i>Multiuser MIMO</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
ND	Número de Estações Desassociando
NR	Número de Respostas de Registro
PA	Amplificador de Potência
PA	<i>Power Amplifier</i>

PAN	<i>Rede de Área Pessoal</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PAR	Relação de Ponto Máximo-Médio
PAR	<i>Peak-to-Average Ratio</i>
PM	Parâmetros do Módulo
PR	Parâmetros de Rede
PSD	Densidade Espectral de Potência
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PSM	<i>Power Saving Mode/Mechanism</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RACK	<i>Register Acknowledgment</i>
REG	Período de Registro
RF	Rádio-frequência
RFD	<i>Reduced-function Device</i>
RFD-RX	<i>Reduced Function Device-Receive</i>
RFD-TX	<i>Reduced Function Device-Transmit</i>
RSIot	<i>Request Slot</i>
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
RTR	<i>Request To Register</i>
RTS	Request To Send
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>
S-MAC-AL	<i>Sensor-MAC with Adaptive Listen</i>
S-MAC-AL	Sensor-MAC com Escuta Adaptativa
SAP	<i>Service Access Point</i>
SD	<i>Superframe Duration</i>

SISO	Única Entrada e Única Saída
S-MAC	<i>Sensor-MAC</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SO	<i>Superframe Order</i>
SyncM	<i>Synchronization Moment</i>
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TMMAC	Protocolo MAC Multicanal baseado em TDMA para Redes <i>Ad Hoc</i>
TMMAC	<i>TDMA based Multi-Channel MAC Protocol</i>
V-BLAST	<i>Vertical - Bell Laboratories Layered Space-Time</i>
WPAN	<i>Rede de Área Pessoal Sem Fio</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

t_d	Tempo aleatório necessário para retransmitir a programação do nó sincronizador no protocolo S-MAC [s]
t_{esp}	Tempo dos espaços vazios entre as vagas PKT dos protocolos M2M-TEE e DyTEE [s]
M	Número de canais de frequência não sobrepostos disponíveis
N	Número de $slots$ para um determinado intervalo entre $beacons$ do protocolo TMMAC
M_r	Número de antenas de recepção da estação
$ACK_{timeout}$	Tempo máximo que uma estação pode esperar por um ATIM-ACK [s]
l_{slot}	Tempo necessário para a transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede, juntamente com sua confirmação de recebimento [s]
$T_{ActiveMax}$	Tempo máximo do ciclo de trabalho [s]
$T_{BeaconMax}$	Tempo máximo de duração de um sinal de sincronização ($beacon$) [s]
C	Número de estações ativas na rede
$T_{RSlotTOTAL}$	Tempo total de duração do período de requisição de vagas (RSlot) [s]
T_{RSlot}	Tempo de duração de uma vaga no período RSlot [s]
S_{header}	Tamanho do cabeçalho do pacote [$bits$]
R_b	Taxa de transmissão do rádio [bps]
N_{agenda}	Número total de combinações no pacote $broadcast$ do SyncM do protocolo M2M-TEE entre uma vaga de dados e um canal de frequência
$T_{broadcast}$	Tempo de transmissão do pacote $broadcast$ [s]
$S_{broadcast}$	Tamanho do pacote $broadcast$ [$bits$]
$N_{agenda_{max}}$	Valor máximo para o número total de combinações no pacote $broadcast$ do SyncM do protocolo M2M-TEE (N_{agenda})

NR_{max}	Valor máximo do Número de Respostas de Registro (NR)
ND_{max}	Valor máximo do Número de Estações Desassociando (ND)
M_{rmax}	Valor máximo para o número de antenas de recepção da estação (M_r)
t_{espBDR}	Tempo mínimo necessário para as estações do M2M-TEE descobrirem se o coordenador completou a transmissão do agendamento dos dados [s]
δ	Atraso de propagação [s]
T_{intRX}	Tempo de recepção e interpretação do pacote de dados por parte do nó receptor [s]
T_{intTX}	Tempo de recepção e interpretação do pacote ACK por parte do nó transmissor [s]
T_{DATA}	Tempo de transmissão do pacote de dados [s]
T_{ACK}	Tempo de transmissão do pacote ACK [s]
S_{DSN}	Tamanho do DSN [bits]
$S_{payload_{max}}$	Tamanho máximo da carga útil (<i>payload</i>) de um pacote de dados [bits]
Max_{TX}	Número máximo de transmissões de dados que podem ocorrer durante o período ativo do protocolo M2M-TEE
b_i	Variável aleatória independente que representa o valor binário do i -ésimo interruptor do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário
V_{dd}	Tensão da fonte de alimentação do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [V]
I_0	Corrente da fonte de corrente unitária correspondente ao <i>Bit</i> Menos Significativo do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [A]
n_1	Número Efetivo de <i>Bits</i> (ENOB) que determina a precisão do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário

P_{PA}	Consumo de potência do amplificador de potência [W]
P_c	Consumo de potência de todos os blocos do circuito do transceptor integrado de comunicação muitos-para-muitos [W]
P_{out}	Consumo de potência de transmissão [W]
$\bar{E}_b$	Consumo de energia por <i>bit</i> mediante uma determinada Taxa de Erro de Bit (BER) [J/bit]
d	Distância entre duas estações comunicantes de uma mesma rede [m]
G_t	Ganho da antena de transmissão [dBi]
G_r	Ganho da antena de recepção [dBi]
λ	Comprimento de onda da portadora [m]
M_l	Valor da margem de <i>link</i> que compensa as variações do processo de <i>hardware</i> e outras interferências ou ruídos em segundo plano adicionais [dB]
N_f	Valor da figura de ruído do nó receptor [dB]
N_0	Valor da Densidade Espectral de Potência (PSD) do ruído térmico unilateral na temperatura ambiente [dBm/Hz]
N_r	Valor da Densidade Espectral de Potência (PSD) do ruído efetivo total na entrada do nó receptor [dBm/Hz]
ξ	Valor da Relação de Ponto Máximo-Médio (PAR)
η	Valor da eficiência de drenagem do amplificador de potência de Rádio-frequência (RF)
P_{add}	Consumo de potência do somador analógico de frequência da multiportadora [W]
M_{BPSK}	Tamanho da constelação para o esquema de modulação BPSK
P_{DAC}	Consumo de potência do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [W]

P_{mix}	Consumo de potência do <i>mixer</i> [W]
P_{filt}	Consumo de potência dos filtros ativos do bloco transmissor [W]
P_{syn}	Consumo de potência do Sintetizador de Frequência (FS) [W]
P_{LNA}	Consumo de potência do Amplificador de Baixo Ruído (LNA) [W]
P_{IFA}	Consumo de potência do Amplificador de Frequência Intermediária (IFA) [W]
P_{filr}	Consumo de potência dos filtros ativos do bloco receptor [W]
P_{ADC}	Consumo de potência do Conversor Analógico-Digital (ADC) de taxa de <i>Nyquist</i> [W]
P_s	Consumo de potência estático do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [W]
P_d	Consumo de potência dinâmico do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [W]
C_p	Capacitância parasita para cada interruptor do Conversor Digital-Analógico (DAC) de direção de corrente com peso binário [F]
f_s	Frequência de amostragem [Hz]
B	Largura de banda [Hz]
f_{cor}	Frequência de corte do ruído rosa [Hz]
f_{IF}	Valor mínimo da Frequência Intermediária (IF) [Hz]
β	Fator de correção para incorporar alguns efeitos de segunda ordem no cálculo de P_{DAC}
L_{min}	Comprimento mínimo do canal para a tecnologia CMOS [m]
n_2	Número Efetivo de <i>Bits</i> (ENOB) que determina a precisão do Conversor Analógico-Digital (ADC) de taxa de <i>Nyquist</i>
$\bar{P}_b$	Taxa de Erro de Bit (BER) média

M_t	Número de antenas de transmissão da estação
E_{bt}	Consumo total médio de energia por <i>bit</i> para os sistemas MISO e SISO [J/bit]
$E_{bt_{TX}}$	Consumo total médio de energia para transmitir um <i>bit</i> para os sistemas MISO e SISO [J/bit]
$P_{c_{TX}}$	Consumo de potência do bloco de transmissão do circuito do transceptor integrado de comunicação muitos-para-muitos [W]
$E_{bt_{RX}}$	Consumo total médio de energia para receber um <i>bit</i> para os sistemas MISO e SISO [J/bit]
$P_{c_{RX}}$	Consumo de potência do bloco de recepção do circuito do transceptor integrado de comunicação muitos-para-muitos [W]
N_{data}	Número total de mensagens de dados geradas na rede
$S_{payload}$	Tamanho médio da carga útil (<i>payload</i>) de um pacote de dados [$bits$]
T_{TOTAL}	Tempo necessário para que ocorram as transmissões de todos os N_{data} pacotes de dados na rede [s]
<i>Throughput</i>	Taxa de transferência final da rede [bps]
<i>Overhead</i>	Percentual da sobrecarga da rede [%]
$S_{controlPKT_{TOTAL}}$	Tamanho total de todos os pacotes de controle e de dados da rede, sem considerar o <i>payload</i> [$bits$]
$S_{RTR_{TOTAL}}$	Tamanho total de todos pacotes RTRs [$bits$]
$S_{RACK_{TOTAL}}$	Tamanho total de todos pacotes RACKs [$bits$]
$S_{RSlot_{TOTAL}}$	Tamanho total de todos pacotes RSlots [$bits$]
$S_{broadcast_{TOTAL}}$	Tamanho total de todos pacotes <i>broadcasts</i> [$bits$]
S_{DATA}	Tamanho médio de um pacote de dados [$bits$]
S_{ACK}	Tamanho de um pacote de confirmação (ACK) [$bits$]

$T_{genesis}$	Intervalo de tempo onde são geradas todas as N_{data} mensagens de dados [s]
W	Variável aleatória de <i>Poisson</i> que contabiliza o número de pacotes de dados criados no intervalo $T_{genesis}$
Z	Variável aleatória que representa o período entre chegadas de mensagens da rede
$\Delta t_{message_arrival}$	Média dos períodos entre chegadas de mensagens baseada na distribuição exponencial [s]
$Latency_{AVG}$	Latência média por pacote da rede [s]
LTC_j	Latência do j -ésimo pacote de dados, com $1 \leq j \leq N_{data}$ [s]
P_{sleep}	Consumo de potência das estações no modo <i>SLEEP</i> [W]
DC	Percentual do ciclo de trabalho em relação ao intervalo entre <i>beacons</i> [%]
P_{idle}	Consumo de potência das estações no estado ocioso [W]
E_{idle}	Consumo de energia das estações no estado ocioso [J]
Δt_{idle}	Intervalo de tempo no qual a estação se mantém no estado ocioso [s]
f_c	Frequência da portadora [Hz]
E_{sleep}	Consumo de energia das estações no modo <i>SLEEP</i> [J]
Δt_{sleep}	Intervalo de tempo no qual a estação se mantém no modo <i>SLEEP</i> [s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	27
1.2	MOTIVAÇÃO	27
1.3	OBJETIVOS	28
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	INTRODUÇÃO	31
2.2	SISTEMA ALOHA	31
2.3	ACESSO MÚLTIPLO POR DETECÇÃO DA PORTADORA COM PRE- VENÇÃO DE COLISÃO (CSMA/CA)	32
2.4	ACESSO MÚLTIPLO POR DIVISÃO DE TEMPO (TDMA)	33
2.5	PADRÃO IEEE 802.15.4	34
2.5.1	Tipos de dispositivos	35
2.5.2	Topologias de rede	35
2.5.2.1	<i>Topologia estrela</i>	36
2.5.2.2	<i>Topologia peer-to-peer</i>	36
2.5.2.3	<i>Topologia cluster tree</i>	37
2.5.3	Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4	37
2.5.3.1	<i>Camada física (PHY)</i>	38
2.5.3.2	<i>Subcamada de enlace (MAC)</i>	38
2.5.4	Visão geral do funcionamento do padrão IEEE 802.15.4	39
2.5.4.1	<i>Beacon superframe</i>	39
2.5.4.2	<i>Modelo de transferência de dados e estrutura do quadro</i>	40
2.5.4.3	<i>Consumo de energia dos dispositivos</i>	41
2.6	IEEE 802.11 POWER SAVING MODE/MECHANISM	41
2.7	COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS EM REDES SEM FIO	42
2.8	MULTIUSER MIMO (MU-MIMO)	43
2.9	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	44
3	TRABALHOS RELACIONADOS	45
3.1	INTRODUÇÃO	45

3.2	PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (SENSOR-MAC)	45
3.3	PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE COM ESCUTA ADAPTATIVA PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (SENSOR-MAC-AL)	49
3.4	PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE E LIVRE DE COLISÕES PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (DYTEE)	50
3.4.1	A formação do cluster	51
3.4.2	Visão geral do funcionamento do DyTEE	52
3.4.3	O momento de sincronização	53
3.4.3.1	<i>Beacon signal (BS)</i>	53
3.4.3.2	<i>Período de registro (REG)</i>	54
3.4.3.3	<i>Período de requisição de vagas (RSlot)</i>	54
3.4.3.4	<i>Divulgação da agenda (broadcast)</i>	55
3.4.4	Transmissão de dados	56
3.5	PROTOCOLO MAC MULTICANAL PARA REDES AD HOC (MMAC) . .	56
3.6	PROTOCOLO MAC MULTICANAL BASEADO EM TDMA PARA REDES AD HOC (TMMAC)	59
3.7	PROTOCOLO MAC MULTICANAL PARA COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS (M2MMAC)	60
3.7.1	Requisitos da camada física	60
3.7.2	Atualizações na estrutura NAV	61
3.7.3	A janela ATIM	62
3.7.4	A janela de comunicação	62
3.7.5	Visão geral do protocolo	63
3.8	QUADRO COMPARATIVO	63
3.9	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	65
4	M2M-TEE: PROTOCOLO MAC MULTICANAL ENERGETICAMENTE EFICIENTE DE COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO	66
4.1	INTRODUÇÃO	66
4.1.1	Premissas	66
4.2	PARÂMETROS DO PROTOCOLO	68
4.3	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS CANDIDATOS A COORDENADORES . .	71

4.4	VISÃO GERAL DO PROTOCOLO	72
4.5	O MOMENTO DE SINCRONIZAÇÃO	78
4.5.1	Beacon signal (BS)	78
4.5.2	Período de registro (REG)	79
4.5.3	Período de requisição de vagas (RSlot)	81
4.5.4	Divulgação da agenda (broadcast)	83
4.6	TRANSMISSÃO DOS DADOS	88
4.7	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	90
5	MODELO DO CIRCUITO TRANSCEPTOR E DO CONSUMO DE ENERGIA	92
5.1	INTRODUÇÃO	92
5.2	ARQUITETURA DE HARDWARE PARA OS TRANSCEPTORES DO M2M-TEE	93
5.3	MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA DO M2M-TEE	96
5.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	100
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	101
6.1	INTRODUÇÃO	101
6.2	METODOLOGIA	101
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
6.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	114
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
7.1	PUBLICAÇÃO RELACIONADA	117
7.2	TRABALHOS FUTUROS	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA COMPLETO DO M2M-TEE . .	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) (do inglês, *Wireless Sensor Networks* (WSNs)) são compostas por um determinado número de dispositivos equipados com sensores que possuem a capacidade de monitorar o ambiente físico no qual estão localizados e que realizam tarefas para fins específicos. Esses tipos de dispositivos são chamados de nós sensores (do inglês, *Sensor Nodes*), que podem ou não conter atuadores que interagem com o ambiente. As RSSFs são um meio de comunicação amplamente utilizado em diversas aplicações, como monitoramento ambiental, atividades médicas, operações militares e de resgate, operações de segurança e vigilância, processos industriais, inteligência doméstica (do inglês, *Home Intelligence*), agricultura de precisão, entre outras. Com o surgimento de diversas redes sem fio, foi necessário que os equipamentos do mercado fossem fabricados com interfaces que seguissem determinadas regras e protocolos de comunicação. Um dos padrões mais utilizados para RSSFs é o IEEE 802.15.4, que é base para especificações como ZigBee, WirelessHART e MiWi (LAN/MAN Standards Committee, 2020). Este padrão fornece o direcionamento para as redes de comunicação sem fio que operam com baixas taxas de transmissão de dados (do inglês, *Low-Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN)), e que permitem a conexão de dispositivos eletrônicos de curto alcance com baixo custo.

1.2 MOTIVAÇÃO

Por estarem muitas vezes em locais remotos e de difícil acesso, e por não estarem fisicamente conectados a fontes contínuas de energia, os nós sensores precisam ser alimentados por baterias, fazendo com que um dos principais desafios de enfrentamento nas RSSFs seja garantir uma vida útil prolongada destes dispositivos. Algumas das causas mais comuns de desperdício de energia em redes sem fio são a colisão de pacotes e a escuta ociosa do canal (do inglês, *idle listening*). É possível atenuar estes problemas através de técnicas de divisão do canal de frequência em *slots* de tempo distintos, que podem ser encontradas no Método de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (FALCONER; ADACHI; GUDMUNDSON, 1995) com o envio de um *broadcast* de agendamento, por parte de um nó coordenador, abrangendo a reserva dos *slots* de dados para cada par de nós comunicantes, e também na operação cíclica

do protocolo em períodos de ativação e inativação dos nós por meio de sinais de sincronização (do inglês, *Beacon Signal* (BS)) também enviados pelo nó líder da rede. É de se esperar que, com a imposição dos períodos de inatividade e dos *slots* de tempo, seja possível alcançar uma supressão da escuta ociosa e maior economia de energia a despeito de uma maior latência na entrega dos dados. Contudo, para determinadas aplicações onde o tamanho da carga útil (do inglês, *payload*) e a taxa de geração de mensagens são pequenos, como é o caso das automações predial e rural, este *trade-off* e qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service* (QoS)) tornam-se aceitáveis, já que é natural que exista nestes casos um maior intervalo entre chegadas de mensagens sem qualquer prejuízo ao sistema.

Outro desafio que não pode ser ignorado e que está presente em muitos protocolos atuais da subcamada MAC (*Medium Access Control*) é a subutilização dos canais não sobrepostos disponíveis. De acordo com a norma IEEE 802.15.4, é possível encontrar 16 canais não sobrepostos para a banda de $2,4GHz$ (LAN/MAN Standards Committee, 2020). Proporcionar à uma RSSF a possibilidade de transmitir em mais de um canal fornece vantagens como a redução de colisões de pacotes e aumento da vazão. Concomitantemente, pode-se ainda considerar algumas técnicas presentes na comunicação muitos-para-muitos como o Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO), que possibilita a diminuição do atraso fim a fim e o aumento da vazão (*throughput*) de dados através do compartilhamento de um mesmo canal de frequência para assegurar a transmissão e recepção simultânea de múltiplos pacotes (*Multi-Packet Transmission and Reception* (MPTR)). Para viabilizar a recepção simultânea de pacotes em um mesmo canal, deve-se considerar técnicas como a detecção de múltiplos usuários.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho propõe um novo protocolo MAC multicanal energeticamente eficiente de comunicação muitos-para-muitos para Redes de Sensores Sem Fio que possibilita uma comunicação livre de colisões de dados e um menor consumo de energia se comparado a outros protocolos correlatos. O protocolo ainda possibilita a diminuição do atraso fim a fim e o aumento da vazão, sendo capaz de utilizar os recursos multicanais que outrora estavam subutilizados ao custo de um aumento discreto na sobrecarga (*overhead*) para intervalos maiores entre chegadas de mensagens. Como objetivos específicos para este trabalho, consideram-se as seguintes etapas:

1. Revisão do estado da arte em termos de protocolos *single channel* energeticamente eficientes da camada MAC que operam com ciclos de trabalho ao custo de um aumento na latência;
2. Revisão do estado da arte em termos de protocolos de comunicação sem fio multicanal de camada MAC e de outros trabalhos relacionados como a comunicação muitos-para-muitos;
3. Desenvolvimento de um modelo de consumo de energia e de um projeto de circuito transceptor adaptado para o protocolo proposto;
4. Realização de simulações numéricas através do MATLAB para avaliação de desempenho do protocolo proposto;
5. Comparação e avaliação, no que diz respeito à eficiência do protocolo proposto, com outros protocolos energeticamente eficientes em termos de consumo de energia, vazão (*throughput*), *overhead* e latência.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Intruduz conceitos básicos relacionados ao cerne deste trabalho, contendo uma revisão do estado da arte sobre o Sistema ALOHA, o CSMA/CA, o TDMA, o padrão IEEE 802.15.4, o mecanismo PSM, e a comunicação muitos-para-muitos.

Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados: Apresenta os trabalhos relacionados à proposta apresentada nesta dissertação, que são os protocolos MAC energeticamente eficientes, e os protocolos multicanais da camada de enlace.

Capítulo 4 - M2M-TEE: Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente de Comunicação Muitos-para-Muitos para Redes de Sensores Sem Fio: Apresenta o novo protocolo MAC multicanal energeticamente eficiente de comunicação muitos-para-muitos para redes de sensores sem fio, o M2M-TEE.

Capítulo 5 - Modelo de Consumo de Energia do Circuito Transceptor: Descreve o modelo de consumo de energia e do circuito transceptor do protocolo proposto neste trabalho.

Capítulo 6 - Avaliação de Desempenho: Apresenta a avaliação de desempenho, tendo por objetivo a exposição dos métodos propostos para as simulações realizadas, os resultados e discussão, sendo disponibilizada uma avaliação de desempenho do protocolo em termos de consumo de energia, vazão (*throughput*), sobrecarga (*overhead*) e latência em comparação com outros protocolos legados do padrão IEEE 802.15.4.

Capítulo 7 - Considerações Finais: Apresenta as considerações finais sobre os principais tópicos abordados nesta dissertação, incluindo as contribuições alcançadas e as indicações de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica, desde os métodos e estratégias mais básicos para RSSFs até os conceitos mais complexos e necessários para o entendimento deste trabalho. Na Seção 2.2 revisa-se sobre o ALOHANET e o *Slotted* ALOHA, os primeiros sistemas de acesso ao meio sem fio baseados em pacotes de dados. Na Seção 2.3, descreve-se rapidamente sobre o protocolo CSMA/CA, um dos principais métodos de contenção e sensoriamento de portadora utilizado entre os dispositivos sem fio. Logo após, na Seção 2.4, trata-se sobre a técnica TDMA, que divide o canal em intervalos de tempo contíguos e distintos.

Em seguida, na Seção 2.5, revisa-se sobre o Padrão IEEE 802.15.4 que define as regras de operação das LR-WPANs, e que é um dos principais pontos de partida do protocolo proposto neste trabalho. A Seção 2.6 apresenta o Padrão IEEE 802.11 PSM, uma das técnicas pioneiras e mais importantes de economia de energia, que apesar de ser mais comumente utilizada entre os dispositivos compatíveis com o Padrão IEEE 802.11, seu princípio de funcionamento pode ser aplicado em diversos protocolos da camada MAC.

Na Seção 2.7, descreve-se rapidamente sobre a comunicação muitos-para-muitos em redes sem fio, onde são abordados trabalhos que combinam soluções como FDMA, CDMA-SIC, e MIMO. Na Seção 2.8, fala-se rapidamente sobre o *Multiuser MIMO* (MU-MIMO). E por fim, na Seção 2.9, são apresentadas as considerações finais do capítulo.

2.2 SISTEMA ALOHA

O ALOHANET, também conhecido como *ALOHA System*, foi o primeiro sistema de acesso ao meio de comunicação de pacotes de dados sem fio entre computadores, desenvolvido na Universidade do Havaí pelo professor Normam Abramson, e entrou em operação em Junho de 1971 (ABRAMSON, 1985). O objetivo principal do ALOHANET era implementar o uso de tecnologias de comunicação via rádio para sistemas computacionais como uma alternativa aos sistemas telefônicos cabeados, e também determinar em quais casos a comunicação via rádio seria mais adequada em comparação à comunicação convencional com fios (ABRAMSON, 1970). Inicialmente foi proposto um protocolo de Controle de Acesso ao Meio (MAC) que permite que os dispositivos utilizem o mesmo canal de comunicação pelo método de acesso

aleatório com transmissões dessincronizadas. Uma transmissão com sucesso ocorre quando apenas uma das estações envia um *frame* de dados para um destinatário da rede. Se o *frame* for recebido pelo destinatário sem erros, então ele deverá enviar um pacote de confirmação (do inglês, *Acknowledgment* (ACK)) para o transmissor. E se caso o pacote de confirmação não for recebido, o *frame* deverá ser retransmitido até que ocorra uma transmissão bem sucedida e a recepção do respectivo pacote ACK pelo transmissor. Quanto maior o número de dispositivos competindo pelo canal, maiores serão as chances de ocorrer colisão entre *frames* e desperdício de energia, e consequentemente maior será o número de retransmissões (ABRAMSON, 1970).

A versão melhorada do ALOHA nativo denomina-se *Slotted ALOHA*, que divide o canal de comunicação em *slots* de tempo contíguos e de duração fixa, que correspondem ao tempo de transmissão de um pacote. As transmissões são feitas no início de cada *slot*, reduzindo desta forma as chances de ocorrer uma colisão e aumentando a eficiência geral da rede (ROBERTS, 1975).

2.3 ACESSO MÚLTIPLO POR DETECÇÃO DA PORTADORA COM PREVENÇÃO DE COLISÃO (CSMA/CA)

Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Prevenção de Colisão (do inglês, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)) é um método da subcamada MAC amplamente utilizado entre os dispositivos legados dos Padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, e que utiliza o sensoramento da portadora (do inglês, *Carrier Sense*) para tentar impedir que outras transmissões de pacotes de dados sejam realizadas na rede enquanto o canal estiver ocupado (IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1997; IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1999; LAN/MAN Standards Committee, 2020). A diferença entre o CSMA/CA e o Acesso Múltiplo por Detecção da Portadora com Detecção de Colisão (CSMA/CD) é que no primeiro método existem técnicas de prevenção de colisões de pacotes de dados, mas no segundo a colisão ainda pode ocorrer, mesmo que o sistema de sensoramento da portadora esteja em funcionamento. Quando a colisão é detectada no CSMA/CD, a estação aborta imediatamente a transmissão para encurtar o tempo necessário antes de realizar uma nova tentativa de transmissão, e aguarda um intervalo de tempo de resguardo aleatório (do inglês, *backoff*) antes de reenviar o quadro (do inglês, *frame*). Como as comunicações em redes sem fio são realizadas através do ar, o transmissor não pode utilizar o CSMA/CD para detectar de forma imediata a ocorrência de colisões.

Embora o CSMA/CA tenha sido utilizado em vários sistemas de comunicação sem fio, ele não resolve por completo o problema do terminal escondido (do inglês, *hidden node problem*), que ocorre quando as estações não conseguem detectar a transmissão de outras estações no canal por estarem muito distantes uma da outra, seja porque têm um raio de alcance limitado para detecção das transmissões do canal, ou porque a potência de transmissão da estação fonte não é suficiente para alcançar todos os nós da rede. Contudo, existem maneiras de mediar o acesso ao canal por meio de pacotes de controle RTS (do inglês, Request To Send) e CTS (do inglês, Clear To Send). Este mecanismo de acesso viabiliza negociações de quatro vias (do inglês, *Four-Way Handshaking*) (IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1997; IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1999). Com isso, se houver colisão devido ao problema do terminal escondido, o tempo de duração da colisão será menor, pois o tamanho dos pacotes de controle são menores que os *frames* de dados. Embora exista tal possibilidade, os pacotes RTS/CTS podem ser desabilitados completamente ou não serem utilizados para transmissões de pacotes de dados pequenos, já que existe um *overhead* significativamente maior para pequenas transferências. Mesmo com a aplicação deste mecanismo, o problema do terminal exposto ainda persiste. Neste problema, uma estação que possui mensagens para transmitir fica próxima de um outro dispositivo transmissor, mas não do destinatário deste segundo dispositivo, ocasionando a sua abstenção desnecessária que não necessariamente prejudicaria o segundo dispositivo transmissor.

2.4 ACESSO MÚLTIPLO POR DIVISÃO DE TEMPO (TDMA)

A técnica TDMA (do inglês, *Time Division Multiple Access*) viabiliza às estações da rede o compartilhamento simultâneo de um mesmo canal de comunicação através da divisão do sinal de frequência em intervalos de tempo (do inglês, *time slots*) contíguos e distintos. Cada *slot* de tempo é reservado para uma única estação transmissora, sendo a garantia desta regra a principal desvantagem da técnica, já que faz-se necessário manter o sincronismo nos instantes de interpolação entre os intervalos. Este sincronismo, mesmo sendo complexo e energeticamente custoso, garante uma comunicação livre de colisões (FALCONER; ADACHI; GUDMUNDSON, 1995).

Uma outra vantagem desta técnica é possibilidade da alteração dinâmica da taxa de *bits* de cada estação de acordo com as demandas de tráfego de dados na rede, sendo possível alocar mais ou menos *slots* de tempo para a estação. O TDMA também possui requisitos de

gerenciamento de energia menos rigorosos que outras técnicas de múltiplo acesso como por exemplo o Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA), já que o controle da interferência entre as distintas estações é estabelecido através dos *slots* de tempo e da alocação de frequência, e não pelo processamento resultante da difusão de largura de banda codificada.

Reserva-se um número permanente de *slots* de tempo para uma quantidade prevista de estações no momento em que a rede TDMA é concebida. Isto pode configurar em sobrecarga (do inglês, *overload*) ou subutilização dos recursos compartilhados no canal de comunicação mediante um crescimento ou declínio substancial do número de estações na rede, respectivamente. Ou seja, se a rede for dinâmica e escalável, e o número de estações for maior que a quantidade de *slots* disponíveis, um mesmo *slot* de tempo poderá ser disputado por mais de uma estação. Caso o número de estações seja menor que a quantidade de *slots*, a latência (do inglês, *delay*) média da rede crescerá e haverá desperdício de *slots* que poderiam estar sendo utilizados, ocasionando uma redução na taxa de transferência de dados (do inglês *throughput*).

2.5 PADRÃO IEEE 802.15.4

O Padrão IEEE 802.15.4 define as regras de operação das LR-WPANs nas camadas física e de enlace (MAC) (LAN/MAN Standards Committee, 2020). A partir do Padrão IEEE 802.15.4 foram especificados protocolos como ZigBee, WirelessHART, MiWi, 6LoWPAN e ISA100.11a, e daí em diante puderam ser desenvolvidas as camadas superiores que não foram especificadas no IEEE 802.15.4. Diferentemente do Padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) que pode oferecer uma maior largura de banda a despeito de um maior consumo de energia, o IEEE 802.15.4 promete uma comunicação de baixa velocidade e baixo custo para os seus dispositivos legados. A taxa de transmissão pode chegar a 250 kbps com um alcance de enlace direto (do inglês, *Line-of-sight* (LoS)) de 30 metros entre os dispositivos. Para que seja possível diminuir ainda mais o consumo de energia da rede, podem ser usadas taxas de transmissão mais baixas. Deste modo, torna-se possível construir dispositivos transceptores mais simples e de menor custo para aplicações com recursos energéticos limitados, transferência de dados confiável, e maior tolerância a atrasos.

2.5.1 Tipos de dispositivos

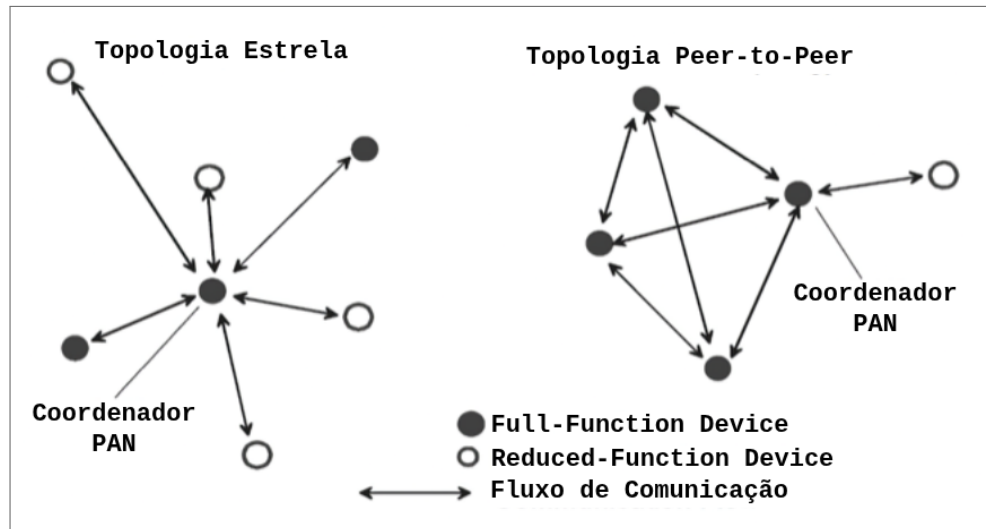
Existem dois tipos de dispositivos que podem participar de uma rede IEEE 802.15.4, que são os *Full-function Devices* (FFDs) e os *Reduced-function Devices* (RFDs). O primeiro grupo pode exercer a função de um Coordenador ou de Coordenador da *Rede de Área Pessoal* (do inglês, *Personal Area Network* (PAN)). Um coordenador comum desempenha o serviço de sincronização para os demais dispositivos ou coordenadores, e apenas um destes exerce a função de Coordenador PAN devido à sua maior capacidade computacional em relação aos demais. No geral, o Coordenador PAN é alimentado pela rede elétrica, enquanto que os demais dispositivos são alimentados por baterias. Os dispositivos RFDs não são capazes de atuarem como coordenadores, pois desempenham aplicações extremamente simples usando recursos mínimos e de pouca capacidade de memória, como por exemplo um interruptor de luz ou um sensor infravermelho passivo. Por não possuírem a necessidade de enviar um grande volume de dados, estes dispositivos se associam a um único FFD por vez. Uma *Rede de Área Pessoal Sem Fio* (do inglês, *Wireless Personal Area Network* (WPAN)) consiste de pelo menos um FFD operando como um Coordenador PAN que se comunica com um ou mais dispositivos em um mesmo canal de frequência. Os dispositivos devem estar equipados com pelo menos uma interface de rádio que segue as diretrizes do Padrão IEEE 802.15.4 (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.2 Topologias de rede

As redes LR-WPANs podem operar em topologias diferentes que podem ser mais adequadas a depender dos requisitos de cada aplicação, três exemplos são: A topologia estrela, a topologia *peer-to-peer*, e a topologia *cluster tree*. As topologias estão exemplificadas nas Figuras 1 e 2.

Em qualquer uma delas, todos os dispositivos possuem endereços exclusivos de identificação na rede, que são chamados de endereços extendidos (do inglês, *extended addresses*). Contudo, durante o processo de associação na rede, o dispositivo também pode receber um endereço curto (do inglês, *short address*). A apropriação dos campos de endereços extendidos e curtos é opcional para os dispositivos de função reduzida com capacidade exclusiva de transmissão (do inglês, *Reduced Function Device-Transmit* (RFD-TX)). É importante pontuar que, da mesma forma que os dispositivos possuem endereços para identificação dentro da rede, a própria rede PAN também deve ter um ID exclusivo (PAN ID) que não pode ser utilizado

Figura 1 – Exemplos de topologias estrela e *peer-to-peer* para LR-WPANs.



Fonte: Adaptado de LAN/MAN Standards Committee (2020)

por outras redes (ou *clusters*) que estão dentro do alcance de comunicação das estações da primeira rede. O PAN ID permite a comunicação interna entre os dispositivos de uma mesma rede usando endereços curtos, e também permite a comunicação externa entre dispositivos de redes independentes. A formação da rede é realizada pela camada superior (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.2.1 Topologia estrela

Na topologia estrela, existe um único dispositivo central que controla toda a rede, sendo este o Coordenador PAN. Os demais dispositivos geralmente executam uma aplicação de propósito específico, sendo eles o ponto de iniciação ou de finalização da comunicação com o Coordenador PAN. Uma vez que o PAN ID foi escolhido, o Coordenador PAN permite aos demais dispositivos o ingresso na rede, sejam eles FFDs ou RFDs. Um dispositivo de função reduzida com capacidade exclusiva de recepção (do inglês, *Reduced Function Device-Receive* (RFD-RX)) pode servir como ponto de terminação do Coordenador PAN para RFD-TXs (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.2.2 Topologia peer-to-peer

Na topologia *peer-to-peer*, qualquer par de dispositivos que estejam dentro de um alcance aceitável das interfaces de rádio pode se comunicar, não havendo a obrigatoriedade do Co-

ordenador PAN participar da comunicação. A topologia *peer-to-peer* possibilita a formação de redes mais complexas, como por exemplo a topologia de rede *mesh* e *cluster tree*. Uma rede *peer-to-peer* permite que as mensagens possam percorrer entre os dispositivos por meio de múltiplos saltos (do inglês, *multi-hop*). Contudo, estas funções devem ser estruturadas na camada superior (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.2.3 Topologia cluster tree

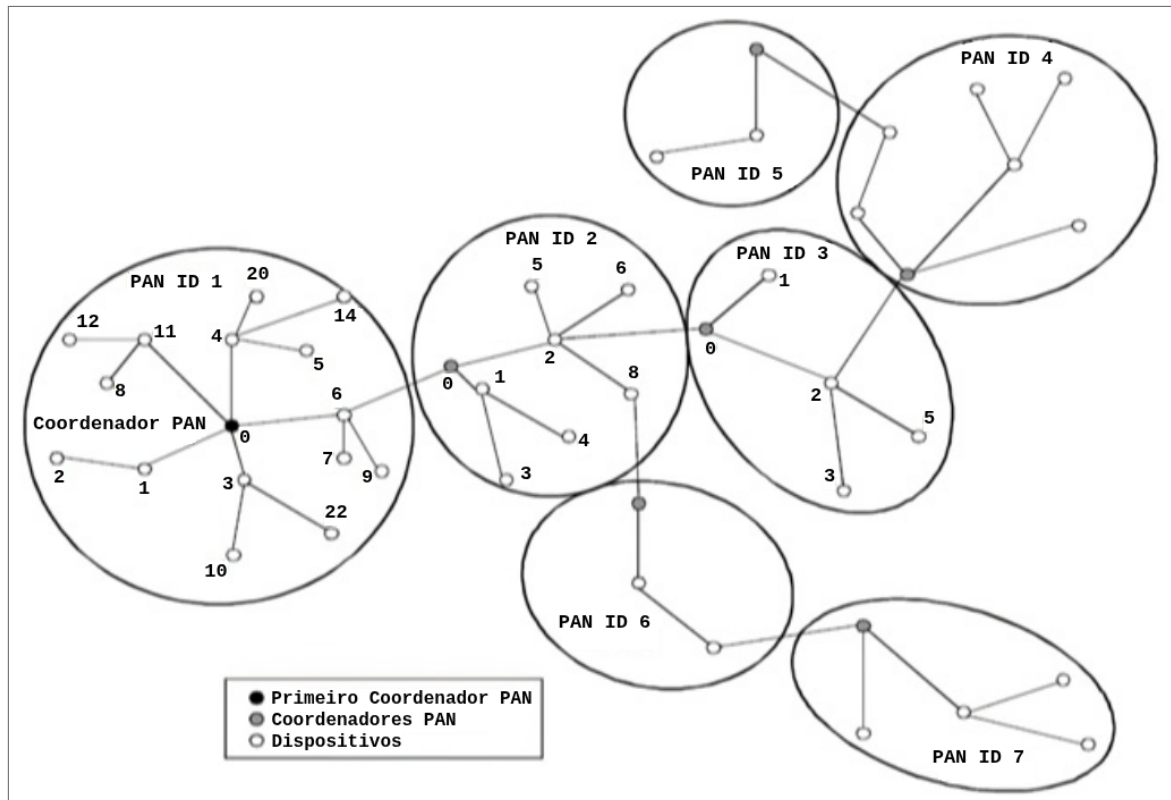
A forma mais simples de se formar uma rede *cluster tree* é construindo uma rede com um único *cluster*, que é um agrupamento de dispositivos interconectados que trabalham para um propósito em comum. Para que isso seja possível, um FFD deverá dar início ao primeiro *cluster*. Este mesmo FFD torna-se o Coordenador PAN do *cluster* e escolhe um PAN ID ainda não utilizado. Será necessário um mecanismo de contenção se caso dois ou mais FFDs tentarem obter o posto de Coordenador PAN ao mesmo tempo.

Para que outros dispositivos possam participar do *cluster*, é necessário que o Coordenador PAN envie periodicamente, via *broadcast*, quadros de sinalização (do inglês, *Beacon Frames* (BF) ou *Beacon Signals* (BS)) para as estações vizinhas que estão ao seu alcance. Os dispositivos que receberem os quadros de sinalização podem solicitar a entrada no *cluster* para o Coordenador PAN, e se caso a solicitação for aceita, o Coordenador terá que adicioná-lo na lista de dispositivos vizinhos, ao mesmo tempo que o dispositivo recém-chegado ao *cluster* também deve adicionar o Coordenador PAN à sua lista (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

É possível construir redes maiores formando uma malha (*mesh*) de múltiplos *clusters* vizinhos. Uma vez que os requisitos da rede tenham sido alcançados, o primeiro Coordenador PAN instrui um outro FFD a se tornar o Coordenador PAN de um novo *cluster* adjacente ao primeiro (LAN/MAN Standards Committee, 2020). Outros dispositivos podem se conectar ao novo *cluster* e formar uma estrutura de rede *multicluster*, conforme apresentado na Figura 2.

2.5.3 Arquitetura do padrão IEEE 802.15.4

A arquitetura dos dispositivos LR-WPANs é dividida em camadas que executam funções distintas no Padrão IEEE 802.15.4, que são a camada física (PHY) e a subcamada de enlace (MAC). Elas fornecem serviços para as camadas superiores. As camadas superiores representadas no bloco de mais alto nível da figura consistem de uma camada de rede, que provê as

Figura 2 – Exemplo de uma Rede *Cluster Tree*.

Fonte: Adaptado de LAN/MAN Standards Committee (2020)

configurações da rede e roteamento das mensagens, e uma camada de aplicação, que define qual será o propósito do dispositivo (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.3.1 Camada física (PHY)

A camada física (PHY) executa mecanismos de controle de baixo nível por meio de um transceptor de Rádio-frequência (RF). Algumas de suas características são a ativação e desativação do transceptor de RF, detecção de energia (do inglês, *Energy Detection* (ED)), indicação de qualidade do link (do inglês, *Link Quality Indication* (LQI)), seleção do canal de frequência e avaliação do canal livre (do inglês, *Clear Channel Assessment* (CCA)) (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.3.2 Subcamada de enlace (MAC)

A subcamada de enlace (MAC) provê dois serviços: O serviço de dados MAC e o serviço de gerenciamento MAC que realiza a interface com o ponto de acesso de serviço (do inglês,

Service Access Point (SAP)) da entidade de gerenciamento de subcamada MAC (do inglês, *MAC Sublayer Management Entity* (MLME)), também conhecido como MLME-SAP. Alguns dos recursos da subcamada MAC são o gerenciamento dos *Beacon Frames*, acesso ao canal, gerenciamento do *Guaranteed TimeSlot* (GTS), validação dos quadros, e confirmação (ACK) da entrega do quadro (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

2.5.4 Visão geral do funcionamento do padrão IEEE 802.15.4

2.5.4.1 *Beacon superframe*

O *Beacon Superframe*, além de ser definido pelo coordenador da rede, é limitado pelo espaço temporal entre dois *beacons* enviados pelo coordenador, denominado de intervalo entre *beacons* (do inglês, *Beacon Interval* (BI)), e o comprimento deste intervalo é descrito pelo atributo *Beacon Order* (BO). Dentro deste espaço temporal, podem existir períodos ativos e inativos. O período ativo também pode ser chamado de *Superframe Duration* (SD), e o comprimento deste período é descrito pelo atributo *Superframe Order* (SO), que inclui também o *Beacon Frame* que dá início ao período ativo. No período de inatividade, o coordenador pode entrar em um modo de economia de energia. A transmissão do *Beacon Frame* começa no início do primeiro *slot* de tempo de cada *superframe*. Os *beacons* são usados para sincronizar os dispositivos conectados, identificar o PAN ID, e descrever a estrutura do *superframe* (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

O período onde os dispositivos podem acessar aleatoriamente o meio é chamado de período de acesso com contenção (do inglês, *Contention Access Period* (CAP)), e deve começar imediatamente após o envio do *beacon*. Qualquer dispositivo que deseja se comunicar durante o CAP deverá competir com outros dispositivos com base no método CSMA/CA. Dito isto, um dispositivo que transmite no CAP deve ter a garantia de que sua transmissão seja realizada com sucesso dentro de um período de espaçamento entre quadros (do inglês, *Interframe Space* (IFS)), desde o envio do pacote de dados até o envio de seu respectivo pacote de reconhecimento (ACK). Se não houver tempo suficiente, o dispositivo deverá reprogramar a sua transmissão até o CAP do *superframe* seguinte. O período CAP também pode ser reservado para novos dispositivos que desejarem ingressar na rede (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

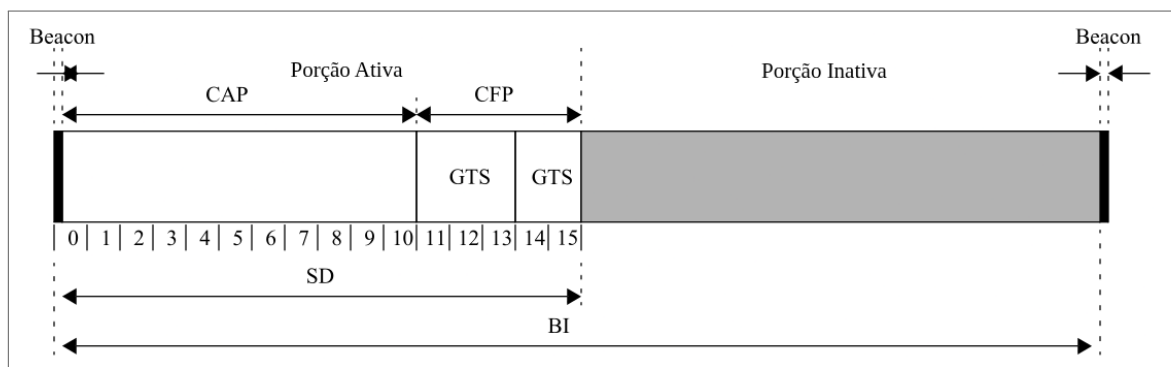
Para aplicações que exigem maior largura de banda ou menor latência para dados específicos, são reservadas porções de tempo denominadas de *Guaranteed TimeSlots* (GTS) que

formam o período livre de contenção (do inglês, *Contention Free Period* (CFP)) e que aparece no final do período ativo do *superframe* imediatamente após o CAP. Toda a comunicação baseada em contenção deve ser concluída antes do início do CFP, e se o CFP tiver comprimento zero, o CAP deve ser concluído no final da parte ativa do *superframe*. O Coordenador PAN pode alocar até sete GTSs, sendo que qualquer um destes GTSs pode ocupar mais de um *slot* de tempo. A transmissão de dados que ocorre em um GTS deve ser concluída antes do próximo GTS ou do final do CFP. A duração do CFP, portanto, muda dependendo da duração total de todos os GTSs combinados, e assim como ocorre no período CAP, um dispositivo que transmite no CFP deve ter a garantia de que suas transmissões sejam concluídas em um período IFS (LAN/MAN Standards Committee, 2020). A Figura 3 apresenta um exemplo da estrutura do *superframe*.

2.5.4.2 Modelo de transferência de dados e estrutura do quadro

Logo que o dispositivo identifica o envio do *beacon* por parte do Coordenador e decodifica as suas informações, ele deve se adequar à estrutura lógica do *superframe* se caso desejar transmitir dados para o Coordenador. E quando o Coordenador deseja transmitir dados para um dispositivo da rede PAN, ele deve indicar, no envio do próximo *beacon*, que existe uma mensagem pendente para este dispositivo. Como o dispositivo escuta periodicamente o envio dos *beacons*, se ele identificar que existe uma mensagem pendente endereçada pra ele, é necessário que ele transmita um comando de requisição de dados. Deste modo, o Coordenador envia para o dispositivo o quadro de dados pendente. Depois que o quadro é transmitido com sucesso, a mensagem é removida da lista de pendências no envio do próximo *beacon* (LAN/MAN Standards Committee, 2020).

Figura 3 – Exemplo de uma estrutura *superframe*.



Fonte: Adaptado de LAN/MAN Standards Committee (2020)

2.5.4.3 Consumo de energia dos dispositivos

Um dos principais desafios para aplicações que utilizam o Padrão IEEE 802.15.4 é o gerenciamento de energia de seus dispositivos, que a princípio são alimentados por baterias cujas substituições ou recargas são quase impraticáveis. No entanto, em certas aplicações, alguns desses dispositivos podem ser alimentados pela rede elétrica. Os dispositivos alimentados por baterias irão passar a maior parte da sua vida útil em estado de dormência ou hibernação, o que pode ocasionar atrasos na entrega das mensagens para os destinatários. Cada dispositivo deve escutar periodicamente o canal de comunicação para verificar se existe alguma mensagem pendente. Já os dispositivos alimentados pela rede elétrica podem ouvir o canal continuamente.

2.6 IEEE 802.11 POWER SAVING MODE/MECHANISM

Um dos principais desafios em RSSFs é controlar o consumo de energia de suas estações. Por não estarem fisicamente conectadas a fontes de energia, os dispositivos sem fio costumam ser alimentados por baterias. Um nó pode consumir energia ao transmitir pacotes (*TX mode*), ao processar pacotes recebidos (*RX mode*), e até mesmo quando estiver ocioso (*IDLE mode*). Em padrões IEEE 802.11, onde são empregados mecanismos de contenção e detecção da portadora, as estações escutam o canal de comunicação antes de enviar os dados. Nesse momento, a estação encontra-se ociosa executando tarefas que podem consumir uma quantidade significativa de energia. No geral, o consumo de energia durante a transmissão e recepção de pacotes é maior que o consumo durante o período ocioso. Todavia, o consumo de energia do dispositivo durante o *IDLE mode* não é necessariamente irrelevante.

Para que o dispositivo possa economizar energia, um estado adicional denominado modo de suspensão ou de inatividade (do inglês, *SLEEP mode* ou *DOZE mode*) é projetado para que ele possa desligar temporariamente o seu transceptor de rádio. Neste estado, o consumo de energia é substancialmente menor do que nos outros estados apresentados. Ademais, para que os nós possam recomeçar normalmente as suas comunicações sem prejuízo, eles devem ligar o transceptor após um certo período programado ativando o modo *AWAKEN*. Nesta seção são apresentados os mecanismos eficientes de economia de energia do Padrão IEEE 802.11 PSM (do inglês, *Power Saving Mode/Mechanism*) descritos em (IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1997; WOESNER et al., 1998; BAEK; CHOI, 2008; TSENG; HSU; HSIEH, 2003;

TAUBER; BHATTI, 2012).

Apesar de ser um método voltado para dispositivos compatíveis com o Padrão IEEE 802.11, o princípio de funcionamento do IEEE 802.11 PSM pode ser aplicado em diversos protocolos, até mesmo aqueles que utilizam múltiplos canais de comunicação, como é o caso de alguns dos trabalhos correlatos que serão apresentados no Capítulo 3 e que serviram de alicerce para este trabalho. O Padrão IEEE 802.11 PSM pode ser utilizado tanto em redes com infraestrutura (*i.e.* BSS, do inglês, *Basic Service Set*) quanto em redes IBSS (do inglês, *Independent BSS*). Nos dois casos, o propósito é o mesmo: proporcionar economia de energia nas redes sem fio.

Todas as ocorrências da rede são efetuadas dentro de intervalos entre *beacons* (*Beacon Intervals*) que são divididos em duas etapas. A primeira fase possibilita a troca de pacotes de controle entre as estações que desejam transmitir dados. Estes pacotes, denominados de pacotes ATIM (do inglês, *Announcement Traffic Indication MAP*), carregam uma estrutura de dados em formato de mapa que indica quais são as estações que irão participar da transmissão de dados na fase subsequente. À primeira fase dá-se o nome de fase de negociação ou Janela ATIM (do inglês, *ATIM-Window*). Se caso as negociações forem bem sucedidas, as estações que trocaram os pacotes de controle garantem participação na próxima etapa. Caso contrário, elas deverão esperar pelo início da janela ATIM do próximo intervalo entre *beacons*.

A segunda fase garante a troca de pacotes de dados (*DATA Frame*). Os nós que não tenham pacotes a transmitir ou a receber entram no estado *DOZE mode* até o início do próximo intervalo entre *beacons*, onde suas atividades serão retomadas pelo estímulo do *AWAKE mode*. Para informar à rede que os pacotes ATIM e de dados foram recebidos com sucesso, durante todo o intervalo entre *beacons* as estações receptoras devem enviar pacotes de reconhecimento (ACK).

2.7 COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS EM REDES SEM FIO

A comunicação muitos-para-muitos (do inglês, *Many-to-Many Communication*) possibilita a transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes de dados (MPTR). Em (MORAES, 2005; MORAES; SADJADPOUR et al., 2009), foram apresentados dois esquemas de cooperação oportunista para redes *ad hoc* sem fio, onde o primeiro utiliza uma combinação de FDMA com CDMA-SIC, e o segundo uma combinação de FDMA com MIMO. Em um esquema de cooperação oportunista, as informações são transmitidas e recebidas simultaneamente entre estações próximas, sendo estas informações decodificadas pelos destinatários. Nesta configu-

ração, os efeitos destrutivos da interferência são inibidos, e a capacidade das redes aumenta com a ampliação da potência de transmissão até um determinado limite, fazendo com que este esquema se torne promissor e desafiador. Quando duas estações estão próximas o suficiente, elas podem enviar mensagens entre si sem qualquer atraso. O modelo híbrido de comunicação muitos-para-muitos foi utilizado como um dos pilares do protocolo M2MMAC (GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017), que será apresentado a posteriori, e que também será tomado como um dos alicerces para a construção da proposta deste trabalho.

2.8 MULTIUSER MIMO (MU-MIMO)

O MIMO com Detecção de Múltiplos Usuários (do inglês, *Multiuser MIMO* (MU-MIMO)) disponibiliza às estações da rede a capacidade de receber e decodificar múltiplos pacotes simultaneamente em um mesmo canal de frequência, possibilitando desta maneira um aumento significativo da vazão (*throughput*) na ordem do menor número de antenas disponíveis entre as estações transmissora e receptora, conforme descrito em (SAMARDZIJA; LOZANO; PAPADIAS, 2005). Para que este método torne-se viável, é necessário aplicar esquemas de codificação e decodificação de sinais apresentado por *Alamouti* em (ALAMOUTI, 1998).

Este tipo de metodologia pode se tornar impraticável em redes com uma infraestrutura organizacional, pois tal característica pode ocasionar um obstáculo no ganho de vazão, dado que as estações clientes centralizam os seus dados em *Access Points* (APs). Contudo, para redes *ad hoc* e de sensores, existe uma homogeneidade maior devido às características de descentralização e distribuição dos dados.

Os receptores de redes com detecção de múltiplos usuários devem ser capazes de diferenciar os seus sinais das demais interferências absorvidas concomitantemente por intermédio de um conjunto de antenas. Os métodos tradicionais de detecção de múltiplos usuários envolvem filtros adaptativos, *Rake Receivers*, decorrelacionamento, detecção adaptativa e detecção ótima, envolvendo soluções tanto de *hardware* quanto de *software* (DU, 2012; DAI et al., 2007).

Para simplificar a complexidade destas técnicas, foram propostas outras alternativas como, por exemplo, os detectores lineares de múltiplos usuários (DAI et al., 2007). Esta alternativa pode ser ainda mais simplificada através da utilização de iterações, que é o caso das arquiteturas V-BLAST (do inglês, *Vertical - Bell Laboratories Layered Space-Time*) (WOLNIANSKY et al., 1998). Seu funcionamento consiste em identificar e decodificar o sinal com maior razão sinal-ruído pós processamento através de múltiplas antenas de recepção. Subsequentemente,

esse sinal tem o efeito cancelado para que o sinal com a segunda maior razão seja decodificado. Este processo iterativo permite a identificação e decodificação de vários sinais transmitidos simultaneamente em uma mesma frequência de forma eficiente.

2.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O objetivo deste capítulo foi revisar o estado da arte e os principais tópicos relacionados às redes sem fio que contribuíram para o desenvolvimento do protocolo proposto neste trabalho. A Seção 2.2 apresentou informações gerais sobre o primeiro sistema de comunicação de pacotes de dados sem fio entre computadores, o ALOHANET. Ainda que este sistema tenha baixa vazão de dados, torna-se necessário entender o seu funcionamento para que seja possível compreender seus princípios e benefícios para redes de dados sem fio. Logo em seguida, foi desenvolvida uma versão melhorada denominada *Slotted ALOHA*, sendo este um dos protocolos que foram utilizados como referência na avaliação de desempenho do protocolo proposto neste trabalho.

Em seguida, foram apresentados os métodos CSMA/CA e TDMA que viabilizam às estações da rede a prevenção de colisões e o compartilhamento de um mesmo canal de comunicação, dividindo-o em intervalos de tempo contíguos e distintos. Estas duas técnicas foram essenciais para a construção do protocolo proposto neste trabalho. A Seção 2.5 apresentou as informações mais importantes do Padrão IEEE 802.15.4, visto que este foi um dos pilares que nortearam este trabalho devido à sua capacidade de comunicação com baixa velocidade e de baixo custo, dividindo a rede em períodos ativos de acesso com e sem contenção. Logo após, foi apresentado o mecanismo de economia de energia amplamente utilizado em dispositivos compatíveis ao Padrão IEEE 802.11, e que serviu como base para os protocolos multicanais correlatos do Capítulo 3.

Por fim, foram apresentadas algumas propostas que possibilitam a transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes de dados (MPTR) através da comunicação muitos-para-muitos. Foram citados dois esquemas de cooperação oportunista, onde o primeiro utiliza uma combinação de FDMA com CDMA-SIC, e o segundo uma combinação de FDMA com MIMO. Esta última configuração, juntamente com a detecção de múltiplos usuários, possibilitaram às estações do protocolo deste trabalho o MPTR em múltiplos canais com um aumento significativo da vazão, de maneira que a interferência entre os fluxos de comunicação de um mesmo canal de frequência seja mínima. O próximo capítulo irá apresentar os protocolos correlatos à proposta apresentada neste trabalho.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os protocolos da subcamada MAC que possuem características semelhantes à proposta apresentada neste trabalho. Tais protocolos podem ser divididos em dois principais grupos: No primeiro, os dispositivos operam em um único canal com ciclos de trabalho, conectam-se em curtas distâncias, têm taxas de transmissão baixas e realizam sincronização global por meio de técnicas de reserva de slots para economizar energia ao custo de um aumento na latência. Além disso, são regidos por um nó coordenador, sendo compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4. São eles o *Sensor-MAC* (S-MAC), o Sensor-MAC com Escuta Adaptativa (S-MAC-AL), e o Protocolo MAC Energeticamente Eficiente e Livre de Colisões (DyTEE).

No segundo grupo, os dispositivos operam em redes descentralizadas com múltiplos canais de frequência, e têm um nível de compatibilidade maior com os equipamentos legados do Padrão IEEE 802.11. São eles o Protocolo MAC Multicanal para Redes *Ad Hoc* (MMAC), o Protocolo MAC Multicanal baseado em TDMA para Redes *Ad Hoc* (TMMAC), e o Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos (M2MMAC).

3.2 PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (SENSOR-MAC)

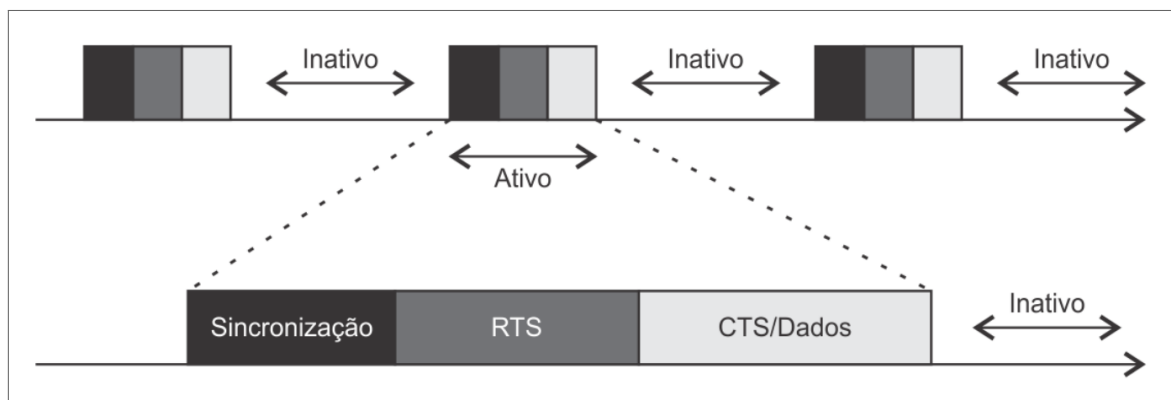
O S-MAC (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002) é um protocolo *single channel* que foi desenvolvido para alcançar maior economia de energia a despeito de uma maior latência como consequência dos ciclos de ativação e desativação (*duty cycle*) de suas estações. O tempo de inatividade deve ser configurado de modo que não ocorra o risco da latência gerar um acúmulo exagerado de mensagens no *buffer* do dispositivo, e consequentemente a perda de pacotes. O S-MAC reduz o tempo de escuta permitindo que a estação entre em modo de suspensão periódica. Durante os períodos ativos, os nós utilizam mecanismos de contenção antes de transmitir pacotes, assim como realizam o controle de tráfego através do CSMA/CA, mitigando o problema do terminal exposto e escondido, e reduzindo o desperdício de energia em caso de colisão. Em períodos de inatividade, apenas um par de estações comunicantes troca pacotes de dados enquanto os outros nós dormem (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002). A

Figura 4 exemplifica a transição temporal simplificada do protocolo Sensor-MAC.

As estações que desejam se comunicar devem se conectar a grupos chamados *clusters* virtuais, mas não há conexão direta com um coordenador. A estratégia do S-MAC evita colisões de pacotes de dados por meio dos pacotes de controle, mas não é apropriada para sistemas onde a carga útil (*payload*) é de apenas alguns *bytes*, porque o período de detecção do canal pode ser muito maior do que o necessário para enviar uma mensagem e, portanto, é necessário gastar mais energia durante o período de contenção do que na transmissão dos dados. Além dos pacotes de controle RTS, CTS e ACK, também são utilizados pacotes de sincronização que são transmitidos em *slots* específicos com contenção, o que pode gerar um certo desperdício de energia. Para controlar o desvio de *clock*, as estações vizinhas do S-MAC realizam sincronizações periódicas entre si, reduzindo desta forma a sobrecarga (*overhead*) dos seus pacotes. Ou seja, as estações escutam o canal no mesmo intervalo de tempo, assim como também entram em modo de inatividade no mesmo período (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002). As estações trocam suas agendas transmitindo-as para todos os seus vizinhos imediatos, e cada estação mantém uma tabela de programações onde armazenam as agendas de todos os seus vizinhos, sendo aplicados os seguintes passos:

1. Primeiramente, a estação escuta o canal de comunicação por um período pré-determinado. Se a estação não detectar qualquer transmissão de agenda por parte de outro nó, então ela escolhe um período aleatório para dormir e transmite de imediato sua agenda em uma mensagem SYNC, informando que ela entrará em um período de inatividade após t segundos. Este nó é chamado de sincronizador, pois é o precursor que estabelece as primeiras definições de sincronização entre as estações vizinhas de forma independente (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002);

Figura 4 – Diagrama temporal do protocolo *Sensor-MAC*.



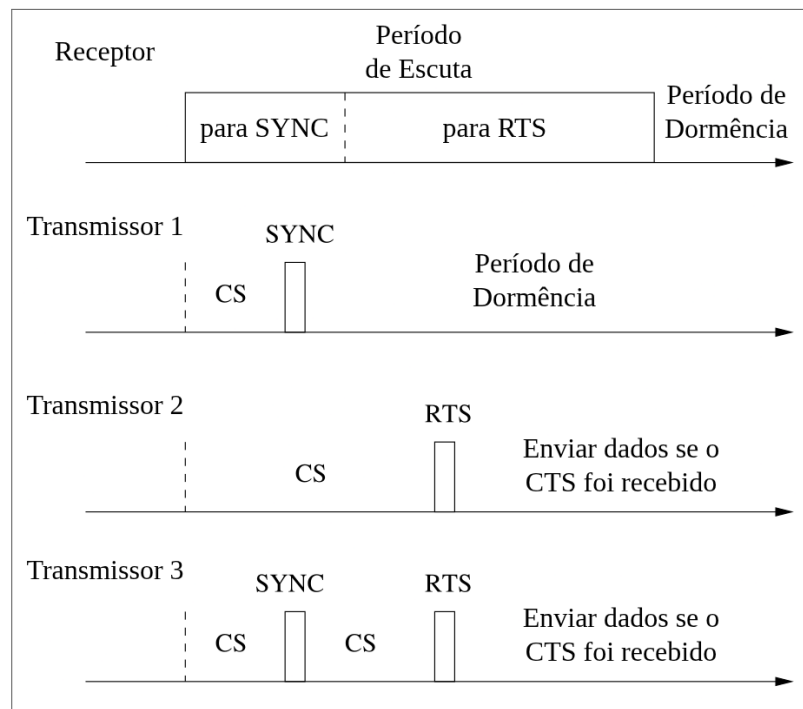
Fonte: GUIMARAES (2014)

2. Se a estação receber a agenda de outro nó vizinho antes de transmitir o seu, então ela deverá reprogramar seu agendamento de acordo com a programação do seu vizinho. Este nó é chamado de seguidor, que espera por um tempo aleatório t_d para retransmitir a programação do nó sincronizador e dormir em $t - t_d$ segundos. O atraso aleatório é necessário para tentar inibir possíveis colisões entre mensagens SYNC de outros seguidores que também detectaram a mesma programação da estação sincronizadora (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002);
3. Se uma estação interceptar a transmissão de outra agenda logo depois de ter transmitido a sua, então será necessário que ela adote ambos os agendamentos, de maneira que ela desperte não somente nos instantes de sua agenda, mas também nos instantes da agenda do nó vizinho. Entretanto, é de se esperar que as estações adotem múltiplas agendas em casos isolados, haja vista que o ideal é seguir a programação da agenda de um único nó sincronizador (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002).

O pacote SYNC inclui o endereço e o *timestamp* do próximo período de inatividade (*SLEEP mode*) da estação transmissora, tendo um tamanho muito pequeno. Dado que o atraso de propagação é curto, as estações vizinhas consideram que o período de inatividade do transmissor se inicia aproximadamente após o momento em que o transmissor finaliza o envio do pacote SYNC. Sendo assim, as estações receptoras ajustam seus temporizadores imediatamente após a recepção do pacote SYNC, indo dormir no momento em que o temporizador disparar (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002).

Se caso uma das estações do *cluster* desejar enviar um ou mais pacotes de dados para outra estação de outro grupo, ela deve adquirir a agenda de ativação da estação vizinha também por meio de mensagens SYNC, e então executar o trabalho em dois ciclos de ativação diferentes. Após iniciarem a transmissão de dados, as estações não cumprem suas agendas de inatividade até terminarem a transmissão. Os nós são organizados em uma topologia plana (*peer-to-peer*), onde cada estação tem acesso a todos os demais nós vizinhos, e não há uma hierarquia ou níveis intermediários entre eles (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002). A Figura 5 exemplifica a comunicação entre uma estação receptora e três estações transmissoras, onde CS representa o período de detecção da portadora. O período ativo é dividido em vários *slots* de tempo para que as estações transmissoras possam realizar *Carrier Sense*. O transmissor 1 (*Sender 1*) envia apenas uma mensagem SYNC, enquanto que o transmissor 2 (*Sender 2*) envia apenas um pacote RTS e seus respectivos dados, caso receba o pacote CTS. O transmissor 3 (*Sender*

Figura 5 – Comunicação entre um receptor e diferentes transmissores do protocolo *Sensor-MAC*.



Fonte: Adaptado de YE; HEIDEMANN; ESTRIN (2002)

3) envia tanto o pacote SYNC quanto o pacote RTS. Cada estação envia periodicamente mensagens SYNC via *broadcast* para os seus vizinhos, mesmo que não existam nós seguidores. Deste modo, se caso surgirem novas estações, elas poderão participar do *cluster*.

É de se esperar que dispositivos baseados em protocolos que utilizam técnicas de contenção desperdicem uma quantidade significativa de energia no período de escuta ociosa enquanto recebem pacotes que não foram endereçados a eles. Isso ocorre especialmente nos casos em que a rede está sobrecarregada, tornando-a energeticamente menos eficiente que as redes baseadas em protocolos derivados da técnica TDMA. Todavia, o S-MAC tenta evitar a escuta excessiva induzindo as estações interferentes a entrarem em um modo de espera após detectarem um pacote RTS/CTS. Como os pacotes de dados geralmente são bem mais longos que os pacotes de controle, esta abordagem impede que os vizinhos mais próximos ouçam pacotes de dados excessivamente longos e seus respectivos pacotes ACK (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002).

Se uma estação detectar um pacote destinado a outra estação vizinha, ela deverá entrar em modo de espera e aguardar o tempo que for necessário até que tal transmissão termine. Este tempo de duração da transmissão encontra-se em um campo do cabeçalho do pacote, que por sua vez é armazenado em uma unidade de registros da estação denominada *Network Allocation Vector* (NAV), cujo valor é decrementado toda vez que um temporizador é disparado. Quando a estação possui dados a transmitir, primeiro ela verifica o NAV e só transmite o pacote se

o seu respectivo valor for zero. Caso contrário, ela entende que o canal está ocupado. A este procedimento dá-se o nome de Detecção Virtual da Portadora (do inglês, *Virtual Carrier Sense*). Dito isto, o canal só pode ser considerado livre se a detecção física e virtual da portadora indicarem o canal como livre (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002).

3.3 PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE COM ESCUTA ADAPTATIVA PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (SENSOR-MAC-AL)

Os períodos de dormência do S-MAC reduzem significativamente o consumo de energia das estações, coibindo-as de praticarem a escuta ociosa (*idle listening*). Todavia, existe um preço a ser pago ao economizar a energia dos dispositivos, que é o aumento da latência da rede, e que consequentemente pode ocasionar um atraso indesejado na entrega dos dados, especialmente para redes *multi-hop*. Para tentar atenuar esta desvantagem, foi desenvolvida uma nova versão do protocolo S-MAC denominada Sensor-MAC com Escuta Adaptativa (do inglês, *Sensor-MAC with Adaptive Listen* (S-MAC-AL)) (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2004). A técnica da escuta adaptativa consiste em despertar, por um curto espaço de tempo, a estação receptora do segundo salto de uma comunicação *multi-hop*. O despertar é realizado no instante final da transmissão dos dados no primeiro salto, e este instante é informado ao receptor do segundo salto por meio do campo de duração da transmissão dos dados que está presente nos pacotes de controle RTS/CTS enviados na transmissão do primeiro salto. De fato, para que a técnica tenha o efeito desejado, o nó receptor do segundo salto deve ser vizinho imediato do nó receptor do primeiro salto, sendo este último o transmissor do segundo salto. Esta é uma das premissas da comunicação *multi-hop*.

Depois de despertar, o receptor do segundo salto está apto a receber de imediato os dados, não sendo necessário reservar novamente o canal de comunicação com novos pacotes RTS/CTS, e nem esperar o próximo período de escuta ativa para receber a mensagem. Se o receptor não tiver dados a receber no período de escuta adaptativa, ele deverá entrar no estado de dormência até o próximo período de escuta ativa agendada. O tempo de escuta adaptativa não inclui o período de transmissão dos pacotes SYNC, assim como ocorre no período normal de escuta ativa. Os pacotes SYNC são enviados apenas nos períodos que já foram agendados para que seja possível garantir que todas as estações vizinhas possam recebê-los. Quando a transmissão do salto anterior é realizada de maneira adaptativa, é um forte indicativo de que o receptor do próximo salto ainda se mantém em período de dormência, sendo necessário

aguardar o próximo período de escuta ativa agendada (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2004).

Apesar de ambas as propostas impedirem a colisão de dados por meio dos pacotes RTS/CTS, esta metodologia pode ser inapropriada para sistemas de automação onde o *payload* da mensagem de dados é pequeno, o que pode gerar um período de contenção muito maior que o necessário para enviar os dados, e assim gerar um desperdício de energia indesejado.

3.4 PROTOCOLO MAC ENERGETICAMENTE EFICIENTE E LIVRE DE COLISÕES PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (DYTEE)

O Protocolo MAC Energeticamente Eficiente e Livre de Colisões (do inglês, *Dynamic Timed Energy Efficient MAC Protocol* (DyTEE)) busca aplicar as melhores características observadas em protocolos como o S-MAC e TDMA (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014), e evita as colisões de pacotes de dados através do agendamento dos *slots* por parte de um nó coordenador. O DyTEE é um protocolo *single channel* com sincronização global e de múltiplos saltos que emprega a abordagem de sensoramento da portadora como método de prevenção de colisões, além de garantir a comunicação entre os nós de um mesmo grupo denominado *cluster* virtual. Deve-se eleger, em cada *cluster*, uma estação responsável por coordenar e sincronizar a comunicação entre as demais estações do grupo.

Uma das propostas do DyTEE para a redução do consumo de energia dos dispositivos é diminuir o *overhead* comprimindo o cabeçalho dos pacotes de controle das negociações sem fio. Parâmetros de configuração devem ser utilizados para adequar o protocolo ao propósito da aplicação, sendo alguns destes específicos para toda a rede (Parâmetros de Rede (PR)), e outros são dinamicamente configuráveis para cada estação em tempo de programação (Parâmetros do Módulo (PM)). O DyTEE garante a entrega dos dados, mesmo que seja ao custo de um alto atraso, e o valor máximo deste atraso depende dos Parâmetros de Rede e da quantidade de dispositivos conectados. Para que o dispositivo considere que o pacote foi perdido, é necessário que seja encontrada uma falha na recepção durante a verificação de integridade dos dados ou que o tempo de espera pelo pacote ACK ultrapasse um certo limiar, denominado *timeout*. São os Parâmetros de Rede que determinam quais são as ações necessárias nestes dois casos, que podem ser a retransmissão do pacote com um limite configurável de tentativas, ou a geração de uma resposta de falha para as camadas superiores (GUIMARAES, 2014).

3.4.1 A formação do cluster

Para que seja possível conectar-se à um *cluster*, é necessário que os Parâmetros do Módulo estejam bem estabelecidos, sendo eles os canais de comunicação disponíveis, a função exercida pelo nó, e a identidade original do nó. O primeiro parâmetro indica quais são os canais de frequência nos quais a estação poderá procurar ou criar um *cluster*. O segundo parâmetro indica a finalidade do nó na rede, que de forma semelhante aos dispositivos das LR-WPANs que operam como FFDs ou RFD, este pode ser um coordenador ou um nó-folha (do inglês, *end-device*). Caso o dispositivo tenha sido programado com a finalidade de coordenação, ele deverá criar seu *cluster* em um dos canais disponíveis que possua a menor leitura de ocupação (ED ou CCA). Se existirem outros *clusters* operando no mesmo canal, o coordenador deverá encontrar um período livre que não entre em conflito com o ciclo de ativação dos demais *clusters* (GUIMARAES, 2014).

O terceiro parâmetro determina o ID da estação quando ela se registra em um *cluster*. É possível que existam outras estações com o mesmo ID em um mesmo canal, todavia é necessário que estas estejam suficientemente afastadas uma da outra, de maneira que a distância entre todas elas seja maior ou igual a duas vezes o raio de alcance de seus transceptores de rádio. Se isso não for possível, as estações deverão adquirir novos IDs após se registrarem. Os PMs também podem ser estabelecidos pela camada de aplicação, permitindo deste modo que as estações usufruam de qualquer canal disponível, de uma identidade aleatória, e de uma função completa (coordenador ou nó-folha). O endereço completo de uma estação no *cluster* é composto por quatro números hexadecimais (dois *bytes*), onde o primeiro *byte* representa o PAN ID do *cluster* do qual ela pertence, e o segundo representa o seu ID na rede, que por sua vez pode ser determinado pela aplicação. Inicialmente, quando o nó-folha ainda não participa de um grupo, o primeiro *byte* do endereço deve ser igual a zero, que é o ID padrão para quem ainda não participa de um *cluster*. A partir do momento que a estação registra-se no grupo, o primeiro *byte* torna-se igual ao PAN ID do *cluster*. Os endereços dos coordenadores possuem uma configuração peculiar. Antes do *cluster* ser formado, a estrutura do endereço do coordenador segue a mesma configuração dos nós-folha. Todavia, quando o grupo é criado, o primeiro *byte* correspondente ao PAN ID será igual ao ID do coordenador. E o segundo *byte* será igual a zero, que representa o ID padrão do coordenador a partir do momento que o grupo é criado (GUIMARAES, 2014).

Os nós que ainda não fazem parte de um *cluster* devem procurar por um *Beacon Signal*

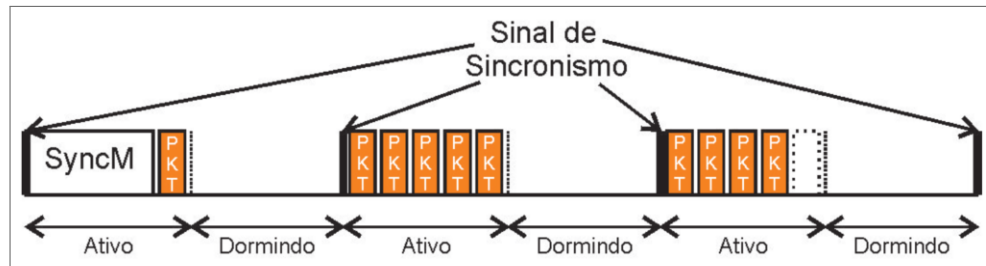
(BS) enviado pelo coordenador. Esta é a primeira fase do Momento de Sincronização (do inglês, *Synchronization Moment* (SyncM)), que será explicada com mais detalhes nas próximas subseções. Se não for possível encontrar um grupo, o primeiro nó desse ambiente que tenha a função de coordenador deverá criar seu próprio *cluster*, seguindo um processo semelhante ao encontrado no S-MAC. A coordenação de um *cluster* pode ser transferida para outra estação de acordo com o tempo de vida útil da bateria de cada nó. Quando o atual coordenador ultrapassa um determinado limiar de consumo de energia da bateria, este anuncia o fim do grupo. Deste modo, inicia-se uma nova competição entre as estações que também poderiam exercer a função de coordenador, e assim o consumo de energia da coordenação não ficaria sob responsabilidade de uma única estação (GUIMARAES, 2014).

3.4.2 Visão geral do funcionamento do DyTEE

A Figura 6 exemplifica a transição temporal simplificada do protocolo DyTEE, onde é possível observar os ciclos de ativação (*duty cycles*) e dormência do protocolo. Durante o momento de sincronização (SyncM), os *end-devices* solicitam ao coordenador a concessão de *slots* de dados (*PKTs*) nos ciclos de ativação para transmitirem suas mensagens aos seus respectivos destinatários. A reserva de cada *slot* de dados é exclusiva para um único par de estações comunicantes, de maneira que se possa garantir a transferência do *payload* no canal de frequência sem possíveis interferências/colisões, ainda que seja possível ocorrer uma falha ou ruído na comunicação. A programação e reserva de cada *PKT* são informados pelo coordenador às demais estações em uma mensagem *broadcast* no final do SyncM. Ou seja, o nó-folha só poderá transmitir seus dados se a sua requisição for aprovada pelo coordenador, e se o coordenador reservar para ele, na mensagem *broadcast*, pelo menos um *PKT*. A agenda *broadcast* contém não somente os pares que irão se comunicar em cada vaga *PKT* disponível, mas também a ordem de cada comunicação (GUIMARAES, 2014).

Observe que as vagas *PKT* estão separadas por espaços vazios de tempos suficientemente pequenos (t_{esp}) para evitar problemas com os desvios de relógio (do inglês, *clock drift*). Diferentemente do S-MAC, o DyTEE não permite que as suas estações se mantenham ativas além do período ativo pré-determinado pelo *duty cycle*, impedindo desta maneira que ocorram possíveis interferências entre outros *clusters* do canal. Caso ainda haja tempo suficiente para a transmissão de dados logo após o término do SyncM, os pares de nós poderão iniciar a comunicação de imediato respeitando o tempo máximo do ciclo ativo (GUIMARAES, 2014).

Figura 6 – Diagrama temporal do protocolo DyTEE.



Fonte: GUIMARAES (2014)

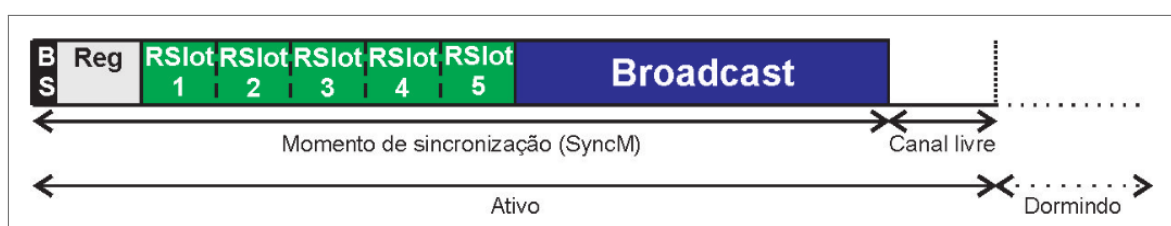
3.4.3 O momento de sincronização

O Momento de Sincronização (SyncM) é dividido em quatro seções, que são: *Beacon Signal* (BS), Período de Registro (REG), Período de Requisição de Vagas (do inglês, *Request Slot* (RSlot)), e Divulgação da Agenda (*Broadcast*). Em todo o SyncM, as estações devem seguir a topologia estrela. A Figura 7 apresenta o diagrama temporal do SyncM.

3.4.3.1 Beacon signal (BS)

O *Beacon Signal* (BS), enviado pelo coordenador, tem a função de atualizar os relógios dos nós-folha do grupo, de modo que as demais ações do *cluster* sejam realizadas com base no momento imediatamente posterior à recepção do BS por parte de cada estação, até que o ciclo reinicie com o envio de um novo BS. Além disso, o BS informa o número de estações conectadas no grupo, o PAN ID, e os *bytes* de mensagens provenientes da aplicação. As novas estações que desejarem se registrar poderão descobrir se o número atual de estações participantes do *cluster* já atingiu o valor máximo, tendo em vista que um dos Parâmetros de Rede indica tal informação. Ademais, o número de estações conectadas também informa o momento de cada evento dentro do SyncM. De acordo com a Figura 6, podem existir ciclos de trabalho que se iniciam com o SyncM ou que possuem apenas *slots* de dados (*PKTs*). O Campo de Controle do Pacote (do inglês, *Frame Control Field* (FCF)) presente no cabeçalho do BS informa se o

Figura 7 – Diagrama temporal do Momento de Sincronização (SyncM).



Fonte: GUIMARAES (2014)

período ativo terá ou não o Momento de Sincronização, sendo tal informação definida no final de cada *broadcast*.

3.4.3.2 Período de registro (REG)

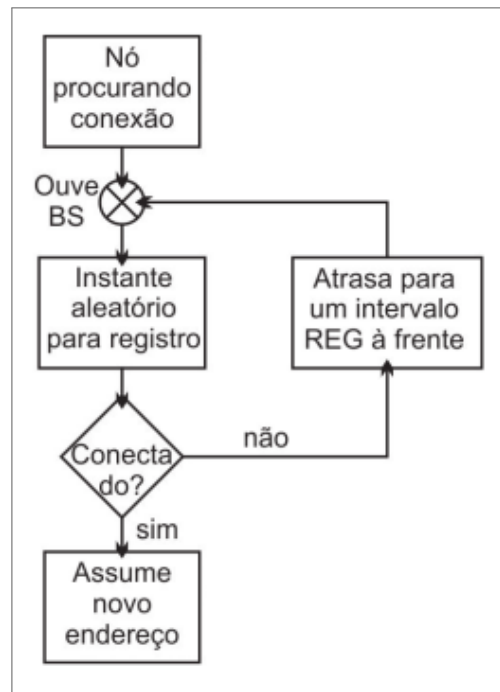
Os nós-folha que detectarem o BS poderão solicitar ao coordenador a adesão ao *cluster*, mesmo que estes já estejam registrados em outro grupo. Neste momento, inicia-se a segunda fase denominada Período de Registro (REG), onde há o risco de colisões de pacotes de controle, já que nela as estações utilizam mecanismos de contenção semelhantes aos do CSMA/CA com vagas (do inglês, *slotted CSMA*). É importante destacar que esta é a única fase onde podem ocorrer colisões, pois nas demais fases o coordenador delimita os momentos em que cada estação pode se comunicar. E as possíveis colisões da fase REG não afetam as estações que já tinham ingressado no grupo anteriormente.

Inicialmente, o nó-folha envia um pacote de solicitação de registro (do inglês, *Request To Register* (RTR)) para o líder do *cluster*, que por sua vez envia a sua confirmação de registro (do inglês, *Register Acknowledgment* (RACK)) se a transmissão do RTR for bem sucedida. O coordenador analisa a possibilidade de admissão da nova estação e insere a resposta no *broadcast* do mesmo SyncM. Se o coordenador aprovar a entrada, ele deverá informar o novo ID do nó-folha recém-chegado. Existem casos onde o nó líder precisa reprovar a entrada, seja porque o grupo está cheio, por falha na recepção, ou por outros motivos internos. Em caso de colisão ou não confirmação do registro por parte do coordenador do grupo, a estação poderá realizar uma nova tentativa de associação durante uma vaga aleatória no período REG de um SyncM posterior qualquer, não necessariamente no próximo período ativo. A Figura 8 apresenta um fluxograma do processo de registro.

3.4.3.3 Período de requisição de vagas (RSlot)

Na terceira fase (RSlot), cada nó informará ao coordenador para quais destinos seus pacotes de dados serão enviados. As solicitações são feitas em intervalos de tempo pré-definidos denominados RSlots, que são reservados para os nós registrados do grupo, uma vaga para cada estação. Os *slots* são organizados sequencialmente, na mesma ordem correspondente aos IDs de cada estação, e possuem duração suficiente para que a estação possa enviar seu ID, os IDs dos seus respectivos destinatários, e uma margem de tempo de espaçamento (t_{esp}) necessário

Figura 8 – Fluxograma do Período de Registro (REG) do SyncM.



Fonte: GUIMARAES (2014)

para evitar problemas com desvios do relógio. Mesmo que a estação não possua dados em seu *buffer*, ela deverá informar ao coordenador em seu RSlot se ainda deseja permanecer na rede, pois existe a possibilidade do nó desconectar-se da rede sem que haja um aviso prévio. Se caso a estação informar que não irá mais permanecer no grupo, seja porque o nível de energia da sua bateria está baixo ou porque tão somente não deseja mais participar do *cluster*, o coordenador deverá removê-la e liberar a vaga para novas estações que desejarem participar do grupo no período REG.

3.4.3.4 Divulgação da agenda (*broadcast*)

Na quarta e última fase, o coordenador enviará o *broadcast* com o resultado das operações ocorridas nas fases anteriores, informando quais foram as estações que se desassociaram e quais se registraram no grupo, além de informar o agendamento dos pares comunicantes e de seus respectivos *slots* de dados (*PKT*), que serão respeitados durante os próximos períodos ativos até chegar ao final do agendamento, onde o ciclo se repete. Para garantir uma justa distribuição na ordem dos pares comunicantes e de seus respectivos *slots* de dados, o coordenador organiza o sequenciamento dos pares de forma aleatória.

3.4.4 Transmissão de dados

Após a divulgação da agenda via *broadcast*, todos os membros do grupo saberão não somente o número total de estações registradas no *cluster*, mas também quais serão os pares de nós comunicantes para cada vaga de dados (*PKT*). Além disso, é possível determinar se haverá tempo suficiente para se iniciar a transmissão dos dados imediatamente após o fim do SyncM, visto que graças aos Parâmetros de Rede os participantes do grupo conseguem identificar o tempo máximo permitido para realizar um ciclo de trabalho (*duty cycle*). No final do período ativo, para que seja possível reduzir o consumo de energia, todas as estações deverão entrar em estado de dormência (*SLEEP Mode*) e esperar pelo próximo período de ativação, para que assim continuem com a programação de transmissão enviada anteriormente via *broadcast* pelo coordenador. Esta sequência de eventos deve se repetir até que todo o planejamento de transmissão dos dados determinado pelo pacote *broadcast* seja finalizado, e dessarte possa se iniciar um novo SyncM no próximo período ativo.

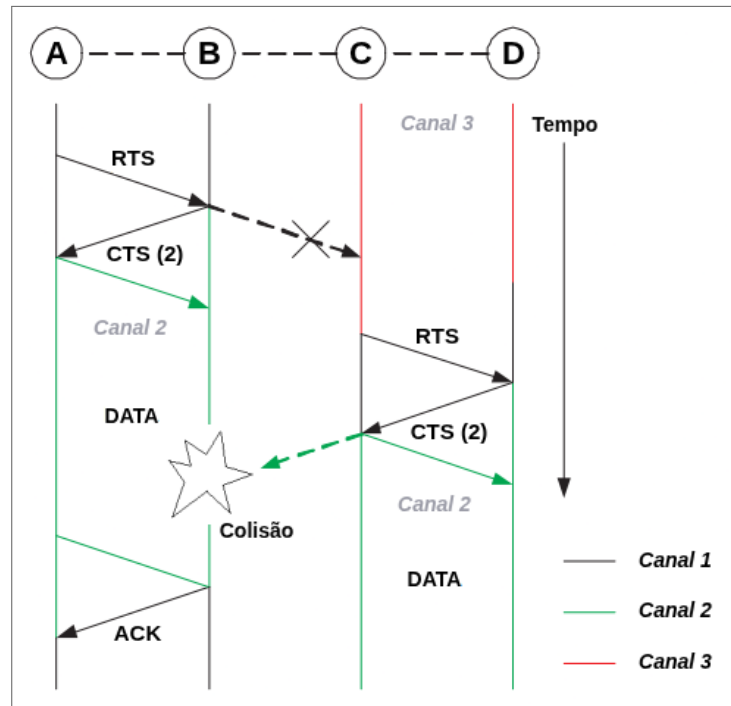
Para evitar possíveis interferências de outras estações que não participam do grupo, o cabeçalho dos pacotes de dados deve incluir, além do endereço do nó receptor, um Número de Sequência de Dados (do inglês, *Data Sequence Number* (DSN)), para que assim possa garantir que somente o receptor do grupo irá decodificar a mensagem. Logo após a transmissão dos dados, o receptor deverá enviar uma resposta de confirmação (ACK).

3.5 PROTOCOLO MAC MULTICANAL PARA REDES AD HOC (MMAC)

O Protocolo MAC Multicanal para Redes *Ad Hoc* (do inglês, *Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks* (MMAC)) foi um dos primeiros protocolos multicanais para redes *ad hoc* a propor uma solução para o problema do terminal escondido multicanal (SO; VAIDYA, 2004), que decorre da falta de capacidade das estações monitorarem mais de um canal simultaneamente, haja vista que as estações legadas, em sua maioria, possuem somente um transceptor de rádio *half-duplex* e não conseguem evitar a ocorrência de colisões pelo método tradicional do CSMA/CA.

A Figura 9 exemplifica o problema do terminal escondido multicanal. De acordo com o cenário apresentado na imagem, a estação *A* deseja transmitir dados para a estação *B*, que para tentar garantir uma transmissão livre de colisões de dados, aplica os mecanismos de detecção virtual da portadora e envia um pacote RTS para a estação *B* no canal de controle (canal 1).

Figura 9 – Problema do terminal escondido em um ambiente multicanal.



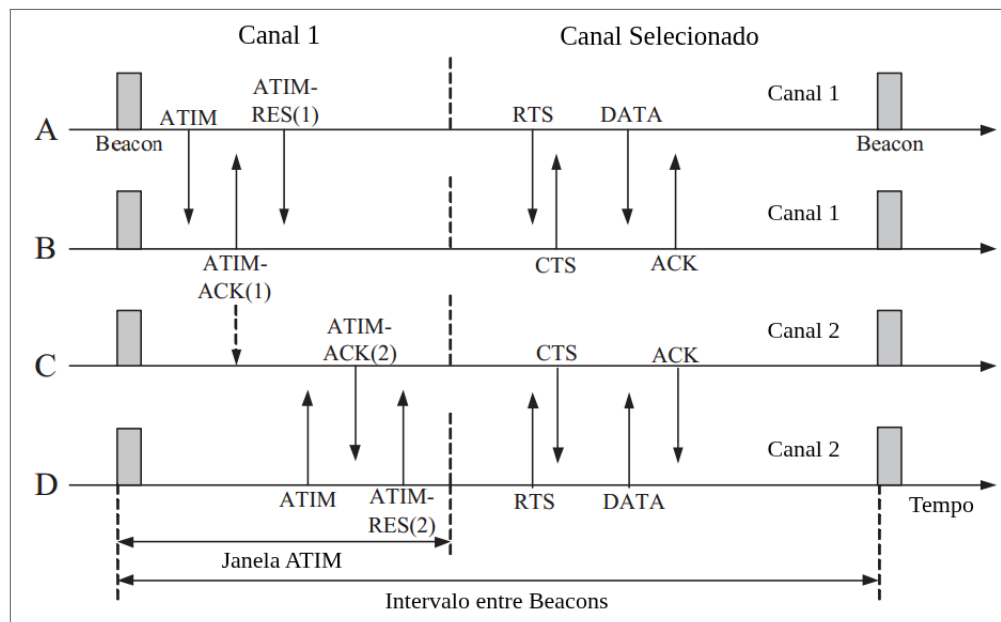
Fonte: Adaptado de SO; VAIDYA (2004)

O nó *B* envia um pacote CTS para *A* garantindo a reserva do canal 2 para a transmissão dos dados. Enquanto ocorrem a troca de pacotes RTS/CTS no canal 1, e se inicia a transmissão dos dados entre as estações *A* e *B*, a estação *C* se mantém ocupada no canal 3 sem saber que o canal 2 também está ocupado. Quando a estação *C* termina a sua transmissão, ela negocia com a estação *D* uma nova transmissão de dados no canal 1, e esta última, coincidentemente, também escolhe o canal 2 para efetuar a troca de dados. Desta maneira, ocorre uma colisão e o desempenho da rede é comprometido.

O protocolo MMAC se destacou em relação aos demais protocolos multicanais por dividir a comunicação em intervalos entre *beacons* (BIs) com duas etapas. A primeira fase é denominada Janela ATIM (do inglês, *ATIM Window*), e a segunda é chamada de Janela de Comunicação (do inglês, *Communication-Window*). Mecanismos de Detecção Virtual da Portadora são utilizados durante as duas etapas de comunicação.

Na primeira fase, os nós que desejam se comunicar iniciam uma negociação de três vias (do inglês, *Three-Way Handshake*). O nó transmissor envia ao nó receptor um pacote ATIM e aguarda pelo recebimento de um pacote ATIM-ACK no canal de controle (canal 1). Cada nó mantém uma lista de canais não sobrepostos preferenciais. Esses canais são escolhidos por serem os menos saturados da rede e os menos utilizados por outros nós da circum-adjacência. Se nenhum dos nós ainda não tiver escolhido um canal devido a uma outra negociação realizada

Figura 10 – Diagrama temporal do protocolo MMAC.



Fonte: Adaptado de SO; VAIDYA (2004)

anteriormente, um dos canais preferenciais é escolhido para a comunicação. Escolher um dos canais preferenciais fará com que aumente a probabilidade de transmissão de dados bem sucedida, além de maximizar a utilização dos recursos disponíveis e minimizar a contenção. Se caso um, e somente um dos nós tiver escolhido um canal, o outro nó será alocado para este canal. Por fim, se as duas estações já tiverem definido um canal, e estes canais são diferentes, uma nova transmissão dos pacotes de controle deverá ser realizada na próxima Janela ATIM, onde haverá novas negociações. Dependendo da escolha do canal de dados feita pelas duas estações, um terceiro pacote de controle chamado ATIM-RES (do inglês, *ATIM-Reservation*) é enviado. Além de definir qual será o canal de dados, o ATIM-RES informará às demais estações próximas ao transmissor que este canal foi reservado.

Na fase de comunicação ainda são trocados pacotes RTS e CTS, pois os canais não são exclusivos a um par de estações. A troca de pacotes RTS/CTS possibilitará um maior nível de compatibilidade com os equipamentos legados que não participam do mesmo protocolo, mas que utilizam os mesmos canais. A Figura 10 apresenta o processo de negociação de canais e troca de dados do protocolo. Na imagem, é possível perceber a troca de pacotes de controle entre os nós A e B no Canal Padrão da Janela ATIM. A negociação define que o canal 1 será o canal escolhido para a troca de pacotes de dados. Os nós C e D, por sua vez, decidem escolher o canal 2 já tendo o conhecimento de que o canal 1 está ocupado. Sendo assim, o problema do terminal escondido multicanal é solucionado.

Os nós que não tiverem pacotes a transmitir ou receber entrarão em *DOZE mode* durante a Janela de Comunicação. A partir do início do próximo intervalo entre *beacons*, estes nós deverão retornar ao estado *AWAKEN* para participarem da Janela ATIM seguinte.

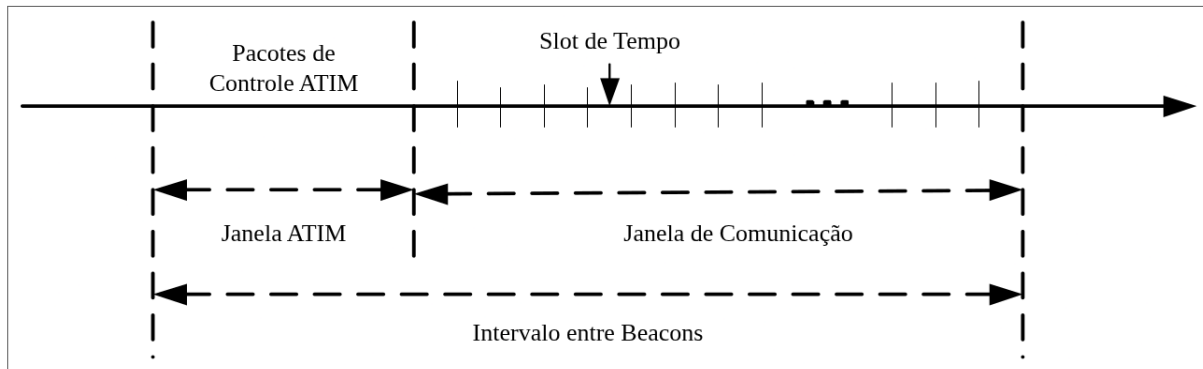
3.6 PROTOCOLO MAC MULTICANAL BASEADO EM TDMA PARA REDES AD HOC (TMMAC)

O Protocolo MAC Multicanal baseado em TDMA para Redes *Ad Hoc* (do inglês, *TDMA based Multi-Channel MAC Protocol* (TMMAC)) reúne os benefícios viabilizados pelo protocolo MMAC combinados à abordagem de multiplexação por divisão de tempo (TDMA) (ZHANG et al., 2007). A Janela de Comunicação é dividida em *slots* de tempo fixos e exclusivos a um único par de estações comunicantes, proporcionando às demais estações a possibilidade de entrarem em *DOZE mode*. A duração de cada *slot* equivale ao tempo mínimo necessário para a transmissão ou recepção de um único pacote de dados, incluindo o tempo para mudar de canal e o tempo para o envio do pacote de reconhecimento (ACK). Desta maneira, é factível alcançar uma maior eficiência energética, sendo o TMMAC um algoritmo de agendamento TDMA adaptativo e eficiente em termos de energia. Além disso, os autores propõem que as estações sejam baseadas em transceptores únicos *half-duplex*.

O número de negociações na Janela ATIM pode ser ainda maior, dado que os recursos negociados nesta fase são a combinação de canal e *slot* de tempo. Sendo assim, os autores ainda propõem um mecanismo de ajuste dinâmico da duração da Janela ATIM com base em padrões de tráfego diferentes da rede. O ajuste dinâmico permite maximizar a vazão do protocolo mediante a quantidade de estações que estão disputando o canal de controle. A Figura 11 apresenta a arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC.

Na fase de comunicação, são trocados os pacotes de dados sem a necessidade da utilização de mecanismos de detecção virtual da portadora como pacotes RTS e CTS. Isto se torna possível pois cada *slot* de tempo é exclusivo para a troca de dados entre um par de nós. Todavia, os autores afirmam que o TMMAC não é um protocolo livre de colisões, pois não se pode garantir que todas as negociações foram realizadas com sucesso durante a fase de negociação. Os resultados mostram que o protocolo atinge uma vazão de saturação 113% superior, e um decréscimo de 74% de energia por pacote quando comparado com o protocolo MMAC.

Figura 11 – Arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC.



Fonte: Adaptado de ZHANG et al. (2007)

3.7 PROTOCOLO MAC MULTICANAL PARA COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS (M2MMAC)

O Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos (do inglês *Many-to-Many Communication Multichannel MAC Protocol* (M2MMAC)) garante um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis em uma rede multicanal, propiciando a transmissão e recepção simultâneas de dados concretizadas por uma comunicação muitos-para-muitos (GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017). Tal como o MMAC, o M2MMAC é um protocolo baseado no Padrão IEEE 802.11 PSM que utiliza duas fases durante o intervalo entre *beacons*. Os pares de estações que realizam uma negociação bem sucedida no canal de controle durante a janela ATIM devem escolher canais de frequência diferentes para a recepção dos dados, de modo que cada transmissor e receptor terá um canal de recepção exclusivo durante a janela de comunicação. A rede deve dispor de M canais de frequência não sobrepostos ortogonais.

3.7.1 Requisitos da camada física

Todas as estações da rede devem possuir um transmissor e um receptor, ambos *simplex*, compondo um transceptor integrado com cadeias paralelas de processamento de sinais que transmite tautocronamente em frequências diferentes, enquanto recebe dados em um único canal de frequência distinto. As estações são equipadas com um conjunto de M_r antenas de recepção e uma única antena para transmissão (GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017).

Para ocorrer a sincronização entre as estações participantes da rede, proporcionando o início do intervalo entre *beacons* no mesmo instante, as estações precisam estar equipadas com uma solução de sincronismo *out-of-band* como o GPS (GHOBAD, 2017; GETTING, 1993).

Ademais, o M2MMAC procura aplicar a técnica MU-MIMO de forma bem sucedida, sendo necessário que as estações estejam suficientemente distantes para evitar a correlação espacial entre os diferentes sinais transmitidos (MORAES, 2005; GHOBAD, 2017; UMAMAHESHWAR; KUMAR; RAO, 2015). Complementarmente, cada estação deve alcançar e ser alcançada por todas as outras estações da rede, exercendo a comunicação em um único salto (do inglês, *single-hop*).

3.7.2 Atualizações na estrutura NAV

Cada estação deve ter um conhecimento preliminar das informações do estado de cada canal, que podem ser armazenadas na estrutura NAV, a mesma estrutura citada na Seção 3.2. Isto posto, se a estação identificar durante a detecção virtual da portadora que o canal está sendo utilizado por outra comunicação em andamento, ela não realiza a transmissão para evitar a ocorrência de uma nova colisão de pacotes. Para validar a proposta do M2MMAC foi necessário atualizar a estrutura NAV, haja vista que cada canal de comunicação só pode ser utilizado por uma única estação para a recepção de dados na janela de comunicação. Sendo assim, a estrutura NAV deverá apenas classificar os canais como utilizados ou não utilizados (GHOBAD, 2017).

Sempre que uma estação detectar um pacote de controle durante o período de negociação, ela deverá atualizar em sua estrutura NAV quais serão os canais que ficarão ocupados. No momento em que a estação recebe o seu primeiro pacote ATIM, ela verifica se existe algum canal disponível para recepção de dados. Havendo mais de um canal disponível, é selecionado um deles aleatoriamente. A partir deste momento, a estação utilizará o canal escolhido durante a janela de comunicação atual, tanto para esta quanto para as próximas negociações estabelecidas com outras estações. Para cada negociação bem sucedida será estabelecido um novo fluxo de transmissão de dados entre os pares comunicantes na janela de comunicação.

Posto isto, a estrutura NAV também deve indicar a quantidade de fluxos de transmissão que uma estação irá participar. De acordo com (KIM; LEE, 2015), se uma estação possui M_r antenas disponíveis, ela poderá decodificar até $(M_r - 1)$ sinais distintos ao mesmo tempo. Essa restrição do número máximo de fluxos de comunicação é imposta pela técnica MU-MIMO. Além disso, a estrutura NAV deve armazenar a quantidade de pacotes de dados que serão transmitidos em cada um dos fluxos de transmissão. É importante ressaltar que a estrutura NAV deve ser reinicializada para seu estado inicial ao final de todos os intervalos entre

beacons.

3.7.3 A janela ATIM

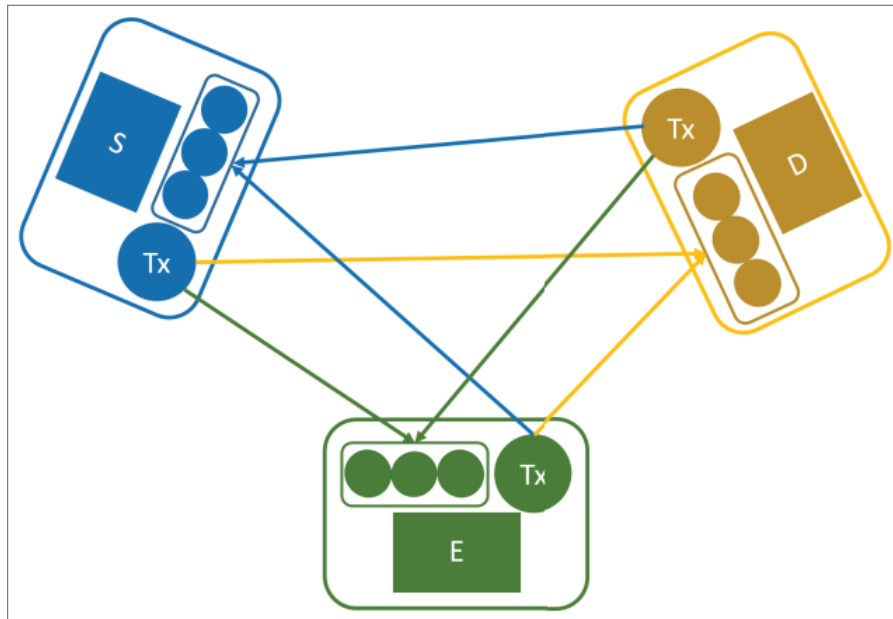
Os fluxos de transmissão são negociados aos pares na janela ATIM, e garantem uma comunicação bidirecional entre um par específico de estações na janela de comunicação. Assim como ocorre nos protocolos MMAC e TMMAC, as negociações se iniciam com a transmissão de um pacote ATIM por parte de um nó fonte para um nó destino, sendo estas negociações necessárias para a reserva dos fluxos de comunicação. O pacote ATIM informa a quantidade de pacotes de dados que serão enviados e a frequência de recepção do transmissor na janela de comunicação.

Embora as informações essenciais estejam sob a responsabilidade do transmissor, é necessário que o receptor também envie pacotes de confirmação ao canal de recepção do transmissor para informar que os dados foram recebidos com sucesso, mesmo que a estação destinatária não tenha dados a enviar à estação fonte durante o mesmo intervalo entre *beacons*. Em seguida, o destinatário deverá consultar sua estrutura NAV para verificar se ainda há a possibilidade de estabelecer um novo fluxo de transmissão na próxima fase. Caso seja viável, o destinatário enviará um pacote ATIM-ACK, informando sua frequência de recepção e o número de pacotes de dados que eventualmente precisará transmitir à estação fonte. Se não for possível, o destinatário deverá responder com um ATIM-NACK (do inglês, *ATIM-Negative Acknowledgment*). Alternativamente, a estação fonte pode iniciar a contagem de um temporizador aguardando um ATIM-ACK até que um tempo limite seja atingido ($ACK_{timeout}$) (GHOBAD, 2017).

3.7.4 A janela de comunicação

Após a negociação ser concluída com sucesso, os pacotes de dados, juntamente com os pacotes de confirmação, poderão ser transmitidos simultaneamente e de forma bidirecional entre as estações enquanto houver espaço disponível na janela de comunicação. Caso alguma estação não tenha dados a serem enviados ou recebidos na próxima fase de comunicação, ela deverá entrar em *DOZE mode* até o início do próximo intervalo entre *beacons*, a fim de economizar energia. A Figura 12 ilustra uma rede de comunicação muitos-para-muitos com três estações (*S*, *D* e *E*) durante a janela de comunicação, onde cada estação conta com um conjunto de três antenas de recepção realizando o MU-MIMO para possibilitar a decodificação

Figura 12 – Nós S, D e E realizam transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes durante a Janela de Comunicação.



Fonte: GHOBAD (2017)

simultânea dos pacotes.

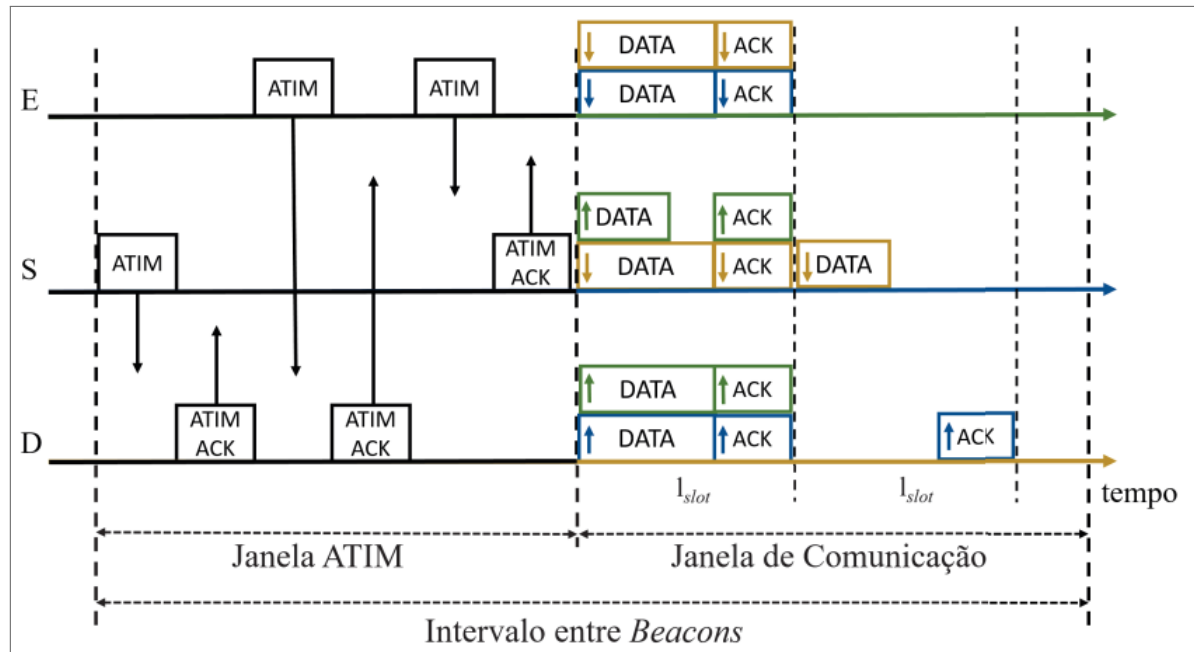
3.7.5 Visão geral do protocolo

A Figura 13 apresenta um diagrama temporal ilustrando o funcionamento do protocolo durante um intervalo entre *beacons*. No período da janela ATIM, são realizadas três negociações bem-sucedidas, que são representadas por pacotes na cor preta. Assim que a janela de comunicação se inicia, ocorre a troca dos pacotes de dados e de seus respectivos pacotes de confirmação ACK. Após o recebimento das confirmações, uma nova rodada de transmissões é realizada. Para garantir o sincronismo na rede, cada rodada de transmissões deve começar somente após transcorridos l_{slot} segundos, sendo l_{slot} o tempo necessário para a transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede, juntamente com sua confirmação de recebimento (GHOBAD, 2017).

3.8 QUADRO COMPARATIVO

O Quadro 1 apresenta o comparativo das principais características dos protocolos correlatos e da proposta apresentada neste trabalho. A coluna referente à colisão de pacotes envolve não somente os pacotes de dados, mas também os pacotes de controle, com exceção dos pacotes

Figura 13 – Negociações de fluxos de comunicação e transmissão de dados do protocolo M2MMAC.



Fonte: GHOBAD (2017)

de solicitação de registro (RTR) do Período REG dos protocolos M2M-TEE e DyTEE, cujas células estão marcadas com um asterisco.

Quadro 1 – Quadro comparativo com as principais características do M2M-TEE e dos protocolos correlatos.

PROTOCOLO	CARACTERÍSTICA								
	Implementação	Sincronização	Requisitos para transmissão dos dados	Duty Cycle	Complexidade	Utiliza cross-layer?	Colisão de pacotes?	Multi-Channel?	Utiliza MIMO?
M2M-TEE	Simulado	Centralizada	Canais e Slots definidos	Fixo	Alta	Não	Não*	Sim	Sim
DyTEE	Módulo Real	Centralizada	Slots definidos	Fixo	Média	Não	Não*	Não	Não
M2MMAC	Simulado	Distribuída	Canais definidos	Fixo	Alta	Não	Sim	Sim	Sim
S-MAC	Módulo Real	Distribuída	Slots definidos	Fixo	Baixa	Não	Sim	Não	Não
S-MAC-AL	Módulo Real	Distribuída	Slots definidos	Variável	Baixa	Não	Sim	Não	Não
MMAC	Simulado	Distribuída	RTS/CTS	Fixo	Média	Não	Sim	Sim	Não
TMMAC	Simulado	Distribuída	Slots definidos	Fixo	Média	Não	Sim	Sim	Não
TDMA	Módulo Real	Centralizada	Slots definidos	Fixo	Baixa	Não	Não	Não	Não
CSMA/CA	Módulo Real	Não tem	Aloha	Não tem	Média	Não	Sim	Não	Não
IEEE 802.15.4	Módulo Real	Centralizada	Slots definidos	Fixo	Média	Não	Sim	Não	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O presente capítulo descreveu os protocolos da subcamada MAC que foram tomados como inspiração para o desenvolvimento deste trabalho. Os protocolos correlatos à proposta desta dissertação podem ser divididos em dois grupos principais. O primeiro grupo trabalha em redes *single channel* com infraestrutura (BSS) cujos dispositivos se comunicam em distâncias curtas e baixas taxas de transmissão, sendo compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4. O segundo grupo trabalha em redes *multi-channel* descentralizadas (IBSS), e seus dispositivos possuem maior compatibilidade com o Padrão IEEE 802.11.

A Seção 3.2 apresentou o protocolo S-MAC, que propõe diminuir o desperdício de energia proveniente da escuta excessiva de seus dispositivos por meio de ciclos de ativação e de dormência. Todavia, a conservação de energia é alcançada ao custo de uma maior latência. Uma versão aprimorada do S-MAC denominada S-MAC-AL, e que foi apresentada na Seção 3.3, propõe acordar a estação receptora do segundo salto de uma comunicação *multi-hop* para que ela possa receber os dados imediatamente após a transmissão do primeiro salto, atenuando desta maneira a latência da versão original do S-MAC. O último protocolo do primeiro grupo, denominado DyTEE, foi apresentado na Seção 3.4, e tem como característica principal garantir uma comunicação de dados livre de colisões com a aplicação de atributos observados no protocolo S-MAC e na técnica TDMA.

Logo após, foram apresentados três protocolos multicanais partícipes do segundo grupo. O primeiro denomina-se MMAC, e foi apresentado na Seção 3.5. Ele propõe a solução do problema do terminal escondido multicanal, dividindo a comunicação em duas fases, sendo a primeira a Janela ATIM, onde as estações realizam negociações no canal de controle, e a segunda a Janela de Comunicação, onde as estações trocam dados no canal que foi escolhido na Janela ATIM. A Seção 3.6 apresentou a versão do MMAC combinada à técnica TDMA, que foi denominada de TMMAC. Neste protocolo, a Janela de Comunicação é dividida em *slots* de tempo que são exclusivos para um par de estações comunicantes. Por fim, na Seção 3.7, foi apresentado o protocolo M2MMAC que proporciona a transmissão e recepção simultâneas de dados por meio da comunicação muitos-para-muitos. Durante a Janela de Comunicação, cada canal deve ser reservado para uma única estação, que por sua vez o utilizará para recepção dos seus dados por meio de um ou mais fluxos de comunicação. O M2MMAC e o DyTEE foram fundamentais para o desenvolvimento da proposta que será apresentada no próximo capítulo.

4 M2M-TEE: PROTOCOLO MAC MULTICANAL ENERGETICAMENTE EFICIENTE DE COMUNICAÇÃO MUITOS-PARA-MUITOS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta o Protocolo MAC Multicanal Energeticamente Eficiente para Comunicação Muitos-para-Muitos (do inglês, *Many-to-Many Communication Multi-Channel and Timed Energy Efficient MAC Protocol* (M2M-TEE)), uma proposta que combina as vantagens do DyTEE (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014) e do M2MMAC (GHOBAD; MORAES, 2017; GHOBAD, 2017) em um único protocolo MAC para Redes de Sensores Sem Fio baseadas no Padrão IEEE 802.15.4. Suas principais características são a redução do consumo de energia por meio da supressão da escuta ociosa, a abolição das colisões de pacotes com a reserva de *slots* de tempo predefinidos para a troca de pacotes de dados, e a comunicação muitos-para-muitos em múltiplos canais de frequência não sobrepostos. Esta abordagem funciona em ciclos de trabalho com períodos de ativação e dormência das estações, assim como ocorre no protocolo DyTEE, e foi modelada para prover a Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes (MORAES; SADJADPOUR et al., 2009; MORAES et al., 2013) de forma semelhante ao protocolo M2MMAC, mitigando a latência em detrimento de um leve aumento no *overhead*.

O restante deste capítulo apresentará os parâmetros customizados do novo protocolo proposto para possibilitar a comunicação muitos-para-muitos, além de trazer uma visão geral do M2M-TEE, desde a concepção do *cluster* virtual até o funcionamento do SyncM seguido da transmissão e recepção de múltiplos pacotes de dados. Não obstante, faz-se necessário informar algumas premissas necessárias para o entendimento da proposta, que serão apresentadas a seguir.

4.1.1 Premissas

Dado que o M2M-TEE trabalha com múltiplos canais de frequência, *slots* de tempo e fluxos de comunicação, as combinações entre estes recursos podem aumentar consideravelmente a sobrecarga da rede, sendo necessário que as estações consumam uma maior quantidade de energia para transmitir informações que não fazem parte da carga útil da mensagem. De

acordo com a norma IEEE 802.15.4 (LAN/MAN Standards Committee, 2020), existem 16 canais ortogonais não sobrepostos para a banda de $2,4\text{GHz}$. Similarmente ao M2MMAC (GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017), cada combinação de canal e *slot* de dados deve ser reservada para uma única estação, o que limita o protocolo a ter no máximo 16 estações por *slot* devido ao número de canais disponíveis na norma IEEE 802.15.4. Não obstante, um *cluster* pode agrupar uma quantidade maior de estações, haja vista que a função do coordenador é distribuir os *slots* entre as estações no decorrer de todo o período de troca de dados. Entretanto, para reduzir as informações excessivas do cabeçalho (*overhead*) provenientes do protocolo DyTEE, considera-se que o ID de cada estação será representado por um único número hexadecimal (4 *bits*), sendo possível identificar até duas estações em um único *byte* dos pacotes de controle. O número $0x0$ deve ser reservado ao coordenador, e o número $0xf$ deve ser desconsiderado, predispondo-se por conseguinte um máximo de 15 estações por *cluster*, podendo cada uma delas ocupar tautocronamente um dos 16 canais disponíveis durante a fase de dados.

De acordo com (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014), são necessários dois *bytes* para a construção da identidade completa da estação no *cluster*, sendo o primeiro *byte* equivalente ao PAN ID do grupo, e o segundo *byte* equivalente ao ID único da estação. No geral, o PAN ID é igual ao ID original do coordenador antes de iniciar o *cluster*. Por exemplo, se um nó coordenador ainda não formou o seu grupo, sua identidade completa é igual a $0x00yy$, onde $0xyy$ representa o seu ID original. O primeiro *byte* igual a $0x00$ indica que a estação ainda não faz parte de um *cluster*. Logo após a formação do grupo, sua identidade completa torna-se igual a $0xyy00$, sendo $0x00$ o novo ID do coordenador. As próximas estações que se registrarem no *cluster* terão sua identidade completa igual a $0xyyww$, onde $0xww$ representa o ID único do nó-folha no grupo. Como as estações do M2M-TEE podem ser identificadas por um único número hexadecimal, é possível formar a identidade completa de uma estação M2M-TEE com apenas um *byte*, já que o PAN ID é equivalente ao ID original do coordenador antes de criar o grupo. Sendo assim, os primeiros 4 *bits* serão equivalentes ao PAN ID, e os últimos 4 *bits* serão iguais ao ID único da estação.

Algumas das premissas dos protocolos DyTEE e M2MMAC permanecem válidas e devem ser consideradas para a proposta deste trabalho, sendo resumidas nos seguintes itens:

1. A rede possui M canais ortogonais não sobrepostos (pelo menos 3 canais), e suas estações devem ser governadas por um nó líder que executa a fase de controle (SyncM) no canal padrão. O nó líder deve enviar sinais de sincronização (BS) para todos os canais

para coordenar a rede;

2. As estações devem utilizar o GPS como uma solução de sincronismo *out-of-band* para que todas iniciem o intervalo entre *beacons* no mesmo instante;
3. Todas as estações devem ter um transceptor integrado com cadeias paralelas de processamento de sinais que transmite pacotes de dados simultaneamente em diferentes frequências enquanto recebe dados em um único canal (MORAES et al., 2013; GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017). As estações devem estar equipadas com uma única antena de transmissão e um conjunto de M_r antenas de recepção MIMO;
4. Todos os nós podem suportar até $M_r - 1$ fluxos bidirecionais que podem ser usados para trocar pacotes com seus vizinhos. Essa limitação provém da técnica de detecção múltiplos usuários (MU-MIMO) (MORAES et al., 2013; GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017). As estações devem estar equipadas com pelo menos três antenas de recepção ($M_r \geq 3$) para possibilitar a comunicação muitos-para-muitos;
5. A comunicação sempre deve ser feita em *single-hop*, de maneira que todas as estações estejam ao alcance umas das outras para evitar o terminal escondido;
6. Os nós devem estar distribuídos uniformemente no espaço para manter uma distância média entre eles, e ao mesmo tempo distantes o suficiente para evitar correlação espacial entre os diferentes sinais transmitidos.

4.2 PARÂMETROS DO PROTOCOLO

Semelhantemente ao protocolo DyTEE, os parâmetros do M2M-TEE podem ser divididos em dois grupos, que são: Os Parâmetros de Rede (PR) e os Parâmetros do Módulo (PM). O primeiro grupo define os limitantes gerais de toda a rede para que esta possa se adequar à aplicação e às restrições comuns dos dispositivos legados da norma IEEE 802.15.4. Dentre os Parâmetros de Rede, consideram-se os seguintes:

- **Número máximo de estações em um *cluster*:** Permite restringir o número de estações em cada grupo para se alcançar a máxima economia de energia para cada estação com uma latência aceitável e uma boa taxa de transferência. Conforme detalhado na Subseção 4.1.1, este parâmetro deve ser menor ou igual a 15;

- **Número mínimo de antenas de recepção para cada estação do *cluster*:** Conforme descrito na Seção 4.1, cada estação deve possuir no mínimo 3 antenas de recepção em seu transceptor integrado para possibilitar a comunicação MIMO. Todavia, para participar do grupo, a estação deve ter um número mínimo de antenas de recepção que pode ser maior ou igual a 3;
- **Tempo máximo do ciclo de trabalho (*Duty Cycle*):** Refere-se ao tempo máximo que as estações poderão operar em um intervalo entre *beacons*, e que ao mesmo tempo define o tempo mínimo de inatividade do *cluster*;
- **Número de vagas para registro de novas estações:** Indica o número de *slots* de tempo disponíveis na fase de registro (REG) do momento de sincronização (SyncM). Um número ótimo é aquele que possibilita uma probabilidade de colisões e um consumo de energia proveniente da escuta ociosa mais equilibrados;
- **Número de vagas para troca de dados (PKT):** Este parâmetro depende totalmente do tempo máximo do ciclo de trabalho e do tempo necessário para concluir a transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede juntamente com a sua confirmação (ACK). Esse tempo de transmissão é definido por l_{slot} . Sendo assim, o número máximo de vagas para troca de dados pode ser definido por $\lfloor ((T_{ActiveMax} - T_{BeaconMax}) / l_{slot}) \rfloor$, onde $T_{ActiveMax}$, $T_{BeaconMax}$ e $\lfloor \cdot \rfloor$ representam o tempo máximo do ciclo de trabalho, o tempo máximo de duração de um sinal de sincronização (*beacon*), e a função piso, respectivamente;
- **Número máximo de períodos de contenção:** Determina por quanto tempo uma estação pode retardar sua solicitação de registro durante os Períodos de Registro (REGs) do SyncM, até que seja realizada uma nova tentativa de registro no *cluster*;
- **Número máximo de tentativas de registro:** Define o número máximo de tentativas de registro da estação no *cluster*. Se caso a estação extrapolar este limite, ocorrerá uma falha de registro nas camadas superiores. Contudo, este processo de identificação de falha pode ser reiniciado quantas vezes for necessário;
- **Número máximo de requisições de transmissões no SyncM:** Diz-se respeito ao número máximo de estações receptoras que o transmissor pode requisitar para o envio de dados em um mesmo período. Se a taxa de geração de mensagens da estação for

relativamente alta, é possível reduzir o consumo de energia e o *overhead* da rede permitindo que a estação realize mais de uma requisição de transmissão no mesmo ciclo de trabalho;

- **Comprimento máximo do *payload*:** Indica o tamanho máximo (em *bytes*) da mensagem a ser transmitida em um pacote de dados. Este parâmetro também depende do ciclo de trabalho máximo permitido;
- **Número máximo de mensagens armazenadas no *buffer*:** Determina o número máximo de mensagens que podem ser acumuladas na memória da estação. Esse parâmetro deve ser controlado pela taxa de geração de mensagens e pelo limite máximo de informações armazenadas no *buffer* para que os pacotes não sejam descartados com frequência. Além disso, o tamanho do ciclo de trabalho e do número máximo de requisições de transmissões no SyncM pode interferir neste parâmetro;
- **Número máximo de tentativas de retransmissão dos pacotes de dados:** Visto que não existem colisões de dados no M2M-TEE, e que as tentativas de retransmissão só ocorrem por falhas na recepção ou por *timeout* do pacote de confirmação (ACK), este parâmetro define a quantidade máxima de retransmissões permitidas na camada MAC.

O segundo grupo define os parâmetros individuais de cada estação que são dinamicamente configuráveis em tempo de programação, sendo descritos a seguir:

- **Lista de canais disponíveis:** Com este parâmetro, as estações terão o conhecimento de uma lista ordenada de canais de frequência disponíveis para troca de dados, sendo o primeiro da lista o canal principal ou canal de controle. A ordem é importante para a distribuição sequencial das estações para cada combinação de canal e *slot* de tempo disponíveis no período de troca de dados, e que será explicado com mais detalhes na Seção 4.5;
- **Finalidade do dispositivo no *cluster*:** Semelhantemente aos dispositivos LR-WPAN, as estações do M2M-TEE podem exercer a função de coordenador ou nó-folha (do inglês, *end-device*). Se a camada de enlace definir que o dispositivo deve ser obrigatoriamente um coordenador, este deve selecionar o canal de frequência que possuir o menor nível de energia (ED) e executar seu SyncM no período livre do canal (CCA), mesmo que o canal

já esteja ocupado por outro *grupo* em um *duty cycle* diferente. Todavia, se a camada de enlace definir que o dispositivo deve ser um nó-folha, este deve procurar por *clusters* já disponíveis e nunca iniciar um novo grupo. O dispositivo também pode ter uma finalidade genérica, podendo ser coordenador ou nó-folha. (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014);

- **ID original da estação:** Indica a identidade original da estação antes dela se registrar no *cluster*. Assim como ocorre no protocolo DyTEE (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014), essa identidade pode se manter a mesma logo após a confirmação do registro por parte do coordenador, desde que não exista outra estação (com o mesmo ID) que esteja a uma distância menor que duas vezes o raio de alcance da estação que está tentando se registrar no *cluster*. Caso contrário, o novo integrante do grupo deverá obter uma nova identidade.

4.3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS CANDIDATOS A COORDENADORES

De acordo com (BASAGNI, 1999), os *clusters* podem ser organizados hierarquicamente em conformidade com parâmetros que são baseados no grau (ou peso) de mobilidade de cada estação, possibilitando a escolha do coordenador (ou *clusterhead*) com base no dispositivo que tiver o maior grau de mobilidade na rede. Em (BASAGNI, 1999) foram apresentados dois algoritmos que dividem as estações de uma rede *ad hoc* totalmente móvel em *clusters*, que são: (1) Algoritmo de Agrupamento Distribuído (do inglês, *Distributed Clustering Algorithm* (DCA)), que possibilita formar os *clusters* para redes *ad hoc* quase estáticas, com fácil implementação e complexidade limitada por um Parâmetro de Rede que depende da topologia da rede. (2) Algoritmo de Agrupamento Distribuído Adaptável à Mobilidade (do inglês, *Distributed Mobility-Adaptive Clustering* (DMAC)), que é adequado para qualquer ambiente móvel, pois adapta-se às mudanças na topologia da rede devido à mobilidade dos nós.

Para efeitos de simplificação, deve-se considerar que o protocolo M2M-TEE opera em redes de dispositivos com baixa ou nenhuma mobilidade. Sendo assim, a finalidade do dispositivo pode ser definida por meio de um algoritmo que se baseia no DCA. Os candidatos a coordenadores de um *cluster* do protocolo M2M-TEE devem seguir alguns critérios específicos não somente na camada de enlace, mas também na camada física da rede. Dito isto, a finalidade do dispositivo no *cluster* também pode ser determinada consoante o seu poder de processa-

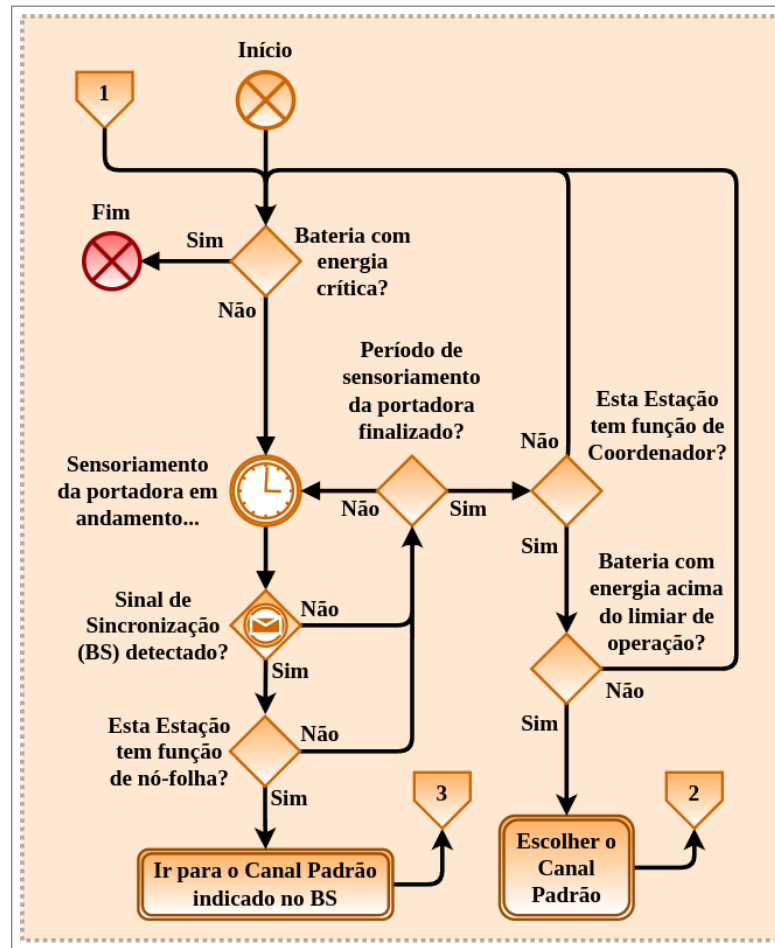
mento, capacidade de memória e autonomia da bateria. Os critérios de seleção dos candidatos a coordenadores são de suma importância, mas não fazem parte do objetivo deste trabalho. Contudo, podem ser abordados com mais detalhes em trabalhos futuros.

4.4 VISÃO GERAL DO PROTOCOLO

Semelhantemente ao protocolo DyTEE, as estações devem procurar por um sinal de sincronização e solicitar ao coordenador a entrada no grupo. A Figura 14 apresenta o fluxograma do algoritmo de busca por um *cluster*. Se a estação não detectar um BS em um período pré-determinado de sensoriamento da portadora, e estiver configurada com uma finalidade de coordenador ou genérica (que pode ser coordenador ou nó-folha), esta poderá dar início ao seu próprio grupo. A Figura 14 representa parte de todo o processo do protocolo M2M-TEE, sendo o primeiro de um total de quatro fluxogramas que serão apresentados mais adiante. O fluxograma completo do M2M-TEE pode ser encontrado no Apêndice A. A figura está interligada a um conector externo de entrada (Conector 1) e dois conectores externos de saída (Conectores 2 e 3). Estes conectores fazem a ligação com o restante da cadeia de ações do M2M-TEE. O Conector 1 representa o *reset* da estação ao seu estado original (sem *cluster*), e os Conectores 2 e 3 representam os *links* para a sequência de eventos do coordenador e da fase de registro do nó-folha no *cluster*, respectivamente.

Dado que o M2M-TEE opera com múltiplos canais, faz-se necessário que o coordenador defina o canal padrão onde ocorrerá o momento de sincronização (SyncM), e que envie os sinais de sincronização em todos os canais de frequência disponíveis, já que existe a possibilidade de integrar novas estações sintonizadas nos demais canais do M2M-TEE que são exclusivos para troca de dados. Se o coordenador atingir um limite (*threshold*) mínimo de porcentagem de bateria, a liderança do grupo deve ser concedida a outro nó, e o coordenador deve anunciar o fim do *cluster*. Deste modo, o consumo excessivo de energia da bateria não fica a cargo de uma única estação. A Figura 15 exemplifica o funcionamento do protocolo M2M-TEE. Neste caso, o *cluster* virtual da rede possui dez estações comunicantes e um coordenador que também pode transmitir dados, se necessário. Todas as estações possuem um conjunto de três antenas de recepção ($M_r = 3$) e são rotuladas com cores diferentes. O canal 1 (CH1) foi selecionado pelo nó líder para executar a fase de controle (SyncM), que funciona de forma semelhante ao protocolo DyTEE (GUIMARAES, 2014), com exceção do período de requisição de vagas (RSlot). Para fazer melhor uso dos recursos MIMO disponíveis em cada estação, os

Figura 14 – Fluxograma que representa a busca de uma estação por um *cluster* no protocolo M2M-TEE. (1) Conector de entrada das Figuras 17, 18 e 19. (2) Conector de saída para a Figura 17. (3) Conector de saída para a Figura 18.

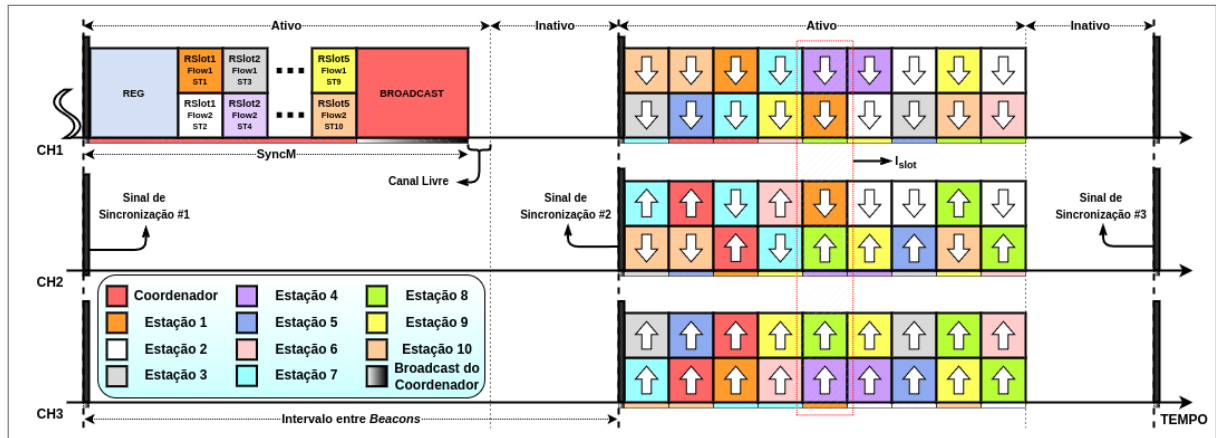


Fonte: O autor (2025)

RSlots podem ser reservados simultaneamente para $M_r - 1$ nós-folha concorrentes, sendo um nó para cada fluxo de recepção do coordenador. Portanto, o período de requisição de vagas do M2M-TEE para o exemplo apresentado na Figura 15 pode ser concluído na metade do tempo necessário para o mesmo período no DyTEE.

Logo após o período de requisição de vagas, o coordenador deve enviar a agenda das transmissões de dados por meio de um pacote *broadcast*. Diferentemente do líder do DyTEE que envia o *broadcast* com a ordem dos pares comunicantes para cada vaga de dados (PKT) de um único canal, o coordenador do M2M-TEE deve enviar a ordem dos canais exclusivos para troca de dados, e também a ordem das estações que irão ocupar cada uma das combinações exclusivas de canal de frequência e de vaga de dados. É possível notar no exemplo apresentado na Figura 15 que cada *slot* de dados pode ser ocupado por até três estações simultaneamente. Ou seja, cada estação ocupará exclusivamente um dos canais de frequência para receber os dados enviados pelas demais estações participantes do mesmo *slot*. Além disso, o canal de

Figura 15 – Exemplo do diagrama temporal no momento de sincronização (SyncM) e da transmissão de dados do protocolo M2M-TEE.



Fonte: O autor (2025)

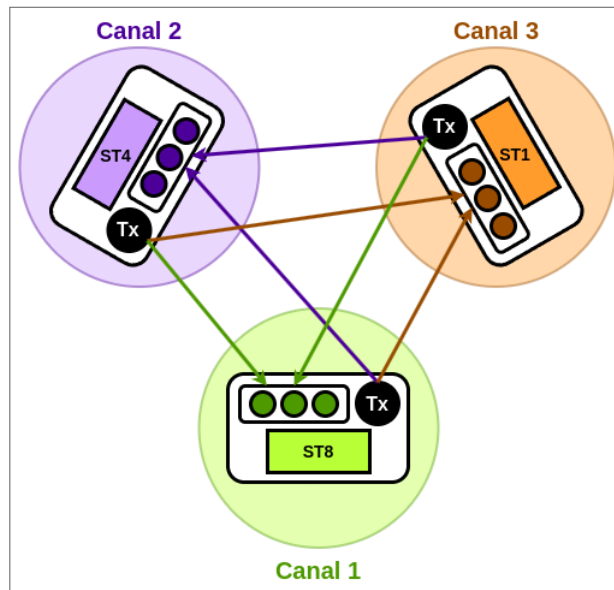
controle também deve ser utilizado para troca dos dados logo após o SyncM.

Os períodos ativos e de dormência permitem que mais de um *cluster* possa atuar sem possíveis interferências em múltiplos canais. Por exemplo, se o ciclo de trabalho de todos os *clusters* virtuais for igual a 25%, é possível operar até quatro grupos alternadamente, visto que cada grupo deve se manter inativo durante 75% do período total do intervalo entre *beacons*. Fica evidente que, para este exemplo, seria necessário desconsiderar os problemas com desvios de relógio (do inglês, *clock drift*). Para que mais de um *cluster* possa operar no período ativo ao mesmo tempo, é necessário que as estações de *clusters* diferentes estejam suficientemente distantes uma da outra, com distância mínima de duas vezes o raio de alcance de seus transceptores de rádio.

É importante lembrar que, assim como ocorre no DyTEE, se caso existir tempo suficiente para a transmissão dos dados logo após o fim do SyncM, as estações poderão enviar imediatamente seus pacotes de dados úteis até que se alcance o tempo máximo do período ativo (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014). Para estabelecer a sincronização da rede, cada *slot* de dados deve ter l_{slot} segundos de espaço de tempo, onde l_{slot} representa o tempo total para transmissão de um pacote de dados com o comprimento máximo do *payload* permitido pelos parâmetros de rede, juntamente com o recebimento do pacote ACK. No exemplo apresentado da Figura 15 existe um período livre do canal imediatamente após o *broadcast* que é menor do que os l_{slot} segundos necessários. Portanto neste caso, a transferência dos dados só deverá ocorrer no próximo período ativo.

A Figura 16 exemplifica a transmissão e recepção simultânea de pacotes entre as estações 1, 4 e 8 que ocorre no 5º *slot* de dados (com l_{slot} segundos) do diagrama temporal da Figura

Figura 16 – As estações 1, 4 e 8 realizam transmissões e recepções simultâneas de pacotes no quinto *slot* de dados do exemplo do diagrama temporal do protocolo M2M-TEE.



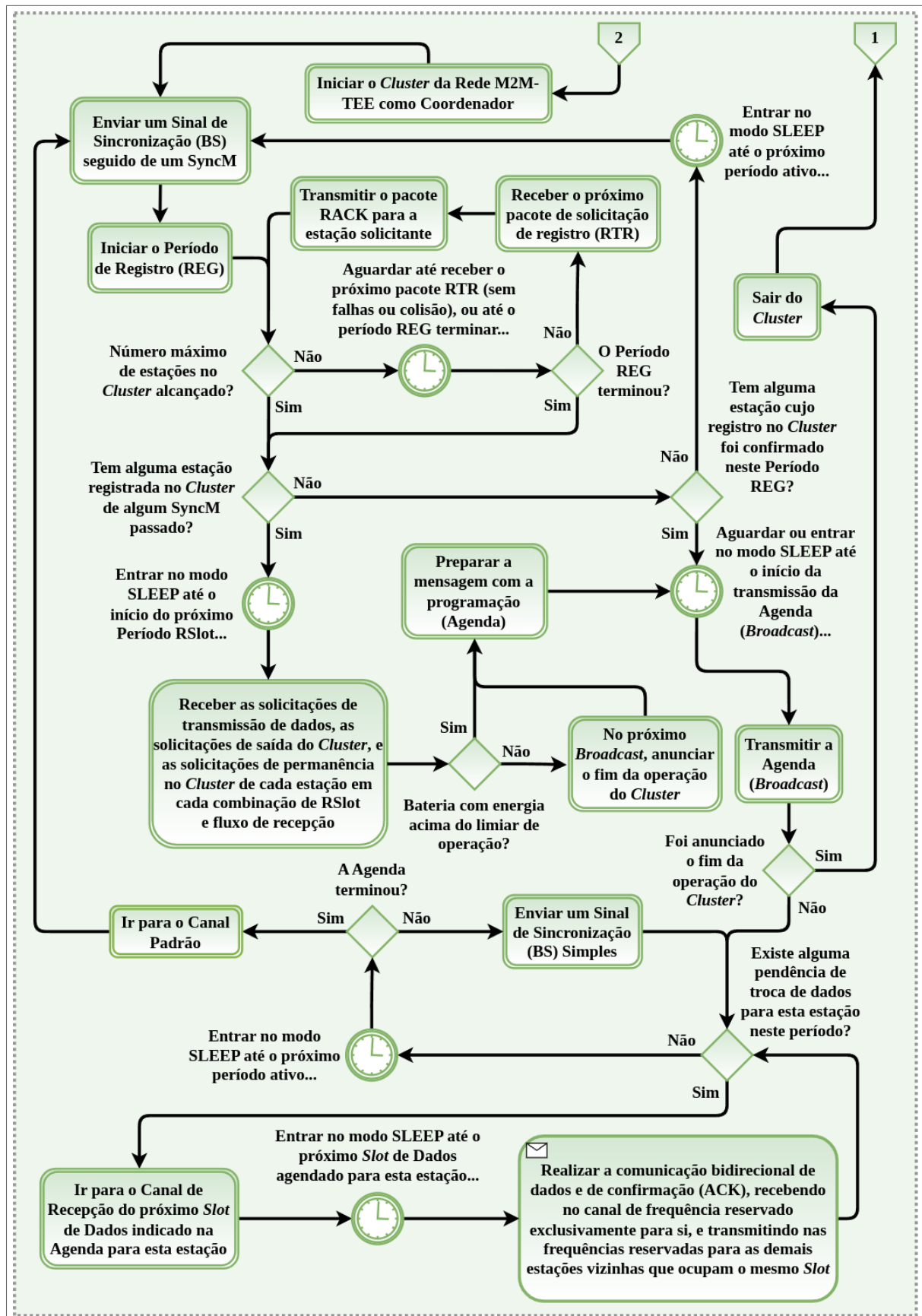
Fonte: O autor (2025)

15, e que é cercado por um retângulo com linhas vermelhas pontilhadas. O canal 1 (CH1) é ocupado pela estação 8 (ST8), o canal 2 (CH2) pela estação 4 (ST4), e o canal 3 (CH3) pela estação 1 (ST1). Cada estação recebe dados em seus respectivos canais, e transmite os dados nas frequências dos canais de seus respectivos nós de comunicação. Desta forma, para cada fluxo de recepção haverá também um fluxo de transmissão no sentido oposto, tornando a comunicação bidirecional.

Na Figura 15, para cada transferência de pacotes de controle e de dados, existe uma região na parte inferior do canal que representa a cor do nó que está recebendo a informação naquele espaço de tempo específico do canal. Por exemplo, nas fases de registro (REG) e de requisição de *slots* de dados (RSlot) do SyncM, a parte inferior do canal de controle (CH1) está destacada em vermelho, que é a cor que representa a estação líder. Isto significa que o coordenador deve ser o único a receber os pacotes de controle durante este período. Existe uma região na parte inferior do canal que possui uma cor gradiente em preto e branco que indica a transmissão do *broadcast*. Neste momento, apenas o coordenador transmitirá o pacote *broadcast* com o agendamento dos fluxos de dados para todas as demais estações. A Figura 17 apresenta o fluxograma da sequência de eventos do coordenador do protocolo M2M-TEE.

Todos os pacotes de controle e de dados devem ser precedidos por um cabeçalho (*header*) fixo para que as estações possam identificar a origem da transmissão e o propósito do pacote. Dito isto, também faz-se necessário identificar de qual protocolo decorreu o pacote, haja vista

Figura 17 – Fluxograma do coordenador no protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (2) Conector de entrada na Figura 14.



que podem existir outros módulos interferentes que não fazem parte do protocolo proposto neste trabalho, ou que são dispositivos legados de outros padrões como o IEEE 802.11 (GUIMARAES, 2014). O primeiro *byte* do cabeçalho sempre indicará o comprimento do pacote em *bytes*, enquanto que o segundo *byte* corresponde ao Campo de Controle do Pacote (FCF), que informa qual é o tipo do pacote enviado. O terceiro *byte* corresponde ao identificador do protocolo M2M-TEE. Os valores do FCF são os mesmos apresentados em (GUIMARAES, 2014), que por sua vez são:

- **FCF_FRAME_TYPE_SIMPLE_BEACON:** Indica que o pacote é um BS simples onde posteriormente devem ocorrer apenas transmissões de dados;
- **FCF_FRAME_TYPE_SYNCM_BEACON:** Indica que o pacote é um BS seguido de um SyncM;
- **FCF_FRAME_TYPE_DATA:** Indica que o pacote é uma mensagem com dados úteis (PKT) que será transmitido para outra estação do *cluster*;
- **FCF_FRAME_TYPE_ACK:** Indica que o pacote é de confirmação ou reconhecimento dos dados recebidos (ACK);
- **FCF_FRAME_TYPE_REGISTER_REQUEST:** Indica que o pacote é de solicitação de registro no grupo (REG);
- **FCF_FRAME_TYPE_DISASSOCIATE:** Indica que o pacote é de requisição de desassociação do *cluster*;
- **FCF_FRAME_TYPE_REQUEST_SLOT:** Indica que o pacote é de requisição de vagas (RSlot) para transmissão de dados;
- **FCF_FRAME_TYPE_MAC_CMD:** Indica que o pacote é um *broadcast* do coordenador para anunciar a agenda dos fluxos para as transmissões de dados.

É bem verdade que, como estratégia de redução da sobrecarga do cabeçalho, o Campo de Controle do Pacote poderia ser configurado com apenas 3 *bits*, dado que existem apenas oito combinações diferentes do FCF. Todavia, é importante entender que todos os dispositivos presentes na área de alcance da estação transmissora (em especial aqueles que não operam por meio do M2M-TEE) devem identificar qual foi o protocolo que originou o pacote transmitido. Sendo assim, os três primeiros *bytes* do cabeçalho dos pacotes do protocolo M2M-TEE devem

seguir a mesma ordem e estrutura lógica dos três primeiros *bytes* dos pacotes do DyTEE e dos dispositivos LR-WPAN. Ao final de todos os pacotes, são adicionados alguns *bytes* de informação que servem como uma Sequência de Verificação do Pacote (do inglês, *Frame Check Sequence* (FCS)). Depois da verificação de integridade das informações, os *bytes* referentes ao FCS são descartados e substituídos por parâmetros como o LQI e o ED, que por sua vez são encaminhados para as camadas superiores de comunicação.

4.5 O MOMENTO DE SINCRONIZAÇÃO

Conforme descrito na Seção 4.1, o Momento de Sincronização (SyncM) deve ocorrer no canal de controle (padrão) predefinido pelo coordenador. Toda a comunicação acontece exclusivamente entre o coordenador e os demais nós-folha do grupo, seguindo a topologia estrela. Para aproveitar as principais características do DyTEE e do M2MMAC, é necessário considerar algumas atualizações nos pacotes de controle e de dados para tornar o novo protocolo proposto exequível. As próximas subseções descrevem os detalhes destes ajustes para cada uma das quatro fases do SyncM do M2M-TEE.

4.5.1 Beacon signal (BS)

O envio do sinal de sincronização por parte do coordenador tem o propósito de atualizar os relógios das estações associadas ao grupo (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014), e estabelecer o marco zero para todas as ações seguintes até a ocorrência do próximo BS. Além disso, o BS tem a função de anunciar aos demais dispositivos que não fazem parte do *cluster* sobre o número de estações registradas no grupo (C), assim como o ID do canal padrão. O BS é a única etapa do SyncM que atua em todos os canais participantes do *cluster*. Um dos motivos pelos quais se faz necessário realizar esta ação é para impedir o problema do terminal escondido multicanal, conforme descrito na Seção 3.5. O Quadro 2 apresenta a sequência de *bytes* do BS.

Conforme descrito na Subseção 4.1.1, o número máximo de dispositivos que podem ser registrados simultaneamente em um *cluster* para o protocolo M2M-TEE é de 15 dispositivos. Dito isto, o PAN ID do grupo, que é igual ao ID original do coordenador, pode ser representado por um número hexadecimal. Como consequência, ambas as informações podem ser armazenadas em um único *byte*, que no Quadro 2 é representado pelo 4º *byte*. Dado que um dos

Quadro 2 – Sequência de *bytes* do *Beacon Signal* do protocolo M2M-TEE.

<i>Byte 1</i>	<i>Byte 2</i>	<i>Byte 3</i>	<i>Byte 4</i>
Comprimento do pacote em <i>bytes</i> (<i>n</i>)	FCF	Identificador M2MTEE	PAN ID do <i>cluster</i> [4 <i>bits</i>] + Número de estações registradas no <i>cluster</i> [4 <i>bits</i>]
<i>Byte 5</i>	<i>Byte 6</i>	...	<i>Byte (n-2)</i>
ID do canal padrão [4 <i>bits</i>] + Quantidade mínima de antenas de recepção [4 <i>bits</i>]	Primeiro Byte da carga útil (payload) da mensagem	...	Último Byte da carga útil (payload) da mensagem
<i>Byte (n-1)</i>	<i>Byte n</i>		
FCS	FCS		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Parâmetros de Rede informa o número máximo de estações em um *cluster*, as novas estações que desejarem se conectar ao grupo saberão se existem ou não vagas disponíveis para registro.

Semelhantemente ao caso anterior, tanto o ID do canal padrão quanto o número mínimo necessário de antenas de recepção para que o coordenador possa aceitar a entrada de novas estações no *cluster* são representados por 4 *bits*, respectivamente. Estas informações estão registradas no 5º *byte* do BS. A quantidade mínima de antenas de recepção deve ser equivalente ao número de canais disponíveis na fase de comunicação de dados, contando também com o canal padrão. A partir do 6º *byte* a configuração é semelhante ao DyTEE.

4.5.2 Período de registro (REG)

O Período de Registro (REG) é a única fase onde há o risco de colisões de pacotes de controle, porque nela as estações utilizam os mecanismos de contenção semelhantes aos do *slotted CSMA*. Nesta fase, o coordenador avalia a entrada de novas estações no *cluster* após o recebimento de pacotes solicitação de registro (RTRs). Se a solicitação for aprovada, o nó líder deverá enviar no mesmo período REG um pacote de confirmação do registro (RACK), e as demais informações necessárias para o novo integrante do grupo deverão ser enviadas no próximo *broadcast*. O Quadro 3 apresenta a sequência de *bytes* do RTR e do RACK do Período de Registro.

O processo de solicitação de registro no grupo é semelhante ao processo apresentado na Subseção 3.4.3 do protocolo DyTEE. Contudo, é importante pontuar que o sinal de sincro-

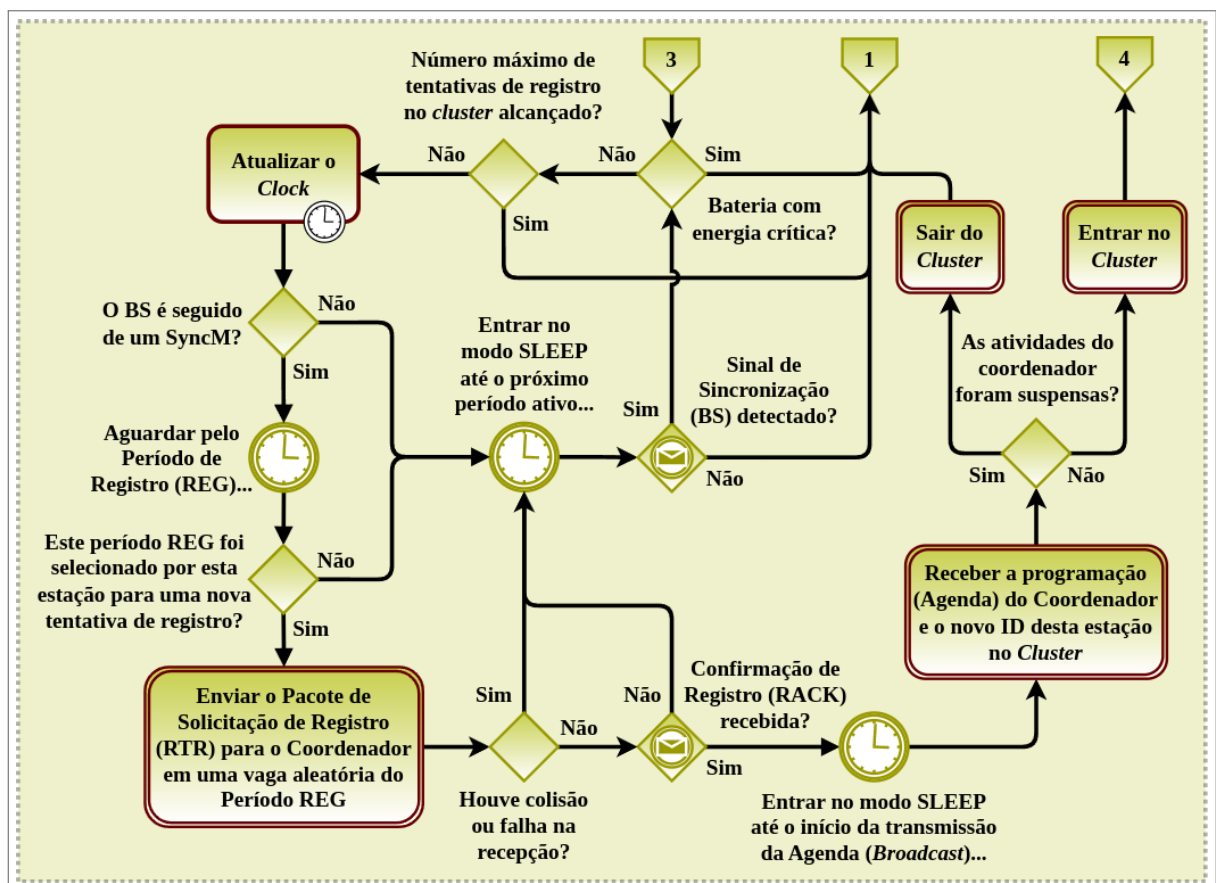
Quadro 3 – Sequência de *bytes* do pacote de solicitação de registro (RTR) e de confirmação (RACK) do Período de Registro do protocolo M2M-TEE.

Byte 1	Byte 2	Byte 3
Comprimento do pacote em bytes (n)	FCF	Identificador M2MTEE
Byte 4	Byte 5	Byte 6
PAN ID do <i>cluster</i> [4 bits] + ID original da estação requerente [4 bits]	FCS	FCS

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

nização (BS) é enviado para todos os canais partícipes do grupo no protocolo M2M-TEE. Sendo assim, se caso uma das novas estações ouvir o BS e não estiver sintonizada no canal de controle, esta deverá alternar o contexto do seu transceptor para o canal padrão informado no BS, para que assim ela possa transmitir o RTR. A Figura 18 apresenta o fluxograma da sequência de eventos de um nó-folha durante o Período de Registro do protocolo M2M-TEE. O Conector 4 (conector externo de saída) representa o *link* para o restante das ações do nó-folha, logo depois que ele consegue entrar no *cluster*.

Figura 18 – Fluxograma do nó-folha no Período de Registro do protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (3) Conector de entrada da Figura 14. (4) Conector de saída para a Figura 19.



Fonte: O autor (2025)

4.5.3 Período de requisição de vagas (RSlot)

No Período de Requisição de Vagas (RSlot), cada estação informará ao coordenador para quais nós seus pacotes de dados deverão ser enviados. Para aproveitar melhor os recursos disponíveis no MU-MIMO, o coordenador pode decodificar até $M_r - 1$ sinais distintos simultaneamente em cada vaga do período de requisição, sendo cada sinal transmitido em fluxos de recepção distintos, um para cada nó-folha. Desta forma, o tempo total necessário para finalizar o período de requisição de vagas ($T_{RSlotTOTAL}$) pode reduzir consideravelmente. A ordenação dos fluxos deve seguir de acordo com a ordem ascendente dos IDs de cada nó-folha partícipe do grupo. E se existirem mais nós-folha do que o número máximo de fluxos simultâneos suportados em uma única vaga de requisição, a sequência deve continuar nos fluxos das próximas vagas, até que todas as estações possam ter o direito de solicitar ao líder a quantidade de vagas necessárias para transmitir os pacotes de dados presentes em seu *buffer*. Embora a configuração dos transceptores integrados permita que a comunicação possa ocorrer de forma bidirecional entre o coordenador e as demais estações, apenas os nós-folha poderão enviar os pacotes RSlot neste período. O Quadro 4 apresenta a sequência completa de *bytes* de um pacote RSlot para as estações que desejam solicitar vagas no período de dados.

Os quatro primeiros *bits* do 4º *byte* informam o PAN ID do *cluster*, enquanto que os quatro últimos informam o ID do nó-folha requerente em questão. A partir do 5º *byte*, deve ser informada a sequência das estações receptoras (4 *bits*) e a quantidade de vagas necessárias para transmitir toda a carga útil (4 *bits*). Existem 16 combinações diferentes para os 4 *bits* que

Quadro 4 – Sequência de *bytes* do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE.

Byte 1	Byte 2	Byte 3
Comprimento do pacote em <i>bytes</i> (n)	FCF	Identificador M2MTEE
Byte 4	Byte 5	...
PAN ID do <i>cluster</i> [4 <i>bits</i>] + ID da estação requerente [4 <i>bits</i>]	ID da primeira estação receptora [4 <i>bits</i>] + Quantidade de vagas necessárias [4 <i>bits</i>]	...
Byte (n-2)	Byte (n-1)	Byte n
ID da última estação receptora [4 <i>bits</i>] + Quantidade de vagas necessárias [4 <i>bits</i>]	FCS	FCS

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

informam a quantidade de vagas. Sendo assim, a estação pode requisitar de 1 (combinação 0x0) a 16 (combinação 0xf) vagas de transmissão. Se a estação precisar de mais de 16 vagas de dados para transmitir toda a carga útil para o nó receptor em questão, então ela poderá solicitar mais vagas no *byte* seguinte, sendo necessário informar mais uma vez o ID da estação receptora. Todavia, cada nó-folha só poderá repetir a solicitação de vagas para a mesma estação uma única vez, não sendo possível repetir para outra estação no mesmo pacote RSlot. Isso se faz necessário devido à limitação de tempo do período ativo. As vagas de períodos RSlot de SyncMs diferentes podem ter tempos de duração diferentes, haja vista que o número de estações (C) em cada período ativo pode variar. Contudo, as vagas de um mesmo período RSlot possuem o mesmo tempo de duração (T_{RSlot}), que pode ser calculado como segue

$$T_{RSlot} = \frac{(S_{header} + (C + 1) + 1) \times 8}{R_b}, \quad (4.1)$$

onde S_{header} representa o tamanho do cabeçalho do protocolo, a contar com os três primeiros *bytes* do pacote mais os dois últimos *bytes* referentes ao FCS, e R_b representa a taxa de transmissão do rádio dada em *kilobits* por segundo (kbps). C representa o número atual de estações no *cluster* sem contar com o coordenador, e como é dada a oportunidade de repetir uma única vez a solicitação de vagas de dados para uma mesma estação, a quantidade de *bytes* referentes aos IDs das estações receptoras deve ser igual a $C + 1$. O acréscimo de mais um *byte* no numerador da Equação (4.1) é referente ao 4º *byte* do pacote RSlot. Sendo assim, o tempo total de duração do período RSlot ($T_{RSlotTOTAL}$) é dado por

$$T_{RSlotTOTAL} = \left\lceil \left(\frac{T_{RSlot} \times C}{M_r - 1} \right) \right\rceil. \quad (4.2)$$

As solicitações de transmissão de dados são feitas em intervalos de tempo predefinidos, e mesmo que as estações não tenham dados em seus respectivos *buffers*, elas devem informar ao coordenador se ainda desejam permanecer no *cluster*. O Quadro 5 apresenta a sequência de *bytes* de um pacote RSlot para as estações que não possuem dados para transmitir, mas que ainda pretendem continuar no grupo. Para a situação do Quadro 5, o valor do FCF deve se manter equivalente a FCF_FRAMETYPE_REQUEST_SLOT. Isso é possível graças ao comprimento do pacote, que neste cenário possui apenas 6 *bytes* ($n=6$). O pacote RSlot precisa ter um comprimento mínimo de 7 *bytes* para informar pelo menos o ID de uma estação receptora e a quantidade necessária de vagas de transmissão.

O Quadro 6 apresenta a sequência de *bytes* de um pacote RSlot para as estações que desejam se desassociar do *cluster*. É necessário informar no 5º *byte* a razão pela qual a

Quadro 5 – Sequência de *bytes* do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE para as estações que não possuem dados para transmitir.

Byte 1	Byte 2	Byte 3
Comprimento do pacote em bytes (n)	FCF	Identificador M2MTEE
Byte 4	Byte 5	Byte 6
PAN ID do <i>cluster</i> [4 bits] + ID da estação requerente [4 bits]	FCS	FCS

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

estação deseja se desassociar do grupo. Existem ainda os casos em que o próprio coordenador poderá informar a desassociação do nó-folha do grupo, porém esta situação só poderá ocorrer no período da divulgação da agenda (*broadcast*), que por sua vez será detalhado na próxima subseção.

Quadro 6 – Sequência de *bytes* do pacote de requisição de vagas (RSlot) do protocolo M2M-TEE para as estações que desejam se desassociar do *cluster*.

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Comprimento do pacote em bytes (n)	FCF	Identificador M2MTEE	PAN ID do <i>cluster</i> [4 bits] + ID da estação requerente [4 bits]
Byte 5	Byte 6	Byte 7	
Razão da desassociação da estação no <i>cluster</i>	FCS	FCS	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.5.4 Divulgação da agenda (*broadcast*)

Na fase final do SyncM, o coordenador enviará o pacote *broadcast* com o resultado das requisições de entrada e saída das estações no grupo, assim como o agendamento no período de troca de pacotes de dados, que será respeitado durante os próximos períodos ativos até que toda a programação seja concluída. O *broadcast* deve ser reestruturado não apenas com a sequência dos IDs de cada par de estações comunicantes em cada *slot* de dados (*PKT*) (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014), mas também com os IDs dos canais onde estas comunicações deverão acontecer. Entretanto, devido à comunicação muitos-para-muitos, a troca de dados em uma vaga deve ocorrer não somente entre um par de estações, mas através de múltiplos fluxos simultâneos e bidirecionais, conforme descrito na Seção 3.7 do protocolo M2MMAC. Para o exemplo apresentado na Figura 16, são 6 fluxos

simultâneos, sendo 2 fluxos de recepção por canal. O Quadro 7 apresenta a sequência de *bytes* de um pacote *broadcast* enviado pelo coordenador do *cluster*.

Quadro 7 – Sequência de *bytes* do pacote *Broadcast* do protocolo M2M-TEE.

<i>Byte 1</i>	<i>Byte 2</i>	<i>Byte 3</i>	<i>Byte 4</i>
Comprimento do pacote em <i>bytes</i> (<i>n</i>)	FCF	Identificador M2MTEE	PAN ID do <i>cluster</i> [4 <i>bits</i>] + Número de respostas de registro (NR) [4 <i>bits</i>]
<i>Byte 5</i>	...	<i>Byte 4 + NR</i>	<i>Byte 4 + NR + 1</i>
Antigo ID [4 <i>bits</i>] e novo ID [4 <i>bits</i>] da primeira estação registrada no <i>cluster</i> neste período	...	Antigo ID [4 <i>bits</i>] e novo ID [4 <i>bits</i>] da última estação registrada no <i>cluster</i> neste período	Número de estações desassociando (ND) [4 <i>bits</i>] + ID da primeira estação a se desassociar do grupo neste período [4 <i>bits</i>]
<i>Byte 4 + NR + 2</i>	...	<i>Byte 4 + NR + $\lfloor (ND/2) \rfloor + 1$</i>	<i>Byte 4 + NR + $\lfloor (ND/2) \rfloor + 2$</i>
ID da segunda [4 <i>bits</i>] e terceira [4 <i>bits</i>] estações a se desassociarem do grupo neste período	...	ID(s) da(s) última(s) estação(ões) [4+4 <i>bits</i>] a se desassociar(em) do grupo neste período	Razão da saída da primeira estação a se desassociar do grupo neste período
...	<i>Byte 4 + NR + ND + $\lfloor (ND/2) \rfloor + 1$</i>	<i>Byte 4 + NR + ND + $\lfloor (ND/2) \rfloor + 2$</i>	...
...	Razão da saída da última estação a se desassociar do grupo neste período	IDs do primeiro [4 <i>bits</i>] e segundo [4 <i>bits</i>] canais exclusivos para troca de dados	...
<i>Byte 4 + NR + ND + $\lfloor (ND/2) \rfloor + \lfloor (Mr/2) \rfloor + 1$</i>	<i>Byte 4 + NR + ND + $\lfloor (ND/2) \rfloor + \lfloor (Mr/2) \rfloor + 2$</i>	...	<i>Byte 4 + NR + ND + $\lfloor (ND/2) \rfloor + \lfloor (Mr/2) \rfloor +$ Nagenda + 1</i>
ID(s) do(s) último(s) canal(is) exclusivo(s) [4+4 <i>bits</i>] para troca de dados	ID da primeira estação que ocupará a primeira vaga de dados [4 <i>bits</i>] + ID do canal a ser ocupado [4 <i>bits</i>]	...	ID da última estação que ocupará a última vaga de dados [4 <i>bits</i>] + ID do canal a ser ocupado [4 <i>bits</i>]
<i>Byte (n-1)</i>	<i>Byte n</i>		
FCS	FCS		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após a sequência dos três primeiros *bytes* do Cabeçalho do Protocolo (S_{header}), é informado o PAN ID do *cluster* e o Número de Respostas de Registro (NR). Conforme descrito na Subseção 4.1.1, um dos objetivos do M2M-TEE é reduzir as informações excessivas do

cabeçalho. Sendo assim, ficou definido que um *cluster* pode agrupar até 15 estações simultaneamente, fazendo com que o valor do NR possa ser representado pelos últimos 4 *bits* do 4º *byte* do pacote *broadcast*. A sequência dos próximos *bytes* deve informar o antigo e o novo ID de cada uma das NR estações recém-registradas no grupo. Em seguida, no *byte* (4+NR+1), é informado o Número de Estações Desassociando (ND) e o ID da primeira estação a se desassociar do grupo neste período, que também podem ser representados por 4 *bits*.

Os próximos $\lfloor (ND/2) \rfloor$ *bytes* informam as demais estações que se desassociarão do grupo, onde $\lfloor . \rfloor$ representa a função piso. Se caso o último *byte* desta sequência abranger apenas um ID, os últimos 4 *bits* deverão ser iguais a 0xf, que é um número não utilizado para os IDs das estações, conforme descrito na Subseção 4.1.1. A partir do *byte* (4+NR+ $\lfloor (ND/2) \rfloor$ +2), deverão ser indicadas as razões de saída do grupo de cada estação, na mesma ordem em que foram apresentados os seus respectivos IDs a partir do *byte* (4+NR+1). A razão pode ser dada pelo próprio coordenador ou pela requisição de vagas (RSlot) do nó-folha. Cada razão deve ser representada por 1 *byte* completo, sendo necessários mais ND *bytes*. Se o coordenador anunciar a desassociação com o seu próprio ID, seja por questões de conservação da energia restante da bateria ou por outro motivo qualquer, os nós-folha entenderão que o *cluster* será encerrado, dando a oportunidade para outras estações abrirem um novo grupo.

A partir do *byte* (4+NR+ND+ $\lfloor (ND/2) \rfloor$ +2), devem ser informados os IDs de cada um dos canais exclusivos para troca de dados. Como o ID do canal padrão já foi informado no BS, não se faz mais necessário informá-lo novamente no *broadcast*. Esta sequência renderá mais $\lfloor (Mr/2) \rfloor$ *bytes*. Se caso o último *byte* desta sequência abranger apenas um ID, os últimos 4 *bits* deverão ser desconsiderados. De acordo com a Subseção 4.5.1, a quantidade mínima de antenas de recepção informada no BS deve ser equivalente ao número de canais disponíveis na fase de comunicação de dados, contando também com o canal padrão. Dito isto, os nós-folha saberão se os últimos 4 *bits* do último *byte* da sequência de IDs dos canais de frequência devem ser desconsiderados ou não.

A partir do *byte* (4+NR+ND+ $\lfloor (ND/2) \rfloor$ + $\lfloor (Mr/2) \rfloor$ +2) se inicia a sequência dos N_{agenda} *bytes* de programação das transmissões de dados. Cada um informa o ID da estação e seu respectivo canal de recepção de dados. Grosso modo, N_{agenda} representa o número total de combinações entre uma vaga de dados (com l_{slot} segundos) e um canal de frequência, de maneira que cada uma destas combinações seja obrigatoriamente ocupada por uma das estações do grupo. No exemplo apresentado da Figura 15 existem 9 vagas de dados, e cada uma delas possuem três combinações úteis, haja vista que existem 3 canais de comunicação

não sobrepostos disponíveis. Sendo assim, para este cenário, $N_{agenda} = 9 \times 3 = 27$. O Quadro 8 apresenta a sequência dos N_{agenda} bytes do pacote *broadcast* da Figura 15.

Quadro 8 – Sequência dos N_{agenda} bytes do pacote *broadcast* da Figura 15 alusivos às 27 combinações dos IDs das estações e de seus respectivos canais de recepção.

Byte 1 = 0x71	Byte 2 = 0x32	Byte 3 = 0xa3	Byte 4 = 0x01	Byte 5 = 0x52	Byte 6 = 0xa3
ST07 + CH1 (Slot 1)	ST03 + CH2 (Slot 1)	ST10 + CH3 (Slot 1)	ST00 + CH1 (Slot 2)	ST05 + CH2 (Slot 2)	ST10 + CH3 (Slot 2)
Byte 7 = 0x01	Byte 8 = 0x12	Byte 9 = 0x73	Byte 10 = 0x61	Byte 11 = 0x92	Byte 12 = 0x73
ST00 + CH1 (Slot 3)	ST01 + CH2 (Slot 3)	ST07 + CH3 (Slot 3)	ST06 + CH1 (Slot 4)	ST09 + CH2 (Slot 4)	ST07 + CH3 (Slot 4)
Byte 13 = 0x81	Byte 14 = 0x42	Byte 15 = 0x13	Byte 16 = 0x91	Byte 17 = 0x42	Byte 18 = 0x23
ST08 + CH1 (Slot 5)	ST04 + CH2 (Slot 5)	ST01 + CH3 (Slot 5)	ST09 + CH1 (Slot 6)	ST04 + CH2 (Slot 6)	ST02 + CH3 (Slot 6)
Byte 19 = 0x51	Byte 20 = 0x32	Byte 21 = 0x23	Byte 22 = 0x81	Byte 23 = 0x62	Byte 24 = 0x23
ST05 + CH1 (Slot 7)	ST03 + CH2 (Slot 7)	ST02 + CH3 (Slot 7)	ST08 + CH1 (Slot 8)	ST06 + CH2 (Slot 8)	ST02 + CH3 (Slot 8)
Byte 25 = 0x81	Byte 26 = 0x62	Byte 27 = 0x23			
ST08 + CH1 (Slot 9)	ST06 + CH2 (Slot 9)	ST02 + CH3 (Slot 9)			

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A sequência dos N_{agenda} bytes acompanha a ordem dos canais apresentada nos bytes anteriores, porém o primeiro da lista deve ser o canal padrão. A distribuição das primeiras estações no primeiro *slot* de dados termina quando a sequência dos canais chega ao fim. Quando os canais começam a se repetir nos N_{agenda} bytes, é um indicativo de que as próximas combinações entre as estações e seus respectivos canais de recepção serão direcionadas para o próximo *slot* de dados.

Como o número de antenas de recepção (M_r) de todas as estações é maior ou igual ao número de canais disponíveis do *cluster* (M), cada estação deve estabelecer M fluxos para receber os dados enviados pelas demais estações que ocupam os demais canais de frequência na mesma vaga de dados. Semelhantemente, esta mesma estação deve estabelecer M fluxos de transmissão direcionados para cada um dos canais de frequência do grupo, com exceção do canal ocupado por ela mesma. Um ponto importante a ser observado é que as camadas superiores do coordenador devem entregar a programação mais justa e completa possível, de maneira que mantenham os mesmos direitos de transmissão de dados para todas as estações, com todas as combinações de *slot* e canal de frequência ocupadas, mesmo sabendo que nem sempre isso será possível. Na próxima seção serão apresentados mais detalhes sobre a fase de transmissão dos dados.

O tamanho mínimo do *broadcast* é alcançado quando não existem requisições de vagas para transmissão de dados, nem estações se registrando, e nem estações se desassociando do grupo. Deste modo, o pacote será composto pelos 5 *bytes* do S_{header} , mais 1 *byte* informando o PAN ID do grupo e o NR=0, mais 1 *byte* indicando ND=0. O Quadro 9 apresenta a sequência de *bytes* para o *broadcast* com esta configuração mínima de tamanho.

Quadro 9 – Sequência de *bytes* do pacote *Broadcast* com tamanho mínimo do protocolo M2M-TEE.

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Comprimento do pacote em bytes (n)	FCF	Identificador M2MTEE	PAN ID do <i>cluster</i> [4 bits] + Número de respostas de registro (NR) [4 bits]
Byte 5	Byte 6	Byte 7	
Número de estações desassociando (ND)	FCS	FCS	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O tempo de transmissão do pacote *broadcast* ($T_{broadcast}$) juntamente com o espaçamento de tempo (t_{esp}) necessário para evitar problemas com o *clock drift* pode ser calculado por

$$T_{broadcast} = \frac{S_{broadcast} \times 8}{R_b} + t_{esp}, \quad (4.3)$$

onde $S_{broadcast}$ e R_b representam o tamanho em *bytes* do pacote *broadcast* para o protocolo M2M-TEE e a taxa de transmissão do rádio dada em *kilobits* por segundo (kbps), respectivamente. O valor do $S_{broadcast}$ pode ser calculado por

$$S_{broadcast} = S_{header} + NR + ND + \lfloor (ND/2) \rfloor + \lfloor (M_r/2) \rfloor + N_{agenda} + 2. \quad (4.4)$$

Dado que os dispositivos do protocolo M2M-TEE atendem às especificações da norma IEEE 802.15.4, o número máximo de *bytes* que um pacote pode comportar é de 127 *bytes*. Sendo assim, o número máximo de combinações de *slots* e canais de frequência ($N_{agenda_{max}}$) que podem ser programadas em um *broadcast* é dado por

$$N_{agenda_{max}} = 127 - (S_{header} + NR_{max} + ND_{max} + \lfloor (ND_{max}/2) \rfloor + \lfloor (M_{r_{max}}/2) \rfloor + 2), \quad (4.5)$$

onde NR_{max} , ND_{max} e $M_{r_{max}}$ representam os números máximos de respostas de registro, de estações desassociando, e de antenas de recepção para cada estação, respectivamente. Uma vez que $S_{header} = 5$ e que $NR_{max} = ND_{max} = M_{r_{max}} = 15$, $N_{agenda_{max}}$ equivale a

$$\begin{aligned} N_{agenda_{max}} &= 127 - (5 + 15 + 15 + \lfloor (15/2) \rfloor + \lfloor (15/2) \rfloor + 2) \\ &= 127 - (35 + 7 + 7 + 2) \\ &= 76. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Se não for possível comportar todas as requisições de vagas de dados (RSlot) de todas as estações do *cluster* em um único pacote *broadcast*, de maneira que seja necessário ultrapassar o limite máximo dos 127 *bytes*, torna-se lícito transmitir sequencialmente mais de um *broadcast*. Se o valor do FCF do pacote subsequente ao primeiro *broadcast* também for igual a FCF_FRAMETYPE_MAC_CMD, os nós-folha do grupo entenderão que este pacote é a extensão do primeiro. Desta maneira, depois dos três primeiros *bytes* do S_{header} do próximo *broadcast*, o coordenador já poderá continuar a sequência das combinações entre os IDs das estações e seus respectivos canais de recepção (N_{agenda}). Se o comprimento do primeiro *broadcast* do coordenador for igual a 127 *bytes*, e o tempo restante do período ativo for suficiente para iniciar a troca de dados, toda a rede deverá aguardar um tempo mínimo necessário (t_{espBDR}) para descobrir se o coordenador de fato completou a transmissão de agendamento dos dados. Este tempo deve ser o bastante para conter o atraso de propagação (δ) para a estação mais distante do coordenador, além do espaçamento de tempo (t_{esp}) necessário para a decodificação das informações transmitidas no *broadcast* anterior por parte deste mesmo nó-folha mais distante, e para evitar problemas com os desvios de relógio.

Outro ponto importante que é preciso considerar é que o tempo máximo para concluir um SyncM não deve ultrapassar o tempo máximo do ciclo de trabalho, sendo este um dos Parâmetros de Rede derivados do *cluster*. Logo após o envio do BS, todas as estações do grupo ficam cientes do momento em que cada uma delas poderá se comunicar com o coordenador ou com os demais nós-folha, já que o nó líder envia no BS a quantidade de estações registradas no grupo. Deste modo, garante-se que não haverá colisões entre os pacotes das estações do grupo.

4.6 TRANSMISSÃO DOS DADOS

Os fluxos de dados são organizados em pares pelo coordenador para garantir a comunicação simultânea e bidirecional na fase de troca de dados. Mesmo que uma das estações não possua dados para transmitir ao seu respectivo par, é necessário que ela transmita o pacote de confirmação (ACK) ao remetente. Vale lembrar que cada estação deve ocupar um canal de frequência exclusivo para receber os dados das demais estações, e transmitir na frequência dos canais de cada um dos respectivos vizinhos que participam da mesma vaga de dados. Toda a comunicação de dados ocorre sem contenção. Ao reservar intervalos de tempo durante o período de troca de dados, cada nó conhece os momentos em que deve participar da comu-

nicação. Portanto, os nós podem entrar em *SLEEP mode* para economizar energia quando não estiverem trocando dados, assim como também devem dormir imediatamente após o fim do período ativo. O Quadro 10 apresenta a sequência de *bytes* de um pacote de dados do protocolo M2M-TEE.

Quadro 10 – Sequência de *bytes* do pacote de dados do protocolo M2M-TEE.

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Comprimento do pacote em bytes (n)	FCF	Identificador M2MTEE	Número sequencial de dados (DSN)
Byte 5	Byte 6	...	Byte (n-2)
PAN ID do <i>cluster</i> da estação receptora [4 bits] + ID da estação receptora [4 bits]	Primeiro byte da carga útil (payload) da mensagem	...	Último byte da carga útil (payload) da mensagem
Byte (n-1)	Byte n		
FCS	FCS		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Assim como ocorre no protocolo DyTEE, deve ser enviado o PAN ID do grupo, o ID da estação receptora, e o Número de Sequência de Dados, fazendo com que somente o receptor a quem foi destinado o pacote possa decodificar a mensagem (GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; GUIMARAES, 2014). O DSN é útil apenas para os casos onde existem outros *clusters* atuando na rede, de maneira que seja possível evitar que outras estações de fora do grupo possam ocasionalmente detectar a mensagem. O tempo total necessário para concluir a transmissão do maior pacote de dados e de seu respectivo pacote ACK (l_{slot}) deve envolver outras variáveis, que são: O tempo de espaçamento (t_{esp}) anterior à transmissão do pacote de dados, o tempo de recepção e interpretação do pacote de dados por parte do receptor ($T_{int_{RX}}$), o tempo de recepção e interpretação do pacote ACK por parte do transmissor ($T_{int_{TX}}$), e o tempo de espaçamento (t_{esp}) posterior à transmissão do pacote ACK. Sendo assim, l_{slot} pode ser calculado por

$$l_{slot} = t_{esp} + T_{DATA} + T_{int_{RX}} + T_{ACK} + T_{int_{TX}} + t_{esp}, \quad (4.7)$$

onde T_{DATA} e T_{ACK} representam o tempo de transmissão do pacote de dados e do pacote ACK, respectivamente. O T_{DATA} é dado por

$$T_{DATA} = \frac{(S_{header} + S_{DSN} + S_{payload_{max}} + 1) \times 8}{R_b}, \quad (4.8)$$

onde S_{DSN} e $S_{payload_{max}}$ representam o tamanho em *bytes* do DSN e da carga útil (*payload*) máxima do pacote de dados, que por sua vez pode ser obtido nos Parâmetros de Rede. O acréscimo de mais um byte no numerador da Equação (4.8) é referente ao 5º *byte* do pacote de dados. O número máximo de transmissões de dados que podem ocorrer durante o período ativo (Max_{TX}) é dado por

$$Max_{TX} = M \times (M_r - 1) \times \left(\left\lfloor \frac{T_{ActiveMax} - T_{BeaconMax}}{l_{slot}} \right\rfloor \right), \quad (4.9)$$

onde M , M_r , $T_{ActiveMax}$ e $T_{BeaconMax}$ representam o número de canais de frequência disponíveis para troca de dados, o número de antenas de recepção úteis de todas as estações partícipes da comunicação MIMO no período de troca de dados, o tempo do ciclo de trabalho máximo, e o tempo máximo de duração de um sinal de sincronização (BS), respectivamente. O Quadro 11 apresenta a sequência de *bytes* de um pacote de confirmação (ACK) do protocolo M2M-TEE.

Quadro 11 – Sequência de *bytes* do pacote ACK do protocolo M2M-TEE.

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4
Comprimento do pacote em <i>bytes</i> (n)	FCF	Identificador M2MTEE	Número sequencial de dados (DSN) recebido
Byte 5	Byte 6	Byte 7	
PAN ID do <i>cluster</i> da estação transmissora [4 <i>bits</i>] + ID da estação transmissora [4 <i>bits</i>]	FCS	FCS	

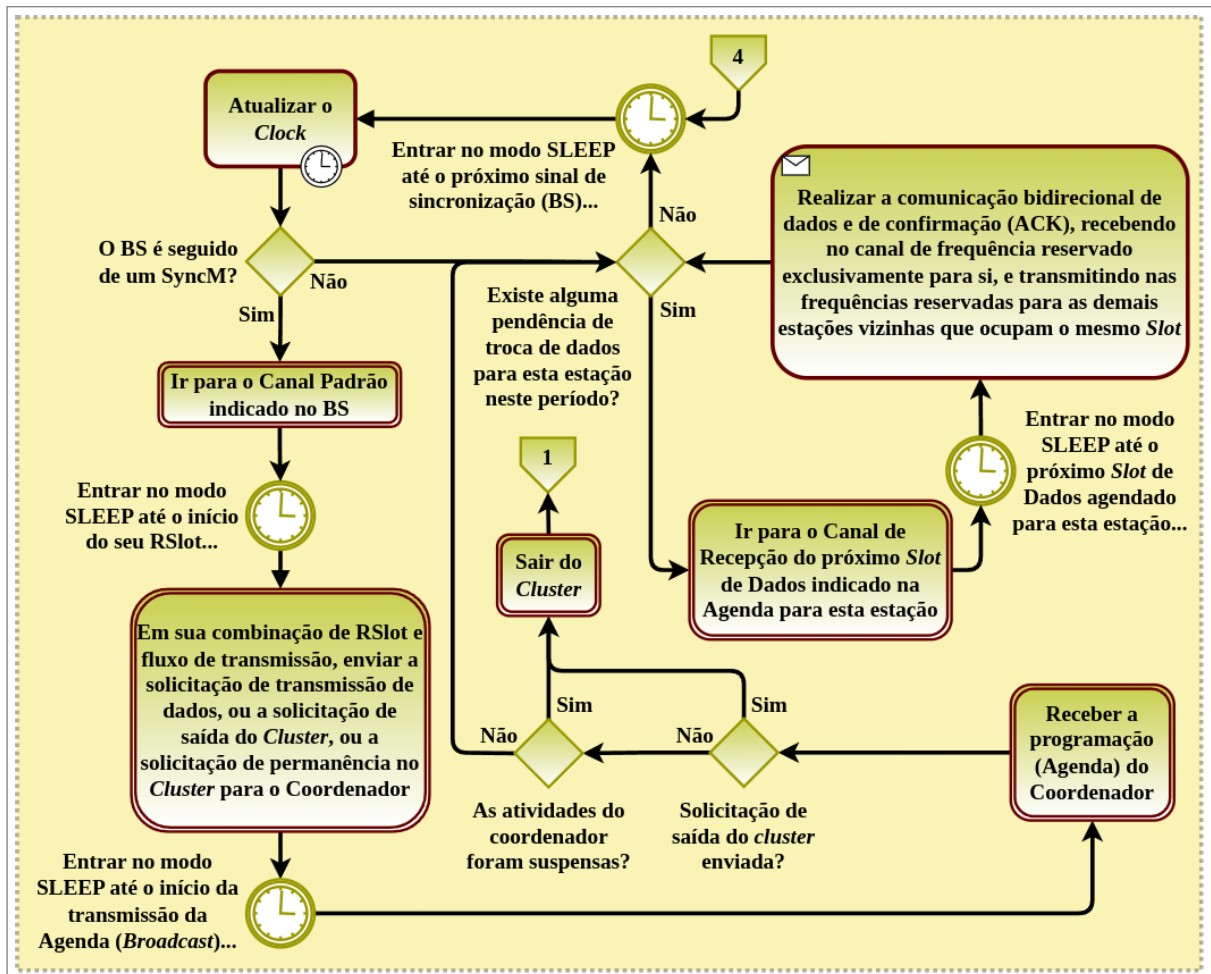
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ademais, a Figura 19 apresenta o quarto e último fluxograma que representa a sequência de eventos de um nó-folha logo depois que ele se registra no *cluster*.

4.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu todas as etapas necessárias para o funcionamento do protocolo M2M-TEE, assim como as premissas e restrições fundamentais para a implementação da proposta deste trabalho. Também foram apresentados na Seção 4.2 os Parâmetros de Rede e os Parâmetros do Módulo que devem ser considerados na configuração da aplicação, e na Seção 4.3 foram abordados os critérios de seleção dos candidatos a coordenadores.

Figura 19 – Fluxograma do nó-folha logo após o Período de Registro do protocolo M2M-TEE. (1) Conector de saída para a Figura 14. (4) Conector de entrada da Figura 18.



Fonte: O autor (2025)

O protocolo M2M-TEE aproveita as principais características do DyTEE e do M2MMAC, provendo a Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes e diminuindo a latência em detrimento de um leve aumento na sobrecarga da rede. A Seção 4.4 apresentou uma visão geral do M2M-TEE por meio de um diagrama temporal que exemplifica o funcionamento da fase de controle (SyncM) e de transmissão de dados. Na Seção 4.5 foram apresentados mais detalhes sobre cada uma das fases do SyncM, que são: O sinal de sincronização (BS), o período de registro de novas estações (REG), o período de requisição de vagas para transmissão de dados (RSlot), e a divulgação da agenda por meio de um pacote *broadcast* enviado pelo coordenador do *cluster*.

Por fim, na Seção 4.6, foram apresentados maiores detalhes sobre como funciona a fase de transmissão dos dados. O próximo capítulo irá apresentar o modelo do circuito transceptor e do consumo de energia do protocolo M2M-TEE.

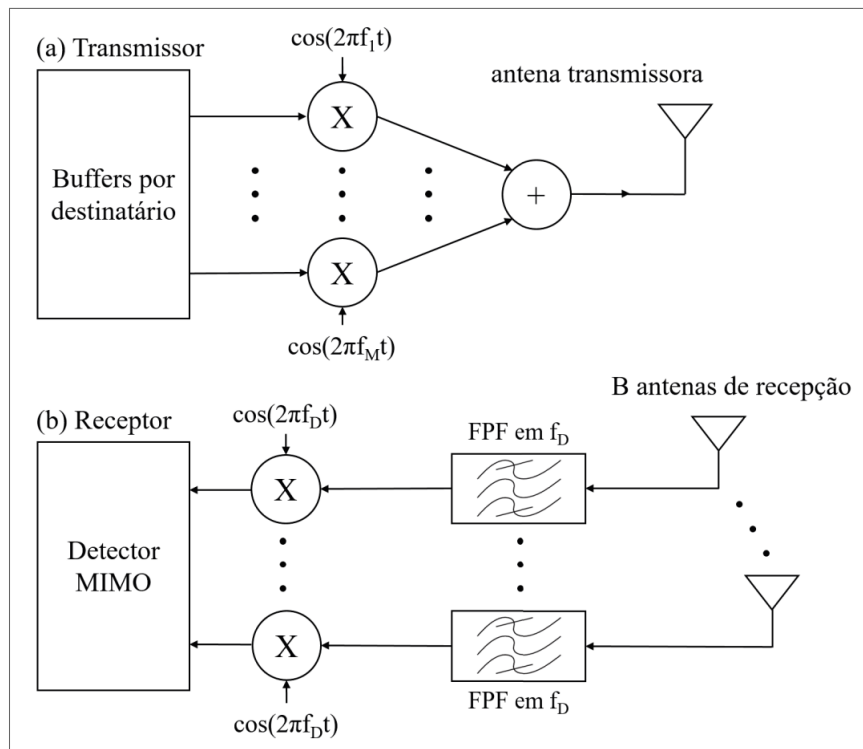
5 MODELO DO CIRCUITO TRANSCEPTOR E DO CONSUMO DE ENERGIA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta detalhes da camada física (PHY) que dão sustentabilidade aos processos relacionados à subcamada de enlace (MAC) do protocolo M2M-TEE. Dado que a proposta do M2M-TEE executa a comunicação muitos-para-muitos em múltiplos canais de frequência, assim como no protocolo M2MMAC, faz-se necessário apresentar um modelo de transceptor integrado que atenda a estas características. Em (GHOBAD, 2017), foi apresentado um diagrama simplificado que descreve a arquitetura de *hardware* dos blocos de transmissão e de recepção das estações que operam sob as regras do M2MMAC. A Figura 20 ilustra as estruturas que compõem o transceptor destas estações.

No bloco de transmissão (Figura 20(a)), os pacotes são armazenados em *buffers* separados para cada um dos destinatários. Ao sair do *buffer* para ser transmitido, o pacote passa por um modulador para que seja transmitido na frequência correspondente ao canal de recepção do destinatário. Posteriormente, todos os sinais são somados e transmitidos por meio de uma única antena. No bloco de recepção (Figura 20(b)), os sinais chegam em um conjunto de

Figura 20 – Arquitetura de *hardware* dos blocos de transmissão e de recepção para o protocolo M2MMAC.



Fonte: GHOBAD (2017)

antenas de recepção, e depois passam por um Filtro Passa-Faixa centrado na frequência da estação receptora. Logo depois, os sinais passam por demoduladores para que enfim sejam separados por um detector multiusuário MIMO. Todas as estações devem ser equipadas com ambos os blocos.

Neste capítulo será apresentada uma arquitetura semelhante, porém mais detalhada. Na Seção 5.2 será proposta uma nova arquitetura de *hardware* para os dispositivos do protocolo M2M-TEE que opera em um sistema cooperativo MIMO. Será apresentado na Seção 5.3 um modelo do consumo total de energia necessário para transmitir um *bit*. Por fim, na Seção 5.4, são apresentadas as considerações finais do capítulo.

5.2 ARQUITETURA DE HARDWARE PARA OS TRANSCEPTORES DO M2M-TEE

Conforme descrito no Capítulo 4, todas as estações do protocolo M2M-TEE devem estar equipadas com um transceptor integrado com cadeias paralelas de processamento de sinais, de maneira que seja possível transmitir mensagens simultâneas em diferentes frequências e receber múltiplas mensagens em um único canal de frequência, possibilitando a Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes (MPTR) (MORAES et al., 2013; GHOBAD, 2017; GHOBAD; MORAES, 2017). O circuito transceptor proposto neste trabalho baseou-se em (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004; CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005), porém foi modelado com múltiplas antenas de recepção e uma única antena de transmissão com consumo de energia variável de acordo com a distância entre as estações comunicantes. Dado que os dispositivos do M2M-TEE possuem uma única antena para transmissão das informações, não é possível empregar a técnica MIMO de diversidade espacial. O circuito apresentado em (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004; CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005) opera em um sistema cooperativo MIMO de canais *flat Rayleigh-fading* baseado no esquema de diversidade *Alamouti* (ALAMOUTI, 1998), o que propicia uma boa eficiência espectral, apesar do custo energético adicional proveniente dos demais componentes do circuito.

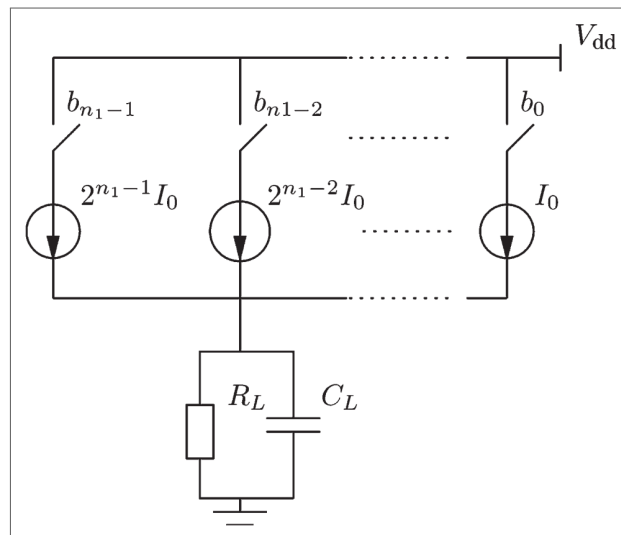
Graças aos largos avanços da tecnologia, hoje é possível atribuir a um único *chip* funcionalidades complexas de processamento de sinais. De acordo com (PAULRAJ; NABAR; GORE, 2003), sistemas MIMO podem prover altas taxas de transferência mediante os mesmos requisitos de desempenho de potência de transmissão e de Taxa de Erro de Bit (do inglês, *Bit Error Rate* (BER)) necessárias para sistemas SISO (do inglês, *Single-Input Single-Output*). Diante dos mesmos requisitos de vazão (*throughput*), também é possível que os sistemas MIMO consu-

mam uma menor quantidade de energia do que os sistemas SISO durante a transferência dos dados. Todavia, a depender da distância entre os dispositivos comunicantes, o consumo de energia do circuito pode ter uma relevância significativa no que se refere ao consumo total de energia, dado que a complexidade dos circuitos para os sistemas MIMO é maior que a dos sistemas SISO.

O consumo de energia do circuito inclui o consumo de todos os componentes utilizados ao longo da trajetória do sinal, sendo eles: O Conversor Analógico-Digital (do inglês, *Analog to Digital Converter* (ADC)), o Conversor Digital-Analógico (do inglês, *Digital to Analog Converter* (DAC)), o Sintetizador de Frequência (do inglês, *Frequency Synthesizer* (FS)) que gera sinais de Oscilador Local (do inglês, *Local Oscillator* (LO)), o *Mixer*, o Amplificador de Baixo Ruído (do inglês, *Low-Noise Amplifier* (LNA)), o Amplificador de Potência (do inglês, *Power Amplifier* (PA)), e o *baseband* DSP (do inglês, *Digital Signal Processing*). Porém, para evitar que o modelo fique demasiadamente complexo, os componentes do processamento de sinal da banda base, a saber, a codificação da fonte, a modelagem de pulso, e a modulação digital, serão desconsiderados. Além disso, deve-se presumir que o sistema não é codificado, de maneira que não sejam incluídos componentes de Código de Correção de Erro. Deve-se considerar um DAC de direção de corrente com peso binário (GUSTAVSSON; WIKNER; TAN, 2000), cujo circuito eletrônico simplificado está indicado na Figura 21.

Os termos b_i 's da Figura 21 representam as variáveis aleatórias independentes e binárias dos interruptores, com 50% de chances de terem resultado igual a 1, e 50% de terem resultado igual a 0. Os termos V_{dd} , I_0 e n_1 representam o valor da tensão (em volts) da fonte de

Figura 21 – Circuito do Conversor Digital-Analógico (DAC).

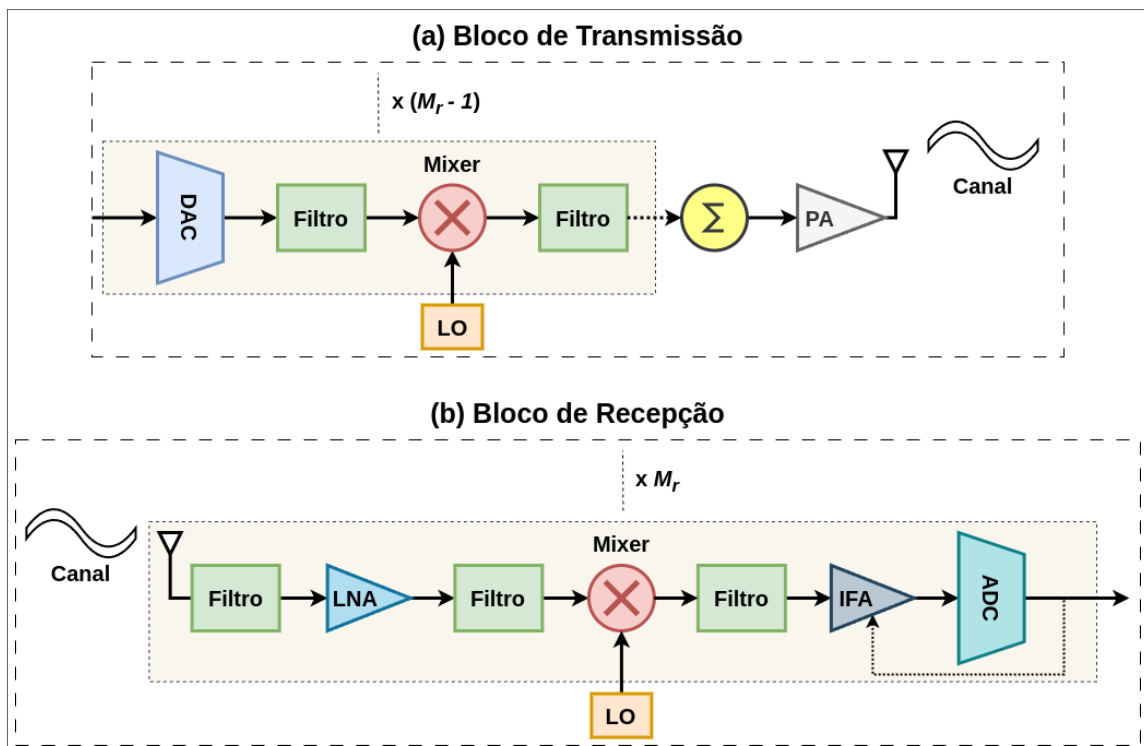


Fonte: CUI; GOLDSMITH; BAHAI (2005)

alimentação, o valor da corrente (em *ampères*) da fonte de corrente unitária correspondente ao *Bit* Menos Significativo (LSB), e o Número Efetivo de *Bits* (do inglês, *Effective Number of Bits* (ENOB)) que determina a precisão do DAC, respectivamente. A Figura 22 apresenta os diagramas de blocos dos circuitos transceptores para os dispositivos do protocolo M2M-TEE, onde M_r representa o número de antenas de recepção.

Todas as estações devem estar equipadas com ambos os circuitos, que são baseados em uma estrutura de transceptor de Frequência Intermediária-Baixa (do inglês, *Low-Intermediate Frequency* (Low-IF)), que é um tipo de transceptor de Rádio-frequência (RF) que mescla o sinal de RF em uma frequência diferente de zero e relativamente baixa antes de processá-lo. Considera-se que o Sintetizador de Frequência é compartilhado entre todos os trajetos de sinal da antena (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005). O bloco de transmissão (Figura 22(a)) deve ser equipado com $M_r - 1$ circuitos de conversão e modulação de sinal que representam o número máximo de fluxos de transmissão. O sinal deve ser modulado em cada circuito na frequência de transmissão correspondente ao seu nó receptor. Em primeiro lugar, o sinal deve ser convertido através de um Conversor Digital-Analógico e passar por um Filtro Passa-Baixa para finalmente ser modulado pelo *Mixer* e filtrado novamente. Por fim, todos os sinais são somados antes de chegarem ao Amplificador de Potência para serem transmitidos pelo canal. Um modelo

Figura 22 – Diagramas de blocos dos circuitos transmissor e receptor do protocolo M2M-TEE.



Fonte: O autor (2025)

semelhante de somador analógico pode ser encontrado em (AL-NSOUR; ABDEL-ATY-ZOHDY, 1999).

O bloco de recepção (Figura 22(b)) deve ser equipado com M_r circuitos de demodulação e conversão de sinal, e isso também inclui as M_r antenas de recepção. Este bloco pode suportar até $M_r - 1$ fluxos de recepção devido às restrições de detecção multiusuário MIMO (MU-MIMO) (KIM; LEE, 2015). Todavia, se o número de fluxos de recepção utilizáveis for menor que $M_r - 1$, então o número de circuitos que devem ser empregados será proporcional a esta mesma quantidade de fluxos. Os sinais que chegam do canal são filtrados por Filtros Passa-Banda centrados na frequência do nó receptor, passam pelo Amplificador de Baixo Ruído, e depois por Filtros de Suavização para serem demodulados pelos *Mixers*. Depois disso, os sinais são filtrados novamente até chegarem ao Amplificador de Frequência Intermediária cujos ganhos são ajustáveis, para que sejam finalmente convertidos pelo Conversor Analógico-Digital. Caso a estação utilize apenas um fluxo bidirecional, então seu modo de funcionamento deverá ser baseado no modelo SISO, onde será utilizado apenas um circuito de transmissão com uma única antena de transmissão, e um circuito de recepção com uma antena de recepção (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005).

5.3 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA DO M2M-TEE

O modelo de consumo de energia do protocolo M2M-TEE foi baseado em técnicas MIMO eficientes para minimizar o consumo total de energia necessário para transmitir um *bit* (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004). Para este trabalho, foi considerado um sistema de taxa fixa com esquema de Modulação Binária por Deslocamento de Fase (do inglês, *Binary Phase Shift Keying* (BPSK)), e de acordo com (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004), o consumo médio total de potência do trajeto do sinal pode ser dividido em dois componentes: o consumo de potência do amplificador de potência (P_{PA}), e o consumo de potência de todos os outros blocos do circuito (P_c). O termo P_{PA} depende da potência de transmissão (P_{out}). Se os canais sofrerem uma perda de caminho quadrático, então P_{out} pode ser dado por

$$P_{out} = \bar{E}_b R_b \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f, \quad (5.1)$$

em que $\bar{E}_b$, R_b , d , G_t , G_r , λ , M_l e N_f são os valores da energia por *bit* necessária no receptor mediante uma determinada Taxa de Erro de Bit, da taxa de *bits*, da distância de transmissão, do ganho da antena de transmissão, do ganho da antena de recepção, do comprimento de

onda da portadora em metros, da margem de *link* que compensa as variações do processo de *hardware* e outras interferências ou ruídos em segundo plano adicionais, e da figura de ruído do receptor, respectivamente (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004). O termo N_f pode ser definido como

$$N_f = N_r/N_0, \quad (5.2)$$

em que N_0 e N_r representam os valores da Densidade Espectral de Potência (do inglês, *Power Spectral Density* (PSD)) do ruído térmico unilateral na temperatura ambiente, e da Densidade Espectral de Potência do ruído efetivo total na entrada do receptor, respectivamente. O termo P_{PA} pode ser calculado por

$$P_{PA} = (1 + \alpha)P_{out} + P_{add}, \quad (5.3)$$

em que $\alpha = (\xi/\eta) - 1$, com ξ sendo o valor da Relação de Ponto Máximo-Médio (do inglês, *Peak-to-Average Ratio* (PAR)) e η sendo o valor da eficiência de drenagem do amplificador de potência de Rádio-frequência (RF) (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004), e P_{add} é o valor de consumo de potência para o somador analógico de frequência da multiportadora. O termo ξ pode ser calculado por

$$\xi = 3 \left(\frac{\sqrt{M_{BPSK}} - 1}{\sqrt{M_{BPSK}} + 1} \right), \quad (5.4)$$

em que M_{BPSK} representa o tamanho da constelação para o esquema de modulação BPSK. Em contrapartida, o termo P_c pode ser calculado por

$$P_c \approx (M_r - 1) \times (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt}) + 2P_{syn} + M_r \times (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filr} + P_{ADC}), \quad (5.5)$$

em que P_{DAC} , P_{mix} , P_{filt} , P_{syn} , P_{LNA} , P_{IFA} , P_{filr} e P_{ADC} são os valores de consumo de potência para o Conversor Digital-Analógico (DAC), o *mixer*, os filtros ativos do bloco transmissor, o Sintetizador de Frequência (FS), o Amplificador de Baixo Ruído (LNA), o Amplificador de Frequência Intermediária (IFA), os filtros ativos do bloco receptor, e o Conversor Analógico-Digital (ADC), respectivamente. O consumo de potência do DAC apresentado na Figura 21 é composto de dois termos principais, que são: O consumo de potência estático (P_s), e o consumo de potência dinâmico (P_d) (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005). O termo P_s é afetado principalmente pelas fontes de corrente, e pode ser calculado por

$$\begin{aligned} P_s &= V_{dd} I_0 E \left[\sum_{i=0}^{n_1-1} 2^i b_i \right] \\ &= \frac{1}{2} V_{dd} I_0 (2^{n_1} - 1). \end{aligned} \quad (5.6)$$

O consumo de potência dinâmico ocorre durante o processo de transição entre os pulsos digitais (símbolos), ou seja, quando ocorre a comutação do interruptor de ligado para desligado, ou vice-versa. Em uma aproximação de primeira ordem, o valor médio do termo P_d pode ser calculado por

$$P_d \approx \frac{1}{2} n_1 C_p f_s V_{dd}^2, \quad (5.7)$$

em que C_p representa a capacitância parasita de cada interruptor, e o termo $(1/2)$ representa o valor do fator de comutação referente à mudança de *status* do interruptor para cada transição de símbolo, cuja probabilidade é de 50% (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005). O termo f_s representa a frequência de amostragem, e para a estrutura *low*-IF do modelo proposto na Seção 5.2, f_s pode ser calculado por

$$f_s = 2(2B + f_{cor}), \quad (5.8)$$

em que B representa a largura de banda dada em *Hertz*, e f_{cor} representa a frequência de corte do ruído rosa (LEE, 2003). O ruído rosa é um tipo de ruído eletrônico com uma Densidade Espectral de Potência (PSD) que diminui com o aumento da frequência, seguindo uma relação $1/f$. A expressão $B + f_{cor}$ representa o termo f_{IF} , que é o menor valor possível para a IF de maneira que o sinal não seja severamente afetado pelo ruído rosa (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005). Sendo assim, o termo P_d pode ser reescrito como

$$P_d \approx n_1 C_p (2B + f_{cor}) V_{dd}^2. \quad (5.9)$$

Isto posto, o consumo total de potência do Conversor Digital-Analógico (DAC) pode ser representado por

$$\begin{aligned} P_{DAC} &\approx \beta (P_s + P_d) \\ &\approx \beta \left(\frac{1}{2} V_{dd} I_0 (2^{n_1} - 1) + n_1 C_p (2B + f_{cor}) V_{dd}^2 \right), \end{aligned} \quad (5.10)$$

em que β representa um fator de correção para incorporar alguns efeitos de segunda ordem (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005). De acordo com (LAUWERS; GIELEN, 2002), que propõe um modelo de Conversor Analógico-Digital (ADC) de taxa de *Nyquist*, o consumo de potência do ADC pode ser calculado por

$$P_{ADC} \approx \frac{3V_{dd}^2 L_{min} (2B + f_{cor})}{10^{-0,1525n_2+4,838}}, \quad (5.11)$$

em que L_{min} e n_2 representam o comprimento mínimo do canal para a tecnologia CMOS, e o ENOB que determina a precisão do ADC, respectivamente. O consumo total médio de energia

por *bit* pode ser calculado por

$$E_{bt} = (P_{PA} + P_c)/R_b. \quad (5.12)$$

De acordo com (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004), os sistemas MIMO podem atingir uma probabilidade média de erro menor do que os sistemas SISO sob a mesma provisão de energia de transmissão devido ao ganho da diversidade. No entanto, os sistemas MIMO tendem a ser menos eficientes em termos de energia do que os sistemas SISO se for considerado não apenas a energia de transmissão, mas também o consumo de energia do circuito, uma vez que os sistemas MIMO têm circuitos integrados mais complexos. Quanto menor o número de componentes do circuito e maior a distância entre os nós de comunicação, maior a vantagem dos sistemas MIMO sobre os sistemas SISO. De acordo com o limite de *Chernoff* no regime de alta Relação Sinal-Ruído (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)) (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004), é possível descrever a Taxa de Erro de Bit (BER) média da seguinte forma

$$\bar{P}_b \leq \left(\frac{\bar{E}_b}{M_t N_0} \right)^{-M_t}, \quad (5.13)$$

em que M_t representa o número de antenas de transmissão. Como o bloco de transmissão tem apenas uma única antena, pode-se inferir um limite superior para a energia necessária por *bit* da seguinte forma

$$\bar{E}_b \leq N_0/\bar{P}_b. \quad (5.14)$$

Agora é possível calcular o limite superior do consumo total de energia por *bit* para os sistemas MISO (do inglês, *Multiple-Input Single-Output*) e SISO de acordo com (5.1) e (5.12). Aproximando o limite como uma igualdade (CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004), o termo E_{bt} pode ser calculado por

$$E_{bt} = (1 + \alpha) \frac{N_0}{\bar{P}_b} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f + \frac{P_{add} + P_c}{R_b}. \quad (5.15)$$

É importante destacar que a equação (5.15) considera o consumo total de energia por *bit* em função do consumo de energia de todos os blocos do transceptor integrado. O consumo necessário para transmitir um *bit* ($E_{bt_{TX}}$) depende apenas da potência de transmissão (P_{PA}) e do consumo de potência do circuito do bloco de transmissão ($P_{c_{TX}}$). Sendo assim, $E_{bt_{TX}}$ pode ser escrito por

$$E_{bt_{TX}} = (1 + \alpha) \frac{N_0}{\bar{P}_b} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f + \frac{P_{add} + P_{c_{TX}}}{R_b}, \quad (5.16)$$

em que $P_{c_{TX}} = (M_r - 1) \times (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt}) + P_{syn}$. Por outro lado, o consumo necessário para receber um *bit* ($E_{bt_{RX}}$) depende apenas do consumo de potência do circuito do bloco de

recepção ($P_{c_{RX}}$), e pode ser calculado por

$$E_{bt_{RX}} = P_{c_{RX}}/R_b, \quad (5.17)$$

em que $P_{c_{RX}} = M_r \times (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filr} + P_{ADC}) + P_{syn}$.

5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou o modelo do circuito transceptor integrado e do consumo de energia para o novo protocolo proposto neste trabalho. O circuito opera em um sistema cooperativo MIMO baseado no esquema de diversidade *Alamouti*, sendo composto pelo bloco de transmissão e de recepção. O esquemático do bloco de transmissão deve ser equipado com uma única antena de transmissão e $M_r - 1$ circuitos de conversão e modulação do sinal que são utilizados para os $M_r - 1$ fluxos de transmissão, enquanto que no bloco de recepção são necessários M_r circuitos de demodulação e conversão do sinal, incluindo também as M_r antenas de recepção. A estação também poderá operar no modelo SISO de comunicação com um único fluxo bidirecional, sendo utilizados apenas um circuito e uma antena em ambos os blocos do transceptor integrado.

O modelo do consumo de energia foi baseado em técnicas MIMO eficientes para minimizar o consumo total de energia necessário para transmitir um *bit*, podendo ser dividido em dois componentes: o consumo de energia do amplificador de potência (P_{PA}), e o consumo de energia de todos os outros blocos do circuito (P_c). O modelo proposto considerou um sistema de taxa fixa com esquema de Modulação Binária por Deslocamento de Fase (BPSK), e também a Taxa de Erro de Bit (BER) no regime de alta Relação Sinal-Ruído (SNR), sendo calculado o limite superior do consumo total de energia por *bit* para os sistemas SISO (para os casos onde se utiliza apenas um fluxo bidirecional) e MISO, haja vista que o modelo proposto utiliza múltiplas antenas de recepção e uma única antena de transmissão. O próximo capítulo apresentará os resultados das simulações, com foco especial no consumo de energia das estações do protocolo proposto e dos protocolos correlatos.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

6.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a avaliação analítica de desempenho do protocolo M2M-TEE em comparação com alguns dos protocolos correlatos abordados no Capítulo 3. A Seção 6.2 expõe a metodologia utilizada para a realização das simulações, que foram executadas por meio de eventos temporais discretos no MATLAB. Também são apresentadas as equações utilizadas para a avaliação de desempenho no que se refere à vazão (*throughput*) total do *cluster*, o percentual de sobrecarga (*overhead*) da rede, e a latência média por pacote. A geração das mensagens com carga útil são tratadas como eventos de um processo de *Poisson* que ocorrem aleatoriamente, o que aproxima a simulação de um caso real. Mais adiante, também são apresentados os parâmetros utilizados para a condução das simulações.

Além disso, os resultados das simulações são discutidos na Seção 6.3. São apresentados os gráficos com os resultados no que diz respeito ao consumo total de energia da rede, ao consumo médio de energia por *bit* de carga útil para cada estação, ao consumo médio de potência por estação, à porcentagem do consumo médio de energia do coordenador em relação ao consumo total do *cluster*, à taxa de transferência total da rede, à latência média por mensagem de carga útil, e à sobrecarga total da rede. Todos os resultados foram apresentados em função do intervalo médio entre chegadas de mensagens.

6.2 METODOLOGIA

Embora as características mais marcantes do M2M-TEE, como comunicação multicanal e muitos-para-muitos, se assemelhem aos protocolos do segundo grupo apresentado no Capítulo 3, o desempenho e eficiência do M2M-TEE são comparados com os protocolos legados do padrão IEEE 802.15.4 que fazem parte do primeiro grupo. Isto porque o M2M-TEE é mais adequado para aplicações de RSSFs com *payloads* menores, com pequenas distâncias entre os nós, que possuem um nó coordenador, e que demandam alta eficiência energética. Dito isto, foram considerados na avaliação de desempenho os protocolos DyTEE e S-MAC. Além disso, também foi considerado o *Slotted ALOHA* por se tratar do primeiro sistema de comunicação de dados sem fio que divide a comunicação em *slots* de tempo com duração fixa, e que corresponde ao tempo de transmissão para um pacote de dados. De maneira geral, a avaliação

análítica de desempenho foi realizada em termos de consumo de energia, vazão (*throughput*), sobrecarga (*overhead*) e latência.

Foi utilizado o MATLAB (MATHWORKS, 2022), um *software* de programação interativa focado em cálculos numéricos, para a realização das simulações por meio de eventos temporais discretos, onde foram implementados os roteiros de execução dos protocolos DyTEE, S-MAC e *Slotted ALOHA*, e do protocolo proposto neste trabalho. De modo geral, os eventos são executados a cada $100\mu s$ com o objetivo de reproduzir a operação real de cada um dos protocolos, desde o início do período ativo até o fim do período de dormência, completando assim um intervalo entre *beacons*. Todavia, o processo de execução de cada protocolo só deverá terminar quando o propósito da aplicação for alcançado, que no contexto das simulações apresentadas neste trabalho seria a transmissão de todos os pacotes de dados do *cluster* (N_{data}) para as suas respectivas estações destinatárias. Com o conhecimento do tamanho médio da carga útil (*payload*) de um pacote de dados ($S_{payload}$) e do tempo necessário para que ocorram as transmissões de todos os pacotes de dados no *cluster* (T_{TOTAL}), a vazão final da rede M2M-TEE, dada em *bps*, pode ser calculada por

$$Throughput = \frac{S_{payload} \times N_{data} \times 8}{T_{TOTAL}}. \quad (6.1)$$

De acordo com (GHOBAD, 2017), a sobrecarga (*overhead*) da rede pode exercer grande impacto no desempenho de cada protocolo em termos de vazão. Por este motivo, faz-se necessário que seja considerado apenas a carga útil na avaliação de desempenho da vazão, deixando de lado os cabeçalhos dos pacotes. Sendo assim, pode-se afirmar que esta avaliação considera apenas o *goodput* da transmissão. Por outro lado, é possível avaliar a sobrecarga da rede separadamente, que por sua vez é dada em um valor percentual (%) e pode ser calculada a seguir

$$Overhead = \frac{S_{controlPKT_{TOTAL}}}{S_{controlPKT_{TOTAL}} + (S_{payload} \times N_{data})} \times 100, \quad (6.2)$$

em que $S_{controlPKT_{TOTAL}}$ representa o tamanho total, em *bytes*, de todos os pacotes de controle e de dados da rede, sem considerar o *payload* dos pacotes de dados. Deste modo, o termo $S_{controlPKT_{TOTAL}}$ pode ser dado por

$$S_{controlPKT_{TOTAL}} = S_{RTR_{TOTAL}} + S_{RACK_{TOTAL}} + S_{RSlot_{TOTAL}} + S_{broadcast_{TOTAL}} + N_{data}(S_{DATA} - S_{payload}) + N_{data}S_{ACK}, \quad (6.3)$$

em que $S_{RTR_{TOTAL}}$, $S_{RACK_{TOTAL}}$, $S_{RSlot_{TOTAL}}$ e $S_{broadcast_{TOTAL}}$ representam os tamanhos totais de todos pacotes RTRs, RACKs, RSlots e *broadcasts* enviados até o término do propósito

da aplicação, respectivamente. Já os termos S_{DATA} e S_{ACK} representam o tamanho dos pacotes de dados e de confirmação (ACK), respectivamente. É importante notar que os tamanhos dos pacotes *RSlot* e *broadcast* podem variar, e que a configuração da rede no período SyncM deve ser estabelecida com base na topologia estrela.

Grosso modo, as gerações dos pacotes que são transmitidos na fase de dados representam eventos de um processo de *Poisson* que ocorrem ao acaso dentro de um intervalo de tempo $T_{genesis}$. Seja W a variável aleatória de *Poisson* que contabiliza o número de pacotes de dados criados no intervalo $T_{genesis}$. Estes pacotes armazenam as mensagens com carga útil (*payload*) que podem ser geradas nas camadas superiores da rede por qualquer uma das estações do *cluster*, incluindo até mesmo o coordenador. Considera-se também que o número médio de mensagens geradas no intervalo $T_{genesis}$ é representado pelo termo N_{data} , e que o período $T_{genesis}$ pode ser dividido em subintervalos com comprimentos suficientemente pequenos, de maneira que seja possível garantir a ocorrência de apenas uma geração de mensagem com carga útil no final de cada subintervalo. Cada evento é independente dos outros subintervalos, o que testifica que o processo também segue uma distribuição de *Poisson*. Cada subintervalo representa o período entre chegadas (ou gerações) de duas mensagens consecutivas, que também representa uma variável aleatória Z de interesse. Cada período entre chegadas de mensagens segue uma distribuição exponencial, e pode ter qualquer valor aleatório com média constante equivalente a $\Delta t_{message_arrival}$ milissegundos. Existe um atraso (latência) que deve ser considerado desde a concepção do pacote de dados até o momento de sua recepção por parte da estação destinatária. No geral, a latência de cada um dos N_{data} pacotes pode ser diferente. Sendo assim, faz-se necessário calcular a latência média por pacote, que pode ser dada por

$$Latency_{AVG} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{data}} LTC_j}{N_{data}}, \quad (6.4)$$

em que LTC_j representa a latência do j -ésimo pacote de dados, com $1 \leq j \leq N_{data}$. A avaliação analítica de desempenho foi aplicada para períodos aleatórios entre chegadas de mensagens, tendo por base diferentes valores da média $\Delta t_{message_arrival}$. Estes valores são indicados na sequência a seguir (em milissegundos):

$\Delta t_{message_arrival} = [0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000]$.

Cada valor representa uma coordenada no eixo das abscissas dos gráficos que serão apre-

sentados na próxima seção durante a discussão dos resultados. Todos os pontos plotados, provenientes do cruzamento entre as coordenadas dos eixos das abscissas e das ordenadas, possuem marcadores com barras de erro com um intervalo de confiança de 95%, e que foram calculadas com base na média e desvio padrão para 10 amostras. Foi utilizada a função inversa da Função de Distribuição Acumulada (FDA) da distribuição *t-Student* para o cálculo do fator de multiplicação do intervalo de confiança. Para manter as mesmas condições de consumo de energia durante as simulações, todos os dispositivos dos protocolos correlatos que serão avaliados na próxima seção devem ser equipados com o mesmo modelo de transceptor apresentado no Capítulo 5, mesmo que eles trabalhem somente no modelo de comunicação SISO. Considera-se como premissa que a distância média entre as estações (d) de ambos os protocolos é de 10 metros, o que é compatível com as redes LR-WPAN (LAN/MAN Standards Committee, 2020). Além disso, as condições de rede para as simulações do protocolo M2M-TEE são as mesmas apresentadas na Figura 15, e a menos que seja indicado de outra forma, os parâmetros utilizados para a condução da avaliação analítica de desempenho podem ser encontrados na Tabela 1, onde P_{sleep} e DC representam o valor do consumo de potência das estações no modo *SLEEP* e o ciclo de trabalho, respectivamente. Os valores dos parâmetros da Tabela 1 correspondem aos valores apresentados em (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002; GUIMARAES; BAUCHSPIESS; MORAES, 2013; CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2004; CUI; GOLDSMITH; BAHAI, 2005; AL-NSOUR; ABDEL-ATY-ZOHDY, 1999).

Os parâmetros escolhidos podem ser alterados a depender das necessidades da aplicação, sendo possível configurar o protocolo de maneira que se obtenha resultados para outro propósito específico. Considera-se que o consumo de potência no estado ocioso (P_{idle}) é equivalente ao consumo de potência do circuito do bloco de recepção (P_{cRX}). Deste modo, o consumo de energia dos dispositivos no estado ocioso (E_{idle}) pode ser calculado por

$$E_{idle} = P_{cRX} \times \Delta t_{idle}, \quad (6.5)$$

em que Δt_{idle} representa o intervalo de tempo no qual o dispositivo se manteve no estado ocioso. Dado que os protocolos M2M-TEE e DyTEE operam conforme o agendamento de vagas do coordenador, todas as estações registradas no *cluster* sabem o momento exato em que deverão participar da comunicação, inibindo desta forma a escuta ociosa. O único momento em que existe a possibilidade das estações entrarem no estado ocioso (*idle listening*) é no período de registro (REG), sendo esta a única fase de contenção com risco de colisão entre os pacotes RTR. De maneira semelhante, o consumo de energia dos dispositivos no modo *SLEEP*

Tabela 1 – Parâmetros da Avaliação de Desempenho

Sigla do Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Valor do Parâmetro
C	Número de estações ativas na rede	10
M	Número de canais de frequência não sobrepostos disponíveis	3
M_r	Número de antenas de recepção da estação	3
N_{data}	Número total de mensagens de dados geradas na rede	20
B	Largura de banda	10 kHz
R_b	Taxa de transmissão do rádio	20 kbps
$S_{payload}$	Tamanho médio da carga útil (<i>payload</i>) de um pacote de dados	100 Bytes
$T_{ActiveMax}$	Tempo máximo do ciclo de trabalho	115 ms
N_0	Valor da Densidade Espectral de Potência (PSD) do ruído térmico unilateral na temperatura ambiente	-171 dBm/Hz
$n_1=n_2$	Número Efetivo de Bits (ENOB)	10
$G_t G_r$	Ganho das antenas de transmissão/recepção	5 dBi
$P_{filt} = P_{filr}$	Consumo de potência dos filtros ativos dos blocos transmissor/receptor	2,5 mW
P_{sleep}	Consumo de potência da estação no modo <i>SLEEP</i>	15 μ W
P_{mix}	Consumo de potência do <i>mixer</i>	30,3 mW
P_{IFA}	Consumo de potência do Amplificador de Frequência Intermediária (IFA)	3 mW
P_{LNA}	Consumo de potência do Amplificador de Baixo Ruído (LNA)	20 mW
P_{syn}	Consumo de potência do Sintetizador de Frequência (FS)	50 mW
P_{add}	Consumo de potência do somador analógico de frequência da multiportadora	0,5 mW
$\bar{P}_b$	Taxa de Erro de Bit (BER) média	10^{-3}
DC	Ciclo de trabalho	10%
f_c	Frequência da portadora	2,4 GHz
f_{cor}	Frequência de corte do ruído rosa	1 MHz
β	Fator de correção para incorporar alguns efeitos de segunda ordem no cálculo de P_{DAC}	1
η	Valor da eficiência de drenagem do amplificador de potência de Rádio-frequência (RF)	0,35
V_{dd}	Tensão da fonte de alimentação do Conversor Digital-Analógico (DAC)	3 V
I_0	Corrente da fonte de corrente unitária correspondente ao <i>Bit</i> Menos Significativo do Conversor Digital-Analógico (DAC)	10 μ A
M_l	Valor da margem de link que compensa as variações do processo de <i>hardware</i>	40 dB
N_f	Valor da figura de ruído do nó receptor	10 dB
C_p	Capacitância parasita para cada interruptor do Conversor Digital-Analógico (DAC)	1 pF
L_{min}	Comprimento mínimo do canal para a tecnologia CMOS	0,5 μ m

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

(E_{sleep}) pode ser calculado por

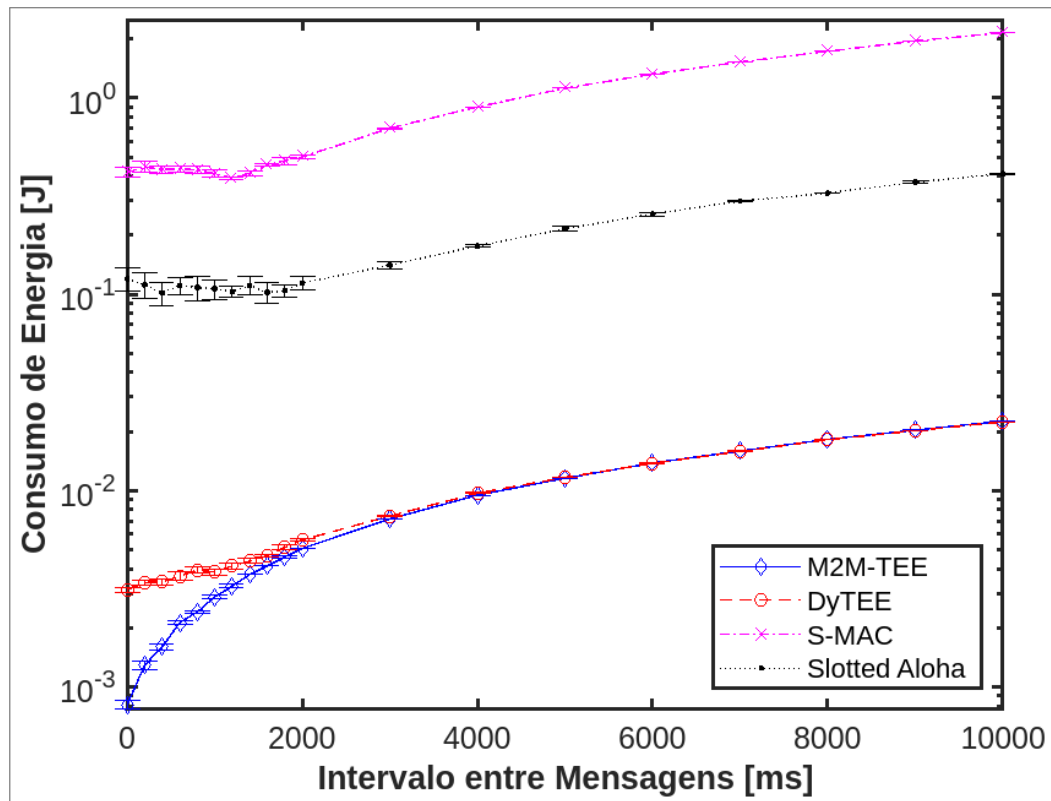
$$E_{sleep} = P_{sleep} \times \Delta t_{sleep}, \quad (6.6)$$

em que Δt_{sleep} representa o intervalo de tempo no qual o dispositivo se manteve no modo *SLEEP*.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 23 apresenta o consumo total de energia do *cluster* na escala *log* em função do tempo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$). Por utilizar mecanismos de contenção, o S-MAC desperdiça mais energia no período de escuta ociosa e nas ocorrências de colisões de pacotes. Como o protocolo S-MAC realiza o acesso ao canal por meio de pacotes de controle RTS/CTS, seu consumo de energia torna-se maior que o consumo do *Slotted ALOHA* para transferências de dados com carga útil pequena. Além dos pacotes de controle convencionais e dos pacotes de confirmação (ACK), o S-MAC ainda utiliza os pacotes de sincronização (SYNC) que são transmitidos em vagas com contenção, e que também podem

Figura 23 – Consumo total de energia da rede *versus* intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).



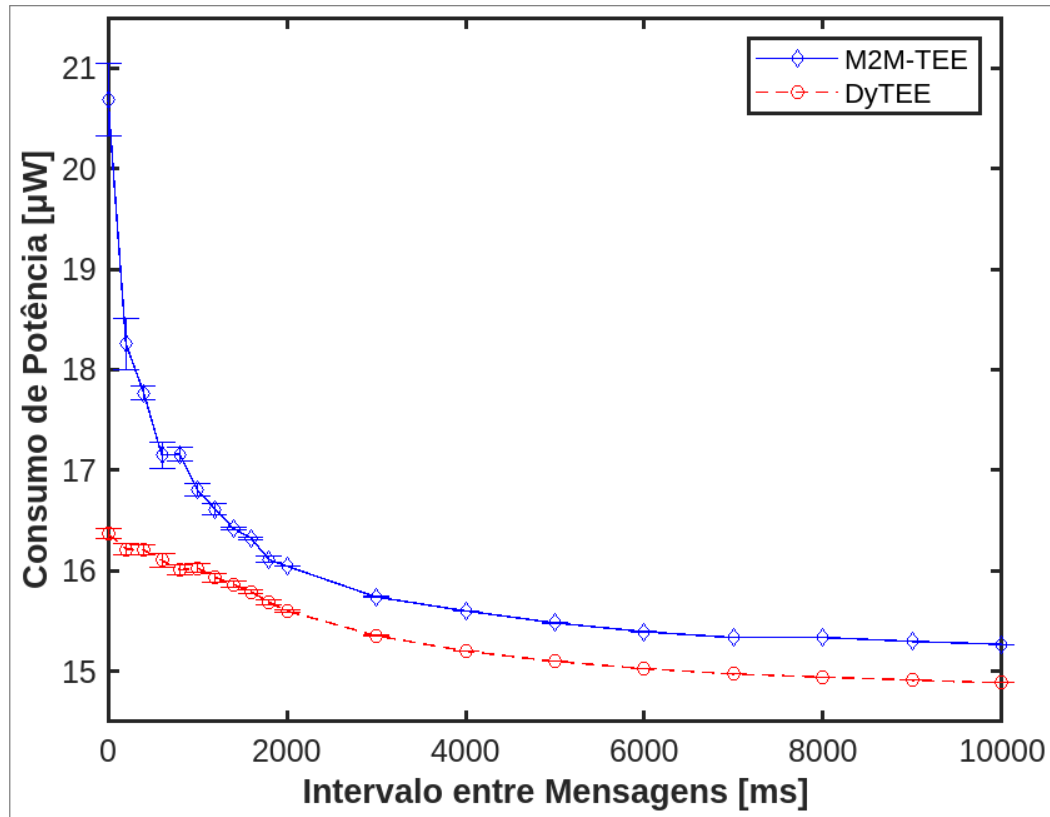
Fonte: O autor (2025)

sofrer colisões. Outro ponto a ser considerado para o S-MAC é que todas as estações do grupo ficam operantes nos períodos de atividade do protocolo. Por estas razões, o gasto energético médio para o S-MAC é maior que nos demais protocolos, até mesmo em relação ao *Slotted ALOHA* que não verifica se o canal está ocupado antes de transmitir os dados no início de cada *slot*.

Por outro lado, o M2M-TEE e o DyTEE se destacam em relação aos demais protocolos correlatos por possibilitarem a transmissão dos pacotes de controle e de dados sem que haja colisões. O M2M-TEE se destaca ainda mais para taxas de chegadas de mensagens mais baixas. Com $\Delta t_{message_arrival} \leq 3000ms$, as estações geram as N_{data} mensagens de dados mais rapidamente. Com isso, o número de ocorrências do período SyncM para o M2M-TEE será menor, fazendo com que o protocolo apresente melhor desempenho até mesmo em relação ao DyTEE em termos de gasto energético, já que existem mais recursos disponíveis devido à comunicação muitos-para-muitos em múltiplos canais de frequência na fase de dados. Para intervalos entre chegadas de mensagens a partir de $3000ms$, os recursos adicionais do M2M-TEE começam a não fazer tanta diferença quando os seus resultados são comparados com o DyTEE. De maneira geral, para $\Delta t_{message_arrival} \geq 3000ms$, o número de recursos utilizados para troca de dados em ambos os protocolos tornam-se equivalentes, o que justifica os resultados semelhantes no gráfico para intervalos entre chegadas de mensagens maiores que $3000ms$.

A Figura 24 apresenta o consumo médio de potência por estação para os protocolos M2M-TEE e DyTEE, que por sua vez foram calculados com base no consumo médio de energia por estação dividido pelo tempo total necessário para finalizar as transferências de todas as N_{data} mensagens de dados. Para assegurar a Transmissão e Recepção de Múltiplos Pacotes (MPTR), o M2M-TEE deve operar em um sistema de comunicação MIMO. Com isso, é de se esperar que o consumo de potência do circuito (P_c) para sistemas MIMO seja maior que o consumo para comunicações SISO. De fato, quanto maior a demanda de transferência de dados, mais recursos deverão ser aplicados, e como consequência o consumo do circuito será maior. Quanto maior o número de fluxos simultâneos, maior será a quantidade de blocos utilizados do circuito. Pode-se observar que, quanto menor for a taxa de geração de mensagens, maior será o consumo de potência médio das estações do M2M-TEE, o que corrobora com o modelo apresentado na Seção 5.3. Outro ponto a ser considerado é que quanto maior for a quantidade de recursos aplicados pelas estações do M2M-TEE, menor será o tempo necessário para finalizar todas as transferências. Por isso, quanto menor for os intervalos médios de chegadas entre mensagens,

Figura 24 – Consumo médio de potência por estação *versus* intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).

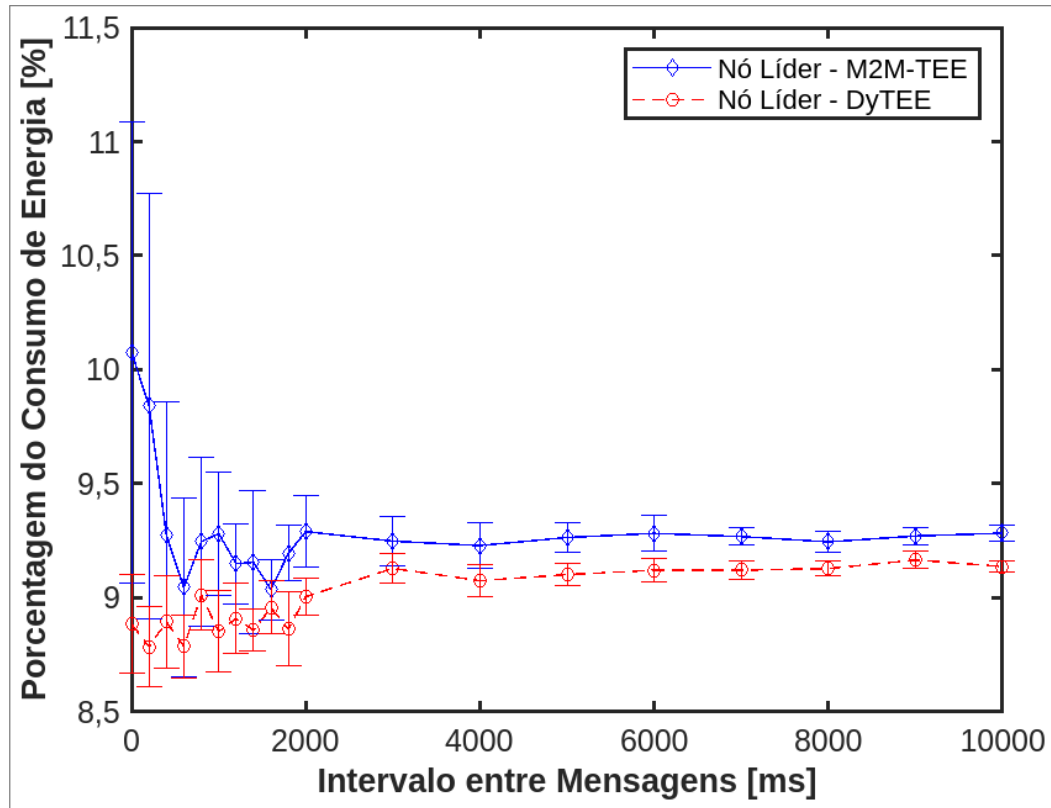


Fonte: O autor (2025)

maior será o consumo médio de potência do M2M-TEE em relação ao DyTEE. De fato, é possível perceber que, para $\Delta t_{message_arrival} \geq 2000ms$, a diferença de potência entre ambos os protocolos é menor e constante.

A Figura 25 apresenta o percentual do consumo de energia dos coordenadores do M2M-TEE e do DyTEE em relação ao consumo total do *cluster* *versus* o tempo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$). É de se esperar que o consumo percentual do coordenador em relação aos demais nós-folha do grupo seja maior devido à troca de pacotes de controle no período SyncM. Contudo, isso pode ser facilmente resolvido por meio da alternância da função de coordenador entre as estações do *cluster*, ou pela alimentação do nó líder via rede elétrica. Neste último caso, não se faz necessário alimentar o nó líder com uma bateria, pois a rede elétrica garante a estabilidade do coordenador no grupo. O coordenador do M2M-TEE tem maior consumo percentual de energia em relação ao coordenador do DyTEE devido ao aumento da capacidade de transmissão e recepção de pacotes de dados e de controle simultâneos, o que também contribui com o aumento da sobrecarga (*overhead*) necessária para a sua operação. Um ponto importante a ser observado é que existe uma disparidade maior

Figura 25 – Porcentagem do consumo médio de energia do nó líder em relação ao consumo total do *cluster* versus intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).

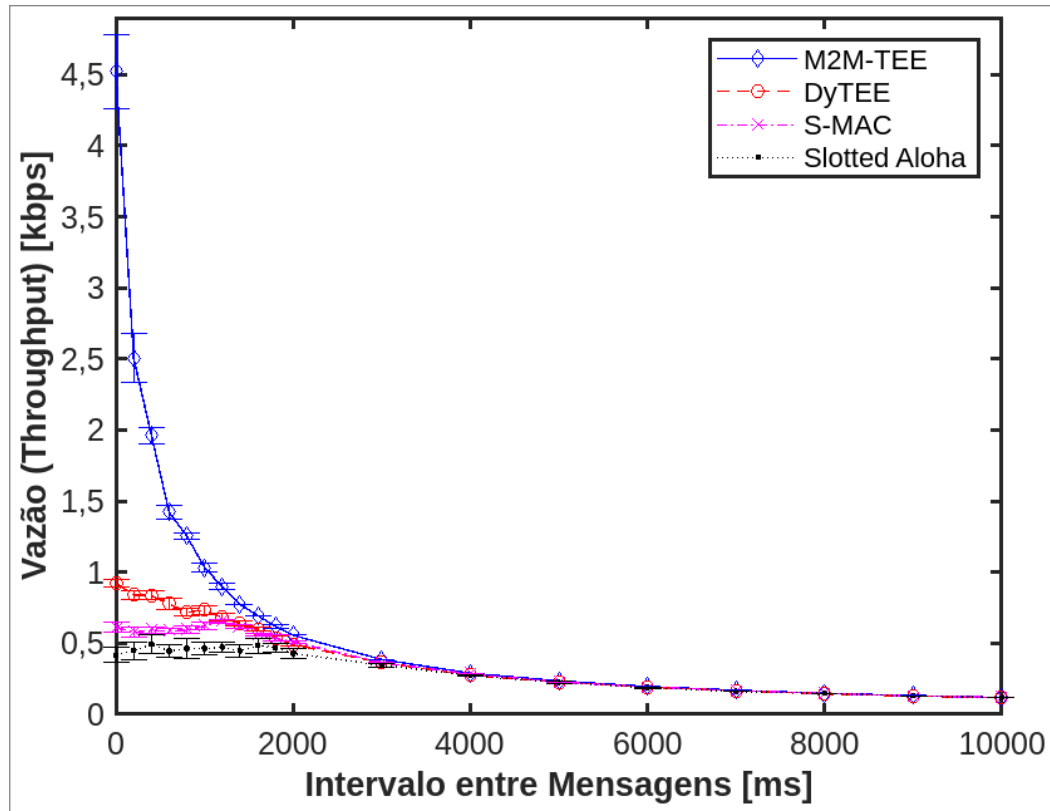


Fonte: O autor (2025)

entre os resultados de ambos os protocolos para intervalos entre chegadas de mensagens mais curtos. Isso mostra que, para $\Delta t_{message_arrival} \leq 3000ms$, a demanda para a transmissão de dados é maior, fazendo com que o coordenador do M2M-TEE transmita agendas mais extensas via *broadcast*, e consequentemente tenha um consumo energético maior. A partir dos $3000ms$ de intervalo médio entre mensagens, a distância entre as curvas se torna menor. Além disso, os consumos de energia de ambos os coordenadores mantêm um padrão constante e linear. Como a frequência de chegadas de mensagens é menor para intervalos entre mensagens maiores, o número de requisições de vagas de dados cai consideravelmente, o que acaba por manter os tamanhos das agendas transmitidas via *broadcast* de ambos os protocolos com valores mais próximos.

A Figura 26 apresenta a taxa de transferência (*throughput*) total da rede. Ou seja, são apresentados os resultados do número médio de *bits* por segundo para a soma de todas as transmissões das estações da rede para cada protocolo. Percebe-se que quando a rede está saturada com as N_{data} mensagens sendo geradas em intervalos entre chegadas de mensagens menores que $2000ms$, o ganho de eficiência dos protocolos é maior em termos de vazão de

Figura 26 – Vazão (*Throughput*) total da rede *versus* intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).



Fonte: O autor (2025)

dados se comparado com o ganho para intervalos maiores que $2000ms$. Contudo, os resultados do M2M-TEE e DyTEE superam os resultados dos demais protocolos devido à capacidade de programação e transmissão de múltiplos dados livres de colisões em um ou mais períodos ativos, até que o agendamento do *broadcast* seja plenamente concluído. Essa vantagem não ocorre no S-MAC, que por sua vez precisa de um período ativo completo com todas as estações ligadas para transmitir uma única mensagem.

Enquanto que no protocolo DyTEE só é possível transmitir uma mensagem em cada *slot* de dados, no M2M-TEE é possível estabelecer até $M \times (M_r - 1)$ fluxos simultâneos de comunicação em cada *slot*, o que contribui significativamente para o aumento da capacidade de transmissão de dados, haja vista que o M2M-TEE opera com múltiplos canais e fluxos de comunicação. O M2M-TEE se destaca nos casos em que o intervalo médio entre a geração de mensagens consecutivas é menor que $3000ms$, pelas mesmas razões discutidas nas análises anteriores. Como a frequência de geração de mensagens de dados é maior para os casos onde o intervalo entre mensagens é menor, então o número de agendamentos de transmissões de dados no SyncM para o M2M-TEE é maior. Para o caso onde o intervalo entre as mensagens é

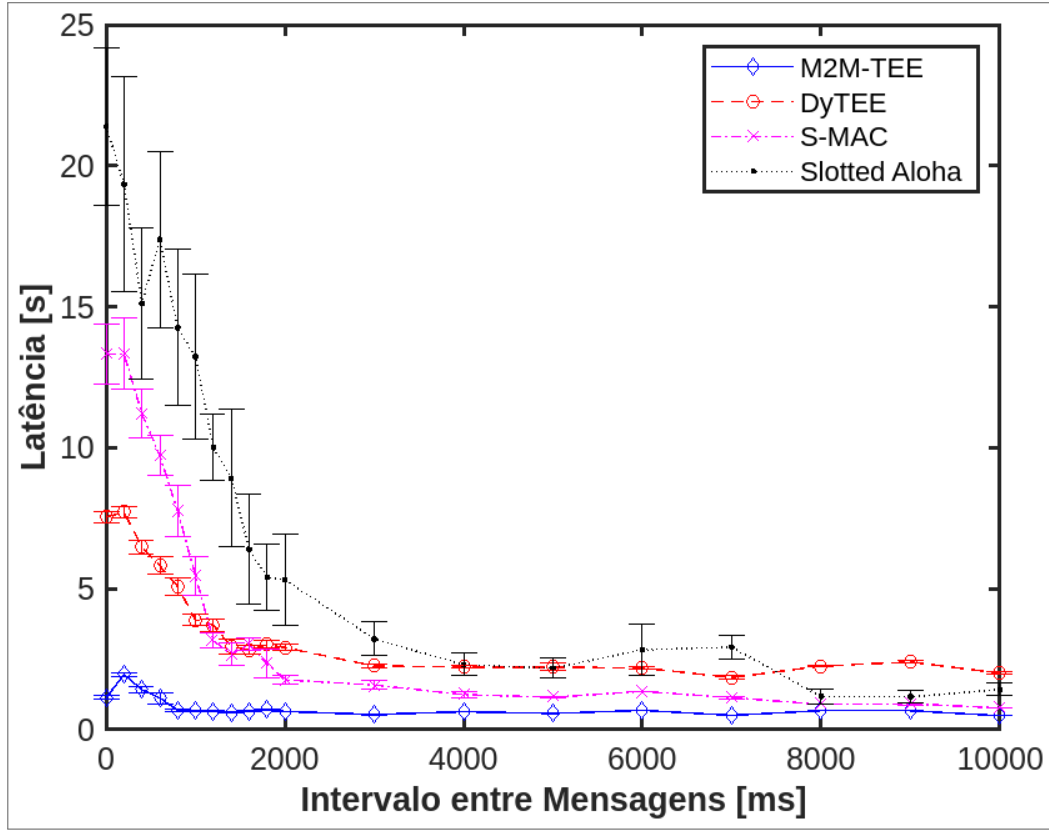
desprezível, todas as N_{data} mensagens são geradas quase que ao mesmo tempo, o que faz com que a vazão do M2M-TEE seja 4,5 vezes maior do que a vazão do DyTEE. À medida que os intervalos médios entre chegadas de mensagens se tornam maiores, o número de agendamentos decai e, como resultado, os recursos do M2M-TEE são subutilizados.

A Figura 27 apresenta a latência média por mensagem de carga útil *versus* o tempo médio entre as chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$). Apesar do aumento do rendimento máximo da rede por meio da divisão do canal em *slots* de tempo contíguos e de duração fixa, os dispositivos do *Slotted ALOHA* não utilizam métodos de contenção e sensoramento da portadora, fazendo com que a probabilidade de colisão entre os pacotes transmitidos por estes dispositivos seja ainda maior que a probabilidade de colisão dos demais protocolos. Sendo assim, se o intervalo entre chegadas de mensagens for curto, maiores serão as chances de ocorrerem colisões, e portanto maior será o número de retransmissões de pacotes, o que gera um aumento significativo na latência. Por este motivo, a latência média por mensagem do *Slotted ALOHA* é maior que a latência dos demais protocolos até os 7500ms de intervalo entre chegadas de mensagens. Quando $\Delta t_{message_arrival} > 7500ms$, a frequência de geração de mensagens é menor, o que possibilita uma probabilidade maior de transmissões com sucesso para o *Slotted ALOHA*, e por consequência um menor atraso na transmissão dos dados.

Por outro lado, mesmo que o S-MAC realize o controle de tráfego por meio do CSMA/CA e aplique técnicas para alcançar maior economia de energia, existe uma desvantagem em relação aos protocolos M2M-TEE e DyTEE até os 1200ms de intervalo médio entre chegadas de mensagens. Isso decorre do fato de que o S-MAC precisa operar em um período ativo completo para transmitir apenas uma mensagem, o que faz aumentar a latência se a frequência média de geração de mensagens é maior. Todavia, para $\Delta t_{message_arrival} \geq 1600ms$, o S-MAC só tem maior atraso em relação ao M2M-TEE. O DyTEE, por sua vez, mantém uma latência relativamente constante a partir dos 3000ms de intervalo médio entre chegadas de mensagens, porém neste caso seu atraso é maior que os atrasos dos protocolos S-MAC e M2M-TEE. Como o DyTEE não opera em períodos de dormência, uma frequência de geração de mensagens menor faz com que as estações sejam obrigadas a aguardarem pelo próximo ciclo de ativação, para que enfim possam transmitir as mensagens após o SyncM. Por este motivo, o atraso mantém uma constância relativa para $\Delta t_{message_arrival} \geq 3000ms$.

Devido à maior capacidade de troca de dados com fluxos de comunicação simultâneos, o M2M-TEE pode concentrar um volume maior de dados no mesmo período ativo, ou seja, mensagens que ainda seriam transmitidas no DyTEE não precisam esperar pelo próximo agen-

Figura 27 – Latência média por mensagem de carga útil (*payload*) versus intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).

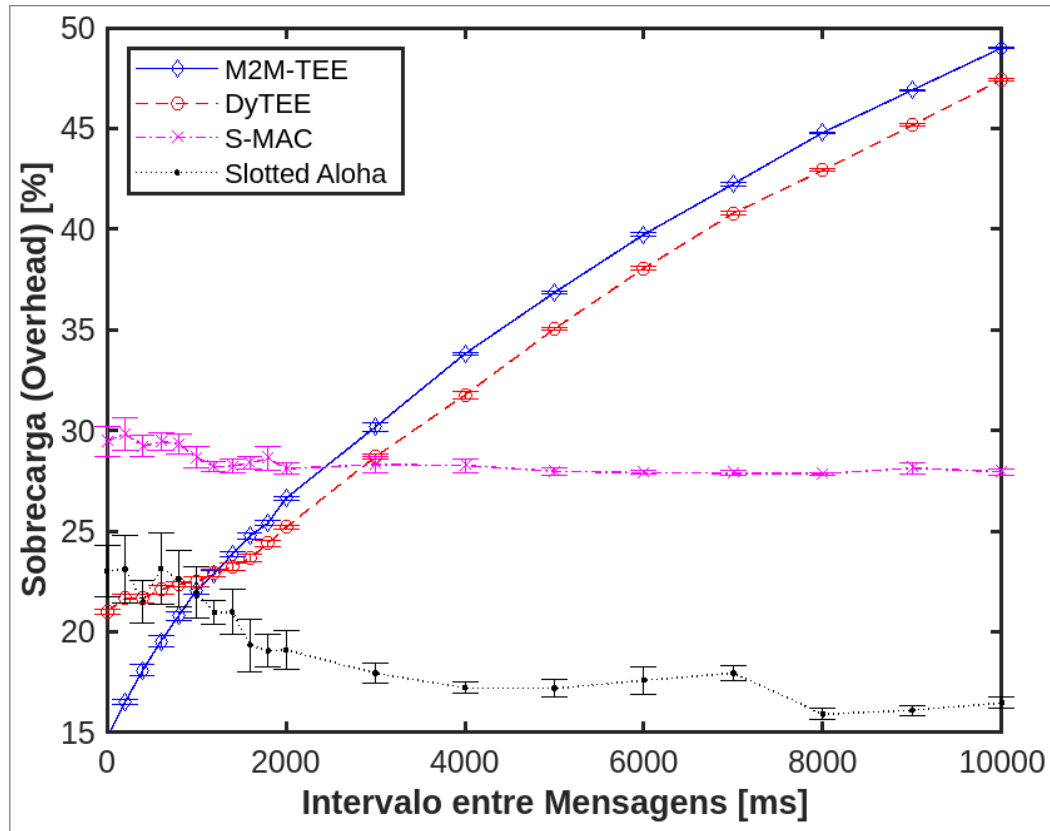


Fonte: O autor (2025)

damento de dados. Por este motivo, a latência média do M2M-TEE nos primeiros 2000ms de intervalo médio entre chegadas de mensagens é quase 8 vezes menor que a latência média do DyTEE para $\Delta t_{message_arrival} = 0ms$. Além disso, o M2M-TEE pode reduzir o tempo total do SyncM com a recepção simultânea de até $M_r - 1$ requisições de vagas em um mesmo *slot* do período RSlot, o que possibilita o envio dos dados em um espaço de tempo menor se comparado com o DyTEE. E se também for levado em consideração que um único *slot* de tempo do período de dados pode reservar até $M_r \times (M_r - 1)$ fluxos simultâneos, o tempo total para cumprir toda a agenda de transmissão no M2M-TEE também pode ser menor que o tempo necessário para cumprir a mesma quantidade de transmissões de mensagens no DyTEE.

Como esperado, o *overhead* do M2M-TEE e do DyTEE superam o *overhead* dos demais protocolos para intervalos entre chegadas de mensagens mais extensos, como mostra a Figura 28. Quanto maior for o intervalo entre a geração de mensagens consecutivas, mais ocorrências de SyncMs serão necessárias para concluir a transmissão de todos os dados, e portanto menor será a quantidade de mensagens agendadas em cada SyncM, o que certamente produzirá uma maior sobrecarga na rede. A Figura 28 mostra que o *overhead* dos protocolos M2M-TEE

Figura 28 – Sobrecarga (Overhead) da rede versus intervalo médio entre chegadas de mensagens ($\Delta t_{message_arrival}$).



Fonte: O autor (2025)

e DyTEE cresce até os 10000ms de intervalo entre chegadas de mensagens, todavia este crescimento pode atingir um valor máximo que não está demonstrado no gráfico. O excesso de cabeçalho é necessário para que seja possível efetuar uma troca de pacotes de dados mais eficiente, o que justifica os menores consumos totais de energia apresentados na Figura 23. Diferentemente do DyTEE, os agendamentos para troca de dados entre as estações do M2M-TEE devem considerar a combinação do ID da estação e do ID do canal a ser ocupado, conforme apresentado no Quadro 7. Por esse motivo, o *overhead* durante a troca de pacotes de controle no SyncM para o M2M-TEE é maior se comparado com o *overhead* do DyTEE para $\Delta t_{message_arrival} \geq 1000ms$.

Como o *Slotted ALOHA* não transmite pacotes de controle antes do envio dos seus dados, isso possibilita uma sobrecarga menor se comparado com os demais protocolos. Contudo, o que poderia ser uma vantagem, pode se tornar um problema. Para intervalos entre chegadas de mensagens mais curtos, a probabilidade de colisões é maior, já que para o *Slotted ALOHA* não existem métodos de contenção e sensoriamento da portadora. Por este motivo, o *overhead* é maior para intervalos mais curtos, mas para $\Delta t_{message_arrival} > 1000ms$ o *Slotted ALOHA*

torna-se mais vantajoso. Observe que a menor sobrecarga do *Slotted ALOHA* se apresenta na condição em que $\Delta t_{message_arrival} = 8000ms$, sendo quase duas vezes menor que a sobrecarga do S-MAC. Já o *overhead* do S-MAC se mantém relativamente estável, entre 29 a 30%. Dado que o S-MAC utiliza pacotes RTS para diminuir o tempo de duração de possíveis colisões, e que esses pacotes possuem tamanho menor, isso contribui para que a sobrecarga se estabilize até mesmo com colisões em intervalos entre chegadas de mensagens mais curtos.

6.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O presente capítulo descreveu a metodologia e os resultados da avaliação analítica de desempenho do M2M-TEE e dos demais protocolos correlatos, a saber, o DyTEE, S-MAC e o *Slotted ALOHA*. As simulações foram realizadas no MATLAB por meio de eventos temporais discretos, onde foram implementados os roteiros de execução dos protocolos. De maneira geral, a avaliação de desempenho considerou os indicadores de consumo de energia, taxa de transferência, sobrecarga e latência da rede. A Seção 6.2 apresentou detalhes importantes da simulação, como o fato de que a avaliação foi aplicada para períodos aleatórios entre chegadas de mensagens que seguem uma distribuição exponencial com média de $\Delta t_{message_arrival}$ milissegundos. Além disso, todos os pontos que foram plotados nos gráficos possuem marcadores com barras de erro com um intervalo de confiança de 95%, que por sua vez foram geradas com base na média e desvio padrão para 10 amostras. Os valores dos parâmetros utilizados para a condução da avaliação de desempenho foram apresentados na Tabela 1, e podem ser alterados conforme as necessidades da aplicação.

A Seção 6.3 apresentou os resultados e discussões referentes à avaliação de desempenho. Foi considerado nas simulações que as estações do M2M-TEE tinham três antenas de recepção e operavam em 3 canais não sobrepostos. O M2M-TEE obteve menor consumo total de energia em relação aos demais protocolos correlatos para $\Delta t_{message_arrival} \leq 3000ms$. Todavia, o nó líder do M2M-TEE deteve maior consumo percentual de energia em relação ao nó líder do DyTEE. Isso decorre da sobrecarga maior proveniente dos pacotes de controle do SyncM, especificamente das agendas transmitidas via *broadcast*. Contudo, a taxa de transferência do M2M-TEE em relação ao DyTEE foi 4,5 vezes maior para um intervalo médio entre chegadas de mensagens igual ou próximo a zero. O M2M-TEE alcança essa vantagem devido aos fluxos simultâneos que podem ser estabelecidos em cada *slot* de dados, o que contribui significativamente para o aumento da capacidade de transmissão. Um dos progressos mais importantes

do M2M-TEE é a sua capacidade de reduzir a latência da rede. Estima-se que o atraso médio por mensagem seja 8 vezes menor que o atraso do DyTEE para $\Delta t_{message_arrival} = 0ms$. Porém, ao considerar a sobrecarga da rede, o M2M-TEE se mostra em desvantagem quando comparado com o DyTEE para $\Delta t_{message_arrival} \geq 1000ms$. O motivo dessa desvantagem está no esforço maior e necessário durante o agendamento das transmissões de dados durante o *broadcast*, já que o M2M-TEE precisa lidar com mais recursos que o DyTEE.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs um protocolo MAC multicanal de comunicação muitos-para-muitos para Redes de Sensores Sem Fio com certo nível de compatibilidade com o Padrão IEEE 802.15.4, e que utiliza mecanismos de eficiência energética baseados no método TDMA, o que possibilita uma comunicação livre de colisões de dados. A este novo protocolo dá-se o nome de M2M-TEE. Com o reaproveitamento dos recursos multicanais, que são subutilizados pelos dispositivos legados do Padrão IEEE 802.15.4, o M2M-TEE possibilitou o aumento da taxa de transferência e a diminuição do atraso fim a fim. Também foi realizada uma revisão bibliográfica necessária para o entendimento deste trabalho, a partir do funcionamento geral do *Slotted ALOHA*, do protocolo CSMA/CA, e da técnica TDMA. Em seguida, foram apresentadas as regras de operação das LR-WPANs e do Padrão IEEE 802.11 PSM. Foram citados alguns trabalhos que combinam soluções como FDMA, CDMA-SIC e MIMO, e logo depois falou-se rapidamente sobre o MU-MIMO.

Além disso, foram apresentados os trabalhos relacionados que possuem características semelhantes ao protocolo M2M-TEE, e que foram divididos em dois grupos principais. Os protocolos do primeiro grupo são regidos por um nó líder, sendo compatíveis com o Padrão IEEE 802.15.4. São eles o S-MAC, o S-MAC-AL, e o DyTEE. Já os protocolos do segundo grupo operam em redes descentralizadas com múltiplos canais, sendo compatíveis com o Padrão IEEE 802.11. São eles o MMAC, o TMMAC, e o M2MMAC. Ademais, foi apresentado um modelo de transceptor integrado para o M2M-TEE que possibilita a comunicação muitos-para-muitos em múltiplos canais de frequência, assim como também um modelo de consumo de energia para os dispositivos que operam sob as regras do M2M-TEE.

O protocolo proposto foi avaliado em termos de consumo de energia, taxa de transferência, sobrecarga (*overhead*) e latência da rede. As simulações foram executadas no MATLAB por meio de eventos temporais, e em todos os casos foi considerado que a rede do M2M-TEE operaria com três canais não sobrepostos, e que suas estações deveriam ter três antenas de recepção. Os resultados da avaliação analítica de desempenho do M2M-TEE foram comparados com os resultados dos protocolos DyTEE, S-MAC, e *Slotted ALOHA*. O M2M-TEE demonstrou ser superior aos protocolos relacionados devido à sua capacidade combinada de economia de energia com o processamento de múltiplos sinais simultâneos por meio de mecanismos MIMO e comunicação multicanal. O M2M-TEE obteve maior economia de energia,

maior rendimento e menor latência do que o protocolo DyTEE ao custo de uma sobrecarga maior. Por outro lado, o consumo percentual de energia do coordenador do M2M-TEE em relação aos demais nós-folha do *cluster* é maior se comparado com o consumo percentual do coordenador do DyTEE devido à maior sobrecarga durante a troca de pacotes de controle no período SyncM.

A vazão total para a rede do M2M-TEE foi 4,5 vezes maior que a vazão do DyTEE, e a latência média por mensagem para o M2M-TEE foi 8 vezes menor que a latência para o DyTEE com intervalo médio entre chegadas nulo ($\Delta t_{message_arrival} = 0ms$). À medida que os intervalos médios entre chegadas de mensagens se tornam maiores, os recursos adicionais do M2M-TEE vão se tornando subutilizados, fazendo com que o protocolo perca eficiência. E quanto maior for o intervalo médio entre as gerações de mensagens consecutivas, serão necessários mais períodos SyncMs para completar todo o agendamento e transmissão dos dados, o que certamente irá produzir maior sobrecarga na rede. Entretanto, o excesso de pacotes de controle é necessário para garantir uma troca de dados mais eficiente e sem ocorrências de colisões, o que justifica o menor consumo de energia do M2M-TEE.

7.1 PUBLICAÇÃO RELACIONADA

Parte dos resultados do presente trabalho foi publicado nos anais do *19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'24)*. O simpósio é dedicado aos sistemas de comunicação sem fio e suas aplicações, tendo qualificação A3 no *Qualis CAPES Eventos em Computação* para o quadriênio 2017-2020. O artigo também foi submetido na biblioteca digital *IEEE Xplore*, podendo ser encontrado por meio do seguinte título: *M2M-TEE: A Many-to-Many Communication Multi-Channel and Timed Energy Efficient MAC Protocol for WSNs* (ADAUTO; MORAES, 2024).

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao trabalho de pesquisa descrito nesta dissertação, seria interessante investigar a possibilidade de transmissão de dados em outros canais de frequência enquanto o SyncM ocorre no canal de controle. Outra vertente de pesquisa poderia explorar o comportamento do protocolo em um simulador de rede como o *Network Simulator 3* (NS-3 PROJECT, 2024). Outro ponto a ser considerado são mecanismos de ajuste dinâmico da duração dos

ciclos de ativação, que dependendo do número de nós no *cluster*, do número de canais disponíveis, e da carga de dados na rede, podem aumentar ainda mais a vazão e diminuir a latência. Em vista disso, é válido considerar possíveis melhorias do protocolo para os casos onde o intervalo entre chegadas de mensagens é maior que 2000ms, abrangendo a condição em que a rede não está saturada de mensagens. Além disso, é importante analisar o funcionamento do M2M-TEE em comunicações *multi-hop* com integração na camada de roteamento (*crosslayer design*), verificar a aplicabilidade do protocolo com transceptores *full-duplex*, e realizar testes do protocolo M2M-TEE em kits de rádio para situações do mundo real. Por fim, também é importante analisar a aplicabilidade do protocolo para redes *ad hoc* com dispositivos móveis, considerando maiores detalhes da seleção do coordenador com base no grau de mobilidade de cada estação no *cluster*.

REFERÊNCIAS

- ABRAMSON, N. **The ALOHA System: Another alternative for computer communications.** In: *Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference*. [S.l.: s.n.], 1970. p. 281–285.
- ABRAMSON, N. **Development of the ALOHANET.** *IEEE Trans. Inf. Theory*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 31, n. 2, p. 119–123, 1985.
- ADAUTO, D. A. R.; MORAES, R. M. de. **M2M-TEE: A Many-to-Many Communication Multi-Channel and Timed Energy Efficient MAC Protocol for WSNs.** In: IEEE. *2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. [S.l.], 2024. p. 1–6.
- AL-NSOUR, M.; ABDEL-ATY-ZOHDY, H. S. **Analog Computational Circuits for Neural Network Implementations.** In: IEEE. *ICECS'99. Proceedings of ICECS'99. 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Cat. No. 99EX357)*. [S.l.], 1999. v. 1, p. 299–302.
- ALAMOUTI, S. M. **A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications.** *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 16, n. 8, p. 1451–1458, 1998.
- BAEK, S.; CHOI, B. D. **Performance Analysis of Power Save Mode in IEEE 802.11 Infrastructure WLAN.** In: IEEE. *Telecommunications, 2008. ICT 2008. International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1–4.
- BASAGNI, S. **Distributed Clustering for Ad Hoc Networks.** In: IEEE. *Proceedings Fourth International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (I-SPAN'99)*. [S.l.], 1999. p. 310–315.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. **Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO Techniques in Sensor Networks.** *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 22, n. 6, p. 1089–1098, 2004.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. **Energy-constrained Modulation Optimization.** *IEEE Trans. Wireless Commun.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 4, n. 5, p. 2349–2360, 2005.
- DAI, H.; JAYAWEERA, S.; POOR, H. V.; REYNOLDS, D.; WANG, X. **Multiuser Receiver Design.** *MIMO Wireless Communications*, 2007.
- DU, Y. **Multiuser Detection in Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems by Blind Signal Separation Techniques.** Tese (Doutorado) — Florida International University, Miami, Florida, mar. 2012.
- FALCONER, D. D.; ADACHI, F.; GUDMUNDSON, B. **Time Division Multiple Access methods for Wireless Personal Communications.** *IEEE Commun. Mag.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 33, n. 1, p. 50–57, 1995.
- GETTING, I. A. **Perspective/navigation-the Global Positioning System.** *IEEE Spectr.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 30, n. 12, p. 36–38, 1993.

GHOBAD, P. C. **M2MMAC: Um Novo Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes 802.11**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, jul. 2017.

GHOBAD, P. C.; MORAES, R. M. D. **Many-to-Many Communication Multichannel MAC Protocol for 802.11-based Wireless Networks**. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Francisco, CA, USA, mar. 2017.

GUIMARAES, V. G. **Protocolo MAC Eficiente em Energia e Livre de Colisões para Redes de Sensores sem Fio**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, ago. 2014.

GUIMARAES, V. G.; BAUCHSPIESS, A.; MORAES, R. M. de. **Dynamic Timed Energy Efficient and Data Collision Free MAC Protocol for Wireless Sensor Networks**. In: IEEE. *2013 IEEE Latin-America Conference on Communications*. [S.l.], 2013. p. 1–6.

GUSTAVSSON, M.; WIKNER, J. J.; TAN, N. **CMOS Data Converters for Communications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2000. v. 543.

IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. *IEEE Standard 802.11-1997*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.

IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. **Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Band**. *IEEE Standard 802.11a-1999*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.

KIM, J.; LEE, I. **802.11 WLAN: History and New Enabling MIMO Techniques for Next Generation Standards**. *IEEE Commun. Mag.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 53, n. 3, p. 134–140, 2015.

LAN/MAN Standards Committee. **IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks**. *IEEE 802.15.4 Standard*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.

LAUWERS, E.; GIELEN, G. **Power Estimation Methods for Analog Circuits for Architectural Exploration of Integrated Systems**. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 10, n. 2, p. 155–162, 2002.

LEE, T. H. **The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

MATHWORKS. **MATLAB version: 9.13.0 (R2022b)**. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc., 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com>>.

MORAES, R. M. de. **Performance Analysis of Wireless Networks**. Tese (Doutorado) — University of California, California, dez. 2005.

MORAES, R. M. de; KIM, H.; SADJADPOUR, H.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. **A New Distributed Cooperative MIMO Scheme for Mobile Ad Hoc Networks**. *Information Sciences*, v. 232, p. 88–103, 2013.

MORAES, R. M. de; SADJADPOUR, H. R. et al. **Many-to-Many Communication for Mobile Ad Hoc Networks**. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 8, n. 5, 2009.

NS-3 PROJECT. **Network Simulator 3**. 2024. <<https://www.nsnam.org/releases/ns-3-43>>. Release ns-3.43, Accessed: 2025-01-12.

PAULRAJ, A.; NABAR, R.; GORE, D. **Introduction to Space-Time Wireless Communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

ROBERTS, L. G. **ALOHA Packet System with and without Slots and Capture**. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ACM New York, NY, USA, v. 5, n. 2, p. 28–42, 1975.

SAMARDZIJA, D.; LOZANO, A.; PAPADIAS, C. B. **Design and Experimental Validation of MIMO Multiuser Detection for Downlink Packet Data**. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Springer, v. 2005, n. 11, p. 320481, 2005.

SO, J.; VAIDYA, N. H. **Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals using a single transceiver**. In: ACM. *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. [S.l.], 2004. p. 222–233.

TAUBER, M.; BHATTI, S. N. **The Effect of the 802.11 Power Save Mechanism (PSM) on Energy Efficiency and Performance during System Activity**. In: IEEE. *Green Computing and Communications (GreenCom), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 573–580.

TSENG, Y.-C.; HSU, C.-S.; HSIEH, T.-Y. **Power-Saving Protocols for IEEE 802.11-based Multi-hop Ad Hoc Networks**. *Computer Networks*, Elsevier, v. 43, n. 3, p. 317–337, 2003.

UMAMAHESHWAR, S.; KUMAR, T. A.; RAO, K. S. **Performance Evaluation of Multiuser MIMO Detection Techniques**. In: IEEE. *Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 1178–1183.

WOESNER, H.; EBERT, J.-P.; SCHLAGER, M.; WOLISZ, A. **Power-Saving Mechanisms in Emerging Standards for Wireless LANs: The MAC Level Perspective**. *IEEE Pers. Commun.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 5, n. 3, p. 40–48, 1998.

WOLNIANSKY, P. W.; FOSCHINI, G. J.; GOLDEN, G.; VALENZUELA, R. A. **V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel**. In: IEEE. *Signals, Systems, and Electronics, 1998. ISSSE 98. 1998 URSI International Symposium on*. [S.l.], 1998. p. 295–300.

YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. **An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks**. In: IEEE. *Proceedings. Twenty-first Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 1567–1576.

YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. **Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks**. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 12, n. 3, p. 493–506, 2004.

ZHANG, J.; ZHOU, G.; HUANG, C.; SON, S. H.; STANKOVIC, J. A. **TMMAC: An Energy Efficient Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks**. In: IEEE. *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 3554–3561.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA COMPLETO DO M2M-TEE

