

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Uma Abordagem Cross-Layer para Redes Corporais Sem Fio Considerando
Dispositivos com Taxas de Dados Variáveis

Rogério Santos Pozza

Tese de Doutorado submetida à Banca designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Diógenes Cecílio da Silva Júnior

Belo Horizonte - MG
Outubro de 2019

TESE DE DOUTORADO N° 309

**UMA ABORDAGEM CROSS-LAYER PARA REDES CORPORAIS SEM FIO
CONSIDERANDO DISPOSITIVOS COM TAXAS DE DADOS VARIÁVEIS**

Rogério Santos Pozza

DATA DA DEFESA: 23/10/2019

P893a Pozza, Rogério Santos.
Uma abordagem cross-layer para redes corporais sem fio considerando dispositivos com taxas de dados variáveis [recurso eletrônico] / Rogério Santos Pozza. - 2019.
1 recurso online (xvi, 145 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Diógenes Cecílio da Silva Júnior.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 139-145.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Redes corporais sem fio - Teses.
3. Postura humana - Teses. I. Silva Júnior, Diógenes Cecílio da.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Prof^o Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

**"Uma Abordagem Cross-layer para Redes Corporais Sem Fio
Considerando Dispositivos com Taxas de Dados Variáveis"**

Rogério Santos Pozza

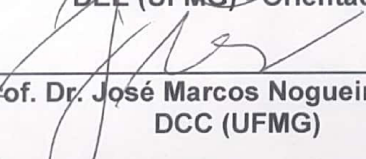
Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23 de outubro de 2019.

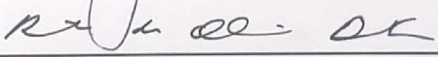
Por:




Prof. Dr. Diógenes Cecílio da Silva Jr.
DEE (UFMG) - Orientador



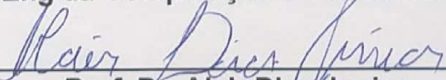
Prof. Dr. José Marcos Nogueira da Silva
DCC (UFMG)



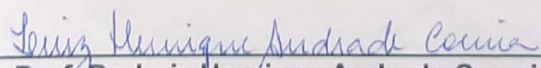
Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Duarte
DELT (UFMG)



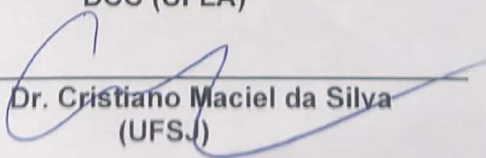
Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Faculdade de Eng da Computação e Telecomunicações (UFPA)



Prof. Dr. Alair Dias Junior
atualmente sem filiação



Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia
DCC (UFLA)



Prof. Dr. Cristiano Maciel da Silva
(UFSJ)

Agradecimentos

Para Maria e Gervásio pelo amor e sabedoria transmitidos. Sou grato a vocês pela dedicação. Meu eterno agradecimento.

Agradeço à Maria Angélica e Alexandre pelo apoio incondicional e compreensão em todos os momentos desses anos. Esse trabalho não seria possível sem vocês.

Aos meus irmãos Gervásio e Herodes, incansáveis ombros, pelo incentivo durante esse desafio. Aos meus amados sobrinhos, Marcela, André, Gabriel, Daniel e Guilherme, que incondicionalmente me apoiaram. Meu muito obrigado aos meus novos amores Mariana e Francisco, por me rejuvenescerem ao lembrarem do legado de Maria e Gervásio.

Agradeço ao professor Diógenes por aceitar me orientar, pela disposição, contribuição e paciência dedicadas à conclusão deste trabalho, através de várias reuniões e telefonemas. Foi um aprendizado além da pesquisa e livros.

Agradeço ao Germano, dona Irene, Milene, Priscila, Dejanira e minhas tias Vitória, Santa, Carmen, Tereza e Regina, pelas orações e torcida. Para vocês o meu carinho e consideração.

Agradeço aos professores, alunos, funcionários e amigos da UTFPR de Cornélio Procópio que acompanharam e possibilitaram a minha trajetória desses anos e, por vezes, sobrecarregados em virtude do meu trabalho de tese. Para vocês o meu reconhecimento e gratidão.

Agradeço velhos amigos da FATEC Ourinhos, do mestrado da UEM e aos novos do PPGEE. Embora os anos passem, continuamos com a mesma intimidade. Agradeço o apoio e incentivo que recebi de vocês durante esse período.

Agradeço aos amigos de Piraju pela amizade e apoio que foram muito importantes na trajetória durante desse trabalho.

Agradeço a doutora Tânia, Karina e Dulce pela dedicação e afeto nesses últimos anos. Com certeza, seriam anos muito mais dolorosos sem vocês. Muito obrigado!

Foram muitas pessoas que contribuíram de alguma forma na realização dessa tese. Minhas desculpas pelo eventual esquecimento ou por não citá-los nominalmente.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro das agências financiadoras CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Resumo

Pozza, R. S. **Uma Abordagem Cross-Layer para Redes Corporais Sem Fio Considerando Dispositivos com Taxas de Dados Variáveis**. 2019. 156 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

A pesquisa em redes corporais sem fio (*Wireless Body Area Networks* – WBAN) ganhou interesse e tornou-se um tema de serviços de saúde emergente devido ao seu potencial uso no monitoramento contínuo do bem-estar humano. Os movimentos naturais do corpo humano e a interferência ambiental impõem dificuldades ao desempenho de uma WBAN, como o tempo de vida e a confiabilidade na entrega de dados. Devido à complexidade das características das WBANS, um desafio é manter uma boa qualidade dos enlaces entre os nós sensores da rede enquanto o uso de suas baterias é prolongado.

Diferentes trabalhos experimentais na literatura mostram que o uso de uma potência de transmissão fixa e com valor elevado pode não ser adequado, embora possibilite uma comunicação mais confiável, pode levar ao consumo de energia desnecessário. Por outro lado, a transmissão com potência baixa oferece maior economia de energia, mas pode reduzir a confiabilidade na entrega de pacotes. A pesquisa envolvendo a transmissão de dados nas WBANS tem importância como estratégia para economia de energia, uma vez que as técnicas de controle de potência permitem selecionar níveis de potência suficientes para obter bom desempenho e reduzir adicionalmente problemas de interferência.

Esse trabalho propõe uma abordagem *cross-layer*, denominada CL, baseada no padrão IEEE 802.15.4 para garantir a qualidade do serviço em termos de entrega de pacotes e de tempo de vida da rede. A abordagem CL propõe compartilhar os valores de parâmetros entre as camadas da pilha de protocolos com o objetivo de melhorar a eficiência na entrega de pacotes ao *sink* e no consumo de energia. Os resultados desse trabalho foram obtidos através da implementação de WBANS no simulador Castalia. Três cenários foram usados, com diferentes taxas de dados e dois tipos de canal de comunicação, com e sem interferência. Os cenários foram comparados em termos da entrega de pacotes, consumo de energia e adaptabilidade ao meio de comunicação.

A proposta é comprovada através de três abordagens *cross-layer*: CL-2, CL-4 e CL-Bin. CL-2 usa dois níveis de potência de Tx, CL-4 quatro níveis, onde a escolha é pela quantidade de pacotes recebidos pelo *sink*. CL-Bin é uma abordagem preditiva usando um modelo probabilístico para determinar a potência de Tx. Essas abordagens foram comparadas a uma WBAN convencional de camadas e os resultados mostram que a abordagem CL é mais eficiente ao considerar os cenários propostos.

Palavras-chave: Redes corporais sem fio, cross-layer, monitoramento corporal, WBAN.

Abstract

Pozza, R. S. **A Cross-Layer Approach to Wireless Body Networks with Devices and Variable Data Rates**. 2019. 156 f. Thesis – Electrical Engineering Department, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Research on wireless body area networks (WBAN) has gained interest and has become an emerging theme of health services due to its potential use in the continuous monitoring of human well-being. The natural movements of the human body and environmental interference impose difficulties on the performance of a WBAN, such as a lifetime and reliability of data delivery. Due to the complexity of the WBANS characteristics, it is a challenge to maintain the quality of the links among the network sensor nodes while extending the battery life.

Different experimental studies in the literature show that the use of fixed and high power transmission may not be adequate, although it allows a more reliable communication, it can lead to unnecessary energy consumption. On the other hand, low power transmission offers more energy savings but may reduce the reliability of packet delivery. Research on data transmission in WBANs is essential as an energy-saving strategy, as power control techniques allow sufficient power levels to be selected to achieve excellent performance and further reduce interference problems.

This work proposes a cross-layer approach, called CL, based on the IEEE802.15.4 standard to ensure the quality of service (QoS) in terms of packet delivery and network lifetime. The CL approach proposes to share parameter values between protocol stack layers to improve efficiency in sink packet delivery and power consumption. The results from this work were obtained through the implementation of WBANs with the Castalia simulator. It was used three scenarios, with different data rates and two types of communication channels (with and without interference). The results comparison of the scenarios concerned packet delivery, power consumption, and communication media adaptability.

Three cross-layer approaches proved this proposition: CL-2, CL-4, and CL-Bin. CL-2 uses two levels of Tx power, CL-4 four levels, where the choice is by the number of packets received by the sink. CL-Bin is a predictive approach using a probabilistic model to determine the power of Tx. The results of these approaches, compared to a conventional layered WBAN, show that the CL approach is more efficient when considering the proposed scenarios.

Keywords: Wireless Body Area Network, cross-layer, body monitoring, WBAN.

Sumário

Lista de Abreviaturas	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Justificativa	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivos Específicos	5
1.3 Contribuições	5
1.4 Organização da Tese	6
2 Aspectos Conceituais	7
2.1 Redes de Comunicação sem Fio	7
2.2 Redes Corporais sem Fio	9
2.2.1 Sinais fisiológicos	12
2.2.2 Topologias e Arquiteturas	14
2.3 Abordagem Cross-Layer	16
2.3.1 Abordagem de Srivastava	18
2.3.2 Abordagem de Akyildiz	20
2.3.3 Abordagem de Gajjar	22
2.3.4 Abordagens de <i>Cross-Layer</i> em WBANs	25
2.4 QoS	27
2.4.1 QoS em WBANs	29
2.5 Considerações	32
3 Revisão Bibliográfica de WBANs e <i>Cross-layer</i>	35
3.1 Revisão Sistemática da Literatura	35
3.1.1 Fase de Planejamento	36
3.1.2 Fase de Condução	38
3.1.3 Fase de Apresentação	40
3.2 Trabalhos Relacionados	43
3.3 Considerações	46

4	Materiais e Métodos	47
4.1	Simulador Castalia	47
4.1.1	Módulo de Hardware	48
4.1.2	Módulo do Canal Wireless	50
4.2	IEEE 802.15.4	51
4.2.1	Camada Física	53
4.2.2	Camada de Acesso ao Meio	54
4.2.3	Comunicação	55
4.3	Cenários de Simulação	57
4.4	Análise dos Dados	60
4.5	Considerações	61
5	Desenvolvimento	63
5.1	CL : Uma Abordagem Cross-Layer para WBAN	63
5.1.1	Proposta CL2	65
5.1.2	Proposta CL4	67
5.1.3	Proposta CL-Bin	70
5.1.4	Comparação Entre CL-Bin e uma Distribuição Uniforme	75
5.2	Considerações	80
6	Resultados e Discussão	83
6.1	Descrição dos Cenários e Comparações	83
6.2	Experimentos com CL2	84
6.2.1	Tráfego de Pacotes das Camadas de Aplicação e MAC	84
6.2.2	Perdas de Pacotes	88
6.2.3	Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede	91
6.2.4	Considerações sobre CL2	96
6.3	Experimentos com CL4	98
6.3.1	Tráfego de Pacotes entre Camadas de Aplicação e MAC	98
6.3.2	Perdas de Pacotes	101
6.3.3	Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede	103
6.3.4	Considerações sobre CL4	108
6.4	Experimentos com CL-Bin	108
6.4.1	Tráfego de Pacotes entre Camadas de Aplicação e MAC	108
6.4.2	Perdas de Pacotes	112
6.4.3	Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede	112
6.4.4	Considerações sobre CL-Bin	118
6.5	Adaptabilidade	119
6.6	Considerações	122
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	133
7.1	Trabalhos Futuros	134
	Referências Bibliográficas	139

Lista de Abreviaturas

WBAN	Wireless Body Area Network
PAN	Personal Area Network
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
e-Health	electronic Health
QoS	Quality of Service
OSI	Open System Interface
ITU	International Telecommunication Union
APP	Camada de Aplicação
MAC	Camada de Acesso ao Meio
PHY	Camada Física
MICS	Medical Implant Communications Service
WMTS	Wireless Medical Telemetry Services
ISM	Industrial, Scientific, e Medical
TDMA	Time Division Multiple Access
M-QAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
PSK	Phase Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
PRR	Packet Received Rate
ACK	Acknowledgement packet
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
UWB	Ultra Wide Band
PA	Protocolo com Potência Alta
PB	Protocolo com Potência Baixa
CL	Proposta de abordagem Cross Layer
CL2	Implementação da CL utilizando duas potências (PA e PB) de transmissão
CL4	Implementação da CL utilizando quatro potências de transmissão
CL-Bin	Implementação da CL baseada em estimativa probabilística

Lista de Figuras

2.1	Modelo de uma RSSF (Akyildiz e Vuran, 2010).	8
2.2	Exemplo de um projeto de rede corporal sem fio (Nakanishi et al., 2012).	10
2.3	Arquitetura de três níveis de uma WBAN (Negra et al., 2016) para aplicação médica.	15
2.4	Arquitetura de 3 camadas proposta por Razzaque et al. (2017).	16
2.5	Um modelo ilustrativo de três camadas.	17
2.6	Arquitetura de quatro camadas com interação <i>cross-layer</i> (Mendes e J.P.C. Rodrigues, 2011).	18
2.7	Propostas para projetos de interação <i>cross-layer</i> (Srivastava e Motani, 2005).	19
2.8	Propostas para arquiteturas de comunicação <i>cross-layer</i> (Srivastava e Motani, 2005).	20
2.9	Módulo conceitual <i>cross-layer</i> para RSSF (Akyildiz e Vuran, 2010).	21
2.10	Modelo de QoS proposto por Ameen et al. (2008).	28
3.1	Fases das SLR com os respectivos valores.	41
3.2	Quantidade de publicação relacionadas a WBANs e <i>cross-layer</i> entre 2014 e 2019.	41
3.3	Categorias de publicações (periódicos, conferências e simpósios).	41
3.4	Métricas utilizados em soluções nas WBANs com <i>cross-layer</i> .	42
3.5	Topologias utilizadas nas WBANs.	42
3.6	Conjunto de camadas usadas com <i>cross-layer</i> .	42
3.7	Padrões utilizados nos trabalhos para WBANs e <i>cross-layer</i> .	43
4.1	Arquitetura do simulador Castalia (Castalia, 2019).	48
4.2	Arquitetura do nó no Castalia (Castalia, 2019).	48
4.3	Estrutura dos diretórios relacionados a arquitetura do Castalia (Castalia, 2019).	50
4.4	Modelo de referência do IEEE 802.15.4 (Rochol, 2018).	52
4.5	Exemplos de topologia estrela ponto a ponto (802.15.4, 2011).	53
4.6	Estrutura do <i>superframe</i> do padrão IEEE 802.15.4.	54
4.7	Comunicação de dados do padrão IEEE 802.15.4 (a) com <i>beacon</i> e (b) sem <i>beacon</i> .	56
4.8	Comunicação de dados do padrão IEEE 802.15.4 (a) com <i>beacon</i> e (b) sem <i>beacon</i> .	56
4.9	Mecanismo de formação da rede do padrão IEEE 802.15.4.	57
4.10	Topologia utilizada na WBAN (Boulis et al., 2012b).	60
5.1	Fluxo tradicional de comunicação (linhas contínuas) e dois fluxos adicionais propostos (linhas tracejadas) (Pozza e Silva, 2015).	63
5.2	Frequência da entrega de pacotes para uma janela de 10 pacotes para taxa de dados Baixa.	68

5.3	Frequência da entrega de pacotes em uma janela para 10 pacotes para taxa de dados Alta.	69
5.4	Frequência da entrega de pacotes em uma Janela para 10 pacotes em taxa de dados Muito Alta.	70
5.5	Frequência dos valores da PRR_MAC nas simulações PA e PB (Janela=5).	72
5.6	Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Baixa com e sem colisão.	73
5.7	Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Alta com e sem colisão.	74
5.8	Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Muito alta com e sem colisão.	74
6.1	Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Baixa.	85
6.2	Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Alta.	85
6.3	Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Muito Alta.	86
6.4	Entrega de pacotes entre camadas MAC para Taxa Baixa.	87
6.5	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.	87
6.6	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.	88
6.7	Falhas devido ao estouro de <i>buffer</i> para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	89
6.8	Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	91
6.9	Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito alta, Alta e Baixa.	92
6.10	Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.	93
6.11	Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.	93
6.12	Eficiência energética rede para a Taxa Muito Alta.	94
6.13	Tempo de vida da rede para a Taxa Baixa.	95
6.14	Tempo de vida da rede para a Taxa Alta.	95
6.15	Tempo de vida da rede para a Taxa Muito Alta.	96
6.16	Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Baixa.	98
6.17	Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Alta.	98
6.18	Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Muito Alta.	99
6.19	Entrega de pacotes entre camadas MAC com Taxa Baixa.	100
6.20	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.	100
6.21	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.	100
6.22	Falha devido ao estouro de <i>buffer</i> para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	102
6.23	Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	103
6.24	Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	104
6.25	Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.	105
6.26	Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.	105
6.27	Eficiência energética rede para a Taxa Muito Alta.	106
6.28	Tempo de vida da rede em dias para a Taxa Baixa.	106
6.29	Tempo de vida da rede para a Taxa Alta.	107
6.30	Tempo de vida para a Taxa Muito Alta.	107
6.31	Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Baixa.	109
6.32	Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Alta.	109

6.33	Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Muito Alta.	110
6.34	Entrega de pacotes entre camadas MAC Taxa Baixa.	110
6.35	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.	111
6.36	Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.	111
6.37	Falha devido ao estouro de <i>buffer</i> para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	113
6.38	Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	114
6.39	Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.	115
6.40	Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.	116
6.41	Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.	116
6.42	Eficiência energética para a Taxa Muito Alta.	116
6.43	Tempo de vida da rede para a Taxa Baixa.	117
6.44	Tempo de vida para a Taxa Alta.	117
6.45	Tempo de vida da rede para a Taxa Muito Alta.	118
6.46	NA para Taxa Baixa.	120
6.47	NA para Taxa Alta.	120
6.48	NA para Taxa Muito Alta.	121
6.49	Pacotes recebidos entre APP com Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.	123
6.50	Comparação de pacotes recebidos entre camadas MAC com Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.	124
6.51	Falhas de envio de pacotes devido ao canal ocupado.	126
6.52	Falhas de envio de pacotes devido ao estouro de <i>buffer</i>	127
6.53	Falhas devido ao não recebimento do ACK.	128
6.54	Eficiência energética para as Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.	129
6.55	Tempo de vida para as Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.	130

Lista de Tabelas

2.1	Relação de possíveis doenças que poderiam ser monitoradas com sensores e WBANs (Barakah e Ammad-uddin, 2012)	12
2.2	Descrição de alguns exemplos de sinais sensorados (Pantelopoulos e Bourbakis, 2010).	14
2.3	Exemplos de taxas de dados de sinais fisiológicos (Latré <i>et al.</i> , 2011).	15
3.1	Termos de busca para o estudo terciário no desenvolvimento <i>cross-layer</i> para WBANs	36
3.2	Termos de busca para o estudo secundário para desenvolvimento <i>cross-layer</i> para WBANs	37
3.3	Questões de pesquisa e fundamentação.	37
3.4	Artigos selecionados utilizados na revisão sistemática.	38
4.1	Valores do <i>path loss</i> com atenuação média percebida no enlace entre dois nós distintos.	51
4.2	Funcionalidades dos dispositivos do padrão IEEE 802.15.4.	52
4.3	Frequências do padrão IEEE 802.15.4.	54
4.4	Características Específicas para Cada Abordagem	58
4.5	Taxas de dados usadas para os nós sensores.	58
4.6	Taxas de dados usadas para os nós sensores.	59
4.7	Parâmetros do rádio BANRadio conforme Boulis e Tselishchev (2011)	60
5.1	Tabela com as prioridades estabelecidas nos pacotes enviados pela camada APP.	66
5.2	Valores para seleção de potência baseados na relação entre frequência e valores da PRR_MAC	70
5.3	Vetor utilizado para selecionar a potência de transmissão de pacotes.	73
5.4	PRR_MAC para Cenário Taxa Baixa sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	75
5.5	PRR_MAC para Cenário Taxa Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	76
5.6	PRR_MAC para cenário Taxa Muito Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	76
5.7	PRR_MAC para cenário Taxa Baixa com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	77
5.8	Cenário Taxa Alta com colisão entre CL-Bin e uma distribuição uniforme em relação a PRR_MAC.	77
5.9	PRR_MAC para Cenário Taxa Muito Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	77

5.10	Eficiência energética para cenário Taxa Baixa sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	78
5.11	Eficiência energética para cenário Taxa Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	78
5.12	Eficiência energética para cenário Taxa Muito Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	79
5.13	Eficiência energética para cenário Taxa Baixa com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	79
5.14	Eficiência energética para cenário Taxa Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	80
5.15	Eficiência energética para cenário Taxa Muito Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.	80
6.1	Principais características de CL2 , CL4 e CL-Bin em comparação com PA e PB. . . .	122
6.2	Comparação entre CL2 , CL4 e CL-Bin	131

Capítulo 1

Introdução

Um cenário emergente é o monitoramento contínuo dos estados fisiológicos de pessoas, em que tenham a alternativa de permanecer em suas casas, em vez de hospitais ou clínicas, com a possibilidade do acompanhamento a distância de um profissional, para auxiliar em tratamentos e diagnósticos de doenças. A importância desse auxílio apoia-se nas informações personalizadas coletadas dos pacientes em um intervalo de tempo que garanta sua eficácia. O conhecimento da reação do paciente de forma temporal e contínua pode embasar um diagnóstico mais preciso do que o realizado em observações tradicionais de períodos mais curtos.

A possibilidade de redução de custos na permanência de pacientes em leitos de hospitais e o aumento na qualidade do atendimento também incentiva a pesquisa no monitoramento remoto. O centro de pesquisa americano NIST (*National Institute of Standards and Technology*)¹ realiza estudos com monitoramento remoto através da pesquisa de dispositivos vestíveis e implantáveis no corpo humano, em que os dados fisiológicos coletados são transmitidos por rádios para o acompanhamento de pacientes. Os dispositivos médicos implantáveis podem contribuir, além do monitoramento fisiológico, com a administração de medicamentos através de cápsulas endoscópicas inteligentes ou monitores de glicose.

O Conselho Federal de Medicina (CFM) brasileiro autorizou no começo de 2019 o uso da telemedicina², em que as novas tecnologias de informação e comunicação poderão auxiliar os profissionais da medicina para prevenção de doenças, pesquisa, educação, promoção da saúde e a relação médico-paciente. A resolução determina ainda que as informações sensíveis sejam enviadas e acessadas com segurança.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), telemedicina pode ser definida como a dis-

¹Disponível em www.nist.gov/healthcare/emerging/ban.cfm

²Disponível em: sistemas.cfm.org.br/normas/visualizar/resolucoes/BR/2018/2227

ponibilização de serviços com foco na saúde em que a distância é um fator crítico, utilizando a tecnologia da informação e comunicação para a troca de informações válidas para o diagnóstico, tratamento e prevenção de doenças, pesquisa e validação, com foco no avanço na melhoria da saúde dos indivíduos e da comunidade.

Não apenas no Brasil, mas em outras regiões do mundo, em áreas remotas com difícil acesso ou com reduzido número de profissionais da saúde, os acompanhamentos preventivos de saúde são comprometidos, em que os pacientes somente recorrem aos médicos em situações emergenciais. Um sistema de monitoramento de sinais vitais de baixo custo que forneça informações em tempo real da saúde do paciente à distância, sem a presença de um médico no local, sem a necessidade do paciente se deslocar para um centro médico pode auxiliar na prevenção e tratamento de doenças.

Como resultado, as informações enviadas podem contribuir para diagnóstico com maiores detalhes, em que pesquisadores e profissionais da saúde desenvolvam formas mais precisas de tratamento para patologias e limitações físicas dos pacientes. Entretanto, segundo [Salayma et al. \(2017\)](#), o uso de fios, que conectam sensores fixados no paciente a um equipamento, durante a realização de alguns exames pode comprometer os resultados pelo fato de que o movimento do corpo humano provoca interferências. Além de limitar a movimentação do paciente, a qualidade ou a acurácia dos resultados pode ser reduzida, o que sugere o uso de comunicação sem fio para a coleta dos dados fisiológicos. O aumento no custo na assistência médica, maior expectativa de vida e o crescimento da população idosa motivaram novas propostas no aperfeiçoamento dessas tecnologias.

Os recentes avanços nas pesquisas em comunicação sem fio, sistemas embarcados e dispositivos sensores com baixo consumo energético impulsionaram o desenvolvimento das redes corporais sem fio (WBAN – *Wireless Body Area Networks*) como suporte à mobilidade para aplicações de *e-Health* (*eletronic Health*) [Bouazizi et al. \(2017\)](#). Uma WBAN é composta por pequenos dispositivos computacionais denominados nós sensores que coletam dados de sinais vitais de um usuário. Os nós sensores são caracterizados pela heterogeneidade, pois variam em capacidade de processamento, tipo de sinal monitorado, tamanho e transceptor de rádio, e são projetados para serem implantados ou acoplados na pele humana ou em roupas como forma de monitoramento dos sinais fisiológicos e transmissão de dados para outras redes para acompanhamento por profissionais ou centros de saúde distantes geograficamente [Cavallari et al. \(2014\)](#). Esses dados fornecem informações sobre o estado de um paciente tanto em repouso como durante suas atividades cotidianas.

Devido a importância das informações transmitidas, as WBANS possuem características críticas de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) que as diferenciam de outras redes, como o tempo de vida da rede (consumo de energia) e a confiabilidade (entrega de pacotes). Por exemplo, nas Redes

de Sensores Sem Fio (RSSF) o total da área monitorada é considerado como um requisito de QoS, mas em WBANs não. Devido ao movimento natural do corpo humano e interferências do ambiente o canal de comunicação de uma WBAN possui uma grande variação na intensidade do sinal recebido entre os nós sensores [Punj e Kumar \(2018\)](#). A confiabilidade é um requisito importante tanto para RSSF quanto para WBANs, porém a estratégia adotada para consegui-la é diferente.

Nas RSSF, realiza-se análise no roteamento para a entrega dos pacotes devido à alta densidade de nós; nas topologias das WBANs, que em geral têm apenas um salto entre o dispositivo central (nó *sink*) e os poucos nós sensores, o aumento na confiabilidade se dá pela entrega de pacotes [Cavallari et al. \(2014\)](#). Portanto, projetar arquiteturas ou protocolos considerando QoS é um elemento essencial para que uma WBAN funcione adequadamente. Atualmente as WBANs são estruturadas segundo algum padrão de protocolo para redes sem fio, como os padrões IEEE 802.15.1 ([802.15.1, 2005](#)), IEEE 802.15.4 ([802.15.4, 2011](#)) e IEEE 802.15.6 ([802.15.6, 2012](#)). Algumas soluções com protocolos mais específicos são projetadas para WBANs, como a plataforma desenvolvida por [Santos e Motoyam \(2018\)](#) que utiliza o protocolo de hardware *ShockBurst*.

A maioria das arquiteturas de redes é organizada hierarquicamente em camadas conforme o padrão OSI/ITU-T as quais são responsáveis pela execução de um conjunto específico de funções, e as comunicações ocorrem somente entre camadas adjacentes na mesma pilha de protocolos ou entre camadas pares entre duas pilhas distintas. As funções específicas de cada camada proporcionam flexibilidade a essa arquitetura, o que contribuiu na evolução e desenvolvimento das redes de computadores antes mesmo da Internet. Contudo, tais arquiteturas também apresentam desvantagens, como o *overhead* proporcionado pelo número de camadas, a impossibilidade de ajuste de parâmetros com base no comportamento de outras camadas e a existência de funções duplicadas.

Segundo [Srivastava e Motani \(2005\)](#) uma rede com comunicação sem fio oferece novas formas de interconexão, que eventualmente não podem ser exploradas com a estrutura do modelo em camadas, como a adaptabilidade ao meio de acesso compartilhado. Especificamente, três razões justificam a comunicação entre camadas não adjacentes: 1) a possibilidade da comunicação oportunista; 2) novas modalidades de comunicação oferecidas pelo meio físico; e 3) problemas característicos das transmissões sem fio. Tal abordagem é denominada de *cross-layer* e é definida como uma maneira de melhorar a eficiência e a interação entre duas ou mais camadas não adjacentes de uma pilha de protocolos ([Gajjar et al., 2011b](#)). As WBANs apresentam dificuldades na garantia de entrega de pacote devido a reconfiguração do meio causada pela mobilidade do corpo humano, ruídos, interferências de outras redes e obstáculos, e a abordagem *cross-layer* pode atender esses problemas com a adaptação da rede.

1.1 Motivação e Justificativa

As WBANs são empregadas para coletar dados do contexto do usuário, como informações do ambiente, da sua localização, de atividades físicas e de dados fisiológicos. Essas informações são utilizadas para auxiliar no diagnóstico de doenças e no acompanhamento do bem estar desses usuários pelos profissionais responsáveis. O funcionamento desse cenário está condicionado a entrega eficiente dos dados coletados e a um tempo suficiente de uso contínuo da WBAN pelo usuário, de forma a ter informações suficientes para contribuir para o seu acompanhamento.

O presente trabalho tem como motivação contribuir para melhorar a eficiência da entrega de pacotes gerados pelos nós sensores de uma WBAN, e não impactar negativamente no tempo de vida útil dessa rede. A diminuição da perda de pacotes tem consequência na qualidade dos dados fisiológicos monitorados pela WBAN, e o período maior de coleta garantirá uma amostra com maior confiabilidade para a análise. A entrega correta desses dados em um intervalo de tempo apropriado é fundamental para a melhoria de diagnósticos e do tratamento de doenças.

As soluções projetadas para as WBANs, em sua maioria, são propostas utilizando a arquitetura em camadas. Como descrito por [Srivastava e Motani \(2005\)](#) a abordagem *cross-layer* é uma opção para melhorar o desempenho de redes sem fio, como as WBANs, em relação às arquiteturas em camadas. Nesse sentido, a abordagem *cross-layer* torna-se uma alternativa viável para ser aplicada como justificativa para a obtenção de melhor desempenho tanto na entrega de pacotes quanto em relação ao consumo de energia.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma solução para garantir confiabilidade maior na entrega de pacotes ao *sink* em uma WBAN utilizando *cross-layer* sem comprometer o tempo de vida da rede em relação a uma WBAN estruturada em camadas. Para isso será proposta uma abordagem *cross-layer* para o compartilhamento de informações entre as camadas da pilha de protocolos, para adaptar a WBAN ao estado do meio de comunicação com QoS, em cenários com taxas de dados variadas.

O objetivo geral desse trabalho é melhorar a eficiência na entrega de pacotes e no consumo de energia de uma WBAN por meio de uma abordagem *cross-layer* utilizando o IEEE 802.15.4 como caso de uso.

O aumento na taxa de entrega de pacotes é buscada através da mudança dinâmica na potência de transmissão da camada Física e no aumento da retransmissão de pacotes na camada MAC.

A alteração da potência de transmissão pode incorrer no aumento ou diminuição no consumo da energia em determinado período. Os resultados das simulações serão comparados com cenários estáticos de potência de transmissão e retransmissão de pacotes para analisar a efetividade da proposta dessa tese.

As taxas de dados dependem das informações das atividades fisiológicas coletadas pelos nós sensores. As informações fisiológicas têm variações na quantidade de pacotes enviados para transmiti-las. Enquanto a informação referente a temperatura pode ser transmitida em um pacote, as informações de um dispositivo de eletroencefalograma utilizam diversos pacotes. Por essa razão, esse trabalho utilizará taxas variadas de dados nos experimentos simulados.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são comprovar as seguintes hipóteses:

- O uso da abordagem *cross-layer* é mais eficiente do que a estrutura em camadas na entrega de pacotes ao *sink* da WBAN;
- O uso da abordagem *cross-layer* é mais eficiente do que a estrutura em camadas no consumo de energia da WBAN; e
- O uso da abordagem *cross-layer* permite que uma WBAN possa adaptar os parâmetros de suas camadas em reação às mudanças do meio de comunicação.

1.3 Contribuições

As contribuições desse trabalho englobam:

- os resultados do mapeamento sistemático, proposto para o desenvolvimento de abordagens *cross-layer* para WBAN entre 2014 a abril de 2019;
- as métricas PRR_MAC e PRR_APP que são compartilhadas entre as camadas de Aplicação e MAC para serem utilizadas no desenvolvimento de WBANs com *cross-layer*;
- facilidade para que parâmetros sejam compartilhados entre as camadas de uma WBAN;
- descrição de algoritmos que implementam os fluxos entre camadas apresentados pela abordagem *cross-layer* e compartilham métricas entre camadas;
- proposta de algoritmo utilizando uma distribuição binomial para obter o comportamento parecido com uma WBAN.

1.4 Organização da Tese

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão apresentados os elementos teóricos básicos e os conceitos utilizados nesta tese. No Capítulo 3, será apresentado um mapeamento sistemático da literatura para avaliar estatisticamente o estado da arte sobre o tema e os trabalhos relacionados que servirão de base. O Capítulo 4 apresentará o simulador Castalia, o padrão IEEE 802.15.4 e como foram planejados os experimentos. No Capítulo 5, é descrito como serão executados nos experimentos planejados. No Capítulo 6 serão discutidos e comparados os resultados. No Capítulo 7, serão apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Aspectos Conceituais

Neste capítulo são apresentados os aspectos e conceitos de redes corporais sem fio, aplicações, arquiteturas e a abordagem *cross-layer*.

2.1 Redes de Comunicação sem Fio

As tradicionais redes de computadores sem fio (WLAN, WMAN, WWAN) possuem uma estrutura fixa de topologia que centraliza o acesso a outras redes ou o compartilhamento de recursos entre usuários.

O uso de redes sem fios de forma móvel em ambientes com obstáculos e ruídos, como em campos de batalha, motivaram pesquisas pelo DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), os quais definiram o termo de redes *Ad Hoc*¹, que são redes compostas por dispositivos (computadores, *hosts* ou nós equipados com transceptores sem fio) e sem uma infraestrutura predefinida de comunicação. Nessas redes os enlaces entre os nós são independentes da topologia da rede, e eventuais falhas não ocasionam a interrupção do funcionamento de toda a rede.

As redes de sensores sem fio (RSSF) são exemplos de redes *Ad Hoc*. Segundo Akyildiz e Vuran (2010), as RSSF são um tipo de rede *Ad Hoc*, formadas por pequenos dispositivos com baixo poder computacional, denominados nós sensores, com o objetivo de realizar sensoriamento, monitoramento e transmissão dos dados coletados em um nó específico, denominado *gateway*, nó *sink*, *hub* ou estação base, que consiste em um equipamento de maior desempenho computacional que armazena e repassa os dados recebidos pela rede². Essas redes podem ter os seguintes objetivos:

- coletar o valor de algum sensor em um dado momento, por exemplo, temperatura, pressão

¹O termo *Ad Hoc* é uma expressão latina que pode ser traduzida como *com esse objetivo* ou *para esse fim*.

²Neste trabalho será adotado o termo nó *sink* para a referência do controlador da rede, sinônimo para *hub*, *gateway* e coordenador.

atmosférica, luminosidade e umidade relativa do ar;

- detectar a ocorrência de eventos de interesse, como por exemplo, a movimentação de objetos ou acidentes;
- coletar informações para a detecção de objetos, como pessoas, carros ou animais;
- acompanhar um objeto e coletar suas informações continuamente após detecção.

A Figura 2.1 apresenta uma RSSF típica. Devido a limitação da carga das baterias, os transceptores dos nós sensores têm o alcance de comunicação reduzido, para que o custo com energia seja menor. Com isso, o recebimento de mensagens pelos nós sensores, que estão geograficamente distantes do nó *sink*, utiliza comunicação por múltiplos saltos (*multi-hop*). Desse modo o nó sensor *A* necessita que seus pacotes sejam roteados por outros nós (*B*, *C*, *D* e *E*) e serem recebidos pelo nó *sink*. Esse, por sua vez, pode encaminhar essas informações para outras redes, como a Internet, também mostrada na Figura 2.1.

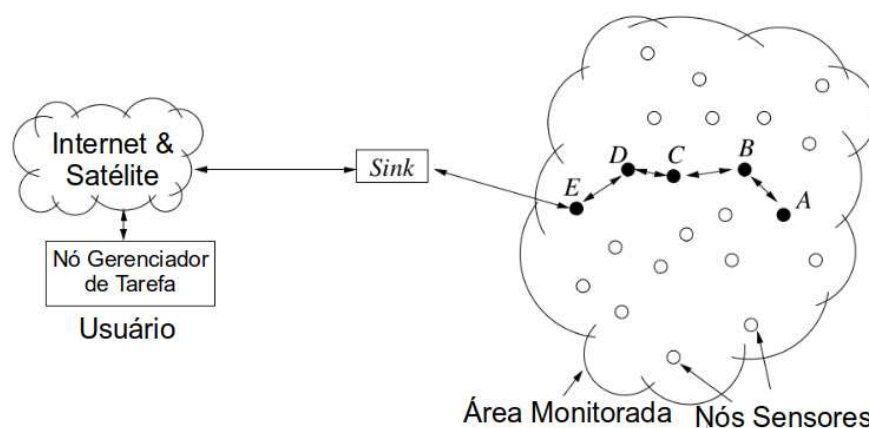


Figura 2.1: Modelo de uma RSSF (Akyildiz e Vuran, 2010).

Além de receber os dados coletados, o nó *sink* pode enviar pacotes aos nós sensores para gerenciamento da rede, como consultas de dados sensorados ou para atender os requisitos das aplicações, como valor do intervalo de coleta dos dados ou tempo do rádio ligado. Segundo Yun e Xia (2010), usualmente as RSSF possuem um único nó *sink* estático, mas o uso de vários *sinks* estáticos ou móveis é adotado como proposta de solução para otimizar o funcionamento dessas redes, como seu tempo de vida.

As RSSF podem ser utilizadas em diferentes ambientes, internos (indústrias e residências) ou externos (florestas, ruas e pontes), e em ambos, onde a presença ou intervenção humana nesses locais pode ser impossibilitada, difícil ou até indesejada, devido às características do lugar, do foco de observação ou da região em que a rede deva ser implantada. Além do consumo de energia,

que é um fator limitante nas RSSF, existem outros desafios a serem pesquisados para essas redes, como a sua integração com outras redes, a comunicação em tempo real de aplicações multimídia e o desenvolvimento de novos protocolos.

2.2 Redes Corporais sem Fio

Redes Corporais sem Fio (WBANs – *Wireless Body Area Networks*) são redes de comunicação de dados sem fio formadas por sensores colocados sobre ou dentro do corpo humano ((Yang, 2006), (Wang e Wang, 2013)). WBANs fazem parte da classe de redes PAN (Redes Pessoais), mas se diferenciam das demais por se restringirem ao entorno do corpo. Geralmente coletam continuamente sinais fisiológicos e permitem o monitoramento remoto para fins de acompanhamento de saúde ou bem estar. Além da privacidade, por transmitirem informações críticas e pessoais, os requisitos dessas redes exigem alta taxa de comunicação, tolerância a falhas, baixo consumo de energia e informações em tempo real.

Os principais cenários incluem principalmente aplicações médicas, mas não restritos a essas, como: *i*) monitoramento hospitalar, ambulatorial ou domiciliar para fins de acompanhamento médico ou reabilitação; *ii*) prevenção de acidentes em idosos e monitoramento do bem estar (*healthcare*), por meio da medição de pressão sanguínea e detecção de movimento; *iii*) diagnóstico e tratamento médico, por meio da adição de atuadores, para a injeção de medicamentos ou ativação muscular; *iv*) esportes e *fitness*, pela medição da temperatura corporal e batimentos cardíacos; e *v*) entretenimento, realidade virtual e jogos.

O Comitê de Padrões IEEE 802.15 criou, em dezembro de 2007, um grupo de trabalho designado como IEEE 802.15.6 para a definição de camadas Físicas e de controle de acesso ao meio (MAC) para redes WBAN (Tseng *et al.*, 2016). A camada Física define rádios de banda estreita nas faixas MICS (*Medical Implant Communications Service*), WMTS (*Wireless Medical Telemetry Services*), ISM (*Industrial Scientific Medical*) e de banda ultra larga (UWB – *Ultra-WideBand*). Essas características formam uma abordagem que permite de maneira não intrusiva, pervasiva e ubíqua o monitoramento do corpo humano.

Apesar do IEEE 802.15.6 ser utilizado desde 2012, até o momento não existe um *chip* comercial para a camada PHY. Por isso as pesquisas na literatura apresentam trabalhos usando as camadas PHY do padrão IEEE 802.15.4 (ZigBee) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth).

A Figura 2.2 mostra um exemplo de WBAN (Nakanishi *et al.*, 2012), como parte de um projeto de pesquisa para o monitoramento remoto de pacientes. Nessa rede são obtidos dados da

temperatura, movimento, oxigenação sanguínea e som, e atividades diárias são identificadas, como a realização de exercícios físicos. Apesar da rede e seus dispositivos serem visíveis na Figura 2.2, a tendência é que futuramente fiquem imperceptíveis aos usuários, e que o tamanho e forma dos dispositivos não causem desconforto nem limitações.



Figura 2.2: Exemplo de um projeto de rede corporal sem fio (Nakanishi et al., 2012).

Um *smartphone* pode realizar as funções de um nó *sink*, desde que possua uma interface para a rede WBAN, como ZigBee, Bluetooth ou outras. Além disso, o nó *sink* pode realizar a função de *gateway* para outras redes, como GSM (*Global System for Mobile Communications*) ou Internet.

Segundo Barakah e Ammad-uddin (2012), os dispositivos presentes em uma WBAN podem ser definidos como:

- **nó sensor sem fio:** um dispositivo que reage e/ou reúne dados sobre estímulos físicos, processa-os se necessário, e envia-os por transmissões sem fio. Seus componentes são sensores, bateria, processador, memória e transceptor de rádio;
- **nó atuador sem fio:** é um nó que possui um atuador, como por exemplo injetar no corpo do usuário uma determinada dosagem de medicamento. Esse dispositivo possui os mesmos itens do nó sensor sem fio acrescido de um atuador;
- **nó sink:** seu objetivo principal é coordenar as informações sensoreadas pelos nós sensores e realizar a comunicação com o usuário (paciente, enfermeira, médico, equipe, entre outros). Os componentes desse dispositivo têm maior capacidade, como para bateria, memória, processador e transceptor.

Outras tecnologias de redes serviram de base para a estruturação das WBANs, como a tecnologia celular móvel, as redes *Ad Hoc* e as RSSF e, por isso, acrescentam tanto conceitos quanto limitações. Ainda segundo Barakah e Ammad-uddin (2012), os aspectos tecnológicos das WBANs possuem desafios que são decorrentes de suas particularidades, como:

- **escala:** as WBANs necessitam monitorar um corpo humano, o que pode representar distância entre alguns centímetros e poucos metros;
- **densidade:** apesar de não ser definido um valor no documento do padrão, vários trabalhos na literatura estimam redes com quantidades máximas próximas a uma centena de nós;
- **precisão do resultado:** os sinais vitais monitorados necessitam de alta precisão, uma vez que a WBAN não apresenta redundância de nós. Além disso, os nós sensores devem ser robustos e autônomicos devido a movimentação do corpo e variação ambiental;
- **tarefas:** nós sensores realizam múltiplas tarefas. Além dos dados do corpo, que podem exigir um ou mais sensores, as informações do ambiente podem ser importantes, como temperatura e umidade do ar. Os nós sensores podem ser responsáveis por processar os dados antes de enviá-los, o que obrigaria o uso de um equipamento mais sofisticado;
- **topologia:** a topologia da rede é variável devido à movimentação do corpo e a aproximação de objetos, quando alguns nós sensores podem ser encobertos, tornando-se incomunicáveis;
- **taxa de dados:** os ciclos dos sinais monitorados e das atividades fisiológicas do corpo humano necessitam uma grande largura de banda;
- **mobilidade:** quando os nós sensores de uma rede não são estáticos a topologia pode alterar e ocorrer perdas de pacotes e aumento na latência;
- **reposição de nós:** a troca ou manutenção dos nós sensores torna-se difícil se os mesmos forem implantados, pois podem requerer ajuda especializada;
- **tempo de uso/trabalho (*lifetime*):** é estimado para vários anos ou meses de uso com baterias de pequeno tamanho, possibilitando um histórico de monitoramento de dados do usuário;
- **baterias:** de tamanho reduzido, e por vezes inacessíveis ou de difícil reposição, sua constante troca pode ocasionar perda de dados, desconfiguração e desconforto ao usuário;

- **biocompatibilidade:** podem ocorrer problemas de aceitação do nó pelo corpo do usuário devido aos dispositivos implantados ou em contato externo;
- **segurança:** é necessário um nível alto de proteção aos dados dos usuários. As informações coletadas por nós sensores são propriedade do usuário em particular e devem permanecer assim mesmo ao se aproximarem de outras redes (corporais ou não), evitando que seus dados sejam coletados e lidos indevidamente;
- **impacto da perda de dados:** a quantidade de dados perdidos pode comprometer a qualidade na precisão dos dados e a função de monitoramento da rede;
- **tecnologia sem fio:** os nós sensores necessitam de transceptores com baixo consumo de energia e de pequeno tamanho;
- **comunicação em tempo real:** os nós sensores necessitam de garantia da entrega dos pacotes com baixa latência ou em intervalos predeterminados,
- **arquitetura:** devido a localização dos nós sensores no corpo humano, essas redes são caracterizadas por poucos saltos ou uma quantidade menor de nós sensores em relação às RSSF, maior mobilidade, atuadores e apenas um nó *sink*.

2.2.1 Sinais fisiológicos

Na Tabela 2.1 é apresentada uma relação não exaustiva de aplicações para WBANs. O monitoramento não depende somente de resultados imediatos, uma vez que o histórico de eventos monitorados, como a pressão sanguínea, pode colaborar com informações importantes para um tratamento mais prolongado, como ao apresentar a reação do paciente em um determinado tempo.

Tabela 2.1: *Relação de possíveis doenças que poderia ser monitorada com sensores e WBANs (Barakah e Ammad-uddin, 2012).*

Fisiologia	Sensor	Benefícios
Cardiovascular	Oxímetro, sensor batimento cardíaco, ECG	A equipe médica pode determinar o tratamento com antecedência ao receber informações vitais sobre a frequência cardíaca e irregularidades do coração, durante a monitoração do estado de saúde do paciente.

Continua na próxima página

Tabela 2.1 – continuação

Fisiologia	Sensor	Benefícios
Paraplegia	Acelerômetro, giroscópio, sensor para posição pernas, sensores nos nervos, atuadores posicionados nas pernas para estímulos dos músculos	Interação entre os dados dos sensores e os atuadores auxilia na restauração da capacidade de movimentação
Dentes quebrados e pontes	Dispositivos com RFID	Diminuição de erros e melhora da qualidade no desenvolvimento de próteses dentárias
Diabetes	Atuador de insulina	Caso o sensor indique uma queda acentuada no nível da glicose, um sinal pode ser enviado para o atuador a fim de iniciar a injeção de insulina.
Asma	Sensor de alergia	Nós sensores que podem detectar os agentes alergênicos presentes no ar e enviar esses dados continuamente para o médico e/ou para o próprio paciente.
Deficientes visuais	Retina artificial, Matriz de micro sensores, Câmera externa	Uma retina artificial composta de uma matriz de micro sensores implantada no olho sob a superfície da retina. A retina artificial traduz os impulsos elétricos em sinais neurológicos. A entrada pode ser obtida localmente a partir de sensores sensíveis à luz ou por uma câmara externa sobre os óculos.
Pressão sanguínea	Sensor de pressão sanguínea, Atuador com medicamentos	Caso ocorram mudanças na pressão sanguínea, monitorada por um sensor e baseada em um limiar, um sinal pode ser enviado para o atuador, a fim de iniciar o procedimento do medicamento injetável
Mal de Parkinson	Sensores de movimento, Acelerômetro	Possibilitam estimar a gravidade do tremor, bradicinesia (lentidão nos movimentos) e discinesia (anormalidade dos movimentos) dos dados do acelerômetro a fim de se realizar uma avaliação completa
Monitoramento Pós Operatório	Temperatura, Pressão Sanguínea, Batimentos Cardíacos e ECG	Possibilita ao paciente não ficar na cama ou em hospitais, permanecendo na própria residência com acompanhamento médico a distância

A Tabela 2.2 descreve alguns tipos de sinais e sensores fisiológicos. O uso de determinados sinais fisiológicos influencia no projeto da rede corporal, devido à quantidade de informações que transmite, além da periodicidade de sua coleta pelos nós sensores.

Tabela 2.2: Descrição de alguns exemplos de sinais sensorados (*Pantelopoulos e Bourbakis, 2010*).

Bio sinal	Sensor	Descrição
Eletrocardiograma (ECG)	Eletrodos	Atividades elétricas do coração (ondas contínuas mostrando as fases de contração e relaxamento do ciclo cardíaco)
Pressão Sanguínea	Esfigmomanômetro	Refere-se à força exercida para a circulação sanguínea nos caminhos das veias, especialmente as artérias
Temperatura corporal ou da pele	Termistores (NTC e PTC)	Forma mensurável do corpo em gerar e eliminar o calor com base em amostras de temperatura de uma região do corpo
Taxa de respiração	Sensor piezo eletrônico e piezo resistivo no tórax	O número de movimentos indica a inspiração e a expiração por unidade de tempo
Saturação do oxigênio	Oxímetro	Indica a oxigenação ou a quantidade de oxigênio presente no sangue de um paciente
Batimento do coração	Oxímetro/ eletrodos	Frequência do ciclo cardíaco
Perspiração (transpiração) ou condutividade da pele	Galvanômetro ou GSR (<i>Galvanic Skin Response</i>)	A condutância da pele é associada com a atividade das glândulas sudoríparas
Sons do coração	Microfone no tórax	A gravação dos sons cardíacos por um microfone no peito (estetoscópio)
Glicose no sangue	Sensor de glicose	Medida da quantidade de glicose no sangue ou pelo líquido na pele
Eletromiograma (EMG)	Eletrodos	Atividades elétricas dos músculos esqueléticos (características do sistema neuromuscular)

As WBANs podem ser compostas por aplicações com diferentes taxas de dados ou que tenham variações altas, de poucos *kbits/s* até vários *Mbit/s*. Na Tabela 2.3 são mostradas as aplicações e suas taxas.

2.2.2 Topologias e Arquiteturas

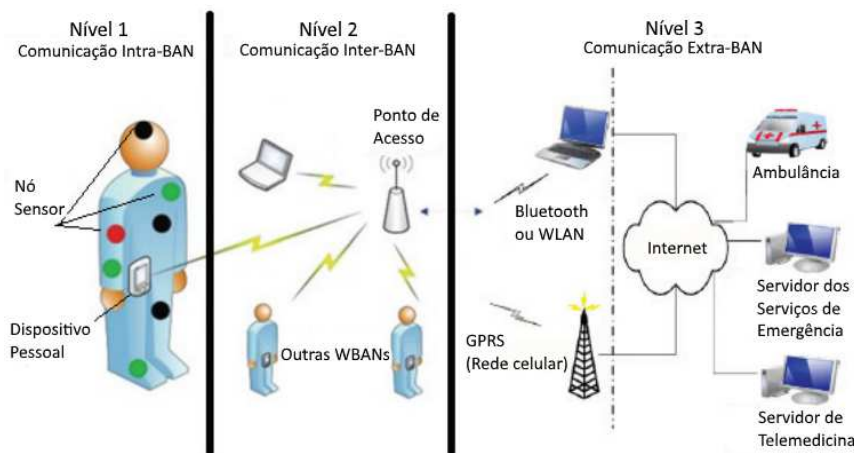
Segundo Ullah *et al.* (2012), as WBANs podem ter topologias como árvore, malha e estrela, sendo a última mais comum. Na topologia estrela os nós são conectados ao nó *sink* em um salto. No padrão IEEE 802.15.6 é definido o máximo de dois saltos entre nós sensores e *sink* como cálculo para diminuir a latência nas aplicações WBANs.

Na literatura a arquitetura em três níveis é muito empregada. Na Figura 2.3 é mostrada uma típica arquitetura em três níveis, onde os dados coletados de nós sensores localizados em um usuário (Nível 1) são transmitidos entre nós sensores e *sink* de uma mesma WBAN. O Nível 1 pode também ser denominado de intra-BAN. No Nível 2 as WBANs podem trocar dados entre si e o nó *sink*

Tabela 2.3: Exemplos de taxas de dados de sinais fisiológicos (Latré et al., 2011).

Aplicação	Taxa de Dados (bps)	Largura de banda (Hz)	Freq. de Amostragem (Hz)
Eletrocardiograma (ECG) 6 a 12 guias	6k - 192k	100 - 1000	60 - 1k
Eletromiograma (EMG)	43,6k - 98k	50 - 3k	125 - 1,5k
Eletrocardiograma EEG 12 guias	42,3k - 98k	0 - 250	250 - 500
Saturação sanguínea (SpO ₂)	16 - 1,44	0 - 30	60
Pressão sanguínea	100 - 1k	0 - 60	120
Fluxo sanguíneo	480 - 640	0 - 20	40 - 63
Batimento cardíaco	2,4k	0 - 250	250 - 500
Glicose	400 - 1,6k	0 - 50	0,2
Temperatura	120	0 - 1	0,1
Movimento	1k - 35k	0 - 500	50 - 150
Implante Coclear	100k		
Retina artificial	1M		
Áudio	1M	15k	44k
Voz	50 - 50k	4k	8k - 10k
Endoscopia	< 10M	250k	0,5 - 30

pode ser equipado com outro tipo de rede, como WiFi. No Nível 3 os dados de uma ou mais WBANs podem ser enviados para outras redes com outras tecnologias, como 4G. O nível 2 e 3 são denominados respectivamente de inter e extra-BAN.

**Figura 2.3:** Arquitetura de três níveis de uma WBAN (Negra et al., 2016) para aplicação médica.

As arquiteturas descritas na literatura influenciam como as aplicações são projetadas, tanto em seus requisitos funcionais quanto não funcionais. Os requisitos funcionais definem as funcionalidades da aplicação, como a coleta e manipulação dos dados, o que não deve ser processado e como reagir em determinadas situações. Os requisitos não funcionais têm relação à aplicação em termos de segurança, usabilidade e desempenho. Portanto, uma aplicação que envolva dados do nível 2 terá requisitos diferentes em relação a um aplicação no nível 1, como, por exemplo, a segurança.

Segundo Razzaque et al. (2017) a arquitetura de uma WBAN depende de sua aplicação e as solu-

ções médicas ou de saúde consistem em três camadas, como mostrado na Figura 2.4. O primeiro nível é descrito como comunicação intra-BANs e consiste de nós sensores colocados no corpo ou dispositivos vestíveis, que reúnem sinais fisiológicos para serem enviados para um *sink*. No segundo nível, denominado de comunicação entre BANs, deve processar as informações enviadas pelo primeiro nível para apresentá-las aos respectivos usuários (como um retorno) ou aos responsáveis (médicos, profissionais da saúde ou companhias de seguro). O terceiro nível é responsável pela análise e decisões com relação aos dados recebidos. O segundo e terceiro nível podem se comunicar por telefonia ou Internet.

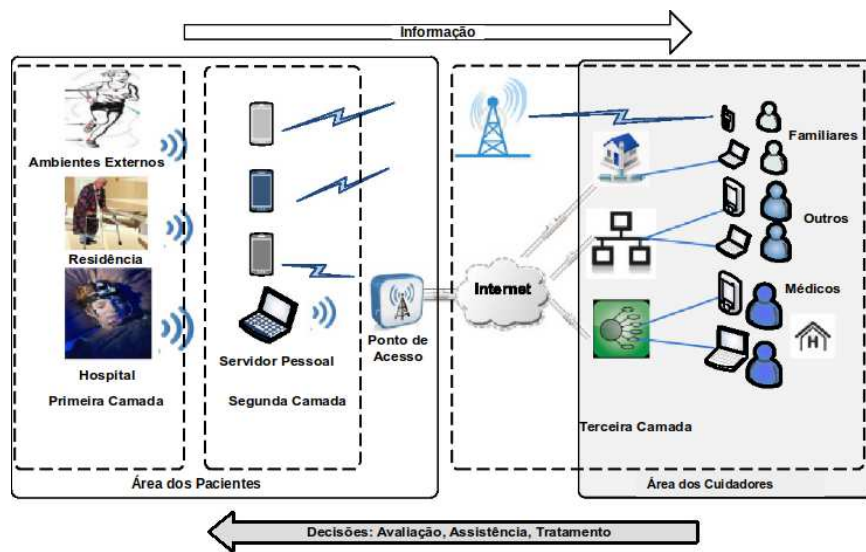


Figura 2.4: Arquitetura de 3 camadas proposta por Razzaque et al. (2017).

2.3 Abordagem Cross-Layer

A grande maioria das arquiteturas de redes de telecomunicações são organizadas hierarquicamente em camadas, e são responsáveis por executar um conjunto de funções padronizadas pelo modelo OSI (*Open System Interconnection*). Nesse tipo de arquitetura, a comunicação ocorre por meio de interfaces entre camadas vizinhas, como pode ser observado na Figura 2.5. Os protocolos são específicos para cada camada, realizando a comunicação horizontal com sua camada correspondente par a par. Para a informação chegar até a mesma camada, realiza-se a comunicação vertical entre as camadas, tanto para enviar quanto para receber dados. O tráfego desses dados, mostrados na Figura 2.5 por linhas cheias, ocorre através das interfaces das camadas. Segundo Sevin et al. (2016) o uso da arquitetura em camadas tem vantagens como escalabilidade, compatibilidade e flexibilidade no projeto de redes.

O modelo OSI foi desenvolvido para redes cabeadas de comunicação digital, permitindo que

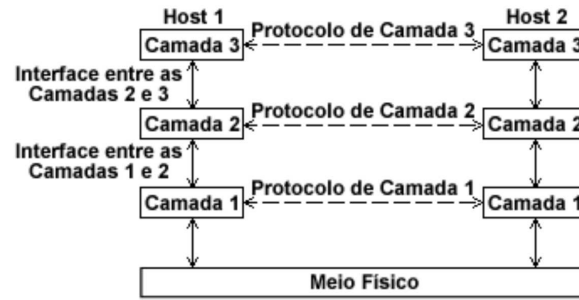


Figura 2.5: Um modelo ilustrativo de três camadas.

fabricantes de equipamentos diferentes possam trocar dados. Essa padronização permitiu, por exemplo, o surgimento da Internet.

Entretanto, o modelo OSI tem sido questionado pela comunidade científica porque restringe a interação entre camadas não adjacentes (Wang *et al.*, 2012) e não é adequado para a funcionalidade eficiente de redes sem fio (Edirisinghe e Zaslavsky, 2014). As redes sem fio são mais dinâmicas e têm recursos limitados, diferentemente da estrutura estática das redes cabeadas. A combinação da complexidade das redes sem fio com a limitação de recursos e a baixa capacidade computacional dos dispositivos sem fio demanda uma adaptação da pilha de protocolos. A demanda de novas aplicações pode ser restringida pela insuficiência do modelo em camadas em atender tais adaptações. A separação das camadas imposta pelo modelo tradicional também restringe o desempenho em redes sem fio por não considerar sua característica *broadcast* e a possibilidade da mobilidade. As constantes mudanças no comportamento do canal requerem respostas rápidas que também podem não ser obtidas. Além disso, as arquiteturas em camadas têm um *overhead* de comunicação proporcional ao número de camadas, a impossibilidade de ajuste de parâmetros com base no comportamento de outras camadas e a implementação duplicada de funções.

A abordagem *cross-layer* é uma técnica utilizada para superar as restrições do modelo em camadas e consiste na interação entre duas ou mais camadas da pilha de protocolos, adjacentes ou não. Em Latré *et al.* (2011) e Hughes *et al.* (2012) o conceito de *cross-layer* é definido como um meio de melhorar a eficiência e a interação entre duas ou mais camadas da pilha de protocolos. Fu *et al.* (2014), Hefeida *et al.* (2012) e Gajjar *et al.* (2011b) descrevem projetos *cross-layer*, nos quais cada camada pode compartilhar parâmetros ou outras informações com outras camadas, sem a necessidade de quebrar a estrutura básica de camadas. Os projetos *cross-layer* podem distribuir entre as camadas informações que são ocultas, como dados do meio de transmissão. Para Foukalas *et al.* (2008) qualquer tentativa de violar o modelo de referência OSI ou transferência de informações entre as camadas é considerado um projeto *cross-layer*.

Segundo Srivastava e Motani (2005), em redes sem fio três razões justificam a comunicação entre

camadas não adjacentes:

- a possibilidade da comunicação oportunista, em que a variação da qualidade do enlace permite o uso oportunista de um canal de comunicação, onde a transmissão de parâmetros entre camadas pode ser utilizados para isso;
- novas modalidades de comunicação oferecidas pelo meio, o que pode ser uma vantagem para os nós cooperarem via *broadcast*; e
- problemas característicos das transmissões sem fio, em que os enlaces sem fio apresentam novos problemas em relação aos enlaces com fio.

Na Figura 2.6 é mostrado um exemplo de interação *cross-layer* com uma arquitetura de quatro camadas. A camada de aplicação pode orientar a camada MAC para o agendamento de acesso ao meio (QoS); a camada física pode informar a camada de rede sobre o estado do canal de comunicação.

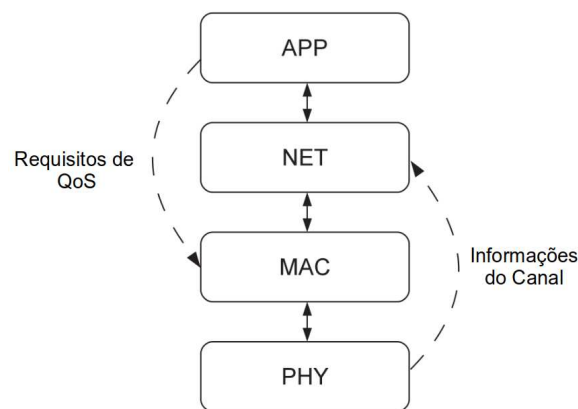


Figura 2.6: Arquitetura de quatro camadas com interação *cross-layer* (Mendes e J.P.C. Rodrigues, 2011).

A variação natural das condições ambientais no canal de comunicação impacta fortemente o desempenho em comunicação sem fio. A seguir serão descritas três abordagens sobre *cross-layer* com detalhes.

2.3.1 Abordagem de Srivastava

As interações entre camadas, conforme mostradas na Figura 2.6 podem ser diversificadas. Segundo Srivastava e Motani (2005), as propostas para projetos *cross-layer* podem ser ilustradas pela Figura 2.7, onde os retângulos representam as camadas de protocolos. As abordagens da Figura 2.7-a até 2.7-c (*Back-and-forth information layers*) exige a necessidade da criação de novas interfaces de comunicação para que o protocolo de uma camada consiga informações de outra camada. Essas novas interfaces permitem que as camadas tenham acesso a variáveis que indiquem as condições

ou estados atuais de outra camada. O compartilhamento dessas variáveis pode ser relevante para o aperfeiçoamento dos serviços específicos de cada camada.

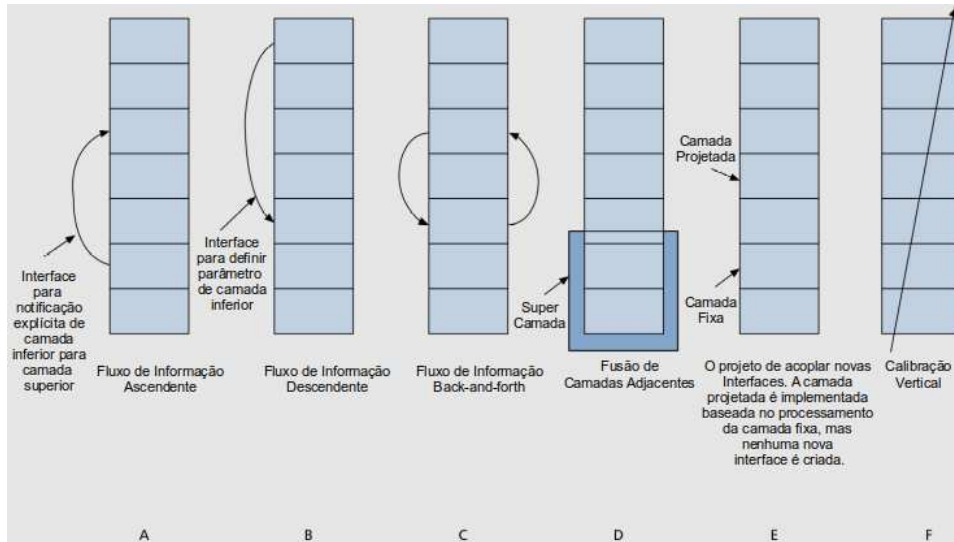


Figura 2.7: Propostas para projetos de interação cross-layer (Srivastava e Motani, 2005).

A abordagem mostrada na Figura 2.7-d é caracterizada pela união de camadas adjacentes, de forma que os serviços das mesmas sejam fornecidos por uma nova e única camada. A arquitetura da rede não se altera, novas interfaces não são necessárias e a nova camada realiza a comunicação com as demais interfaces já existentes.

Na Figura 2.7-e é mostrado o acoplamento de projetos em que parâmetros de camadas são compartilhados entre camadas. Nessa modalidade de projeto não há o desenvolvimento de novas interfaces.

A abordagem da Figura 2.7-f envolve o uso dos parâmetros de várias camadas, denominado de calibração vertical. Nesse caso, todas as camadas têm seus parâmetros compartilhados com a camada de aplicação.

Srivastava e Motani (2005) classificam a interação entre camadas para abordagens *cross-layer* em três tipos de propostas, mostradas na Figura 2.8. A comunicação direta entre camadas (Figura 2.8-a) permite novas comunicações entre camadas com a criação de novas interfaces, mesmo entre camadas adjacentes. Nesse caso, essa interação permite o compartilhamento de variáveis das camadas.

O uso de um banco de dados para compartilhar variáveis entre camadas é mostrado na Figura 2.8-b, oferecendo o serviço de armazenamento e recuperação dos parâmetros e variáveis. O desenvolvimento de interfaces na comunicação vertical da Figura 2.8-b pode especificar novos parâmetros das camadas, conforme a variação do meio ou de outro fator relevante, como taxa de dados ou a prioridade de entrega de pacotes. O desafio nessa proposta é compartilhar os parâmetros ou variáveis,

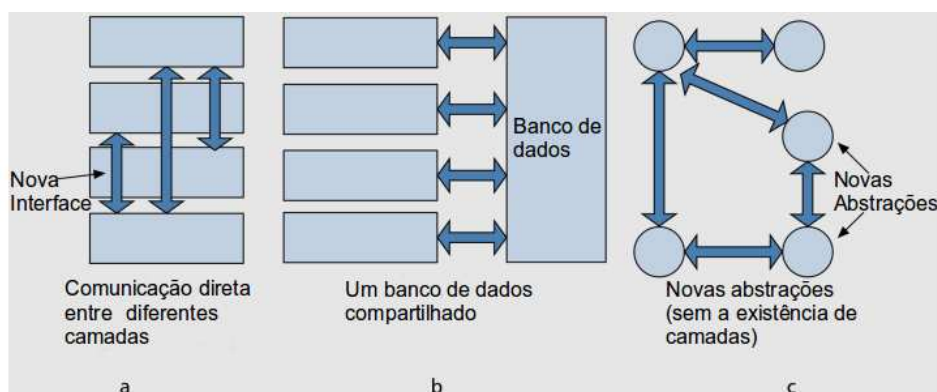


Figura 2.8: Propostas para arquiteturas de comunicação cross-layer (Srivastava e Motani, 2005).

concentrando-se no projeto de um banco de dados integrado com as camadas de protocolos, que realize de forma viável a comunicação dentro da pilha de protocolos.

A Figura 2.8-c mostra o uso de regras ou módulos para a implementação de uma nova comunicação entre a pilha de protocolos, em que as funções ou regras as particularizam como módulos e não mais como camadas. Por isso, descaracterizam também a arquitetura tradicional em camadas.

Segundo Srivastava e Motani (2005), a comunicação oportunista, onde parâmetros das camadas podem ser dinamicamente alterados e disponibilizados para a adaptação da qualidade dos canais, é inviável sem a quebra da estrutura das camadas.

2.3.2 Abordagem de Akyildiz

Akyildiz e Vuran (2010) propõe duas abordagens para *cross-layer*. Na primeira, denominada interações *cross-layer*, toda a estrutura tradicional de camadas é mantida, e cada camada considera a interdependência com outras camadas. A segunda abordagem é a unificação de todas as camadas para prover um módulo único de comunicação para as RSSF.

As soluções propostas para as interações *cross-layer* são classificadas em termos de interações entre as camadas física, MAC, rede e transporte, como descrito a seguir:

- **MAC e aplicação:** o conteúdo dos dados coletados pelos nós sensores tem um impacto direto no desenvolvimento dos protocolos de comunicação. Ao contrário do modelo de tráfego em redes *Ad Hoc*, em que diferentes nós geram tráfegos independentes, as informações coletivas dos nós sensores coletivos são mais importantes que as individuais. Portanto, a densidade de nós em uma região e a periodicidade dos eventos são características que influenciam a proposta de políticas da camada MAC;
- **rede e física:** o aspecto dinâmico do canal de comunicação interfere no tempo de vida útil da

rede. Apesar da distância física entre dois nós não se alterar, os efeitos resultantes do canal produzem oscilações significativas na comunicação, afetando a qualidade das rotas estabelecidas na camada de rede com base em decisões estáticas;

- **transporte e física:** a camada de transporte regula a taxa do tráfego de transmissão para atenuar o congestionamento na rede. Nas RSSF, esse congestionamento tem relação com a contenção ao meio de acesso, que pode ser controlada alterando a potência de transmissão do rádio na camada física. Como consequência, tem-se uma interdependência entre o controle de energia e o controle de congestionamento.

Akyildiz e Vuran (2010) propõe o projeto de um módulo *cross-layer* com as funcionalidades das camadas tradicionais combinadas em um único módulo, como mostrado na Figura 2.9, e denominado *Cross-Layer Protocol* (XLP), que tem como objetivo a incorporação de todas as funcionalidades em um único protocolo, considerando os efeitos do canal de comunicação.

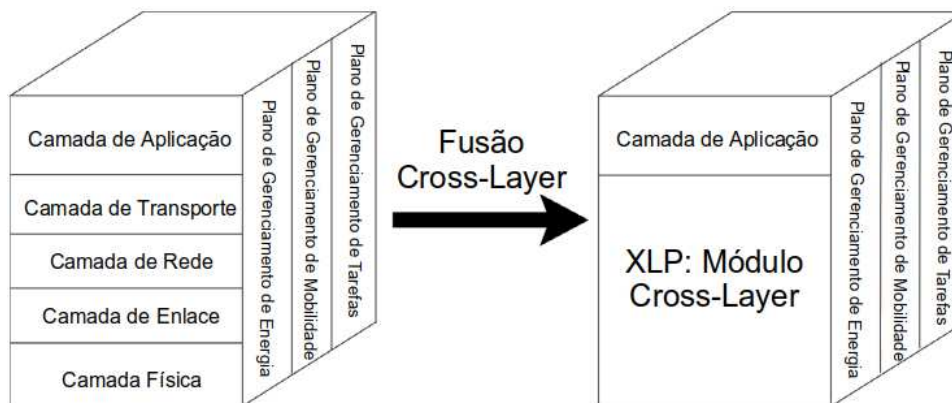


Figura 2.9: Módulo conceitual cross-layer para RSSF (Akyildiz e Vuran, 2010).

O XLP é baseado no funcionamento dos seguintes componentes que formam o núcleo do protocolo desenvolvido:

- **Conceitual (*Initiative concept*):** a iniciativa da comunicação é feita pelo receptor. Cada receptor participa da comunicação baseado no estado local, que é representado por uma função de iniciativa (*function initiative*);
- **Contenção no receptor (*Receiver contention*):** é utilizada para selecionar o próximo salto do nó sensor para o roteamento. Após receber um pacote que contém um indicador de qualidade de enlace, o nó sensor executa uma contenção para o roteamento;
- **Controle de tráfego local (*Local cross-layer congestion control*):** nós sensores podem ser determinados a não realizarem comunicação em razão do controle de tráfego;

- **Roteamento baseado em ângulo (*Angle-based routing*):** ao considerar a localização geográfica dos nós sensores e o ângulo entre os nós sensores vizinhos ao nó sensor emissor e ao *sink*, o roteamento é baseado nas distâncias mais próximas ao *sink*,
- **Funcionamento adaptativo do canal (*Channel adaptive operation*):** os nós sensores adaptam os parâmetros de comunicação baseados nas condições do canal;
- **Operações de *duty cycle* (*Duty cycle operations*):** os nós sensores empregam uma solução distribuída para minimizar o consumo energético e o *overhead* do protocolo.

No XLP as interações realizadas entre as camadas tradicionais são descritas como:

- **Rede, MAC e física:** as informações do estado do canal são incorporadas às camadas mais altas do modelo. Um nó é capaz de controlar a qualidade do canal, utilizando pacotes recebidos. Com isso, o nó participa da comunicação com base no estado recente do canal,
- **Rede e MAC:** as funcionalidades da disputa de acesso ao meio e do roteamento baseada no receptor são agrupadas. Como resultado, procura-se determinar pela posição geográfica em relação ao *sink* quais os receptores aptos a encaminharem os pacotes em *multi-hop*, e
- **Transporte, rede e MAC:** as funcionalidades tradicionais da camada de transporte são incorporadas no controle de tráfego. O nó monitora o estado dos seus *buffers* e de suas taxas de dados e, como consequência, os nós com taxas altas são impedidos de participarem da disputa de acesso ao meio e do roteamento. O encaminhamento de pacotes para evitar muito tráfego na rede e a taxa de dados são controlados com base nas informações locais dos nós.

2.3.3 Abordagem de Gajjar

Gajjar [et al. \(2011b\)](#) propõem que as propriedades da abordagem em camadas (flexibilidade na atualização de certas camadas, fácil depuração e diminuição da complexidade) devem ser preservadas na abordagem *cross-layer*. Isso garante que os ganhos de curto prazo no desempenho e na capacidade oferecidas pelo *cross-layer* possam também ser de longo prazo, considerando custo, facilidade de manutenção e padronização. Os projetos *cross-layer* que combinam camadas são eficientes quanto ao consumo de energia, mas tornam-se caros para desenvolvimento, manutenção e atualização de novos protocolos, pois todas as camadas são afetadas por esses processos. Já os projetos *cross-layer* que apenas compartilham informações tornam-se mais flexíveis e reutilizáveis em relação ao modelo de camadas, mas não no consumo de energia.

Segundo Gajjar *et al.* (2011b) a violação na estrutura de camadas é caracterizada por aspectos como a criação de novas interfaces entre camadas, a redefinição dos limites entre camadas, o desenvolvimento de uma camada com base nos detalhes de implementação de outras e/ou no ajuste de parâmetros entre camadas. Para os autores, os protocolos projetados com *cross-layer* têm influência no processamento das outras camadas. A abordagem *cross-layer* é descrita como um projeto de algoritmos, protocolos ou arquiteturas que explorara ou fornece um conjunto de interações entre camadas, que é um conjunto maior do que o padrão de interfaces fornecidos pela referência da arquitetura em camadas.

As RSSF têm aspectos que justificam o uso de *cross-layer* para a implementação de novos protocolos:

- **mobilidade:** apesar de estática inicialmente, a localização dos nós sensores (grupo ou totalidade) podem ser alteradas devido aos efeitos do ambiente em que estão ou por serem deslocadas por entidades móveis. Essa mobilidade ocasiona mudanças nas camadas física (nível de interferência do sinal), enlace (agendamento de acesso ao meio), rede (topologia da rede) e transporte (tempo de conexão). Um projeto *cross-layer* pode permitir ao nó sensor gerenciar esses recursos em ambientes em que os nós se deslocam, explorando as interdependências entre essas camadas;
- **transmissão sem fio:** a transmissão sem fio tem algumas características adversas, como a atenuação do sinal decorrente do distanciamento, *multipath fading*³, alta taxa de erros de bit (BER), problema do terminal escondido e exposto, disputa pelo meio, comunicações simultâneas, efeito de captura (*capture effect*)⁴, interferência na transmissão e injustiça⁵. Essas características podem acarretar a perda de pacotes e retransmissão ou controle de erros, o que aumenta o consumo de energia nos nós sensores;
- **tamanho, Recursos e Energia:** os requisitos de uma aplicação determinam o tamanho do nó sensor. A variação do tamanho e do custo impactam nos limites de recursos, como capacidade energética, processamento, armazenamento e recursos de comunicação. O projeto *cross-layer* pode relacionar variáveis do consumo e processamento com várias camadas, possibilitando que os nós sensores utilizem esses recursos de forma eficiente. Todos os protocolos das camadas

³A onda que chega por caminhos diferentes do caminho direto pode chegar em fase diferente e cancelar o sinal da onda que veio pelo caminho direto.

⁴Utilizado quando dois sinais na mesma faixa de frequências são recebidos e o que possui maior nível de recepção será aceito e demodulado enquanto o outro será descartado.

⁵Quando a carga de tráfego é alta e pode causar diversos problemas de injustiça no acesso ao meio e de instabilidade em conexões.

afetam o consumo de energia, logo a cooperação entre todas pode reduzir o consumo de todo o sistema, ao compartilhar informações das outras camadas;

- **estrutura específica para a aplicação:** o desempenho como requisito é variável ou específico para cada aplicação. Uma RSSF para monitoramento ambiental, por exemplo, deve priorizar o tempo de execução da rede para evitar a reposição de baterias. Já uma RSSF para detecção de intruso, deve priorizar a confiabilidade e o prazo de entrega dos dados. As técnicas de *cross-layer* podem garantir bom desempenho aos requisitos específicos das aplicações;
- **dependência da aplicação e QoS:** um determinado projeto de aplicação pode requerer confiabilidade e muitas vezes respostas em tempo real; comunicação segura e privada; e facilidades para a mobilidade. Esses protocolos devem oferecer serviços tais como boa cobertura da rede, controle de congestionamento, monitoramento de *buffer*, recebimentos de ACKs, mensagens de criptografia e recuperação de pacotes. A criptografia pode também ser utilizada para a troca segura de pacotes. O uso desses requisitos causa conflito entre a complexidade computacional e consumo de energia, uma vez que necessitam de uma transmissão com mais potência para reduzir a ocorrência de erros no canal;
- **cobertura de rede:** é definida como a taxa do espaço monitorado para toda área definida. A cobertura pode ser parcial (abrangendo apenas áreas de interesse), densa (cobrindo completamente a área de interesse) ou redundante (vários nós sensores abrangendo o mesmo espaço físico). A cobertura é um problema relacionado à camada física que depende da precisão e redundância requeridas pela camada de aplicação. No caso de transmissão e retransmissão de dados em áreas de coberturas densas ou redundantes, ocorre um aumento na disputa pelo acesso ao meio (MAC), congestionamento e complexidade no roteamento (Rede), acarretando mais gasto energético. Nas áreas com coberturas esparsas ou parciais, o aumento do gasto energético devido a maior potência de transmissão utilizada para atingir os nós sensores intermediários e o *sink* poderá particionar a rede e diminuir o tempo de execução da rede;
- **sincronização:** A referência do tempo nos nós sensores pode afetar diretamente uma função da aplicação da rede. Por exemplo, uma RSSF para rastreamento de alvos será inútil caso não registre a posição e o tempo da ocorrência de um evento. A complexidade do protocolo de sincronização de tempo pode afetar diretamente o tempo de execução da rede.

Além dos aspectos descritos, [Gajjar et al. \(2011b\)](#) sugerem desafios ou questões a serem pesquisadas no desenvolvimento de arquiteturas *cross-layer* para RSSF, que são:

- **coexistência de diferentes propostas de *cross-layer***: o propósito seria para diferentes projetos *cross-layer* coexistirem com os propostos em camadas. Uma iniciativa seria a integração das camadas OSI em uma única camada;
- **técnica sistemática**: para o desenvolvimento de técnicas sistemáticas para *cross-layer* é necessário encontrar funções que representem os objetivos globais do sistema, como o mínimo consumo de energia e o máximo tempo de execução da rede;
- **padronização da interação**: padronizar a informação compartilhada e o projeto de acoplamento dos mecanismos utilizados na interação entre camadas e entre nós sensores;
- **inconsistência**: no projeto *cross-layer* os efeitos de simples mudanças no projeto podem afetar todas as camadas, induzindo-as a possíveis inconsistências nos dados. Como forma de prevenção decorridas dessa mudanças, técnicas de teoria de controle do desempenho global do sistema ou grafos de dependência podem ser pesquisados e integrados como propriedades de determinação das informações nos projetos *cross-layer*;
- **outros aspectos**: decidir a melhor hierarquia de roteamento em redes do tipo *clusters*, planas e árvores considerando tráfego, atraso e escalabilidade, com base em uma regra global. Essa regra deve ser baseada no estudo dos estados dos nós sensores (ocioso, dormir, transmitir, ouvir), que tenha relação com os requisitos de QoS, mobilidade e interoperabilidade com outras redes (celular ou outra rede com arquitetura *cross-layer*).

As propriedades fundamentais da abordagem em camadas (flexibilidade na atualização de certas camadas, fácil depuração e diminuição da complexidade) devem ser preservadas em uma abordagem *cross-layer*. Isso garante que os ganhos de curto prazo no desempenho e na capacidade oferecidas pelo *cross-layer* podem também ser de longo prazo, considerando custo, facilidade de manutenção e padronização. Os projetos *cross-layer* são eficientes, considerando o consumo de energia, pois fornecem mais otimizações, mas tornam-se caros para desenvolver, manter e atualizar visto que todas as camadas são afetadas por esses processos. Em contraste, projetos de camadas que compartilham informações tornam-se mais flexíveis e reutilizáveis em relação ao modelo tradicional de camadas, mas não no consumo de energia.

2.3.4 Abordagens de *Cross-Layer* em WBANs

As abordagens descritas nas seções anteriores mostram a relevância no *cross-layer* para o desenvolvimento de aplicações em redes sem fio. [Srivastava e Motani \(2005\)](#) descrevem modelos de

projetos e as interações entre camadas. Já [Akyildiz e Vuran \(2010\)](#) justifica o uso de *cross-layer* para as RSSF e apresenta uma solução denominada XLP, que combina todas as funcionalidades das camadas em um único módulo. [Gajjar et al. \(2011a\)](#) descrevem os desafios das aplicações de RSSF baseadas na arquitetura em camadas, e quais as vantagens do uso do *cross-layer* para essas redes.

Na literatura existem diversas propostas para novas soluções para os desafios das WBANs; os trabalhos relevantes para esta tese e as características das pesquisas serão descritos no Capítulo 3.

A topologia estrela é utilizada em muitas arquiteturas, uma vez que os nós sensores ficam a um salto do *sink*. Com isso, a camada de rede das WBAN não é aplicada (serviço de roteamento), resultando em pesquisas mais voltadas para as camadas de enlace (mais especificamente a camada MAC), camada física e de aplicação. Assim como nas RSSF, nos trabalhos das WBANs não há muitas referências sobre estudos na camada de transporte⁶, o que acarreta uma caracterização de quatro camadas para essas redes. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura descrevem a pilha de protocolos contendo as camadas de aplicação, rede, enlace (MAC) e física.

Devido à baixa densidade de nós e ao pouco uso de roteamento, as técnicas de *flooding* descritas em [Akyildiz e Vuran \(2010\)](#), como uma das justificativas para o uso de *cross-layer* em RSSF, não são aplicáveis em WBANs. A assimetria das RSSF e a possibilidade de rotas alternativas para o envio dos dados ao *sink* motiva a pesquisa do roteamento no desenvolvimento de alguns protocolos. [Akyildiz e Vuran \(2010\)](#) descrevem a interferência entre os nós, o que resultaria em um atraso não determinístico na camada MAC, o que difere das WBANs.

O movimento do corpo humano, a proximidade da pele e a aproximação de ambientes variados tornam o estudo do meio em WBANs mais desafiador. Apesar do número reduzido de nós sensores em relação às RSSF, nas WBANs os *sink* também podem submeter-se às propriedades do meio. Portanto, as diferenças e desafios para as WBANs em relação a outras redes *Ad Hoc* para uma abordagem *cross-layer* seriam:

- pouco ou nenhum uso de técnicas ou tabelas de roteamento;
- não existe redundância de nós sensores (informação coletiva), logo a informação de cada nó sensor é importante;
- movimentos (distância entre nós) e características (absorção) do corpo humano impactam no acesso ao meio;

⁶A camada de transporte é responsável nas redes IEE 802.11 pela transferência dos dados de forma confiável ou não (TCP e UDP).

- variedade de padrões para uso, como o IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6. Esse último projetado especificamente para WBANs;
- proximidade com outras redes ou ambientes diferentes (hospitais, chuva, elevador, ponto de visada) também afetam o acesso ao meio;
- aplicações com variadas taxas de dados.

Em todos trabalhos que desenvolveram os protocolos utilizando técnicas *cross-layer*, a camada MAC é envolvida. A importância do acesso ao meio nas WBANs justifica-se pela variedade de fatores que podem ocasionar dificuldade na transmissão dos dados. Contudo, a dependência dos requisitos da aplicação pode determinar uma política mais ou menos agressiva para o acesso ao meio. Os trabalhos relacionados dão indícios de aspectos que podem ser importantes no desenvolvimento de soluções para WBANs com *cross-layer*, assim como os requisitos descritos por Jovanov e Milenkovic (2011) e Khan *et al.* (2012) mostrados na seção 2.2.2.

Os dispositivos e aplicações mostradas neste capítulo apresentam uma variedade de sinais e fluxos de dados que as WBANs podem utilizar. Além disso, as funções de uma WBAN de monitoramento contínuo podem ser consideradas de pouca mobilidade, como as realizadas em clínicas ou hospitais. Nesses casos, a mobilidade do usuário apresenta desafios como a coexistência com outros pacientes, entretanto a proximidade dos dispositivos com o corpo humano e as variações das posições representam interferências na rede. Portanto, as redes utilizadas por usuários que realizam tarefas cotidianas apresentam desafios diferentes, como a mobilidade do usuário, a alternância entre ambientes que podem interferir no funcionamento da rede (umidade, radiação), proximidade com outras redes corporais. As abordagens *cross-layer* empregadas para outras redes, como as RSSF, não se aplicam diretamente às características das WBANs, pois seus requisitos, estruturas e desafios não são equivalentes.

2.4 QoS

Na literatura a definição de QoS é muito empregada mas possui definições variadas. Segundo o ITU-T (recomendação E.800), a QoS é definida como as características totais de um serviço de telecomunicação que satisfaçam as necessidades explícitas e definidas para o seu usuário. Já a ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) define QoS, para uma perspectiva de rede, como a habilidade de segmentar ou diferenciar tipos de tráfegos para que uma rede consiga gerenciá-los

de maneira distinta. A norma ISO 8402 define qualidade como as características totais que uma entidade suporta para satisfazer as necessidades declaradas e implícitas.

Segundo [Ameen et al. \(2008\)](#) QoS pode ser entendida, na perspectiva da aplicação e da rede, como mostra a Figura 2.10. Na primeira a QoS é percebida pelo usuário final e na segunda é aceita como uma medida do serviço oferecido para as aplicações (latência, *jitter*, largura de banda e entrega de pacotes).

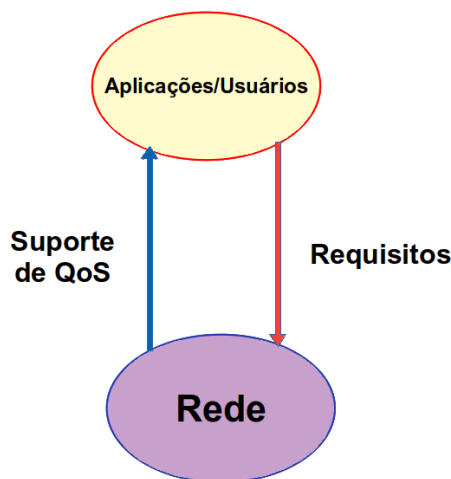


Figura 2.10: Modelo de QoS proposto por [Ameen et al. \(2008\)](#).

Uma arquitetura *cross-layer* é utilizada com o objetivo de melhorar as métricas. Segundo [Fu et al. \(2014\)](#), as camadas superiores precisam ter informações das camadas mais baixas, como a física e de enlace, para melhorar a QoS em certas circunstâncias. Por exemplo, na perda de pacotes em redes sem fio ao utilizar o TCP, como protocolo na camada de transporte, pode ser causado pelo mau desempenho nas camadas MAC e física.

A QoS para redes corporais deve considerar o seu contexto de projeto e pesquisa. A maioria das aplicações desenvolvidas para WBAN segue um padrão baseado em arquitetura de camadas, como descrito na seção 2.2.2. A execução correta de uma aplicação depende da ausência de falhas em quaisquer das camadas que façam suporte. Uma informação incorreta devido a problemas em um nó sensor, no protocolo de comunicação ou pacotes não entregues pode ocasionar consequências graves. Segundo [Zhou et al. \(2011\)](#) e [Chen et al. \(2011\)](#), o desenvolvimento de WBANs são na maioria dos casos destinadas à questões importantes e exigem um alto nível de confiabilidade, dado que têm como objetivo o monitoramento contínuo para melhorar a qualidade de vida de seus usuários.

As aplicações em WBANs devem fornecer serviços que podem exigir maior ou menor precisão, como cuidados em nível crônico até de prevenção ou bem estar [Ullah et al. \(2012\)](#). Logo, os serviços oferecidos pela WBAN exigem suporte de QoS para que tais aplicações sejam confiáveis, o que

influencia no projeto de solução a ser desenvolvido.

2.4.1 QoS em WBANs

Para [Ameen et al. \(2008\)](#) a QoS em WBANs varia de acordo com as aplicações desenvolvidas, e requerem estratégias diferentes de outras redes sem fio. No padrão IEEE 802.15.6 a QoS é definida em termos de taxas de dados, latência e probabilidade de entrega para aplicações relacionadas a saúde e assistência médica.

A definição de QoS tem pouco consenso em sua interpretação e, segundo [Razzaque et al. \(2017\)](#), pode ser entendido segundo os dados gerados de serviços de uma WBAN:

- Gerador de dados e consumidor de serviço: uma WBAN que envie informações de um paciente ou usuário; e
- Provedor de serviço e consumidor de dados: fornecem serviços integrados (assistência de profissionais da saúde e hardware relacionados, como sensores, dispositivos vestíveis).

Para [Razzaque et al. \(2017\)](#), os dados gerados devem ter qualidade, como precisão, validade, confiabilidade, relevância, serem legíveis e disponíveis em tempo hábil. Essa qualidade depende e tem relação com a estrutura das WBANs, que devem ser desenvolvidas considerando a finalidade do consumo dos dados que serão gerados, que podem ser sistematizados em sensor (exatidão), computação (tempo) e comunicação (confiabilidade e eficiência energética). Já os provedores de serviço têm aspectos de qualidades diferentes, como facilidade de uso, segurança, em que conforto e usabilidade terão impacto na motivação na utilização de uma WBAN pelos usuários.

A diversidade de aplicações para WBANs tem, portanto, diferentes requisitos de QoS, em que é improvável uma solução única para todas essas redes. Em uma perspectiva de rede, uma QoS é uma medida que é oferecida por essa rede a uma aplicação (maximizando os recursos da rede); e na perspectiva da aplicação a QoS é a qualidade relevante para um sistema ou usuário. Segundo [Razzaque et al. \(2017\)](#), uma perspectiva de aplicação QoS tem uma abordagem, em relação às camadas, de projeto de cima para baixo, e uma abordagem de baixo para cima em uma perspectiva de rede para QoS.

Segundo [Khan et al. \(2012\)](#), as WBANs podem coletar dados críticos e não críticos de diferentes partes do corpo de um paciente e, por isso, aspectos como confiabilidade, recursos e escalabilidade são importantes e caracterizam o desempenho dessas redes. Os autores afirmam que a camada MAC influencia na eficiência da rede e na utilização de seus recursos, e a camada física na confiabilidade.

Por exemplo, a camada física poderia selecionar modulações apropriadas e técnicas de codificação no uso da variabilidade do canal de transmissão.

A confiabilidade de uma WBAN é relacionada à probabilidade na perda de pacotes transmitidos e retransmitidos, a qual é influenciada pela taxa de erros de bits (BER – *Bit Error Rate*) do canal e dos procedimentos de transmissão da camada MAC. As camadas MAC e Física podem reduzir o BER nas transmissões, adaptando as modulações com as condições do canal de transmissão ou com técnicas de encaminhamento de pacotes (FEC – *Forward Error Correction*). No entanto, tais técnicas podem aumentar o uso de recursos devido ao uso adicional de bits nos pacotes de transmissão. A estratégia de retransmissão, acesso ao meio e tamanho do pacote adotada na camada MAC influencia na confiabilidade de uma WBAN.

O consumo eficiente em WBANs pode ser minimizado com a otimização dos processos das camadas MAC e Física. Assim como as técnicas de escolha de modulação e codificação na camada Física, o agendamento nas transmissões e técnicas de acesso ao canal da MAC podem aumentar a probabilidade de sucesso nas transmissões e reduzir as retransmissões.

No monitoramento de pacientes pode ser necessária a inclusão de nós na rede para as aquisições de outros dados fisiológicos ou para aumentar a confiabilidade dos dados. Para isso a rede deve garantir a escalabilidade, permitindo fácil reconfiguração da rede na inclusão ou remoção de nós sensores. A escalabilidade depende do projeto de protocolo desenvolvido na camada MAC. Segundo os autores, os principais requisitos para uma WBAN são:

- suportar aplicações médicas com dados periódicos, não periódicos e transmissões com *multi hop* dentro de um atraso determinado e sem nenhuma perda crítica de informação. Ao mesmo tempo, ser compatível com aplicações não médicas, possibilitando o controle e a supervisão remota dos dados coletados;
- operar durante tempo suficiente para as funções de monitoramento das aplicações, e sem causar riscos ao usuário. Para isso o uso eficiente da bateria pode ser obtido com a combinação dos procedimentos das camadas MAC e PHY;
- ser auto recuperável (*self-healing*), segura e confiável tanto com dispositivos implantáveis quanto externos;
- suportar diferentes taxas de dados de poucos kbs a Mbs, abrangendo aplicações que envolvem imagens e vídeos;
- suportar QoS e garantir prioridades nos serviços. Em casos de monitoramento de pacientes em

estado crítico, o sistema deve garantir a entrega dos dados fisiológicos e dos dados médicos, que devem ser transmitidos considerando a QoS quanto a latência e perda de pacotes;

- operar e coexistir com outras redes e dispositivos próximos em frequências similares. Assim como operar em ambientes de redes heterogêneas em que diferentes redes devem coexistir e oferecer serviços distintos ou similares.

As soluções para WBANs não têm uma perspectiva geral de requisitos de QoS, pois suas especificidades de serviços e informações inviabilizam uma lista exaustiva. Com o objetivo de sistematizar as métricas de QoS em WBANs são classificadas para WBAN em termos de qualidade de dados, parâmetros de rede e fatores humanos (Razzaque *et al.*, 2017).

A qualidade dos dados visa auxiliar as coletas realizadas pelos sensores de uma WBAN se tornem informações úteis. Em uma rede corporal a qualidade de dados pode ser descrita pelas métricas a seguir:

- Precisão: relação de proximidade em que os dados coletados estão comparados com a precisão com que foram projetados;
- Credibilidade: verossimilhança dos dados coletados;
- Ubiquidade: acesso aos dados a qualquer momento ou local;
- Segurança: autorização para a manipulação ou visualização dos dados;
- Completitude: veracidade de todos dos dados necessários para a execução de serviços ou tratamentos;
- Pontualidade: dados atualizados com relevância segundo os requisitos de uma aplicação;
- Confiabilidade: garantia de entrega dos dados medidos, que podem ser coletados em diferentes tempos e sensores;
- Consistência: dados devem ser entregues atualizados e em ordem; e
- Interpretabilidade: facilidade com o usuário do sistema entenda os dados.

A QoS em uma WBAN pode ser definida em aspectos do seu funcionamento de comunicação, em que envolve o acesso ao meio, uso de recursos (bateria e processador) e a entrega de pacotes. Os parâmetros de rede das WBANs são compostos pelas seguintes métricas:

- Atraso: demora no recebimentos dos dados como resultado de processamento e comunicação;
- Atraso de *Jitter*: variação nos tempos do atraso;
- *Throughput*: taxa de entrega bem sucedida de pacotes por meio de um enlace;
- Taxa de Erros de Pacote: número de pacotes recebidos incorretamente dividido pelo total de pacotes recebidos em um enlace;
- Eficiência Energética: consumo de energia de rádios e sensores; e
- Interoperabilidade: funcionamento com dispositivos e aplicativos heterogêneos sem necessidade de manutenção ou intervenção externa.

Em um nível mais alto, as WBANs devem ser imperceptíveis no seu uso, não causando desconforto ou problemas nas atividades cotidianas dos seus usuários. Dessa forma, as métricas para os fatores das redes corporais são descritas como:

- Conforto: não causar inconveniência no uso dos dispositivos da rede corporal;
- Vestibilidade: dispositivos da rede devem ergonômicos e fáceis de vestir;
- Facilidade de uso: os aplicativos ou a rede devem exigir pouco esforço físico e mental no seu manuseio; e
- Segurança: tolerância a falhas, biocompatibilidade, segurança térmica e de radiação.

Os três níveis descritos são relevantes no desenvolvimento das WBANs, mas nesse trabalho as métricas dos parâmetros de rede são as que mais interessam. A QoS, portanto, pode ser caracterizada como dependente da aplicação e por consequência dos requisitos desta, como nível de segurança, de confiabilidade, de pontualidade, consistência e precisão. Os experimentos realizados foram projetados considerando confiabilidade e uso de recursos (energia).

2.5 Considerações

Neste capítulo foi mostrada a importância e o estado da arte em WBANs, como aplicações, arquiteturas e dispositivos. Essas redes têm potencial para contribuir no monitoramento do bem estar de pessoas e colaborar na precisão de diagnóstico de doenças fatais, por meio do acompanhamento à distância e/ou em tempo real dos mesmos. Além do monitoramento de bem estar, demais aplicações

podem se beneficiar do avanço no estudo das WBANs, como transmissão em tempo real de vídeos, entretenimento, emergência, emoção e autenticação (Movassaghi *et al.*, 2014). As WBANs possuem desafios a serem superados, como os relacionados à qualidade de serviço.

Os protocolos desenvolvidos para as WBAN ainda são poucos quando comparados a outras redes sem fio. As dificuldades no seu desenvolvimento, impostas pelas limitações dos aspectos das WBAN e por ser uma recente área de pesquisa, ainda não consolidaram um ou mais protocolos como padrão. Portanto, o uso da abordagem *cross-layer* para WBANs oferece propostas de solução a problemas como confiabilidade, compartilhamento de informações entre camadas e adaptações da rede a variações do meio de acesso. Nas redes tradicionais, a QoS pode depender de uma certa periodicidade do tráfego de dados, mas os padrões nas WBANs são dinâmicos, em que tem-se períodos de intensa e baixa carga de pacotes (Razzaque *et al.*, 2017).

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica de WBANs e *Cross-layer*

Este capítulo tem como objetivo apresentar a revisão sistemática da literatura para a abordagem *cross-layer* para WBANs e os trabalhos relacionados que fundamentam o desenvolvimento dessa tese. Inicialmente será descrito o conceito de revisão sistemática da literatura, em seguida os resultados obtidos e finalmente os principais trabalhos relacionados serão detalhados.

3.1 Revisão Sistemática da Literatura

Os estudos chamados de primários são aqueles que descrevem pela primeira vez registros de evidências de pesquisa, baseadas em materiais originais. Um estudo primário possui característica de pesquisa específica. São considerados estudos secundários os *surveys*, estudos de casos e experimentos controlados. Os estudos secundários analisam ou reafirmam os estudos primários, por meio da descrição ou da explicação do conteúdo dessas fontes. Os estudos secundários normalmente resumem, interpretam, reorganizam ou fornecem valor agregado a um estudo primário. Existem os estudos terciários, que indexam, abstraem, organizam e compilam outras fontes, como por exemplo materiais de referência e livros didáticos, e têm por objetivo principal listar ou resumir ideias ou outras informações.

Revisão Sistemática da literatura (SLR – *Systematic Literature Review*) ou Mapeamento Sistemático, segundo Kitchenham e Charters (2007), é uma forma de estudo terciário utilizada para identificar, analisar e interpretar as evidências disponíveis sobre uma questão de pesquisa, por meio de uma metodologia bem definida. SLR fornece uma visão geral de um tópico de pesquisa mais amplo e identifica grupos de estudos, e tem como resultado uma estrutura de classificação em um campo de

interesse, em que possam ser utilizadas para responder questões mais específicas.

O objetivo deste capítulo é realizar um SLR para o período de 2014 a 2019 que forneça uma visão geral do estado atual da pesquisa sobre desenvolvimento de soluções *cross-layer* para WBANs. A SLR é dividida em três fases. São elas:

- **Planejamento:** refere-se às atividades de pré-revisão para elaborar o requisito de revisão com questões de pesquisa, critérios de inclusão e exclusão, fontes de estudos, termos de busca e procedimentos de mapeamento;
- **Condução:** executa a fase de planejamento para identificar os trabalhos utilizando uma estratégia de busca, selecionar os trabalhos, extrair e sintetizar os dados pesquisados;
- **Apresentação:** trata da descrição e avaliação dos resultados relevantes para responder às questões de pesquisa.

Nas subseções a seguir são descritas cada fase e os resultados de sua execução.

3.1.1 Fase de Planejamento

A Fase de Planejamento é a primeira etapa da revisão sistemática e tem como objetivos a definição das fontes de pesquisa, dos termos de busca, dos critérios de seleção e das questões da pesquisa, responsáveis por indicar quais dados serão extraídos dos estudos.

Inicialmente foi realizado uma pesquisa para identificar estudos terciários para o estado da arte no desenvolvimento de *cross-layer* para WBANs. A Tabela 3.1 apresenta os termos de buscas (título, resumo e palavras-chave) que foram pesquisados nas bases de dados científicas ACM, IEEE e *Elsevier Science Direct*¹. Uma vez que nenhum estudo relevante foi encontrado, foram então buscado os estudos secundários.

Tabela 3.1: Termos de busca para o estudo terciário no desenvolvimento *cross-layer* para WBANs

Áreas	Termo de Busca	Resultados
WBAN <i>cross-layer</i>	“ <i>cross layer</i> ”, BAN, “body area network”, WBAN, “Wireless Body Area Network”	
Revisão	“systematic literature review”, “systematic review”, “systematic mapping”, “systematic literature mapping”	0
Termos de busca	(“wireless body area network” OR WBAN OR “body area network” OR BAN) AND (“cross-layer” OR “cross layer”) AND (“systematic literature review” OR “systematic review” OR “systematic mapping” OR “systematic literature mapping”)	

Os resultados da pesquisa sobre estudos secundários são mostrados na Tabela 3.2 e apenas quatro artigos foram encontrados. Como nenhum mapeamento ou SLR que contenha os termos da busca

¹<http://portal.acm.org/>, <http://www.ieeexplore.ieee.org/> e <http://www.sciencedirect.com/>, respectivamente.

“WBANs” e “*cross-layer*” foi encontrado, considerando o período de 2014 até a abril de 2019, então pode-se considerar relevante o objetivo desta seção que é a realização de uma SLR sobre esses termos.

Tabela 3.2: *Termos de busca para o estudo secundário para desenvolvimento cross-layer para WBANs*

Áreas	Termo de Busca	Resultados
WBAN <i>cross-layer</i>	“ <i>cross layer</i> ”, BAN, “body area network”, WBAN, “Wireless Body Area Network”	
Revisão	“survey”	4
Termos de busca	(“wireless body area network” OR WBAN OR “body area network” OR “ban”) AND (“cross-layer” OR “cross layer”) AND (“survey”)	

Para concluir a fase de planejamento foram elaboradas as Questões de Pesquisa em um nível mais alto e em quantidade para indicar tendências e quais os tópicos que estão cobertos pela literatura no período e nos termos de busca definidos. A Tabela 3.3 apresenta a lista das seis questões e a sua importância nesse trabalho.

Tabela 3.3: *Questões de pesquisa e fundamentação.*

Número	Questão	Fundamentação
Q1	Quais as camadas compartilhadas nos trabalhos que envolvem <i>cross-layer</i> e WBAN?	A relação de <i>cross-layer</i> pode ser dependente do tipo de rede estudada. Nesse caso, procura-se quais as camadas (Aplicação, Rede, MAC e Física) que mais possuem envolvimento para caracterizar o <i>cross-layer</i> .
Q2	Quais os problemas indicados na literatura sobre a utilização de <i>cross-layer</i> em WBAN?	Os resultados dessa questão podem indicar as tendências ou questões consolidadas dessa pesquisa.
Q3	Quais os principais padrões utilizados no desenvolvimento de WBANs e <i>cross-layer</i> ?	Os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.1 são disponíveis comercialmente. O novo padrão IEEE 802.15.6 foi proposto em 2012 e pode indicar uma tendência no estudo de WBANs.
Q4	Quais as métricas utilizadas para comparação de trabalhos?	Ao desenvolver soluções para WBANs e <i>cross-layer</i> , várias métricas são utilizadas como comparação, como energia, tamanho do pacote, taxa de dados e latência.
Q5	Quais as topologias mais utilizadas desenvolvimento dos trabalhos?	Ao desenvolver soluções para WBANs e <i>cross-layer</i> , várias topologias são utilizadas.

As Questões de Pesquisa serão respondidas com a análise dos trabalhos selecionados pelos termos de busca. Pretende-se sistematizar as informações desses trabalhos para que o estado da arte possa ser quantificado e discutido.

Os termos de busca foram aplicadas nos campos de título, resumo e palavras-chave. O termo de busca foi adaptado de acordo com as particularidades de cada base de dados científica (ACM, IEEEExplore e Elsevier Science Direct).

A seguir, os artigos serão selecionados conforme os critérios de inclusão e exclusão do mapeamento. A inclusão tem como objetivo selecionar os trabalhos segundo os seguintes critérios:

- os campos de título, resumo e palavras-chave do artigo que contenham os termos de busca; e

- a data de publicação do artigo esteja entre os anos 2014 e 2019.

A exclusão tem como objetivo retirar os trabalhos que não atendam os objetivos do mapeamento ou que não tenham contribuição relevante. Os critérios de exclusão são:

- o artigo não é um estudo primário (tutorial, editorial, índice de notas);
- não foi possível o acesso ao trabalho completo;
- o artigo é apenas um resumo, e
- o artigo não responde a nenhuma das Questões de Pesquisa.

As informações descritas nessa seção são um protocolo que formaliza como os dados serão selecionados para a análise final do mapeamento.

Foram encontrados 88 artigos das três bases de dados, sendo 23 da IEEE, 61 da ACM e 4 da Elsevier.

3.1.2 Fase de Condução

Na fase de condução foi aplicada a técnica de *snowballing*, que identifica outros estudos relevantes obtidos a partir das referências dos artigos selecionados na fase anterior. Foram selecionados 27 artigos, sendo 3 da Elsevier, 2 da ACM, 18 do IEEE e 4 resultantes do *snowballing*. As buscas da base de dados da ACM resultou em de 61 trabalhos, e os filtros utilizados produziram um descarte de 59 trabalhos, isso foi ocasionado pelo critério de seleção em que os resultados da busca não atenderam ao contexto de *cross-layer* e WBAN. Os termos *cross-layer* e WBAN nos trabalhos descartados não estavam relacionados entre si.

Na fase de Condução foram retirados os artigos duplicados e os que não atenderam os critérios de inclusão e exclusão e em seguida foram incluídos os artigos encontrados por *snowballing*.

A Tabela 3.4 apresenta a lista dos trabalhos resultantes da revisão sistemática.

Tabela 3.4: Artigos selecionados utilizados na revisão sistemática.

Num.	Referência bibliográfica
#1	A Cross-Layer Opportunistic MAC/Routing protocol to improve reliability in WBAN (Abbasi <i>et al.</i> , 2014)
#2	An Efficient Cross-Layer Reliable Retransmission Scheme for the Human Body Shadowing in IEEE 802.15.6-Based Wireless Body Area Networks (Tseng <i>et al.</i> , 2016)
#3	Wearable Body-to-Body networks for critical and rescue operations – The CROW2project (Ben Hamida <i>et al.</i> , 2014)

Num.	Referência bibliográfica
#4	Characterization of the On-Body Path Loss at 2.45 GHz and Energy Efficient WBAN Design for Dairy Cows (Benaissa <i>et al.</i> , 2016)
#5	A priority based cross layer data dissemination protocol for healthcare applications (Elhadj <i>et al.</i> , 2015))
#6	CLOEE – Cross-Layer Optimization for Energy Efficiency of IEEE 802.15.6 IR-UWB WBANs (Davaslioglu <i>et al.</i> , 2016))
#7	Energy efficiency and resource allocation of IEEE 802.15.6 IR-UWB WBANs: Current state-of-the-art and future directions (Liu <i>et al.</i> , 2017))
#8	Cross-Layer Design for Prompt and Reliable Transmissions Over Body Area Networks (Torabi e Leung, 2014))
#9	Reliable Transport Protocol Based on Loss-Recovery and Fairness for Wireless Body Area Networks (Jaramillo <i>et al.</i> , 2016))
#10	MAC-network cross-layer energy optimization model for Wireless Body Area Networks (Lahlou <i>et al.</i> , 2015))
#11	Cross-layer algorithm for QoS in WBANs (Issaoui e Sethom, 2016))
#12	Cross-layer optimized routing with low duty cycle TDMA across multiple wireless body area networks (Shimly <i>et al.</i> , 2017))
#13	IEEE 802.15.6 based node and hub architectures for healthcare applications (Elhadj <i>et al.</i> , 2015))
#14	Impact of Dynamic Wideband MIMO Body Channel Characteristics on Healthcare Rehabilitation of Walking (Wang <i>et al.</i> , 2017))
#15	Cross-Layer Design and Performance Analysis of Quality of Service Control Scheme for Wireless Body Area Networks (Takabayashi <i>et al.</i> , 2017))
#16	PEAM: A polymorphic, energy-aware MAC protocol for WBAN (Bouachir <i>et al.</i> , 2016))
#17	U-Wear: Software-Defined Ultrasonic Networking for Wearable Devices (Santagati e Melodia, 2015))
#18	Performance evaluation of cross-layer opportunistic MAC/routing with node's mobility for wireless body area networks (Awang e Abbasi, 2015))
#19	An Opportunistic Relay Protocol With Dynamic Scheduling in Wireless Body Area Sensor Network (Pan <i>et al.</i> , 2015))
#20	A cross-layer energy efficiency optimization model for WBAN using IR-UWB transceivers (Karvonen <i>et al.</i> , 2015))
#21	Cross-Layer Designs for Body-to-Body Networks: Adaptive CSMA/CA with Distributed Routing (Shimly <i>et al.</i> , 2018))
#22	A Privacy Preservation Secure Cross Layer Protocol Design for IoT Based Wireless Body Area Networks Using ECDSA Framework (Sharavanan <i>et al.</i> , 2018))
#23	Cross Layer Design for Optimizing Transmission Reliability, Energy Efficiency, and Lifetime in Body Sensor Networks (Chen <i>et al.</i> , 2017))
#24	Distributed cross-layer optimization for healthcare monitoring applications (Awad e Mohamed, 2014))

Num.	Referência bibliográfica
#25	Collaborative Link-Aware Protocols for Energy-Efficient and QoS Wireless Body Area Networks Using Integrated Sensors (Chen e Chiu, 2018))
#26	A cross-layer QoS-aware optimization protocol for guaranteed data streaming over wireless body area networks (Ababneh et al., 2015))
#27	Cross-Layer Design Approach for Power Control in Mobile Ad Hoc Networks (Ahmed et al., 2015))

3.1.3 Fase de Apresentação

Nessa fase, as Questões de Pesquisa serão respondidas a partir da análise dos artigos selecionados. A Figura 3.2 mostra que as publicações com *cross-layer* e WBAN têm diminuído a partir de 2015, o que é um indício de dificuldades no uso de *cross-layer* para resolver os desafios das WBANs, o esgotamento na aplicação em WBAN, ou a utilização de outras abordagens. De janeiro a abril de 2019 não foram encontrados artigos que atendessem os critérios estabelecidos nesta SLR.

A Figura 3.3 apresenta a distribuição das publicações nas categorias de veículos de publicação e mostra que uma pequena maioria das publicações encontradas foram apresentadas em conferências e simpósios (55,6%). Essa informação indica que as pesquisas ainda são de caráter mais exploratório e ainda não estão consolidadas. Nos trabalhos selecionados, os pesquisadores utilizam simuladores, o que pode ser consequência do custo da aquisição de materiais e da dificuldade do seu uso experimental em seres humanos.

A Figura 3.4 apresenta as métricas utilizadas para compartilhar informações entre as camadas que têm relação com a QoS das WBANs. O consumo de energia e a entrega de pacotes aparecem na maioria dos trabalhos. O *payload* (dados a serem transmitidos) e pacote (tamanho total com o *overhead*) têm respectivos 7,3% e 5,5%; *jitter*, *delay* e latência tem 1,8%, 14,5% e 1,8%, respectivamente; e *duty cycle* e *buffer* respectivos 5,5% e 1,8%.

As métricas mostradas na Figura 3.4 contribuem para responder a Q2, em que as métricas são utilizadas para resolver, em sua maior parte, problemas de consumo de energia e entrega de pacotes da WBANs.

A Figura 3.5 apresenta as topologias utilizadas nos trabalhos encontrados e responde a questão Q5 da Tabela 3.3. A topologia em árvore obteve maior frequência (Figura 3.5) nos trabalhos. A categoria *Não descreve* é porcentagem dos trabalhos que não fazem referência a qual topologia utilizaram.

A Figura 3.6 apresenta a frequência de referências às camadas de rede, e responde a questão Q1,

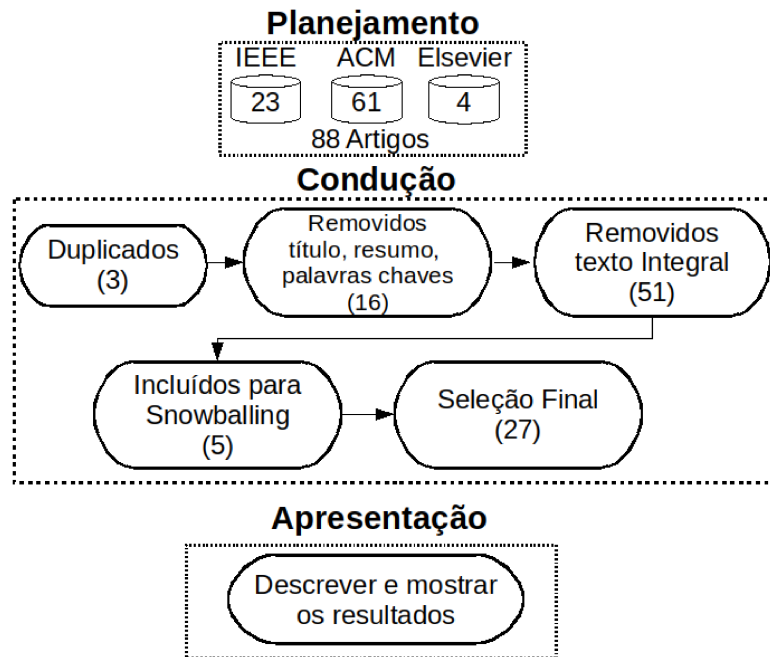


Figura 3.1: Fases das SLR com os respectivos valores.



Figura 3.2: Quantidade de publicação relacionadas a WBANs e cross-layer entre 2014 e 2019.

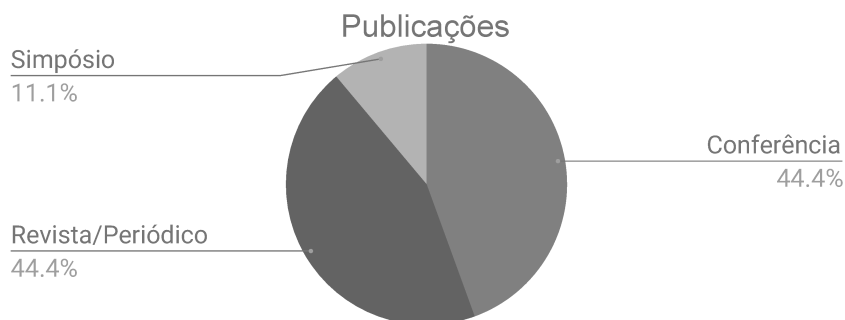


Figura 3.3: Categorias de publicações (periódicos, conferências e simpósios).

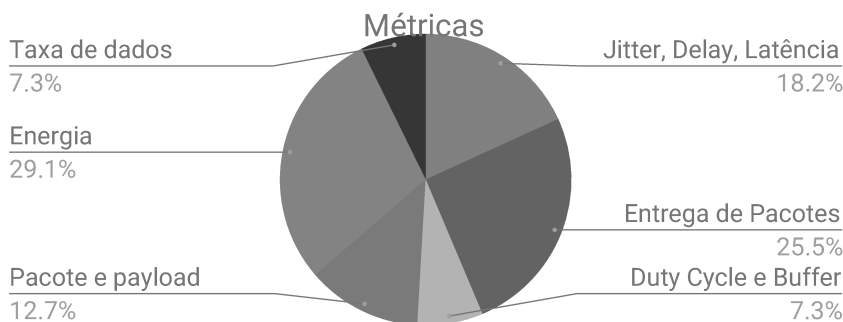


Figura 3.4: Métricas utilizados em soluções nas WBANs com *cross-layer*.

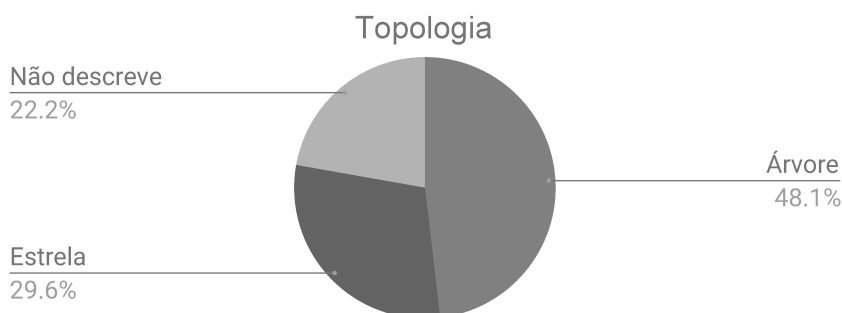


Figura 3.5: Topologias utilizadas nas WBANs.

em que a camada MAC é maioria. Os problemas de acesso ao meio de comunicação das WBANs são decorrentes de aspectos como mobilidade, mudança de topologia da rede e proximidade dos nós ao corpo humano. A camada MAC têm funcionalidades relacionadas ao acesso ao meio, razão pela qual é muito utilizada no trabalhos das WBANs que envolvem *cross-layer*.

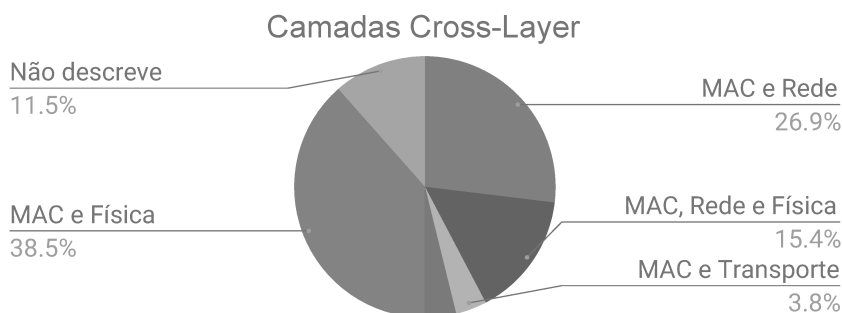


Figura 3.6: Conjunto de camadas usadas com *cross-layer*.

A Figura 3.6 mostra como *Não descreve* os trabalhos da literatura que não especificaram quais camadas utilizaram na implementação do *cross-layer*. Nesses trabalhos foi implementada uma solução que implementa novas funcionalidades que não são caracterizadas pelas camadas do modelo tradicional.

A Figura 3.7 apresenta a distribuição de uso de pilhas de protocolos padrão e responde a questão Q3. O padrão mais utilizado nos trabalhos é o IEEE 802.15.6. Sua maior frequência mostra um

nível exploratório da pesquisa em WBANs, uma vez que esse padrão ainda não foi implementado e disponibilizado comercialmente, diferentemente dos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.

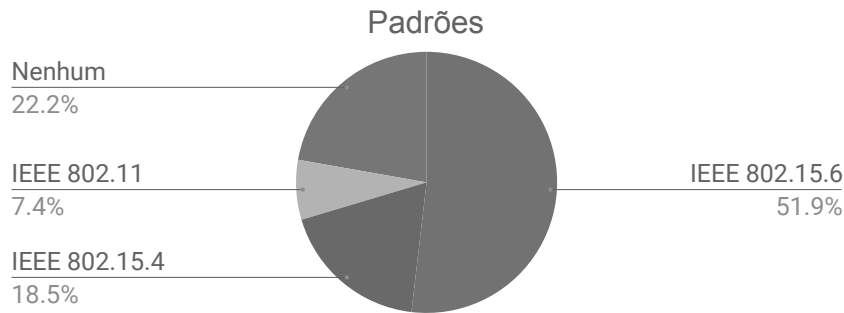


Figura 3.7: Padrões utilizados nos trabalhos para WBANs e cross-layer .

Os trabalhos da categoria *Nenhum* que não fazem referências a um padrão estabelecido modelam o *cross-layer* a partir das funcionalidades básicas das camadas.

3.2 Trabalhos Relacionados

O protocolo H-MAC (Ullah *et al.*, 2012) propõe a sincronização entre os nós sensores da rede pelo batimento cardíaco com o objetivo de diminuir o consumo de energia. O BAN-MAC (Prabh *et al.*, 2012) é compatível com o IEEE 802.15.4 e foi projetado para a topologia estrela. O BAN-MAC recebe os pacotes dos nós sensores e ajusta dinamicamente os parâmetros do seu protocolo para a economia de energia. Pesquisas sobre protocolos *cross-layer* para WBANs ainda são incipientes e normalmente consistem em soluções para redes *ad hoc*. Poucos trabalhos apresentam novas propostas para a camada de Transporte nas WBANs e RSSF (Gajjar *et al.*, 2011b). A maioria deles concentram-se nas camadas de Aplicação, Enlace e Física, devido às dificuldades no acesso ao meio (proximidade da pele, mobilidade) e ao reduzido e não redundante número de nós, comparados às RSSF.

Tseng e Chuang (2013) propõem um algoritmo que detecta um erro do pacote transmitido nas WBANs utilizando o IEEE 802.15.4 e informa ao remetente sobre o tipo de erro, para que seja dado início ao procedimento de retransmissão. A retransmissão de pacotes ocorre devido a problemas como: acesso ao meio de comunicação, dispositivo oculto e desvanecimento do canal. O *cross-layer* desse trabalho utiliza as funcionalidades das camadas MAC e PHY, como o acesso ao meio e a intensidade do sinal recebido, para calcular o processo de retransmissão de pacotes.

O protocolo CICADA – *Cascading Information retrieval by Controlling Access with Distributed slot Assignment* (Singelée *et al.*, 2008) utiliza uma estrutura de roteamento em árvore para diminuir

o consumo de energia e garantir baixo atraso em uma WBAN. Uma árvore de roteamento é gerada continuamente de forma a determinar a presença ou a ausência de nós no próximo salto. O tempo é dividido em *slots* agrupados em ciclos e cada nó informa aos seus nós filhos quando eles podem enviar seus dados. O CICADA possui um modelo teórico para as camadas da rede e utiliza *cross-layer* entre as camadas MAC e Rede.

Para diminuir o consumo de energia, alguns trabalhos propõem protocolos baseados em alterações no hardware. Dumanli *et al.* (2012) projetaram uma antena que permanece próxima ao corpo (distância de 2,5 mm até 10 mm) e propuseram um protocolo denominado ORPL (*Opportunistic foRwarding ProtoCoL*). Os autores afirmam que o *duty cycle* pode acarretar custos adicionais dependendo da qualidade do enlace que pode aumentar as retransmissões de pacotes. O trabalho usou um cenário com um enlace com probabilidade de sucesso de entrega de 70% e o número de saltos entre os nós sensores e o nó *sink* entre 2 e 4. O ORPL usa *cross-layer* entre a camada de Rede e a camada MAC. Para realizar o roteamento de pacotes é utilizada uma tabela com a qualidade do enlace e a potência de transmissão.

Xu e Li (2012) relacionam os parâmetros das camadas Física e MAC para diminuir o consumo energético. O modelo empregado para o canal de comunicação e o consumo de energia correlaciona os valores que definem a modulação utilizada na camada Física, MQAM (*M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) com a duração do *duty-cycle* na camada MAC.

No trabalho de Su e Zhang (2009) foram também realizadas alterações nas camadas Física e MAC, utilizando TDMA com o objetivo de prolongar o tempo de vida da rede. Os *beacons* recebidos são usados para estimar o estado do meio e juntamente com o tamanho do *buffer* calculam qual a modulação a ser utilizada. Segundo os autores, o algoritmo TDMA da proposta é o mesmo utilizando tanto pelo IEEE 802.15.4 quanto pelo IEEE 802.15.1 (Bluetooth), os quais são comparados nos experimentos. O trabalho proposto foi comparado com as versões originais dos padrões e apresentam melhorias em relação ao consumo de energia.

Awad e Mohamed (2014) (número #24) analisaram o impacto do *delay* na entrega de pacotes e a variação da taxa de dados, ambos parâmetros das camadas de Aplicação. Os autores analisaram também o tempo dos *slots* na camada MAC e a qualidade do enlace na camada Física para otimizar o consumo de energia e a confiabilidade na entrega de pacotes. Uma aplicação de eletrocardiograma foi proposta e o compartilhamento dessas variáveis com *cross-layer* permitiu determinar a melhor configuração da rede para minimizar seu consumo total de energia.

O PEAM – *Polymorphic Energy-Aware MAC* (Bouachir *et al.*, 2016) (número #16) é um protocolo que utiliza *cross-layer* para comunicação direta entre as camadas MAC e Aplicação, com

o objetivo de adequar sua taxa de dados de acordo com as condições do paciente (normal, anormal e crítica). Os resultados simulados da utilização do protocolo foram comparados com o IEEE 802.15.4 e utilizando os mesmos cenários apresentou melhoria de desempenho em termos de energia e entrega de pacotes.

O protocolo CLEAR – *Cross-Layer Energy-Aware Resource allocation* (Chen e Chiu, 2018) (número #25) é baseado no IEEE 802.15.6 e utiliza *cross-layer* nas camadas MAC e Física. Esse protocolo utiliza pré-processamento e compressão dos dados para adaptação ao canal de transmissão com o objetivo de melhorar parâmetros de QoS, como o consumo de energia.

O protocolo COMR – *Cross-Layer Opportunistic MAC/Routing* (Abbasi et al., 2014) (número #1) propõe reduzir o consumo de energia durante a transmissão de dados dos nós sensores e, assim, aumentar a taxa de entrega de pacotes com o *delay* mínimo de ponta a ponta. O COMR calcula o tempo de retransmissão dos pacotes baseado nos valores do RSSI e na energia residual dos nós. O consumo de energia é alto dependendo do tamanho da carga útil do pacote e a taxa de entrega diminui conforme aumenta a quantidade de nós na rede.

Com o objetivo de melhorar a QoS em dados de multimídia para tipos diferentes de sensores, Takabayashi et al. (2017) (número #15) utilizam *cross-layer* entre as camadas Física e de Enlace baseado no Padrão IEEE 802.15.6. Foi desenvolvido um modelo teórico em que o acesso agendado ao meio supera o aleatório e tem relação com a modulação usada na camada Física. A análise teórica entre o protocolo desenvolvido e o IEEE 802.15.6 demonstrou melhoria nas transmissões de dados, mas não no consumo de energia.

ARBA – *Adaptive Routing and Bandwidth Allocation* (Ababneh et al., 2015) (número #26) propõe investigar os problemas de consumo de energia e alocação de largura de banda de dados das WBANs. O protocolo *cross-layer* utiliza as camadas de Rede e Física e compreende as fases de descoberta de topologia; elaboração da árvore de roteamento baseada em energia; alocação da taxa de dados e largura de banda, balanceamento de carga e consumo de energia em um canal em condições ideais de desempenho. A execução dessas fases consome uma quantidade alta de energia e o protocolo depende da manutenção da estrutura da topologia, o que não ocorre na maioria das WBANs. Nos cenários descritos como ideais, a proposta obteve bons resultados para dados de alta prioridade em termos de confiabilidade na entrega de pacotes.

Nas WBANs a diminuição do número de enlaces não estimula ou intensifica a pesquisa no desenvolvimento de roteamentos mais elaborados, diferentemente do que ocorre nas RSSF, que possuem um aspecto mais colaborativo. Takahashi et al. (2007) desenvolveram o protocolo LTRT (*Least Total-Route Temperature*) que, com base na temperatura interna dos nós sensores dos usuá-

rios, é gerado um grafo para o roteamento dos pacotes até o nó *sink* com o objetivo de minimizar o incômodo que pode causar ao usuário e a quantidade saltos gerada pelo roteamento decorrente do calor gerado pelos dispositivos. O LTRT define como 40 o número máximo de saltos até o nó *sink*, descartando os pacotes que ultrapassam esse valor.

[Ahmed et al. \(2015\)](#) (número #27) implementam um protocolo *cross-layer* entre as camadas MAC, Rede e Física para controle de potência em uma rede *Ad Hoc*. A estratégia utilizada é que, a partir da leitura do RSSI de pacotes de controle enviados pelos nós da rede, cada nó possa estimar a sua área de alcance em relação aos demais. O objetivo não é apenas obter a menor rota, mas também a mais confiável para a transmissão de pacotes pela rede.

Para [Chen et al. \(2017\)](#) (número #23) a otimização dos recursos em uma WBAN deve-se considerar vários fatores simultaneamente, como o tempo de vida da rede, a confiabilidade e a eficiência energética da transmissão. Para alcançar tal objetivo, as implicações mútuas entre a escolha da potência de transmissão, rota e tamanho do pacote são explicitadas e uma formalização matemática é proposta. A partir de tal formalização foi elaborado um algoritmo para a inicialização da rede, que pode ser iterado por uma quantidade pré-definida de repetições. O estudo considera uma rede composta de dez nós sensores e um nó *sink* em uma topologia com múltiplos saltos. O algoritmo proposto utiliza uma arquitetura *cross-layer* entre as camadas MAC e Física, que determina a potência do rádio do nó sensor em relação a eficiência energética da transmissão de um enlace com o seu vizinho mais próximo. O roteamento é determinado pela camada de Rede que calcula a eficiência de transmissão (atrasos e quantidade de retransmissões) com o balanceamento do consumo de energia entre os nós sensores. Apenas nos nós sensores que consomem menos energia a potência do rádio é recalculada.

3.3 Considerações

Neste capítulo foram mostradas as informações referentes aos trabalhos da literatura entre o período de 2014 a abril de 2019 sobre WBANs e o uso de *cross-layer*. Para isso realizou-se uma revisão sistemática para fundamentar respostas a questões referentes a implementação de *cross-layer* no desenvolvimento de soluções para WBANs, como quais foram as camadas e métricas utilizadas em trabalhos da literatura.

As conclusões apontam para o uso mais acentuado das camadas MAC e Física e a utilização das métricas de consumo de energia e entrega de pacotes, para indicar o desempenho das WBANs. Verificou-se no período pesquisado que as publicações em conferências foram maiores em número em relação a periódicos e revistas, e indica que as soluções para WBANs estão em um nível ainda inicial.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentadas as ferramentas, materias e métodos empregados nessa pesquisa. Serão abordados o simulador Castalia, o padrão IEEE 802.15.4 utilizado como caso de uso e os cenários para as simulações realizadas.

4.1 Simulador Castalia

O Castalia é um simulador de código aberto, baseado na plataforma Omnet ([OMNeT++, 2019](#)), voltado para redes sem fio e, principalmente, WBANs. Por meio do Castalia, é possível utilizar valores reais obtidos de transceptores na camada física. Ainda que simuladores como o NS2/NS3 sejam utilizados em pesquisas na área, essas ferramentas não possuem implementação de protocolos fortemente relacionados às WBANs, como o IEEE 802.15.4 por exemplo. Em consequência disso, trabalhos recentes que utilizam redes corporais têm adotado o Castalia como ferramenta para simulação.

As principais funcionalidades do Castalia são a simulação de redes de sensores sem fio de baixo consumo de energia e a modelagem de canais de comunicação sem fio de maneira realista. A plataforma Omnet++, por sua vez, permite o desenvolvimento de simuladores para redes de dados, modelagem de mobilidade de nós, modelagem do consumo de energia e bibliotecas de protocolos, fornecendo um cerne de simulação orientada a evento. O Omnet é escrito em C++ e possui código aberto para futuras contribuições.

A arquitetura do Castalia, representada na Figura 4.1, é composta por três módulos que trocam mensagens entre eles. Cada módulo é definido como uma unidade básica de execução que recebe mensagens de outros módulos. As setas que interligam os módulos representam as trocas de mensagens.

Os módulos são configuráveis por meio de arquivos texto e seus códigos-fontes podem ser alterados pelos usuários. Os nós da rede não se comunicam diretamente entre eles, mas somente por meio

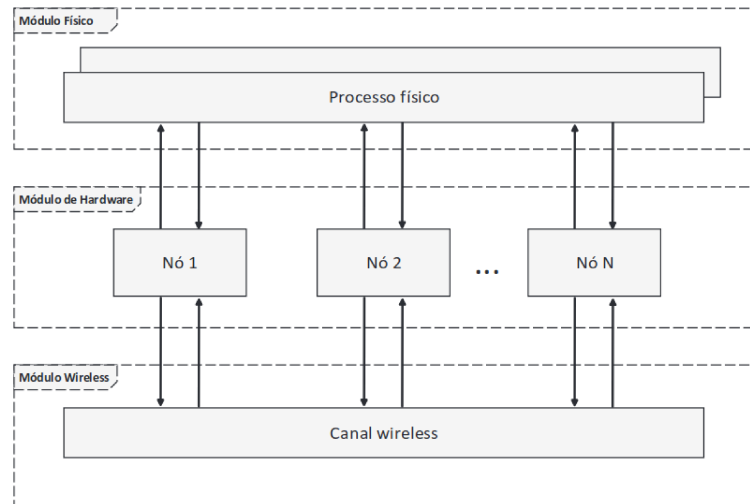


Figura 4.1: Arquitetura do simulador Castalia (Castalia, 2019).

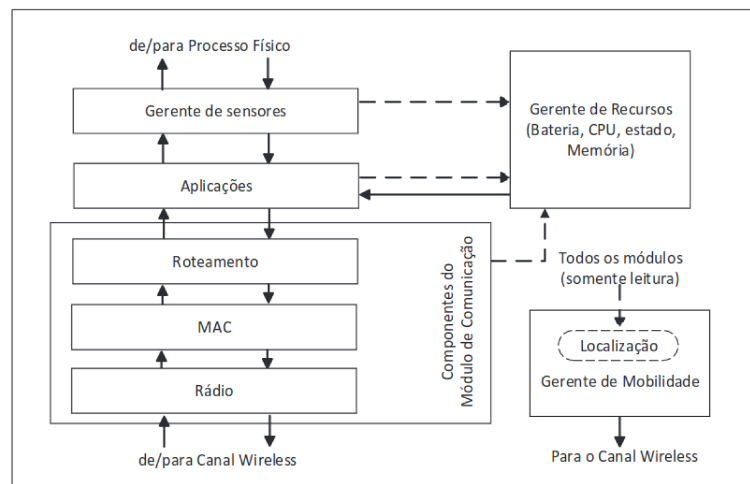


Figura 4.2: Arquitetura do nó no Castalia (Castalia, 2019).

do módulo Wireless. O Módulo de Hardware é composto pelos modelos dos nós sensores da rede e o Módulo Wireless representa o canal sem fio no qual os nós sensores se comunicam.

O Módulo Físico tem a função de fornecer amostras no tempo e no espaço para os nós sensores, como na obtenção de valores de sensores. Na Figura 4.1 observa-se que cada nó sensor pode ter a implementação do seu Módulo Físico, que representam múltiplos dispositivos de detecção ou de sensoriamento.

4.1.1 Módulo de Hardware

A Figura 4.2 detalha a estrutura de cada nó que, por sua vez, é composta por diversos submódulos. As setas sólidas representam a troca de mensagens e as setas tracejadas representam as chamadas de função simples. Os submódulos podem ser configurados por meio de parâmetros utilizando uma linguagem de alto nível denominada NED (*Network Description*).

O Processo Físico modela os processos físicos que representam o ambiente monitorado pelos sensores. O submódulo Gerente de Recursos descreve as características de hardware, como CPU, memória e bateria. O submódulo Gerente de Mobilidade descreve os detalhes da mobilidade do nó em termos da alteração da intensidade do sinal de rádio. O submódulo Aplicações modela o comportamento do aplicação alvo do nó. O submódulo Gerente de Sensores faz a interface entre o processo físico e o tipo de sensor a ser simulado. O submódulo de Comunicação implementa a pilha de protocolos utilizada, que pode ser obtida na biblioteca do Castalia, por exemplo o IEEE 802.15.4 ou 802.15.6, ou desenvolvida pelo usuário.

Para tornar a simulação mais realista, o Castalia implementa modelos de camada física (PHY) baseada em *chips* comerciais, como o CC1000 e CC2420, e oferece um modelo teórico, o BANRadio. Os modelos de rádios podem ter estados internos como, por exemplo, dormente, transmissão (TX) e recepção (RX), onde é possível associar níveis de consumo de energia e tempo de transição. Os rádios podem ter diferentes níveis de potência de transmissão configurados com diferentes tipos de modulação.

Na Figura 4.3 é mostrada a estrutura dos diretórios após a instalação do Castalia. Observa-se a relação dos submódulos apresentados na Figura 4.2 com a hierarquia dos diretórios. Os protocolos implementados são descritos entre parênteses, assim como os modelos de mobilidade.

Os subdiretórios de *node*, desenvolvidos em C++, compõem as funcionalidades que poderão ser parametrizadas nas simulações. A parametrização se dá por meio de um arquivo com extensão NED, o qual define quais as variáveis que poderão ser enviadas ao programa em C++. Por exemplo, no diretório *communication* estão implementadas protocolos MAC, protocolos de roteamento e as funcionalidades básicas do rádio. O Castalia tem especificados os rádios CC1000, CC2420 e o BANRadio. Tais funcionalidades estão descritas nos respectivos arquivos textos, os quais são utilizados para fornecer os parâmetros para a execução do rádio.

Os demais protocolos, aplicações e recursos são configurados da mesma forma no arquivo *omnetpp.ini*. Dessa forma, durante a compilação, os parâmetros são enviados aos submódulos, que personalizam a simulação sem a necessidade de recompilação do código.

O modelo de mobilidade da WBAN utilizado neste trabalho será descrito ainda neste capítulo. Os modelos de mobilidade (*lineMobilityManager* e *noMobilityManager*) mostrados na Figura 4.3 não são utilizados neste trabalho.

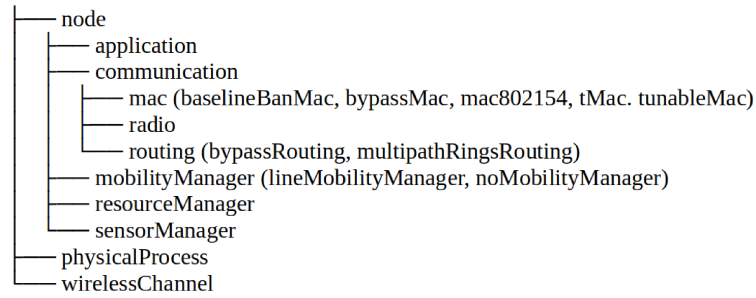


Figura 4.3: Estrutura dos diretórios relacionados a arquitetura do Castalia (Castalia, 2019).

4.1.2 Módulo do Canal Wireless

O modelo do canal sem fio permite o cálculo da perda do sinal de rádio entre dois nós sensores ou, em geral, de dois pontos no espaço. Para isso, o Castalia utiliza o modelo de sombreamento *lognormal* em conjunto com os rádios que retornam uma probabilidade de recepção de pacote (PRP – *packet reception probability*), dado o sinal recebido à relação de ruído (SNR – *signal to noise ratio*).

Nas simulações é possível optar por três modelos (0, 1 e 2) de colisões de pacotes. Se configurado como 0 (modelo de interferência), não haverá perda de pacotes devido às colisões no canal de comunicação. O modelo de colisão 1 é simplista e, nesse caso, se dois nós sensores estiverem transmitindo simultaneamente e o receptor receber ambos os sinais – ainda que minimamente – poderá ocorrer duas possibilidades: ter uma colisão e ambos os pacotes são descartados ou o receptor recebe o pacotes com o sinal mais forte das duas transmissões (se estiver dentro do limite definido pelo rádio). O modelo de colisão 2 utiliza uma interferência aditiva, na qual as transmissões de outros nós são calculadas como interferência no sinal mais forte, adicionando linearmente seu efeito no receptor. Neste caso, a probabilidade de perder ambos os pacotes é maior.

No Castalia o modelo da *lognormal* é utilizado para estimar, em dBm, a perda (*path loss*) da comunicação entre esses dispositivos. Sua fórmula é dada por

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (4.1)$$

onde $PL(d_0)$ é a perda de caminho em uma distância de referência d_0 , η é o expoente de perda de caminho e X_σ é um ruído aleatório Gaussiano de média 0 com desvio padrão σ . Um valor 0 criará enlaces simétricos, enquanto um valor alto criará enlaces direcionados.

Entretanto, a *lognormal* não é precisa para estimar a correlação entre dois enlaces independentes (Boulis e Tselishchev, 2011). Por essa razão, o Castalia utiliza o modelo de correlação temporal proposto por Boulis *et al.* (2012a) como forma de modelar a atenuação do sinal no meio de comunicação. Neste modelo, o próximo valor da atenuação do sinal para um enlace está correlacionado com o

último valor observado e com o tempo transcorrido entre essas duas transmissões.

A implementação dessa correlação no simulador *Castalia* segue a seguinte regra [Boulis et al. \(2012a\)](#): se o intervalo entre duas transmissões é menor que 10ms, então o valor da atenuação não muda; se o intervalo é maior que 5s (cinco segundos) então as atenuações são consideradas independentes; para qualquer intervalo entre esses valores, são especificadas probabilidades condicionais que correlaciona o valor da atenuação com o valor previamente observado.

Com relação à mobilidade são considerados dois arquivos para parametrização do canal de comunicação da WBAN. O primeiro é denominado *Path Loss Map*, mostrado na Tabela 4.1, que define a perda média de sinal no enlace entre dois nós da rede. Por exemplo, o nó D-quadril (nó *sink*) possui em média uma perda de -56 dBm ao transmitir para o nó sensor E-Pulso, localizado no pulso esquerdo. Os valores da Tabela 4.1 foram obtidos através de um experimento em um ambiente interno em que uma pessoa caminhava por uma esteira.

Nó Sensor	D-quadril	E-pulso	D-pulso	E-tornozelo	D-tornozelo	Peito
D-quadril	-	-56	-40	-59	-54	-58
E-pulso	-56	-	-52	-52	-58	-61
D-pulso	-40	-52	-	-58	-54	-61
E-tornozelo	-59	-52	-58	-	-50	-63
D-tornozelo	-54	-58	-54	-50	-	-63
Peito	-58	-61	-61	-63	-63	-

Tabela 4.1: Valores do *path loss* com atenuação média percebida no enlace entre dois nós distintos.

No segundo arquivo, denominado *Temporal Model*, é descrita a variação temporal da atenuação do enlace (em dBm) por meio da quantificação de uma função de distribuição de probabilidade (PDF – *probability distribution function*) para os intervalos pré-definidos descritos anteriormente (5 e 10 segundos), entre duas transmissões consecutivas. O uso dos valores mostrados na Tabela 4.1 e do *Temporal Model* são utilizados na simulação em relação à mobilidade da WBAN.

4.2 IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi publicado em 2003 pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) como o primeiro padrão para redes locais sem fio de área pessoal (WPAN) de baixas taxas. O padrão foi denominado IEEE 802.15.4 – LR-WPAN (*Low Rate – WPAN*). O IEEE 802.15.4 foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar uma fácil instalação da rede e de suportar comunicação robusta em distâncias curtas por meio de uma pilha de protocolos simples e flexível. O ZigBee é uma implementação do padrão IEEE 802.15.4 e disponível comercialmente. Ao considerar as limitações energéticas dos nós, foi proposto um protocolo de comunicação simples com alcance reduzido.

A Figura 4.4 mostra a pilha de protocolos do IEEE 802.15.4. O plano de gerência no lado esquerdo compreende do nível físico ao nível de aplicação, mas está fora do escopo do padrão. O plano de dados especifica os protocolos do nível de acesso ao meio e do nível físico (802.15.4, 2011).

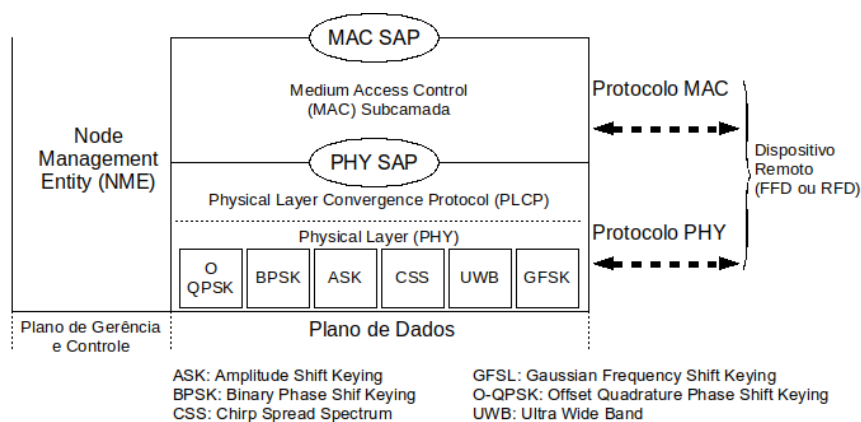


Figura 4.4: Modelo de referência do IEEE 802.15.4 (Rochol, 2018).

No padrão são definidos dois tipos de dispositivos: o RFD (*Reduced Function Device*) e o FFD (*Full Function Device*). Os dispositivos RFD são equipados com um conjunto limitado de funcionalidades da subcamada MAC e operam como dispositivos finais que coletam dados e transmitem a informação para seus vizinhos. Os RFDs são dispositivos normalmente simples, em que a comunicação se faz entre dois nós e, por não realizarem roteamento, são utilizados nas bordas das redes. Os dispositivos FFD são equipados com um conjunto completo de funcionalidades e podem atuar como dispositivos finais, roteadores ou coordenadores da rede.

Uma rede consiste em múltiplos dispositivos FFDs e RFDs, com um dos FFDs designado como coordenador da rede. O resumo das funcionalidades de cada um desses dispositivos em uma rede sem fio é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Funcionalidades dos dispositivos do padrão IEEE 802.15.4.

Dispositivo	Tipo	Função
Coordenador	FFD	Criação e formação da rede, atribuição de endereços únicos.
Roteador	FFD	Permite que mais nós sejam, opcionalmente, acrescentados à rede, efetua funções de controle e monitoramento e sua existência é opcional.
Dispositivo Final	RFD ou FFD	Efetua ações de controle ou monitoramento por meio de um dispositivo associado (sensor, controlador ou atuador)

Na Figura 4.5 são mostradas algumas topologias propostas pelo padrão, com os tipos dos dispositivos apresentados na Tabela 4.2. Todos os dispositivos operando na rede recebem um único endereço de 64 bits. Entretanto, os dispositivos RFD podem obter endereços de apenas 16 bits do coordenador da rede.

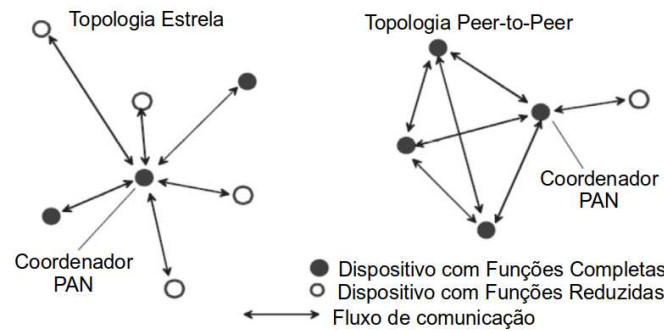


Figura 4.5: Exemplos de topologia estrela ponto a ponto (802.15.4, 2011).

4.2.1 Camada Física

A camada física é responsável por serviços como a ativação e desativação do transceptor; seleção do canal de frequência; transmissão e recepção dos dados; detecção de níveis de energia no canal (ED – *Energy Detection*); medição da qualidade do enlace (LQI – *Link Quality Indication*) para os pacotes recebidos; e verificação da ocupação do canal (CCA – *Clear Channel Assessment*).

A medida da detecção de energia do canal (ED) corresponde a uma estimativa da potência do sinal recebido. O LQI é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. A medida pode ser implementada usando a ED, uma estimativa da relação sinal/ruído ou uma combinação desses métodos. O LQI é reportado como um inteiro de 8 bits, e os valores máximos e mínimos de LQI são associados aos valores de mais baixa e alta qualidade dos sinais IEEE 802.15.4 detectáveis pelo receptor. Portanto, os valores estão uniformemente distribuídos entre esses dois limites.

O CCA é executado de acordo com a configuração de um dos seguintes métodos:

- **energia acima do nível:** CCA reportará o estado do meio como ocupado após detectar um nível de energia acima do nível ED;
- **detecta somente a portadora:** CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção do sinal da portadora. Este sinal pode estar acima ou abaixo do nível ED; e
- **detecta portadora com energia acima do nível:** CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção da portadora com energia acima do nível ED.

A camada física usa as bandas de frequência ISM (*Industrial Medical Scientific*) e pode operar em 3 faixas : 2450 MHz (adotada pelo Brasil) com 16 canais, 915 MHz (apenas nos EUA) com 10 canais e 868 MHz com apenas 1 canal (padrão Europeu). A Tabela 4.3 resume as principais características.

A forma com que tais canais estão organizados permite a coexistência do padrão IEEE 802.15.4 com outros padrões, como por exemplo, o IEEE 802.11 (wi-fi), em um mesmo ambiente.

Tabela 4.3: *Frequências do padrão IEEE 802.15.4.*

Frequência	Cobertura	Taxa (Kbps)	Canais
868 MHz	Europa	20	1
915 MHz	ISM Américas	40	10
2450 MHz	ISM Mundial	250	16

4.2.2 Camada de Acesso ao Meio

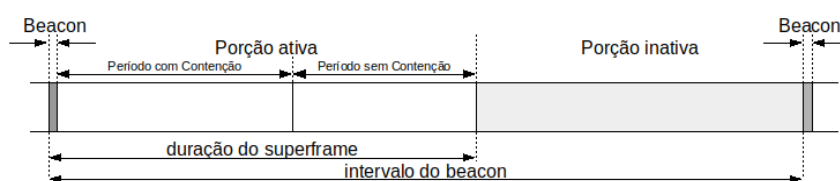
A subcamada MAC trata de todo acesso ao canal e é responsável pelas tarefas de geração e sincronização de *beacons*; suporte de associação e desassociação na rede; gerenciamento de acesso ao canal; manutenção dos tempos reservados; validação e reconhecimento de mensagem e opcionalmente suporte à segurança do dispositivo.

Segundo Rochol (2018), os algoritmos de acesso ao meio são definidos como o *Aloha* e o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Ao utilizar o *Aloha* um dispositivo transmite sem verificar se o canal está ocupado e aguarda um *slot*. Outra versão denominada *Slotted Aloha* utiliza *slots* com tempo fixo para transmitir.

O CSMA/CA pode ser utilizado com ou sem a utilização de *beacons* no *superframe* (*slotted CSMA/CA*). Com o uso de *superframes* baseado em *beacon* existe a sincronização de um período de *backoff* com o início do *beacon*. Quando um dispositivo quer transmitir ele localiza o início do próximo *backoff* no período de contenção. Caso não consiga transmitir após aguardar um número aleatório de *backoffs*, o dispositivo aguarda novamente por um novo intervalo de *backoffs*. Quando o canal está livre, o dispositivo transmite no próximo *backoff* (Rochol, 2018).

Com *superframes* sem sinalização de *beacon* o CSMA/CA é utilizado sem *slots* (*unslotted CSMA/CA*). Nesse caso, aguarda-se um período de unidades de tempo *backoff* aleatório e, quando o canal está ocupado, aguarda-se por um novo período e tenta-se acessar o canal novamente. A confirmação de recebimento (ACK), com e sem *beacon*, é realizada sem utilizar o CSMA/CA.

A Figura 4.6 apresenta a estrutura de um *superframe*, que é definido e enviado pelo coordenador. Um *beacon* é transmitido no primeiro intervalo de tempo (*slot*) de cada *superframe*. Há uma porção ativa, durante a qual a comunicação se processa, e uma porção inativa (opcional), em que os dispositivos podem desligar seus transceptores para conservar energia (modo *sleep*).

**Figura 4.6:** *Estrutura do superframe do padrão IEEE 802.15.4.*

A porção ativa é dividida em 16 períodos de tempo iguais (*slots*) e deve conter no mínimo 8 períodos ativos. Imediatamente após o *beacon* vem o período de acesso com contenção (CAP – *Contention Access Period*). Após o CAP, há um período opcional sem contenção (CFP – *Contention Free Period*), que pode ter até 7 períodos ativos. Em um CFP o coordenador PAN garante *slots* (GTS – *Guaranteed Time Slots*) para os dispositivos.

Durante um *slot* do GTS, um dispositivo tem acesso exclusivo ao canal e não executa CSMA/CA. Esse dispositivo pode transmitir ou receber dados de seu coordenador, mas não ambos. Um GTS será reservado somente para o coordenador da rede (PAN). O comprimento de um GTS deve ser um múltiplo inteiro de um período ativo e todos os GTSs devem ser contidos no CFP e são localizados no final da porção ativa do *superframe*.

Um dispositivo pode desabilitar seu transceptor durante um GTS designado para outro dispositivo a fim de conservar energia. Para cada GTS, o coordenador indicará no *beacon* o intervalo de partida (*slot*), comprimento, direção e endereço do dispositivo associado. A direção do GTS é especificada como transmissão ou recepção.

No caso da topologia em malha, onde não há envio de *beacons* e existe a possibilidade de desligamento do rádio por um período específico, a especificação IEEE 802.15.4 não prevê solução para períodos de desligamento do rádio.

4.2.3 Comunicação

O padrão IEEE 802.15.4 define três sentidos de comunicação para as redes nos modos de operação que trabalham com ou sem a estrutura do *superframe*. No primeiro caso, a orientação da comunicação ocorre a partir de um dispositivo na rede para o coordenador. No segundo caso, a comunicação ocorre de forma inversa. No terceiro caso, a orientação da comunicação pode ocorrer em qualquer sentido, para qualquer tipo de dispositivo. Em uma topologia estrela, apenas os dois primeiros casos são utilizados, enquanto que em uma topologia em malha podem ser utilizados todos os casos.

Para o modo de operação com a estrutura do *superframe* habilitada, quando um dispositivo desejar enviar dados para um coordenador, primeiramente deve-se esperar o recebimento de um *beacon* para que ocorra a sincronização do *superframe*. Em um tempo determinado, a informação coletada na rede é transmitida para o coordenador usando o *slotted CSMA/CA*. O coordenador, opcionalmente, pode enviar uma mensagem de reconhecimento para garantir que o pacote chegou corretamente. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.7-a.

Entretanto, quando a estrutura do *superframe* não é habilitada, um dispositivo não necessita esperar o recebimento de um *beacon* para enviar uma informação. Em um tempo determinado, a

informação é transmitida utilizando o CSMA/CA sem *slots*, conforme descrito na Figura 4.7-b. Nesse modo de comunicação, com o intuito de diminuir a probabilidade de colisões, o dispositivo verifica se o meio está ocioso antes de iniciar a transmissão. Quando uma colisão é detectada, o dispositivo aguarda pelo *backoff* antes de tentar retransmitir o pacote.

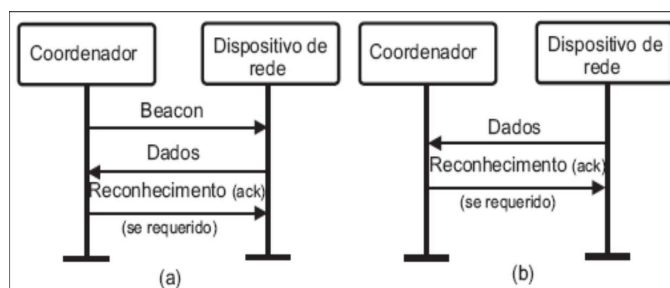


Figura 4.7: Comunicação de dados do padrão IEEE 802.15.4 (a) com beacon e (b) sem beacon.

Para o modo de operação com a estrutura do *superframe* habilitada, quando um coordenador desejar enviar dados para um dispositivo na rede, ele indica explicitamente no *beacon* sua intenção de transmissão. Ao receber um *beacon*, um dispositivo de rede percebe que uma mensagem está pendente e, dessa forma, envia uma requisição para o coordenador, autorizando-o a transmitir a informação. Ao receber a autorização, o coordenador envia uma mensagem de reconhecimento informando que a autorização chegou corretamente e, em seguida, a informação pendente é transmitida utilizando-se o CSMA/CA *slotted*. Ao receber os dados, o dispositivo de rede encaminha um ACK que informa o recebimento. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.8-a. Entretanto, quando a estrutura do *superframe* não está habilitada, o procedimento é ligeiramente diferente. Nesse caso, dispositivos de rede são configurados para enviarem periodicamente mensagens ao coordenador para saber se há informações pendentes. Caso alguma informação esteja pendente, o coordenador as envia para os dispositivos, conforme a descrição da Figura 4.8-b.

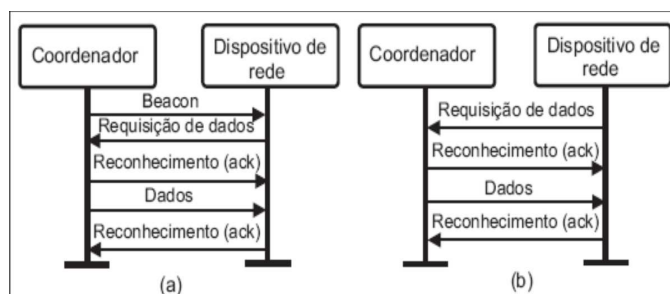


Figura 4.8: Comunicação de dados do padrão IEEE 802.15.4 (a) com beacon e (b) sem beacon.

Outra atribuição do padrão relaciona-se com os mecanismos necessários para a formação da rede. Na fase de formação da rede as trocas de mensagens sempre utilizam o modo *beacon* com *superframe*. O mecanismo é inicializado após o coordenador principal da rede ser configurado.

Então um nó sensor é inicializado, uma verificação nos canais de comunicação é realizada com a finalidade de encontrar *beacons* enviados pelo coordenador principal ou por outros dispositivos que já conseguiram entrar na rede. Sem perda de generalidade pode-se classificar um dispositivo que já entrou na rede como um coordenador. No momento que um dispositivo encontra um coordenador da rede, algumas mensagens são trocadas, visando à entrada na rede por parte do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 4.9.

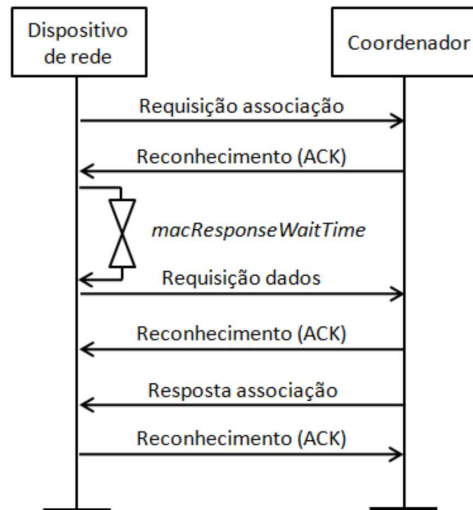


Figura 4.9: Mecanismo de formação da rede do padrão IEEE 802.15.4.

Inicialmente, o dispositivo envia uma mensagem ao coordenador solicitando a entrada na rede. O coordenador, ao receber esta mensagem, responde com uma mensagem de reconhecimento. Nesse momento, o coordenador tem um tempo limite para verificar a possibilidade da entrada do dispositivo na rede. Por outro lado, quando o dispositivo recebe a mensagem de reconhecimento, um atraso de (*macResponseWaitTime*) tempo ocorre. Após esse tempo, o dispositivo envia uma requisição de dados com a finalidade de confirmar a adesão à rede. Em seguida, uma mensagem de confirmação é enviada pelo coordenador para confirmar a entrada na rede.

4.3 Cenários de Simulação

A proposta deste trabalho, aqui denominada CL, usa a camada MAC do Padrão IEEE 802.15.4 com as alterações apresentadas no capítulo de desenvolvimento. Foram desenvolvidas duas propostas denominadas *Potência Alta* e *Potência Baixa* para comparação por meio de simulações.

Na Tabela 4.4 são mostradas as definições de *Potência Alta* e *Potência Baixa*, que usam a camada MAC sem alteração e a camada PHY com potência de transmissão fixa. CL utiliza diversos valores de potência do rádio (BANRadio) e um número maior de retransmissões (3).

Tabela 4.4: *Características Específicas para Cada Abordagem*

Abordagem	Potência TX (dBm)	Protocolo MAC	No. Máximo de Retransmissões
CL	-10, -12, -15, -20 ou -25	CROSS-LAYER	3
Potência Alta	-10	IEEE 802.15.4	1
Potência Baixa	-20	IEEE 802.15.4	1

A *Potência Alta* tem como característica maior potência de TX disponível, o que implica em alto consumo de energia. *Potência Baixa* tem a menor potência de TX o que implica em baixo consumo de energia. Intuitivamente, a *Potência Alta* produzirá uma maior entrega de pacotes com um maior consumo de energia. Por outro lado *Potência Baixa* produzirá uma menor entrega de dados com um menor consumo de energia. *Potência Alta* garante confiabilidade e o tempo de vida da rede é reduzido. E *Potência Baixa* tem pouca confiabilidade mas seu tempo de vida de rede é maior.

As taxas de dados utilizadas foram baseadas em [Boulis et al. \(2012b\)](#), onde o limite teórico do canal de comunicação, considerando a taxa de dados do BANRadio de 512 Kbps, o ciclo de trabalho (*Duty Cycle* – tempo ativo do rádio do nó sensor) de 25% e o MAC IEEE 802.15.4 com *beacon* é de 25,6 Kbps. Baseado nesse limite, as taxas de dados para os cenários foram definidas como Muito Alta, Alta e Baixa, como mostradas na Tabela 4.5. A primeira coluna indica a posição do nó sensor conforme a Figura 4.10. As colunas Taxa Muita Alta, Taxa Alta e Taxa Baixa apresentam a quantidade de pacotes gerada por cada nó sensor enviada pela camada APP.

Nó sensor	Taxas		
	Muito Alta	Alta	Baixa
punho esquerdo	10	5	2
punho direito	10	2	2
tornozelo esquerdo	15	5	2
tornozelo direito	25	2	2
tórax	25	15	2
Taxa Agregada	85	29	10

Tabela 4.5: *Taxas de dados usadas para os nós sensores.*

O submódulo de aplicação do nó é responsável por enviar dados com informações fisiológicas do usuário ao nó *sink*. Os pacotes têm tamanhos fixos de 105 bytes na camada de Aplicação e 142 bytes na camada MAC, incluindo os *overheads*. As propostas possuem os seguintes parâmetros:

- *packet_rate*: quantidade de pacotes a ser enviados por segundo (2, 5, 10, 15 e 25);
- *startupDelay*: tempo de configuração inicial da rede em segundo (1);
- *packetHeaderOverhead*: tamanho em bytes do *overhead* (5) da camada de Aplicação;

- *packetHeaderOverhead*: tamanho em bytes do *overhead* (14) da camada MAC;
- *isSink*: indica se o nó sensor é um *sink* (o nó sensor 0 será configurado como *sink* e os demais não).

Para efeito de comparação, as três propostas foram simuladas usando a mesma topologia e a mesma configuração na camada de Aplicação. Por exemplo, usando a Taxa Muito Alta, os nós 1 e 2 geram um total de 3.000 pacotes, o nó 3 gera 4.500 pacotes e os nós 4 e 5 geram 7.500 pacotes cada. Por utilizar apenas um salto, não houve a necessidade de um protocolo de roteamento. A camada MAC utiliza internamente um *buffer* de recepção para 32 pacotes, tamanho padrão IEEE implementado no Castalia. Como o tempo simulado é de 300 segundos, a Tabela 4.6 mostra o total de pacotes enviados por cada nó sensor.

Nó sensor	Taxas		
	Muito Alta	Alta	Baixa
punho esquerdo	3000	1500	600
punho direito	3000	600	600
tornozelo esquerdo	4500	1500	600
tornozelo direito	7500	600	600
tórax	7500	4500	600

Tabela 4.6: Taxas de dados usadas para os nós sensores.

Foi escolhida uma WBAN com topologia estrela com seis nós e com apenas um salto. Os nós são de dois tipos: um nó coordenador, aqui chamado de nó *sink*, e diversos nós sensores que regularmente enviam ao nó *sink* pacotes de dados. Não existe comunicação entre nós sensores, apenas entre nós sensores e o nó *sink*.

A Figura 4.10 apresenta a disposição da rede onde o nó *sink* está localizado à direita do quadril, e cinco nós sensores estão posicionados nas extremidades dos quatro membros e no torso.

Cada nó sensor tem uma aplicação que usa um ou mais sensores para a coleta de dados fisiológicos. Para melhor representar uma utilização real, os nós sensores possuem diferentes conjuntos de sensores e respectivas taxas de pacotes. Cada pacote gerado pela camada de aplicação de um nó sensor é enviado para a camada de aplicação do nó *sink*. Cada pacote da camada de aplicação gera um único pacote na camada MAC e esse deve ser reconhecido pelo MAC destinatário com o envio de um pacote ACK. O tempo de vida da rede teve duração de 301 segundos, sendo o primeiro segundo para a configuração da rede, e os 300 segundos restantes para o tempo simulado.

Para a camada física um modelo de referência, denominado *BANRadio* (Boulis e Tselishchev, 2011), foi utilizado e seus parâmetros são mostrados na Tabela 4.7. A energia dos nós sensores provem de duas baterias alcalinas tamanho AA e com carga inicial de 18.720 Joules.

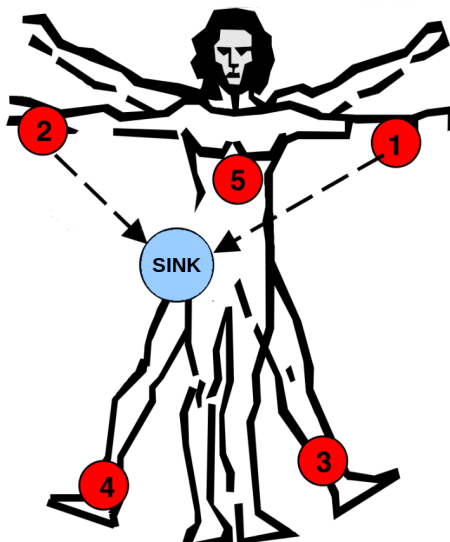


Figura 4.10: Topologia utilizada na WBAN (Boulis et al., 2012b).

Parâmetros	Valor
Taxa de dados	512 Kbps
Modulação	Diff BPSK
Potências de Transmissão	-10 -12 -15 -20 -25 (dBm)
Consumo de Energia TX	3,00 2,96 2,93 2,90 2,90 (mW)
Consumo de Energia RX	3,1 (mW)
Sensibilidade RX	-91 dBm

Tabela 4.7: Parâmetros do rádio BANRadio conforme Boulis e Tselishchev (2011)

Para a camada de acesso ao meio (MAC) foi utilizado o padrão IEEE 802.15.4 em modo *beacon* e o acesso baseado em contenção (CSMA/CA). Tal configuração é comum em WBANs com topologia estrela. Os *beacons* são transmitidos pelo nó *sink* aos nós sensores para indicar o início de cada *frame*, que possui 16 *slots*. O padrão IEEE 802.15.4 geralmente usa um *duty cycle* de 25%, que representa o período de tempo em que o nó sensor tentará enviar seus pacotes, além dos 75% que permanecerá com o rádio desligado (Boulis et al., 2012a).

4.4 Análise dos Dados

Castalia gera relatórios de simulação na forma de arquivos texto com os dados básicos. Os dados gerados são divididos em dois arquivos: um contendo as informações estatísticas dos nós sensores; e outro contendo um *log* (*Castalia-Trace.txt*) das operações das camadas da rede do nó sensor em função do tempo. Enquanto o primeiro arquivo fornece as taxas como entrega de pacotes, falhas e consumo de energia e podem ser selecionados com um comando desse simulador denominado *CastaliaResults*, o segundo têm dados como em qual tempo determinado nó sensor enviou ou recebeu um pacote e não tem um comando para selecionar ou agrupar informações.

Após os dados gerados, foi necessário estruturá-los para a geração de gráficos de frequência. Para isso foi utilizado primeiramente o comando Unix AWK (AWK, 2019) que disponibiliza funcionalidades básicas para análise e tratamento de arquivos textos no ambiente Linux. AWK utiliza expressões regulares, funções, operações de comparação, entre outros, para a busca e seleção de termos de busca. Este recurso foi utilizado para extrair informações de interesse do arquivo *Castalia-Trace.txt*.

Após, os dados estatísticos e os organizados pelo AWK foram estruturados utilizando a linguagem Python com auxílio das bibliotecas *Numpy* e *Pandas* (Pandas, 2019) (Numpy, 2019). Os gráficos foram gerados utilizando as bibliotecas *Matplotlib/Pyplot* e *Seaborn*. As primeiras análises foram feitas com a ajuda do ambiente de computação dinâmica *Jupyter* (Jupyter, 2019), que permite executar comandos da linguagem Python diretamente em um navegador web. A utilização desse ambiente facilitou a prototipação dos *scripts* utilizados para a análise de dados.

Foram realizadas 33 (trinta e três) simulações para cada cenário em que os valores das simulações convergem, onde cada cenário é o resultado da combinação das cinco abordagens, os dois tipos de canais de comunicação (com e sem colisão) e três diferentes taxas de dados, produzindo um total de trinta diferentes cenários. Para garantir credibilidade dos resultados foi definido um intervalo de confiança de 95%, calculado pelo próprio Castalia.

Cada simulação gastou um tempo média de 327 segundos. Foi utilizado um processador Intel i7 com 8 núcleos de 2.2 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS (*Long Term Support*).

4.5 Considerações

Neste capítulo foi descrito o simulador Castalia e sua arquitetura, que é composta por módulos independentes que realizam funções específicas, como a gerencia de recursos e de mobilidade de uma rede sem fio. O Castalia é um simulador desenvolvido para redes com baixo consumo de energia e baixa potência de transmissão, o que inclui RSSFs e WBANs. O seu modelo de mobilidade é limitado a um único cenário de uma pessoa caminhando.

Foi descrito o padrão IEEE 802.15.4, o qual será utilizado como estudo de caso nesse trabalho, e já se encontra implementado no Castalia. Como referência de entrega de pacotes e consumo de energia foram definidas duas redes denominadas de Potência Alta (PA) e Potência Baixa (PB), e que são configuradas com potência de transmissão de -10 dBm e -20 dBm respectivamente. Com isso, pretende-se estabelecer limiares para a comparação da solução apresentada nessa tese, em que, intuitivamente, PA terá uma melhor entrega de pacotes e o maior consumo de energia, e PB uma

menor taxa de entrega de pacotes e menor consumo de energia.

Capítulo 5

Desenvolvimento

Neste capítulo será descrito a abordagem CL e os desenvolvimentos das suas implementações.

5.1 CL : Uma Abordagem Cross-Layer para WBAN

Esse trabalho apresenta a CL, uma nova abordagem *cross-layer* para comunicação em WBANs. A arquitetura adotada é exposta na Figura 5.1 com comunicação entre as camadas não adjacentes. A CL tem por objetivo facilitar a adaptação da WBAN de acordo com o estado do meio de acesso, aumentando a confiabilidade na comunicação sem comprometer o tempo de vida da rede e possibilitar o compartilhamento de métricas entre as camadas. CL utiliza as camadas Enlace (MAC) e Física (PHY) do padrão IEEE 802.15.4 e implementa uma camada de Aplicação (APP) que emula uma aplicação biomédica.

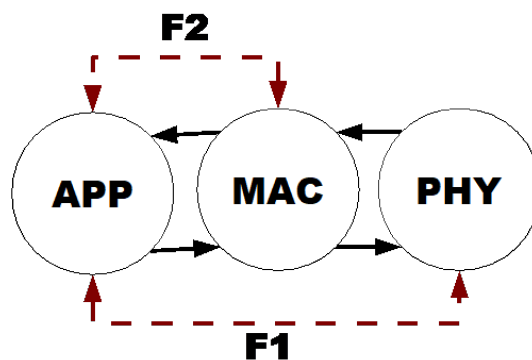


Figura 5.1: Fluxo tradicional de comunicação (linhas contínuas) e dois fluxos adicionais propostos (linhas tracejadas) (Pozza e Silva, 2015).

A proposta define dois fluxos de interação, F1 e F2, entre as camadas Aplicação, MAC e Física, os quais têm o objetivo de compartilhar informações, individualmente para cada nó sensor, para que a WBAN possa ajustar os parâmetros de comunicação de acordo com as características do estado

atual do meio de comunicação, de tal forma que as camadas mais baixas trocam informações com as camadas mais altas da pilha de protocolos. Foram desenvolvidos experimentos para comprovar que CL pode ser utilizada em WBANs.

CL é baseada no modelo de [Srivastava e Motani \(2005\)](#) *Back-and-forth information flow* conforme explicado na seção 2.3.1, mas sem o desenvolvimento de novas interfaces. Serão utilizadas as interfaces já presentes no IEEE padrão e as informações serão compartilhadas por mensagens. Essa mudança no modelo de [Srivastava e Motani \(2005\)](#) tem o propósito de minimizar o impacto no desenvolvimento de novos protocolos, enquanto mantém compatibilidade com protocolo padrão, que é um dos problemas no uso de soluções *cross-layer*.

O fluxo F1, entre as camadas PHY e APP, altera a potência de transmissão do rádio na camada Física de cada nó individual. O critério estabelecido é a taxa de pacotes recebidos (*Packet Received Rate* – PRR) pelo nó *sink*, informada pela camada MAC à camada de Aplicação. A PRR_MAC, calculada na camada MAC, é a razão entre os pacotes ACK (*Acknowledgement*) enviados pelo nó *sink* e os pacotes de dados enviados pelo nó sensor durante um dado intervalo.

O fluxo F2, entre as camadas MAC e APP, além de compartilhar a PRR_MAC tem por objetivo aumentar a probabilidade de entrega de pacotes com maior prioridade através da variação no número de tentativas de envio de pacotes. Em sistemas *e-Health*, a garantia de entrega de pacotes com informações críticas é um requisito importante. Em F2 a camada APP altera o número de retransmissões de cada pacote em caso de não recebimento do ACK. No padrão IEEE 802.15.4 esse valor é definido entre 7 (máximo) e 2 (padrão) [Di Francesco et al. \(2011\)](#). As retransmissões têm impacto tanto no meio de acesso quanto na QoS (entrega de pacotes e tempo de vida da rede), pois aumentam a confiabilidade e o consumo de energia.

O desenvolvimento do CL tem como base o IEEE 802.15.4, que está implementado no simulador Castalia, como descrito na seção 4.1. O padrão IEEE 802.15.4 é muito utilizado nos trabalhos da literatura em redes corporais e sua camada física é disponível comercialmente por diversos fabricantes de circuitos integrados. O novo padrão IEEE 802.15.6, estabelecido para as redes corporais, apresenta diferenças em relação ao IEEE 802.15.4, mas possui também semelhanças. Por exemplo, o IEEE 802.15.6 descreve três camadas físicas, o que não ocorre no IEEE 802.15.4. Apesar da diferença entre as camadas físicas, a possibilidade de aumentar de potência de transmissão nessa camada não é algo restritivo; e na camada MAC, ambos os padrões implementam um protocolo de acesso ao meio baseado no algoritmo de CSMA/CA. Além da quantidade de camadas físicas¹, uma grande diferença entre os padrões é a estrutura do *superframe*, que dificulta a interação entre esses padrões no desenvol-

¹O IEEE 802.15.6 dispõe de três camadas físicas.

vimento de uma proposta para abranger ambos.

Segundo Akyildiz e Vuran (2010) o uso de *cross-layer* intensifica o problema de compatibilidade de soluções em comparação ao modelo em camadas. Neste trabalho, como não houve mudanças estruturais na comunicação entre as camadas, mas o compartilhamento de informações entre as mesmas, o problema de compatibilidade pode ser minimizado. Os fluxos mostrados na Figura 5.1 podem ser implementados em versões futuras do IEEE 802.15.4 e, a partir dessa versão, as aplicações poderão compartilhar métricas entre as camadas.

Para comprovar as hipóteses deste trabalho, foram desenvolvidos três propostas *cross-layer*:

- Proposta 1 – CL2 : variação da potência do rádio em dois níveis, -10 e -20 dBm, e retransmissão de pacotes (1, 2, 3) baseada nas informações de recebimento de pacotes da camada MAC e nas prioridades dos pacotes (seção 5.1.1);
- Proposta 2 – CL4 : variação da potência do rádio em quatro níveis, -10, -12, -15 e -20 dBm, e retransmissão de pacotes (1, 2, 3) baseado nas informações de pacotes da camada MAC e nas prioridades dos pacotes (seção 5.1.2); e
- Proposta 3 – CL-Bin : distribuição binomial para alteração da potência do rádio com cinco valores de transmissão, -10, -12, -15, -20 e -25 dBm (seção 5.1.3).

Para cada proposta foi elaborado um algoritmo que implementa a estratégia para melhorar a entrega de pacotes e diminuir o consumo de energia. Os algoritmos são executados na camada APP dos nós sensores que implementam os fluxos F1 e F2 e alteram os parâmetros anteriormente estáticos pelo padrão IEEE 802.15.4. CL não altera ou adiciona qualquer funcionalidade ou serviço em nenhuma das camadas, apenas possibilita a tomada de decisão na alteração de parâmetros de comunicação com base em informações presentes em camadas distintas.

5.1.1 Proposta CL2

CL2 utiliza dois níveis de potência de transmissão de Tx e altera essa potência de acordo com a taxa de pacotes recebidos pelo nó *sink* e o número de retransmissões de acordo com a prioridade de pacotes.

A hipótese em CL2 é que variando a potência utilizando o fluxo F2 e de acordo com a PRR_MAC recebida pelo fluxo F1 a taxa de entrega de pacotes seria próxima das taxas de potência mais alta, e o consumo de energia seria reduzido ou próximo das taxas de potência mais baixa. Para isso foi comparada a PRR_MAC com um valor de 95% previamente determinado, baseado no trabalho de

Wang et al. (2014) que tem resultados de sucesso entre 67% e 98% na entrega de pacotes de uma WBAN.

O **Algoritmo 1** implementa o fluxo F1, e tem como entrada a PRR_MAC para cada nó sensor (i) e o limiar estabelecido de 95% para todos os nós da rede. Como saída tem a potência de Tx.

Algoritmo 1: Fluxo F1: Ajuste para CL2 de potência de Tx.

```

1  Entrada:
2    $PRR\_MAC_i$ ;  $Limiar\_PRR\_MAC$ 
3  Saída:
4    $PT_i$  valor da potência
5  if  $PRR\_MAC_i \leq Limiar\_PRR\_MAC$  then
6    $PT_i = -10dBm$ ;
7  else
8    $PT_i = -20dBm$ ;
```

A prioridade de um dado pacote é um número randômico gerado entre 0 e 100, indicando menor e maior prioridade. Como mostrado na Tabela 5.1, o pacote ao receber prioridade de 95% terá o número de retransmissões alterada para 3; entre 90% e 94% para 2; entre 50% e 89% para 1 e até 49% não teria retransmissão. Portanto, os pacotes com valores abaixo de 49% tem prioridade muito baixa e não necessitam de retransmissões adicionais. Como os requisitos para WBANs são diferentes, os valores utilizados têm como objetivo mostrar a viabilidade do uso de prioridade de envio de pacotes. O IEEE 802.15.4 não tem proposta para diferenciar pacotes por prioridade. Nesse caso a camada APP poderia definir o nível de prioridade dos pacotes de acordo com suas aplicações. Em CL2 os valores da Tabela 5.1 foram aplicados para todos os nós sensores.

Prioridade do pacote (%)	100-95	94-90	89-50	49-0
Número de Retransmissões	3	2	1	0

Tabela 5.1: Tabela com as prioridades estabelecidas nos pacotes enviados pela camada APP.

O **Algoritmo 2** implementa o fluxo F2 que determina o número de retransmissões na camada MAC. As entradas são os valores de prioridade ($Prioridade_i$) de cada pacote do nó i e os níveis definidos na Tabela 5.1, e a saída é o número de retransmissões adicionais.

Algoritmo 2: Fluxo F2: número de retransmissões de pacotes.

```

1  Entrada:
2    $Prioridade_j$ : prioridade do pacote  $j$ 
3    $Nivel\_Prioridade$ : valores definidos na Tabela 5.1
4  Saída:
5    $retransmissao_i$ : número de retransmissão do pacote  $j$ 
6   $retransmissao_i = Nivel\_Prioridade[Prioridade_j]$ 
```

5.1.2 Proposta CL4

CL4 utiliza quatro valores de potências de transmissão do rádio desde a potência máxima até a mínima definida em CL2 . A alteração no nível de potência de transmissão reage aos valores da PRR_MAC e a taxa de transmissão de pacotes dos nós sensores. Espera-se obter melhorias na entrega de pacotes com o uso de potências menores em detrimento a um nível maior de potência de acordo com as taxas de dados dos nós sensores. Logo, o resultado esperado é uma proximidade ou melhora em relação ao uso contínuo da potência máxima.

Foi adotada uma abordagem que utiliza as frequências da ocorrência de PRR_MAC recebidas para o algoritmo do fluxo F1, ao invés de reagir ao valor do último pacote recebido entre os valores máximo e mínimo da potência. Para cada valor da potência de transmissão a ser usada foi feita uma simulação para obter e analisar os valores e a frequência de ocorrência das respectivas PRR_MACs.

Para as simulações foi utilizada uma janela de 10 pacotes nas taxas de dados Baixa, Alta e Muito Alta (seção 4.3) e as potências de transmissão de -10 dBm, -12 dBm, -15 dBm e -20 dBm. A equação 5.1 mostra como foram realizadas as combinações para os 12 experimentos. O modo com colisão apresenta o pior cenário e apenas ele foi considerado.

$$Experimento_Fluxo1 = \begin{pmatrix} -10dBm \\ -12dBm \\ -15dBm \\ -20dBm \end{pmatrix} \times \left(Com\ Colisão \right) \times \begin{pmatrix} Taxa\ Baixa \\ Taxa\ Alta \\ Taxa\ Muito\ Alta \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Para cada potência de transmissão em um cenário com colisão, em uma determinada taxa de dados, foi simulado uma WBAN para obter os valores das PRR_MACs e respectivas frequências. Portanto, ao final das simulações foram separadas os valores das PRR_MACs e frequências para cada potência de transmissão e cada taxa (Baixa, Alta e Muito Alta).

A premissa é identificar uma relação que indique quais os intervalos em que potências mais altas ou mais baixas podem ser utilizadas, para melhorar a entrega de pacotes ou diminuir o consumo de energia. Ou seja, uma potência pode ser escolhida considerando a melhor entrega de pacotes mesmo consumindo mais energia, assim como outra potência pode ser utilizada para economizar mais energia em detrimento da entrega de pacotes. Essa relação, mostrada nos gráficos das figuras a seguir, será utilizada para o desenvolvimento da estratégia para mudança de potência de transmissão utilizando o fluxo F1.

A Figura 5.2 mostra a relação para a taxa Baixa dos seus valores de PRR_MAC em relação a frequência de ocorrência das mesmas. O nó sensor configurado com -10 dBm obteve PRR_MAC com valor de 100% (Frequência) em uma frequência próxima de 55% (PRR_MAC), e o mesmo nó sensor obteve frequência próxima de 0% com a PRR_MAC de 10%. Foi observado que na frequência da PRR_MAC quando próximos de 90% as potências de transmissão -10 dBm, -12 dBm e -15 dBm têm valores próximos e que mais distantes quando próximos de 100%. Baseado nessa premissa foi determinado o menor valor de potência (-15 dBm) para ser utilizado quando a PRR_MAC estiver com valor acima de 90%. Ou seja, nessa premissa a potência de -15 dBm é a melhor alternativa em termos de consumo de energia e pode não impactar na entrega de pacotes.

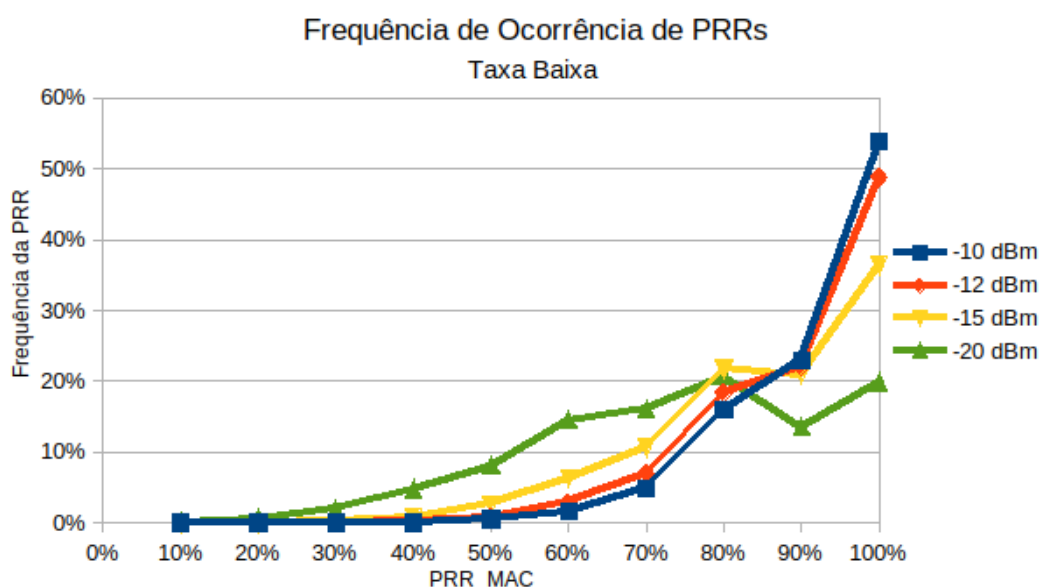


Figura 5.2: Frequência da entrega de pacotes para uma janela de 10 pacotes para taxa de dados Baixa.

Na Figura 5.2 os valores das PRR_MACs entre 70% e 80% têm frequência próxima com -20 dBm, a qual foi escolhida para economizar mais energia. Acima de 80%, os valores para -20 dBm têm uma queda mais acentuada em relação aos demais e os valores das PRR_MACs passam da frequência de 20%. Os valores das PRR_MAC mais baixos começam a convergir a partir de 70% e se agrupam próximos de 90%, representada pela potência de -12 dBm a qual será utilizada. Abaixo da PRR_MAC de 70% a potência de -10 dBm será utilizada por ser uma alternativa para melhorar a entrega de pacotes em detrimento das demais. Nesse caso, a potência de -10 dBm terá um consumo de energia maior, mas poderá garantir maior entrega de pacotes.

A Figura 5.3 mostra a frequência da PRR_MAC para a taxa Alta. Foi observado que abaixo de 50% a PRR_MAC tem valores de frequência próxima a 0%. Nesse caso a potência de -10 dBm será escolhida como tentativa de aumentar a taxa de entrega de pacotes. Entre 50% e 70% a potência de

-12 dBm será escolhida por estar próxima da potência máxima e ser uma alternativa para melhorar a entrega de pacotes e impactar menos na energia do que com -10 dBm.

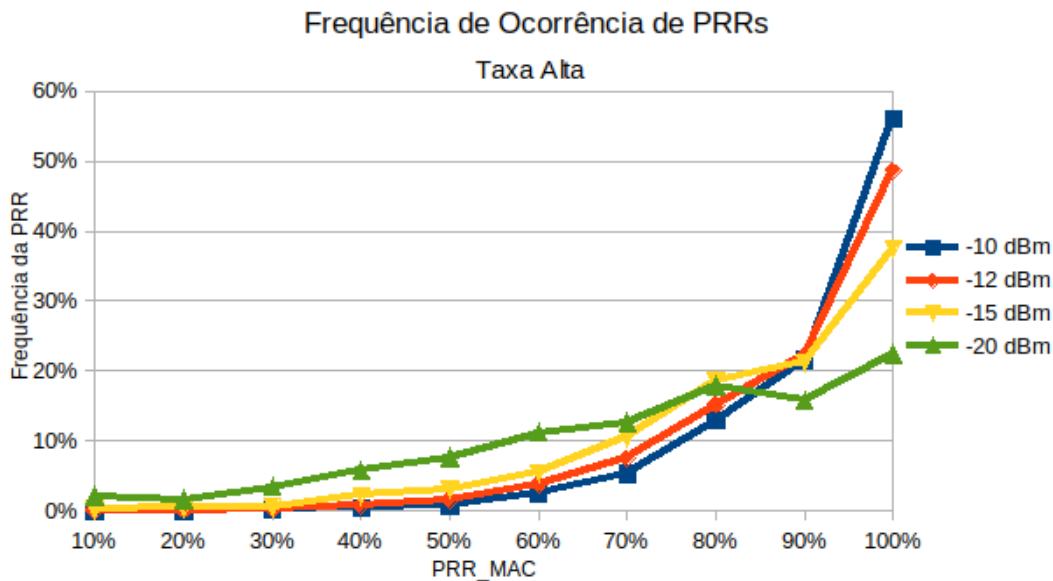


Figura 5.3: *Frequência da entrega de pacotes em uma janela para 10 pacotes para taxa de dados Alta.*

Na Figura 5.3 as frequências entre 70% e 90% têm proximidade de valor com as potências mais altas, e -15 dBm será escolhida por ter impacto semelhante às potências de -10 e -12 dBm. A partir de 90% será escolhida a potência de -12 dBm por estar mais próxima da frequência de PRR_MAC de -10 dBm. A potência de -20 dBm começa a aumentar a frequência de PRR_MAC a partir de 90%, em que sua queda foi menos acentuada que na taxa Baixa e fica uma pouco acima de 20%. Para esse cenário foi escolhida a potência de -20 dBm quando a PRR_MAC for 100% por considerar que a entrega de pacotes irá variar entre 90% e 100% independentemente da potência utilizada. A premissa é que com -20 dBm o consumo de energia será menor e a entrega de pacotes não será comprometida.

A Figura 5.4 mostra a relação da PRR_MAC com a taxa Muito Alta. Observa-se que a frequência de entrega de pacotes foi menor em relação às taxas Baixa e Alta, em que os valores máximos de frequência estão próximos de 40%. Nesse caso, a frequência de entrega de pacotes é baixa até 40% e após começa a aumentar. Nesse caso foi utilizada a potência mais alta, -10 dBm, para melhorar a entrega de pacotes em detrimento do consumo de energia, e a partir dos 40% até 80% foi definida a potência de -12 dBm que está próxima de -10 dBm e pode ter impacto menor no consumo de energia.

Na Figura 5.4 é mostrado que a potência de -15 dBm tem valores de frequência próximos de -10 e -12 dBm a partir da PRR_MAC de 80%. Nos valores próximos de 100% da PRR_MAC a potência de -15 dBm foi mantida por considerar diminuir o consumo de energia em relação as potências de -10 e -12 dBm. Com o canal mais saturado que as taxas Baixa e Alta, nesse caso optou-se por não utilizar

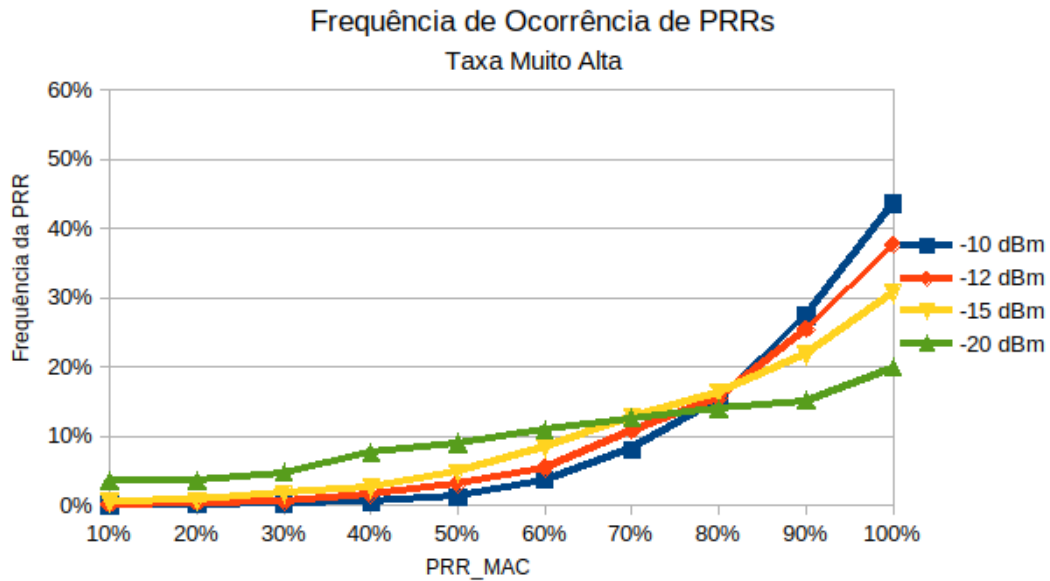


Figura 5.4: Frequência da entrega de pacotes em uma Janela para 10 pacotes em taxa de dados Muito Alta.

a potência mais baixa, -20 dBm, e manter uma potência mais elevada (-15 dBm).

A Tabela 5.2 sintetiza os valores apresentados pelos Gráficos 5.2, 5.3 e 5.4 as PRR_MACs e as potências de transmissão. Esses valores serão utilizados para implementar o fluxo F1 do CL4 com características reativas às entrega de pacotes.

Tabela 5.2: Valores para seleção de potência baseados na relação entre frequência e valores da PRR_MAC

Taxas	Potência de TX			
	-10 dBm	-12dBm	-15 dBm	-20 dBm
Baixa	PRR_MAC < 70	PRR_MAC >= 70 E < 80	PRR_MAC >= 90	PRR_MAC >= 80 E < 90
Alta	PRR_MAC < 50	PRR_MAC >= 50 E < 70	PRR_MAC >= 70 E < 90	PRR_MAC >= 90
Muito Alta	PRR_MAC < 40	PRR_MAC >= 40 e < 80	PRR_MAC >= 80	—

Na taxa Muito Alta a potência -20 dBm não foi utilizada porque foi observado que não tem valor nessa faixa que influencia no aumento da entrega de pacotes.

A seguir são mostrados os algoritmos que implementam a estratégia de alteração de potência de transmissão, para as taxas Baixa, Alta e Muito Alta, utilizando os dados da Tabela 5.2.

O **Algoritmo 3** implementa a estratégia para a taxa Baixa e tem como entrada a PRR_MAC_i enviada pelo fluxo F2, de um dado nó sensor i e $PacketRate_i$ que é a taxa de transmissão de dados do nó i . Como saída fornece o valor da potência de transmissão PT_i , que tem valor inicial de -10 dBm.

5.1.3 Proposta CL-Bin

A proposta CL-Bin é uma estimativa probabilística da potência de rádio a ser usada na transmissão do próximo pacote. A premissa é que se pode obter um comportamento próximo ao sucesso de PA

Algoritmo 3: Fluxo F1 em CL4 : Ajuste de potência de Tx.

```

1  Entrada:
2   $PRR\_MAC$  para o nó sensor  $i$ 
3   $PacketRate_i$  taxa de dados do nó  $i$ 
4   $Baixa, Alta, MuitoAlta$  taxas de dados
5  Saida:
6   $PT_i$  valor da potência
7   $PT_i = -10$ 
8  switch ( $PacketRate_i$ )
9  case: Baixa
10   if ( $PRR\_MAC_i < 70$ ) then
11      $PT_i = -10$ ;
12   if ( $PRR\_MAC_i \geq 70$ ) and ( $PRR\_MAC_i < 80$ ) then
13      $PT_i = -12$ ;
14   if ( $PRR\_MAC_i \geq 80$ ) and ( $PRR\_MAC_i < 90$ ) then
15      $PT_i = -20$ ;
16   if ( $PRR\_MAC_i \geq 90$ ) then
17      $PT_i = -15$ ;
18 case: Alta
19   if ( $PRR\_MAC_i < 50$ ) then
20      $PT_i = -10$ ;
21   if ( $PRR\_MAC_i \geq 50$ ) and ( $PRR\_MAC_i < 70$ ) then
22      $PT_i = -12$ ;
23   if ( $PRR\_MAC_i \geq 70$ ) and ( $PRR\_MAC_i < 90$ ) then
24      $PT_i = -15$ ;
25   if ( $PRR\_MAC_i \geq 90$ ) then
26      $PT_i = -12$ ;
27 case: MuitoAlta
28   if ( $PRR\_MAC_i < 40$ ) then
29      $PT_i = -10$ ;
30   if ( $PRR\_MAC_i \geq 40$ ) and ( $PRR\_MAC_i < 80$ ) then
31      $PT_i = -12$ ;
32   if ( $PRR\_MAC_i \geq 80$ ) then
33      $PT_i = -15$ ;

```

e com um consumo de energia mais próximo ao de PB. Como consequência se espera que o tempo de vida da rede seja aumentado.

Desse modo, o comportamento de CL-Bin é preditivo e dispensa o cálculo permanente da PRR_MAC . Para isso, foram simuladas as abordagens PA e PB para estudar seus comportamentos baseados nos valores da PRR_MAC .

Ao simular PA e PB foi calculada a média da frequência de ocorrência dos valores de PRR_MAC com uma janela de 5 pacotes. O resultado pode ser observado na Figura 5.5.

Observa-se na Figura 5.5 que enquanto os resultados da simulação de PB tende a uma distribuição mais uniforme, em PA há uma predominância de valores maiores mais à direita do gráfico.

A frequência da PRR_MAC para PB ficou entre 12% e 25%, e para PA ela cresce exponen-

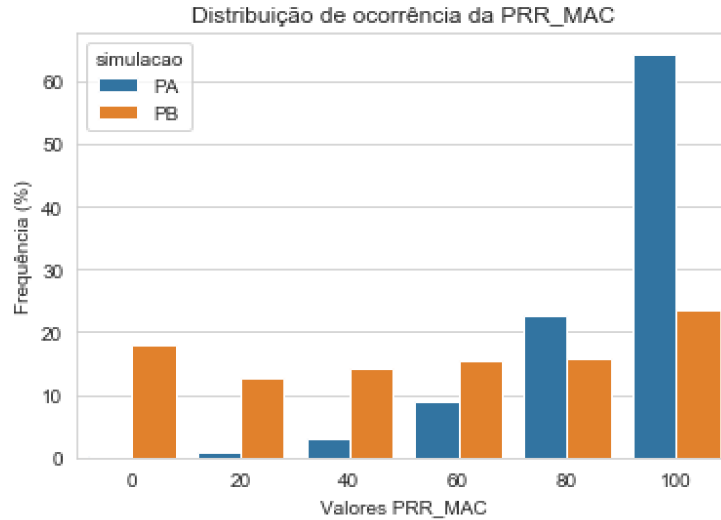


Figura 5.5: Frequência dos valores da PRR_MAC nas simulações PA e PB (Janela=5).

cialmente se concentrando no intervalo entre 80% e 100%. A partir dessa observação foi proposto utilizar o comportamento de uma distribuição estatística que pudesse representar a proximidade dessas ocorrências. Deve-se considerar que os valores da PRR_MAC são resultados da entrega de pacotes ao *sink* e, conforme CL2 e CL4 a potência de transmissão também tem relação com o sucesso dessa entrega.

Uma distribuição binomial é a distribuição da probabilidade discreta do número de k sucessos em uma sequência de n experimentos independentes de resposta binária ² com probabilidade de sucesso individual p .

Uma variável aleatória discreta X segue uma distribuição binomial que tem uma função de distribuição de densidade de probabilidade definida pela equação:

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (5.2)$$

onde X é uma variável aleatória discreta, $k = 1, 2, \dots, n$ representa a quantidade de sucessos, n é a número de tentativas, p é a probabilidade de sucesso e $(1 - p)$ é a probabilidade de fracasso. Em CL-Bin foram escolhidos cinco níveis de potência de transmissão, $(-25, -20, -15, -12, -10)$ dBm. Desse modo a definição do nível de potência a ser usado na transmissão do próximo pacote será dado por $P(X = k) = \binom{5}{k} p^k (1 - p)^{5-k}$, para $k = 1, 2, 3, 4, 5$.

Para implementar essa proposta foi usado um vetor relacionando $X = -25, -20, -15, -12, -10$ dBm com a variável aleatória k , como mostrado na Tabela 5.3.

O uso da CL-Bin possibilita que a escolha da potência de transmissão de um pacote seja feita de

²Uma experiência aleatória com apenas duas possibilidades, sucesso ou fracasso é em teoria das probabilidades e estatística denominada de tentativa de Bernoulli.

Índice	1	2	3	4	5
Potência (dBm)	-25	-20	-15	-12	-10

Tabela 5.3: Vetor utilizado para selecionar a potência de transmissão de pacotes.

forma preditiva e independente do cálculo de PRR_MAC. Dessa forma pretende-se obter o sucesso ao próximo ao de PA mas com menor consumo de energia, ou seja, usando menores potências do rádio. Com isso, todas as potências do rádio poderão ser escolhidas (Tabela 5.3), portanto não será sempre utilizada a potência máxima de -10 dBm (PA).

Na equação 5.2 o valor de p indica se a maior parte das incidências dos resultados serão mais a direita ($p = 0,9$) ou mais a esquerda ($p = 0,1$) do gráfico das frequências de ocorrência. Quando o valor de p se aproxima de 0,9 as potências altas tem maior probabilidade de escolha. Isso ocorre porque os índices da Tabela 5.3 são relacionados aos resultados da binomial. Ou seja, os valores de p próximos a 0,1 farão com que a probabilidade da escolha do índice 1 da Tabela 5.3 seja maior em relação aos demais índices. Como o índice 1 equivale a -25 dBm, essa seria a potência escolhida. Para $p = 0,9$ haverá maior probabilidade da escolha do índice 5, que equivale a potência -10 dBm.

A Figura 5.6 mostra o comportamento das simulações realizadas em cenários com e sem colisão com taxa Baixa, utilizando a equação 5.2 com os valores de p variando de 0,1 a 0,9.

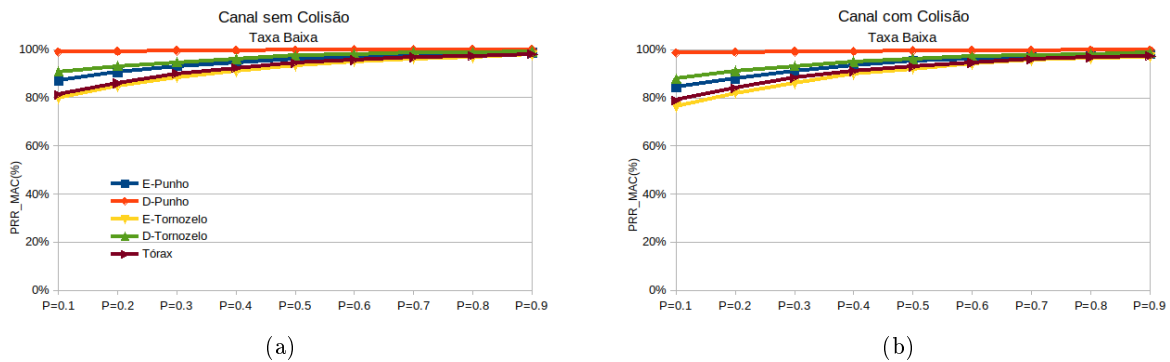


Figura 5.6: Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Baixa com e sem colisão.

A Figura 5.7 mostra o comportamento das simulações realizadas em cenários com e sem colisão com taxa Alta, também utilizando a equação 5.2 e com os valores de p entre 0,1 a 0,9.

A Figura 5.8 mostra o comportamento das simulações realizadas em cenários com e sem colisão com taxa Muito Alta, utilizando a equação 5.2 em que os valores p variam de 0,1 a 0,9.

Foi considerado que a partir de $p = 0,7$ os valores da PRR_MAC convergem ou se tornam mais constantes em todos os cenários, ou seja, nas Figuras 5.6(a), 5.6(b), 5.7(a), 5.7(b), 5.8(a) e 5.8(b)). Ao considerar $p = 0,7$ as potências com maior probabilidade de escolha seriam -10 dBm e -12 dBm, de acordo com os índices da Tabela 5.3.

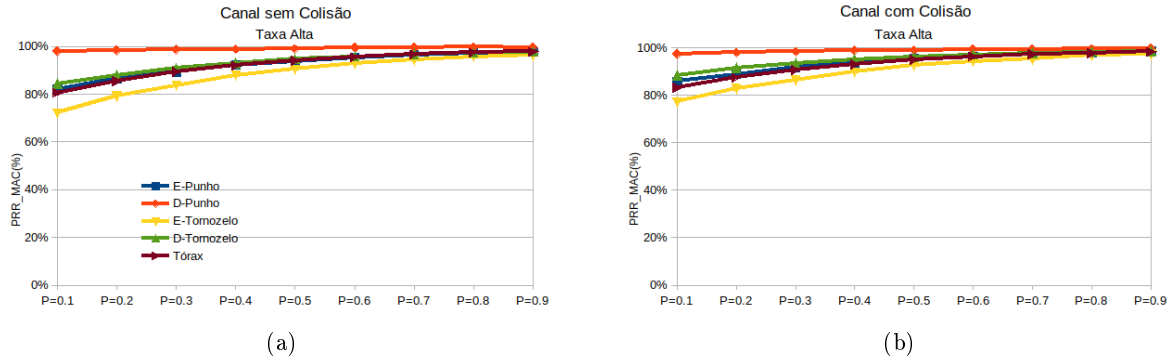


Figura 5.7: Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Alta com e sem colisão.

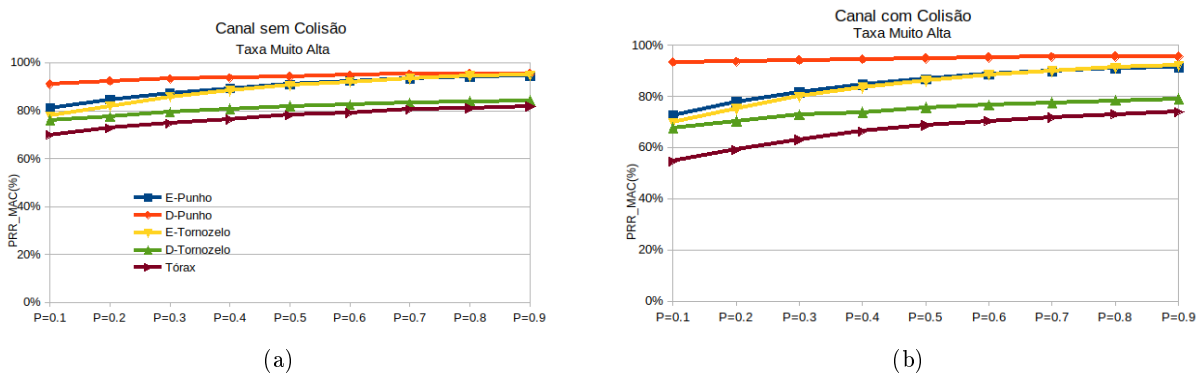


Figura 5.8: Variação da taxa PRR_MAC para CL-Bin em função de p para a Taxa Muito alta com e sem colisão.

O Algoritmo 4 implementa a proposta CL-Bin. O *VetorPotencia* contém os valores da Tabela 5.3 e o valor de *indice* é o resultado da execução da equação 5.2. Portanto, ao determinar o valor de *indice* será associada uma potência de transmissão do rádio. A variável *indice* é um número inteiro, que corresponde a x na equação 5.2, com valores entre 1 e 5 (k). Ou seja, a probabilidade de selecionar determinado valor de potência é associado a ocorrência de k sucessos em $n = 5$ tentativas.

Algoritmo 4: Fluxo F1 em CL-Bin.

- 1 Usa:
 - 2 *VetorPotencia* (Tabela 5.3)
 - 3 Constante:
 - 4 $p = 0,7$
 - 5 $k = 5$
 - 6 Saida:
 - 7 PT_i
 - 8 $indice = CalculaDistribuicaoBinomial(k, p)$
 - 9 $PT_i = VetorPotencia[indice]$
-

CL-Bin tem o comportamento preditivo com as premissas de que usando potências altas, mas não fixas e com o valor máximo do rádio, a taxa de entrega de pacotes consiga ser superior a de PB e próxima a de PA, e consumindo menos energia, o que fará com que o seu tempo vida seja maior.

Para que o uso de CL-Bin seja o mais abrangente foi realizada simulações para comparar a distribuição binomial com uma distribuição uniforme. O objetivo é mostrar a sua viabilidade em relação aos valores da taxa de pacotes e da eficiência energética que serão mostrados na próxima seção.

5.1.4 Comparação Entre CL-Bin e uma Distribuição Uniforme

A variável aleatória discreta Y , assumindo os valores y_1, \dots, y_k , tem distribuição uniforme quando atribui a mesma probabilidade ($\frac{1}{k}$) para todos y_i , a sua função de probabilidade é dada pela equação 5.3:

$$P(Y = y_i) = p(y_i) = p = \frac{1}{k} \quad (5.3)$$

onde $i = 1, 2, \dots, k$.

Afim de embasar os resultados de CL-Bin foi realizada simulações com cenários nas taxas Baixa, Alta e Muito Alta utilizando uma distribuição uniforme, onde as potências do rádio foram alterados usando uma distribuição uniforme (equação 5.3). Foram comparados os resultados das PRR_MAC e a eficiência energética.

A Tabela 5.4 compara valores da PRR_MAC entre CL-Bin e a distribuição uniforme no cenário com taxa Baixa sem interferência. A região hachurada destaca os valores da distribuição uniforme superiores ou iguais de CL-Bin . Os valores da PRR_MAC do nó punho direito têm resultados melhores devido a pouco perda na potência de transmissão. Deve-se observar que a uniforme tem comportamento próximo à distribuição binomial quando a mesma tem $p = 0,5$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,95	1,00	0,91	0,96	0,93
p = 0,1	0,87	0,99	0,80	0,91	0,81
p = 0,2	0,91	0,99	0,85	0,93	0,86
p = 0,3	0,93	0,99	0,88	0,95	0,90
p = 0,4	0,94	1,00	0,91	0,96	0,92
p = 0,5	0,96	1,00	0,93	0,97	0,94
p = 0,6	0,97	1,00	0,95	0,98	0,96
p = 0,7	0,98	1,00	0,96	0,99	0,97
p = 0,8	0,98	1,00	0,97	0,99	0,97
p = 0,9	0,99	1,00	0,98	0,99	0,98

Tabela 5.4: PRR_MAC para Cenário Taxa Baixa sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.5 mostra o cenário sem interferência com taxa Alta comparando o CL-Bin com a distribuição uniforme. Observa-se que com o aumento da taxa de dados os valores da PRR_MAC do

nó punho direito são superados quando P está em 0,8 ou 0,9. Como descrito anteriormente, esse nó tem a menor atenuação entre os demais nós. Conforme a taxa de dados aumenta as perdas de pacotes são maiores e seus valores da PRR_MAC se aproximam dos outros nós.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,94	0,99	0,90	0,95	0,93
$p = 0,1$	0,86	0,97	0,77	0,88	0,83
$p = 0,2$	0,89	0,98	0,83	0,91	0,87
$p = 0,3$	0,92	0,98	0,86	0,93	0,91
$p = 0,4$	0,94	0,99	0,90	0,95	0,93
$p = 0,5$	0,95	0,99	0,92	0,96	0,95
$p = 0,6$	0,96	0,99	0,94	0,97	0,96
$p = 0,7$	0,97	0,99	0,95	0,98	0,97
$p = 0,8$	0,98	1,00	0,97	0,98	0,98
$p = 0,9$	0,98	1,00	0,97	0,99	0,98

Tabela 5.5: PRR_MAC para Cenário Taxa Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.6 mostra o cenário sem interferência com a taxa Muito Alta na comparação da PRR_MAC entre CL-Bin e a distribuição uniforme. Os valores da PRR_MAC da uniforme não ultrapassam o $p = 0,5$ de CL-Bin. O aumento da taxa de dados indica o uso de maior potência de transmissão, o que é representado pelos maiores valores de p .

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,90	0,94	0,89	0,81	0,77
$p = 0,1$	0,81	0,91	0,78	0,76	0,70
$p = 0,2$	0,85	0,92	0,82	0,77	0,73
$p = 0,3$	0,87	0,93	0,86	0,79	0,75
$p = 0,4$	0,89	0,94	0,88	0,81	0,76
$p = 0,5$	0,91	0,94	0,91	0,82	0,78
$p = 0,6$	0,92	0,95	0,92	0,82	0,79
$p = 0,7$	0,93	0,95	0,93	0,83	0,80
$p = 0,8$	0,94	0,95	0,95	0,84	0,81
$p = 0,9$	0,95	0,95	0,95	0,84	0,82

Tabela 5.6: PRR_MAC para cenário Taxa Muito Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.7 mostra a comparação entre CL-Bin e a distribuição uniforme no cenário com taxa Baixa com interferência. Com o uso da interferência os valores da uniforme foram inferiores a todos os PRR_MAC de $p = 0,5$. Assim como o uso de taxas de dados mais altas, o acréscimo de interferência nos cenários implica no uso de maior potência de rádio para melhorar os valores da PRR_MAC. Nesse cenário, o nó punho direito reage melhor às interferências do meio, pois os valores de p no intervalo entre 0,5 e 0,9 de CL-Bin são superiores aos da distribuição uniforme.

A Tabela 5.8 mostra os resultados da PRR_MAC na comparação entre CL-Bin e a distribuição uniforme no cenário com colisão para a taxa Alta. Novamente, o aumento da taxa de dados atenua

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,94	0,99	0,90	0,95	0,91
$p = 0,1$	0,85	0,99	0,76	0,88	0,79
$p = 0,2$	0,88	0,99	0,82	0,91	0,84
$p = 0,3$	0,91	0,99	0,86	0,93	0,88
$p = 0,4$	0,94	0,99	0,90	0,95	0,91
$p = 0,5$	0,95	1,00	0,92	0,96	0,93
$p = 0,6$	0,96	1,00	0,94	0,97	0,95
$p = 0,7$	0,97	1,00	0,96	0,98	0,96
$p = 0,8$	0,98	1,00	0,97	0,98	0,97
$p = 0,9$	0,98	1,00	0,97	0,99	0,97

Tabela 5.7: *PRR_{MAC} para cenário Taxa Baixa com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.*

as taxas de entrega. Com exceção do nó Punho Direito onde os valores da distribuição uniforme superam CL-Bin até $p = 0,7$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,93	0,99	0,89	0,93	0,92
$p = 0,1$	0,82	0,98	0,72	0,84	0,81
$p = 0,2$	0,87	0,98	0,79	0,88	0,86
$p = 0,3$	0,89	0,99	0,84	0,91	0,89
$p = 0,4$	0,92	0,99	0,88	0,93	0,92
$p = 0,5$	0,94	0,99	0,90	0,95	0,94
$p = 0,6$	0,95	0,99	0,93	0,96	0,95
$p = 0,7$	0,97	0,99	0,94	0,97	0,97
$p = 0,8$	0,97	1,00	0,96	0,97	0,97
$p = 0,9$	0,98	1,00	0,96	0,98	0,98

Tabela 5.8: *Cenário Taxa Alta com colisão entre CL-Bin e uma distribuição uniforme em relação a PRR_{MAC}.*

A Tabela 5.9 mostra o cenário com interferência na comparação entre CL-Bin e a distribuição uniforme para a taxa Muito Alta. Os valores da distribuição uniforme ficam próximos de $p = 0,4$ e, mesmo a atenuação menor no nó Punho Direito, ainda assim não superou assim $p = 0,4$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	0,85	0,94	0,84	0,74	0,68
$p = 0,1$	0,73	0,93	0,70	0,68	0,55
$p = 0,2$	0,78	0,94	0,75	0,70	0,59
$p = 0,3$	0,82	0,94	0,80	0,73	0,63
$p = 0,4$	0,85	0,95	0,83	0,74	0,66
$p = 0,5$	0,87	0,95	0,86	0,76	0,69
$p = 0,6$	0,89	0,95	0,88	0,77	0,70
$p = 0,7$	0,90	0,95	0,90	0,77	0,72
$p = 0,8$	0,91	0,96	0,91	0,81	0,73
$p = 0,9$	0,91	0,96	0,92	0,82	0,74

Tabela 5.9: *PRR_{MAC} para Cenário Taxa Muito Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.*

A Tabela 5.10 mostra os valores de eficiência energética entre CL-Bin e a distribuição uniforme

para a taxa Baixa. A eficiência energética representa o consumo instantâneo de energia, medido em nJ por bit enviado, em que o maior valor indica maior tempo de vida da rede. Os valores da distribuição uniforme ficaram próximos mas superaram CL-Bin entre $p = 0,5$ e $p = 0,8$, com exceção do nó punho direito. Ou seja, a distribuição uniforme obteve valores melhores no intervalo de $p = 0,5$ a $p = 0,9$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	514,35	496,58	529,66	508,72	261,63
$p = 0,1$	560,80	500,11	606,20	540,06	298,22
$p = 0,2$	539,20	498,58	572,28	526,71	282,04
$p = 0,3$	524,49	497,33	546,73	517,76	269,22
$p = 0,4$	517,09	496,43	532,31	509,61	262,30
$p = 0,5$	508,08	495,90	519,34	502,84	257,17
$p = 0,6$	503,79	495,59	510,32	500,34	253,26
$p = 0,7$	499,41	495,41	503,13	497,09	250,41
$p = 0,8$	496,05	495,19	499,82	495,93	248,80
$p = 0,9$	495,18	495,06	495,33	494,37	247,26

Tabela 5.10: Eficiência energética para cenário Taxa Baixa sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.11 mostra os dados do cenário sem colisão com a comparação entre CL-Bin e uniforme para a taxa Alta. Novamente os valores de eficiência energética da distribuição uniforme foram superiores aos dos intervalo $p = 0,5$ a $p = 0,9$. O comportamento da distribuição uniforme está próximo aos valores intermediários da distribuição binomial, ou seja, $p = 0,4$ ou $p = 0,5$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	207,56	501,18	213,63	515,83	68,87
$p = 0,1$	227,03	508,04	249,43	554,98	77,00
$p = 0,2$	219,14	505,17	232,56	536,08	73,38
$p = 0,3$	212,21	503,18	223,28	524,82	70,72
$p = 0,4$	208,26	500,39	215,15	516,16	69,05
$p = 0,5$	204,49	499,41	208,92	510,26	67,63
$p = 0,6$	201,77	498,73	204,74	505,28	66,76
$p = 0,7$	200,44	497,44	202,75	502,14	66,17
$p = 0,8$	199,28	497,21	199,79	499,11	65,84
$p = 0,9$	198,31	496,69	198,60	497,55	65,54

Tabela 5.11: Eficiência energética para cenário Taxa Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.12 mostra os dados do cenário sem colisão com Taxa Muito Alta. Novamente o mesmo comportamento dos cenários anteriores. Interessante notar que independentemente da taxa o consumo energético ficou equivalente para a distribuição uniforme e a binomial com $p = 0,4$ ou $p = 0,5$.

As Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 mostram a comparação entre CL-Bin e a distribuição uniforme nos

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	108,41	104,92	72,29	48,20	50,10
$p = 0,1$	119,79	107,92	82,22	50,98	54,70
$p = 0,2$	114,77	106,49	78,13	50,09	54,70
$p = 0,3$	111,15	105,61	74,44	48,88	51,42
$p = 0,4$	108,84	105,12	72,43	48,13	50,23
$p = 0,5$	106,92	104,50	70,83	47,50	49,15
$p = 0,6$	105,16	103,84	69,59	47,11	48,60
$p = 0,7$	104,21	103,54	68,60	46,72	47,92
$p = 0,8$	103,23	103,27	67,82	46,39	47,51
$p = 0,9$	102,96	103,36	67,55	46,31	47,12

Tabela 5.12: Eficiência energética para cenário Taxa Muito Alta sem colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

cenários com colisão e as taxas Baixa, Alta e Muito Alta, respectivamente. Em todas as tabelas é possível observar que o comportamento da uniforme está próximo de $p = 0,5$, ou seja, a uniforme supera os valores da CL-Bin entre $p = 0,5$ e $p = 0,9$.

A Tabela 5.13 mostra os valores de eficiência energética para o cenário de taxa Baixa com colisão e compara os valores de CL-Bin e uniforme. A distribuição uniforme supera os valores de CL-Bin entre $p = 0,5$ e $p = 0,9$.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	517,97	497,75	537,13	515,25	265,40
$p = 0,1$	577,27	501,26	632,59	558,32	307,24
$p = 0,2$	554,07	501,26	589,07	537,65	288,20
$p = 0,3$	536,71	498,56	562,19	526,65	274,61
$p = 0,4$	521,90	498,15	538,27	516,23	265,64
$p = 0,5$	511,98	496,97	525,55	510,43	260,46
$p = 0,6$	508,67	496,45	513,81	504,19	256,33
$p = 0,7$	502,57	496,29	504,99	502,34	252,48
$p = 0,8$	498,73	495,62	501,15	498,63	250,20
$p = 0,9$	496,77	495,60	499,04	497,32	249,13

Tabela 5.13: Eficiência energética para cenário Taxa Baixa com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

A Tabela 5.14 mostra os valores de eficiência energética para o cenário com colisão e compara os valores de CL-Bin e a distribuição uniforme para a taxa Alta. Como descrito, os valores são superiores no intervalo de $p = 0,5$ e $p = 0,9$, e nesse cenário ficou acima do nó punho direito com $p = 0,4$ também.

A Tabela 5.15 mostra o cenário com colisão para a taxa Muito Alta. Os valores da distribuição uniforme são superiores ao CL-Bin no intervalo de $p = 0,5$ a $p = 0,9$ e no nó punho direito com $p = 0,4$.

Os valores das tabelas descritas nessa seção mostram que a distribuição binomial, nos cenários

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	210,63	500,46	217,52	527,14	69,47
$p = 0,1$	237,10	504,65	267,52	581,57	79,61
$p = 0,2$	225,25	503,65	243,44	557,43	75,92
$p = 0,3$	218,22	501,14	230,33	539,47	71,76
$p = 0,4$	211,75	499,90	219,55	527,33	69,83
$p = 0,5$	208,03	499,19	213,33	517,75	68,39
$p = 0,6$	204,36	497,49	207,98	511,90	67,34
$p = 0,7$	201,97	497,43	204,67	506,15	66,57
$p = 0,8$	200,70	496,40	202,03	502,97	66,05
$p = 0,9$	199,46	497,07	200,77	501,55	65,72

Tabela 5.14: Eficiência energética para cenário Taxa Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

Simulação	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Tórax
Uniforme	114,44	104,57	75,98	52,38	57,04
$p = 0,1$	133,57	105,35	91,73	57,38	70,40
$p = 0,2$	125,02	105,20	84,93	55,11	64,79
$p = 0,3$	119,13	104,61	79,91	53,31	60,98
$p = 0,4$	114,80	104,16	76,57	52,75	57,92
$p = 0,5$	112,02	103,82	74,30	51,44	56,03
$p = 0,6$	109,83	103,59	72,34	50,83	54,68
$p = 0,7$	108,14	103,29	71,26	50,24	53,66
$p = 0,8$	107,05	103,22	70,20	49,75	52,86
$p = 0,9$	106,61	103,21	69,82	49,42	52,31

Tabela 5.15: Eficiência energética para cenário Taxa Muito Alta com colisão entre CL-Bin e a distribuição uniforme.

utilizados com a WBAN, tiveram comportamento diferentes em relação aos valores da distribuição uniforme. Ou seja, CL-Bin com $p = 0,7$ foi superior em todos os cenários de entrega de pacotes do que a distribuição uniforme. Com relação a eficiência energética, a distribuição uniforme foi sempre superior para os valores de p no intervalo entre 0,5 e 0,9. O valores resultantes da distribuição uniforme são próximos de $p = 0,5$ CL-Bin ao utilizar o $p = 0,7$ terá probabilidades de entrega maior de pacotes e a eficiência energética menor, porém próxima, em relação a uma distribuição uniforme.

5.2 Considerações

Nesse capítulo foram descritas as três propostas para a abordagem *cross-layer* (CL2 , CL4 e CL-Bin), onde os fluxos F1 e F2 foram utilizados para compartilhar informações entre as camadas. CL2 utilizou uma estratégia de troca entre os valores de potência (-10 e -20 dBm) de transmissão baseada na taxa PRR_MAC e uma única retransmissão de pacotes com prioridade. CL4 utilizou quatro valores (-10, -12, -15 e -20 dBm) para alterar a potência de transmissão do rádio, assim como a prioridade dos pacotes com até três retransmissões. CL-Bin uma distribuição de probabilidade

binomial, em que os valores de PRR_MAC foram utilizados para obter um comportamento próximo da WBAN com potência mais alta (-10 dBm), a qual, intuitivamente, tem maior entrega de pacotes mas com consumo de energia maior.

As três implementações utilizaram os fluxos descritos por CL para adaptar a rede aos diferentes estados do meio de comunicação, seja com e sem colisão, e com as taxas de dados definidas como Baixa, Alta e Muito Alta. Com isso, CL propõe uma solução para uma WBAN que tenha características de adaptabilidade ao meio de comunicação sem inviabilizar a taxa de entrega de pacotes e o consumo de energia.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados de três experimentos para análise das propostas CL2 , CL4 e CL-Bin . Cada experimento consiste na comparação de cada abordagem *cross-layer* para a pilha de protocolos com o padrão convencional da implementação da pilha de protocolos IEEE 802.15.4 com *Potência Alta* e *Potência Baixa* com dois tipos de canal, com e sem colisão. São usados os parâmetros da Tabela 4.4 e a rede definida na seção 4.3.

6.1 Descrição dos Cenários e Comparações

As três propostas *cross-layer* serão comparadas com implementações do protocolo padrão com potências de transmissão fixas na maior potência disponível – *Potência Alta* (PA), que apresenta a premissa da melhor taxa de entrega de pacotes mas com consumo maior de bateria, e uma implementação com potência de transmissão fixa na menor potência disponível – *Potência Baixa* (PB), que apresenta a premissa do menor consumo de energia, conseqüentemente maior tempo de vida da rede, e provavelmente uma menor taxa de entrega de pacotes. Essas comparações serão realizadas através de experimentos organizados como mostra a Equação 6.1.

$$Experimento = (Potência\ de\ Tx) \times (Ambiente) \times (Taxas) \quad (6.1)$$

Onde *Potência de Tx* é a versão da proposta usada (PA, PB e uma das propostas *cross-layer*, CL2 , CL4 ou CL-Bin ; *Ambiente* é o tipo de canal de comunicação sem e com colisão e *Taxas* são três diferentes cenários de aplicação com diferentes taxas de geração de pacotes do nós sensores da WBAN, definidas na seção 4.3 e Tabela 4.4, denominadas de Taxa Baixa, Taxa Alta e Taxa Muito Alta.

Os modelos de colisões utilizados são definidas pelo Castalia onde as transmissões dos outros nós sensores são consideradas como interferência, como descrito na seção 4.1.2.

Dessa forma serão executados trinta diferentes experimentos onde as combinações estão descritas na Equação 6.2.

$$Experimento = \begin{pmatrix} PA \\ PB \\ CL2 \\ CL4 \\ CL - Bin \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Sem Colisão \\ Com Colisão \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Taxa Baixa \\ Taxa Alta \\ Taxa Muito Alta \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Para cada proposta serão feitas três tipos de análises: tráfego de pacotes, perdas de pacotes e consumo. Para cada conjunto de dados gerado pela aplicação de sensoriamento corporal, será gerado um pacote APP. Esse pacote será enviado para a camada MAC, que por sua vez enviará para a camada PHY, ou seja, cada pacote APP gera apenas um pacote MAC.

Para avaliar o tráfego de pacotes na rede será definida uma taxa que mede a eficiência de entrega entre nó sensor e *sink*. Neste trabalho essa taxa é denominada de PRR (*Packet Received Rate*), que é a razão entre o número de ACKs recebidos do nó *sink* e o número de pacotes enviados pelo nó sensor (definida na equação 6.3).

$$PRR = \frac{Número\ de\ Pacotes\ Recebidos}{Número\ de\ Pacotes\ Enviados} \quad (6.3)$$

Para a camada APP, foi definida a PRR_APP como a a PRR entre as camadas APPs dos nós sensores e o *sink*. Foi definida também a A PRR_MAC que é a razão entre o número de pacotes enviados pela camada MAC. A PRR_APP é calculada pelo Castalia ao final da simulação, e a PRR_MAC é calculada em tempo de simulação. O valor da PRR_MAC pode ser diferente da PRR_APP uma vez que um pacote MAC pode ser retransmitido até 3 vezes devido ao número não recebido de ACKs.

6.2 Experimentos com CL2

6.2.1 Tráfego de Pacotes das Camadas de Aplicação e MAC

A Figura 6.1 apresenta a PRR_APP para CL2 para a Taxa Baixa. A Figura 6.1(a) mostra os valores para o ambiente sem colisão, e CL2 tem a mesma taxa de entrega de pacotes de PA do

nó punho direito mas é superado em 2,1%, 2,8%, 1,6% e 2,7% nos nós punho esquerdo, tornozelo esquerdo, tornozelo direito e tórax. CL2 supera todas as taxas de entrega dos nós de PB em 14,3%, 1,5%, 23,2%, 10,5% e 19,5%, respectivamente.

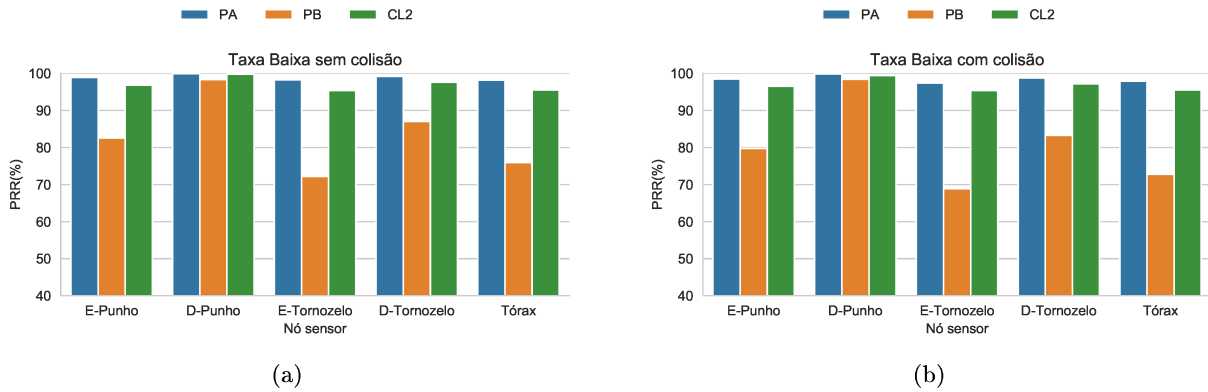


Figura 6.1: Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Baixa.

A Figura 6.1(b) mostra a PRR_APP com colisão. O comportamento de CL2 em relação a PA e PB são próximos ao ambiente sem colisão. CL2 é superado por PA em todos os nós sensores em 2%, 0,5%, 2%, 1,5% e 2,4%, respectivamente, e supera PB em todos os nós em 16,8%, 1%, 26,5%, 14% e 22,7%, respectivamente.

A Figura 6.2 mostra os resultados com PRR_APP para Taxa Alta e os valores são ligeiramente inferiores aos da Taxa Baixa. Na Figura 6.2(a) são mostrados a PRR_APP sem colisão. CL2 equivale a PA no nó punho direito e é superado nos demais em 2,4%, 2,9%, 1,7% e 2,9%. CL2 supera PB em todos os nós em 14,8%, 2,9%, 22,7%, 12% e 17%.

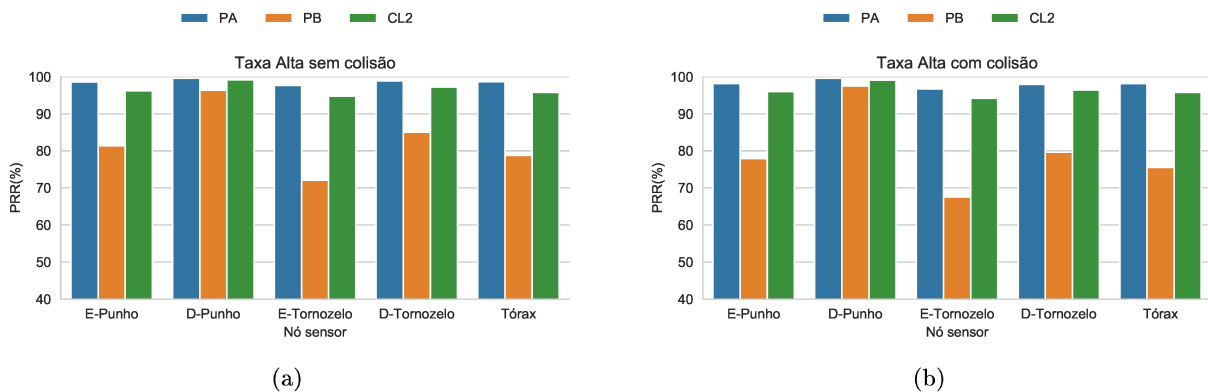


Figura 6.2: Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Alta.

A Figura 6.2(b) mostra os resultados da comparação para a PRR_APP de Taxa Alta com colisão. CL2 tem o mesmo valor do nó do punho direito de PA e é superado nos demais em 2%, 2,5%, 1,5% e 2,3%. CL2 supera todos os nós de PB em 18%, 1,7%, 26,7%, 16,8% e 20,3%. Os

valores de entrega de pacotes com Taxas Baixa e Alta não apresentaram variações impactantes na comparação de $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ com PA e PB. Isso se deve a proximidade da Taxa Baixa e Alta com o limite teórico do canal, em que mesmo com colisão $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ não se mostrou melhor que PA.

A Figura 6.3 mostra os resultados das simulações para a Taxa Muito Alta. A Figura 6.3(a) mostra os dados sem colisão e $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem equivalência aos nós punho esquerdo e direito em relação a PA, mas é superado nos demais em 1,5%, 4,7% e 4,7%. $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ supera PB em todos os nós em 14,7%, 5%, 24%, 6,4% e 22,8%, respectivamente.

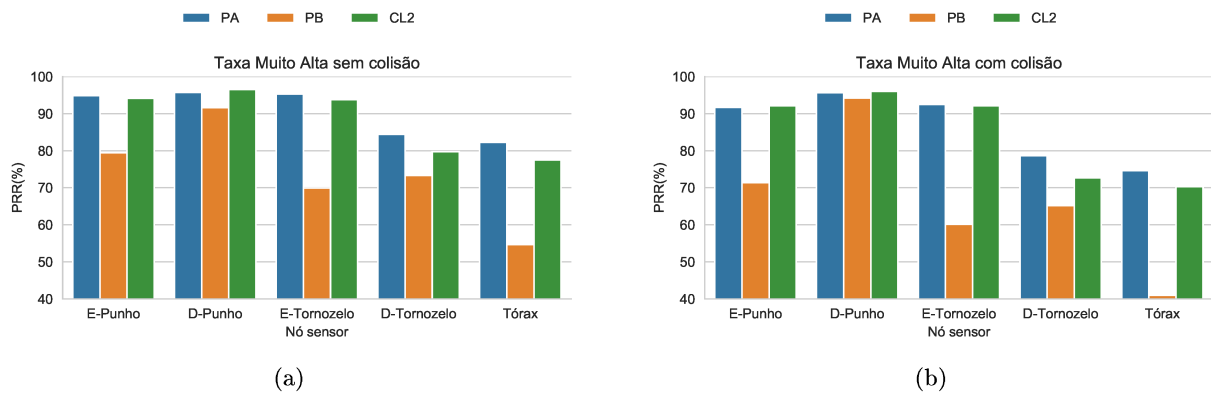


Figura 6.3: Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.3(b) mostra os resultados com colisão e $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem equivalência com PA nos nós punho esquerdo, punho direito e tornozelo esquerdo, mas é superado nos nós tornozelo direito e tórax em 6% e 4,3%. $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ supera PB em todos os nós em 20,8%, 1,8%, 32%, 7,5% e 30%, respectivamente. O nó tórax de PB obteve um valor muito baixo devido a atenuação entre seu enlace com o *sink*.

Nas figuras a seguir serão mostradas a taxa de entrega de pacotes entre camadas MAC.

A Figura 6.4(a) mostra a PRR_MAC para a Taxa Baixa. $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem desempenho inferior a PA em todos os nós sensores, com perdas de 8%, 2%, 10%, 6,5% e 9,7%, respectivamente. Em relação a PB $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem valores maiores em todos os nós sensores, com ganhos respectivos de 24%, 6,8%, 31%, 20,4% e 29%. Esse cenário indica que PA enviou mais pacotes entre camadas MAC do que $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ e PB para entregar os dados ao *sink*.

Na Figura 6.4(b) são mostradas a PRR_MAC com colisão, e $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem valores inferiores a PA em todos os nós sensores, com valores de 5%, 3,8%, 8%, 6,7% e 9,2%. $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem valores superiores a PB em todos os nós sensores (28,4%, 2%, 33,7%, 23,6% e 32%, respectivamente).

A Figura 6.5 mostra para a PRR_MAC de Taxa Alta. Na Figura 6.5(a) para o cenário sem colisão, $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem taxas inferiores a PA em todos os nós sensores (8,3%, 3,1%, 10,5%, 7,6% e 9,4%, respectivamente). $\mathbb{C}\mathbb{L}2$ tem valores superiores a PB em todos os nós sensores, com 24,2%, 7,4%, 31,1%, 21,2% e 27,7%, respectivamente.

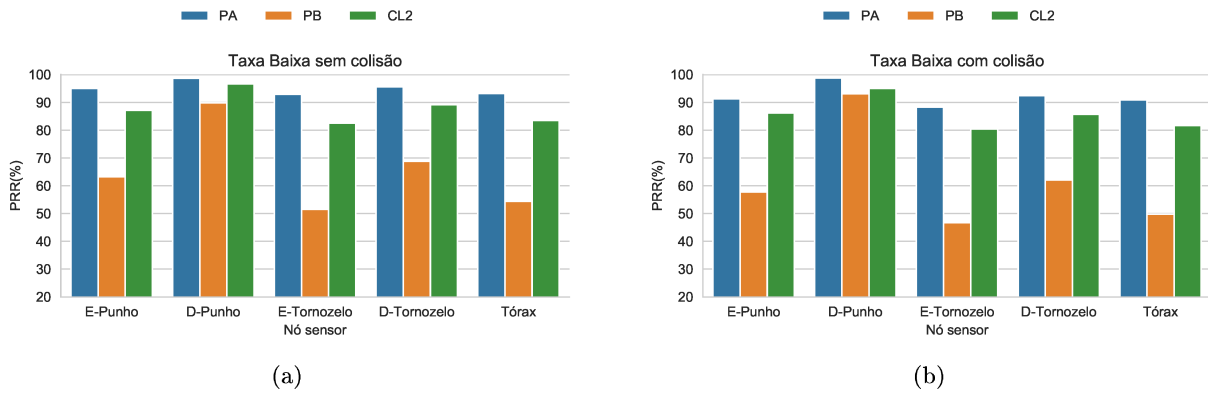


Figura 6.4: Entrega de pacotes entre camadas MAC para Taxa Baixa.

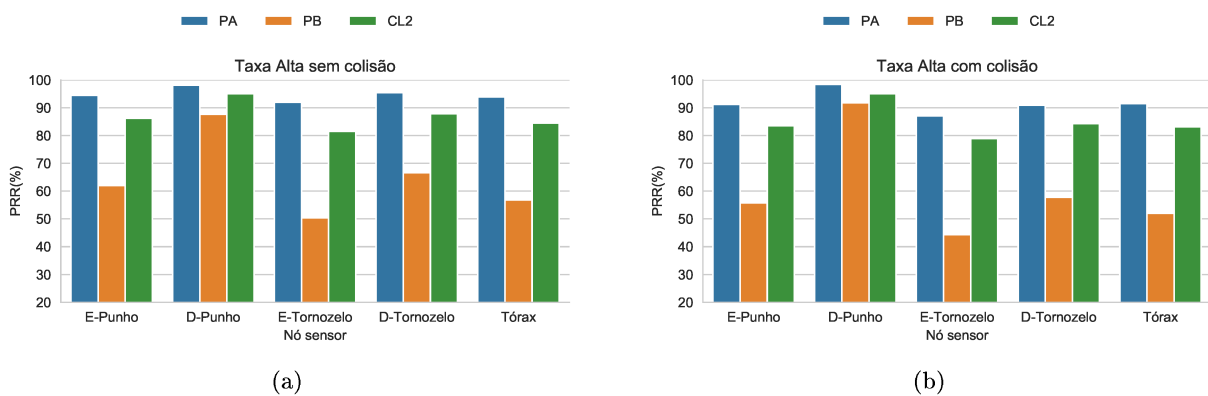


Figura 6.5: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.

A Figura 6.5(b) mostra a comparação com colisão e CL2 tem valores inferiores a PA em 7,7%, 3,4%, 8,2%, 6,6% e 8,4%, respectivamente. CL2 tem valores superiores a PB respectivamente de 27,7%, 3,2%, 34,6%, 26,5% e 31,1%.

Na Figura 6.6 são mostrados as taxas PRR_MAC para a Taxa Muito Alta. A Figura 6.6(a) mostra valores sem colisão e CL2 tem valores inferiores a PA em todos os nós sensores, com 7%, 3,4%, 13,6%, 7,1% e 15,8%, respectivamente. CL2 supera os valores de PB com 24,7%, 9,1%, 26%, 14,7% e 21,7%, respectivamente.

Na Figura 6.6(b) são mostrados os valores com colisão, e CL2 é superado por PA em todos os nós com 5,8%, 4,6%, 13,3%, 7,5% e 13,1%, respectivamente. CL2 tem valores superiores a PB com 31%, 2,8%, 29,6%, 15,7% e 27,1% em todos os nós sensores.

CL2 obteve valores próximos de PA nos cenários da PRR_APP mas não na PRR_MAC. A principal razão é que o algoritmo do CL2 não foi desenvolvido para as particularidades de cada nó sensor, mas baseado na QoS de todos os nós da rede. Cada nó sensor tem uma atenuação no canal devido a sua posição na WBAN, em relação ao *sink*, que não foi considerado em CL2.

O número de retransmissões de CL2 em relação a PA e PB contribuíram para o seu desempenho

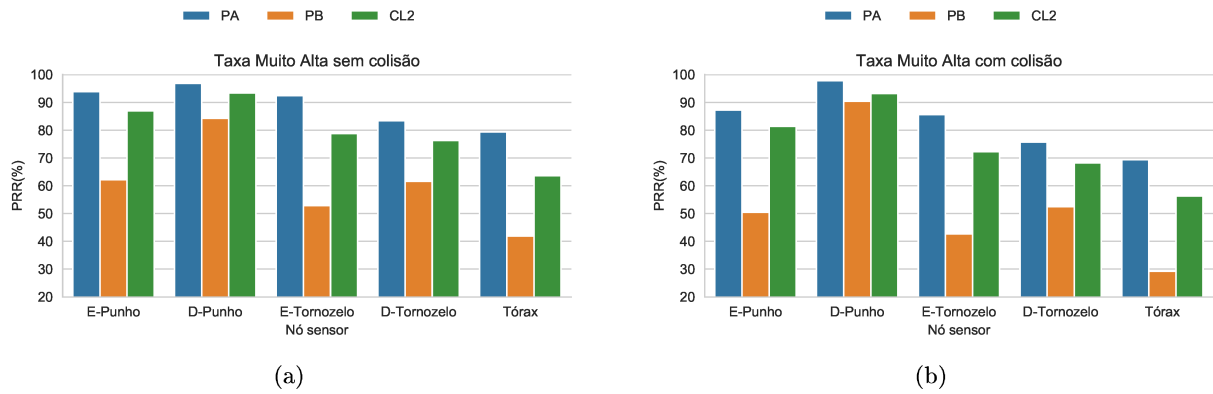


Figura 6.6: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.

na PRR_APP, assim como PB obteve valores menores em entrega de pacotes devido a sua baixa potência de transmissão. Nesse experimento PA obteve os melhores resultados com uma potência fixa mais alta.

6.2.2 Perdas de Pacotes

Nesta seção são apresentadas as razões para as perdas de pacotes. Uma vez que não há perda de pacotes na comunicação entre as camadas APP e MAC, as perdas acontecem ou dentro da camada MAC ou na camada PHY. As perdas são contabilizadas no Castalia para os seguintes tipos de falhas: estouro de *buffer*, não recebimento do ACK e impossibilidade de envio de pacotes devido ao canal de comunicação estar ocupado.

A Figura 6.7 mostra os resultados de perdas de pacotes devido ao estouro de *buffer* para todos os nós sensores. Cada gráfico apresenta as perdas para um dos nós sensores e os valores para cada taxa de dados. A coluna da esquerda se refere ao ambiente sem colisão e da direita com colisão. Cada nó sensor possui um *buffer* com capacidade limitada de armazenar pacotes enviados pela camada APP para a MAC, no caso 32 pacotes. Caso a frequência de envio de pacotes pela camada APP seja muito alto e o espaço disponível no *buffer* não for suficiente, pacotes podem ser descartados e estes não serão enviados pela camada MAC. Os valores indicam a porcentagem de perda em relação ao total de pacotes enviados da camada APP.

A Figura 6.7 mostra que houve estouro de *buffer* apenas nos nós sensores com maiores taxas de dados, especificamente, os situados no tornozelo esquerdo, no tornozelo direito e no tórax, conforme Tabela 4.5.

Na Figura 6.7 apenas PB apresentou perda de pacotes no nó tornozelo esquerdo para os ambientes com e sem colisão para a Taxa Muito Alta, com valores de 8% e 11%, respectivamente. CL2 apresentou perdas maiores que PA no nó tornozelo direito, sem e com colisão, com valores de 4%

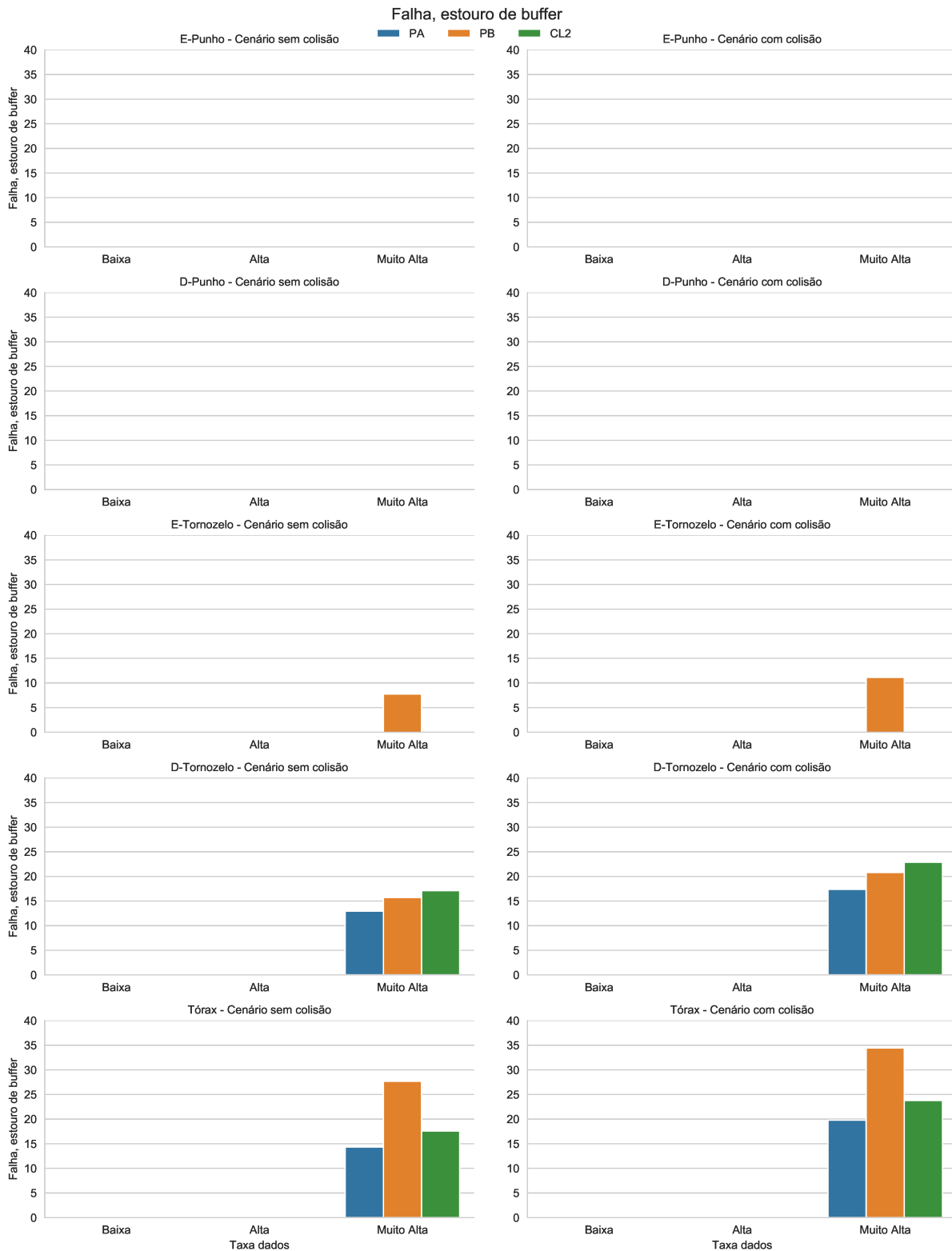


Figura 6.7: Falhas devido ao estouro de buffer para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

e 6%, e de 1,3% e de 2% respectivamente em relação a PB. No nó tórax PB obteve mais perdas por estouro de *buffer* que CL2 em torno de 10% para ambientes sem e com colisão. CL2 obteve perdas maiores que PA 3% e 4% nos nós tornozelo direito e tórax, respectivamente, devido ao número maior de retransmissões.

A Figura 6.7 mostra que nas Taxas Baixa e Alta não há estouro de *buffer*. Isso ocorre pela proximidade dos nós com taxas de dados ao limite teórico do canal. O mesmo ocorre para os nós punhos esquerdo e direito para a Taxa Muito Alta, que têm taxas de dados menores que os demais.

A Figura 6.8 mostra os resultados das falhas na entrega de pacotes referentes ao não recebimento do ACK (enviado pelo *sink*) para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

Como pode ser observado na Figura 6.8, PB obteve perdas maiores em relação a CL2 e PA em todos os casos. CL2 obteve perdas de pacotes em não receber o ACK para PA abaixo de 3% em todas as simulações. Por exemplo, no nó punho esquerdo no cenário sem colisão CL2 obteve perdas de 1,6%, 0,4%, 2,2%, 1% e 1,8% em relação a PA. Com colisão, em comparação com PA, CL2 no nó punho esquerdo foi inferior em 0,9%, 1,2%, 1%, 0,9% e 0,7% para PA, respectivamente. As diferenças de CL2 para PA nos demais nós sensores tiveram valores próximos dos descritos do punho esquerdo.

A Figura 6.9 mostra as perdas devido a ocupação do canal. CL2 apresentou falhas apenas nas Taxas Muito Altas, e isso se deve a quantidade maior de retransmissões permitida.

CL2 obteve perdas menores que PA em todos os nós sensores, com aproximadamente 1,4% de diferença, para ambos os ambientes sem e com colisão. CL2 obteve valores próximos aos de PB com diferenças superiores entre 0,01% e 0,5%.

A perda de pacotes por estouro de *buffer* foi determinada pela taxa de dados, ocorrida apenas para os nós com Taxa Muito Alta, nos cenários sem e com colisão. O tamanho do *buffer* tem influência nos resultados assim como a localização do nó, uma vez que a atenuação tem impacto para determinar retransmissão e mais uso do *buffer*.

A taxa de dados também têm influência nas perdas de pacotes devido ao canal ocupado. Foi observado que apenas na Taxa Muito Alta ocorreram perdas, nos cenários sem e com colisão. PA superou PB e CL2 e, portanto, a diminuição da potência de transmissão de CL2 é sustentável para diminuir a perda de pacotes nesses cenários. O que pode observar é que a potência alta de PA em todos os nós deixa o canal de comunicação com maior probabilidade de problemas de acesso.

Os resultados de CL2 foram melhores que PB e, embora inferiores, próximos aos de PA. A possibilidade de alterar parâmetros entre camadas é uma vantagem que CL2 tem para corrigir problemas como a entrega de ACK, que pode ser minimizada com o aumento nas retransmissões. A entrega de ACK pode ser melhorada aumentando a potência de transmissão do *sink* ou adotando uma solução *cross-layer*. Deve-se observar que a QoS para entrega de pacotes ou para o consumo de energia depende da aplicação, e nesse caso a abordagem CL tem como referência os valores de PA e PB.



Figura 6.8: Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

6.2.3 Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede

Nessa seção é apresentado o desempenho da rede em termos do consumo instantâneo de energia, medido em nJ por bit enviado, e sua recíproca em tempo de vida.

A eficiência energética no Castalia é calculado de acordo com a fórmula 6.4.



Figura 6.9: Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito alta, Alta e Baixa.

$$Nanajoules/bit = \frac{(EnergiaConsumida(J) \times 1.000.000.000)}{(BytesEnviados \times 8)} \tag{6.4}$$

Onde *EnergiaConsumida* é a quantidade total de energia consumida em Joules pelo nó sensor e *BytesEntregues* é a quantidade total de bytes enviados pela aplicação WBAN. O Gerente de

Recursos do Castalia (descrito na seção 4.1) calcula eficiência energética para cada nó sensor.

A Figura 6.10 mostra a eficiência energética para a taxa baixa em ambientes sem e com colisão. A Figura 6.10(a) mostra os cenários sem colisão, onde CL2 apresenta consumo equivalente a PA e PB para o nó punho direito, e nos demais PA consome menos. Nos demais nós CL2 tem consumo menor que PB.

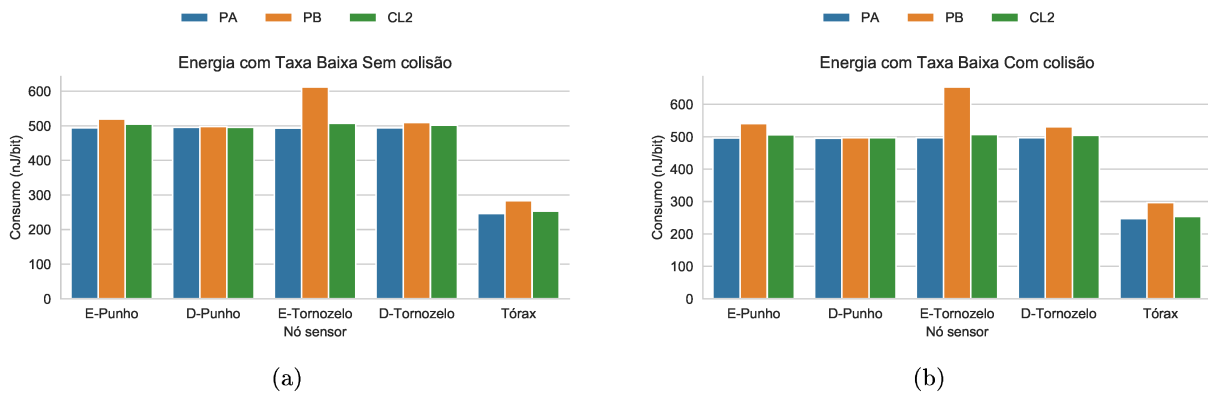


Figura 6.10: Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.

Na Figura 6.10(b) são mostrados os valores para o cenário com colisão. CL2 novamente tem valores próximos de PA e PB no nó do punho direito e eficiência energética maior que PA nos demais nós.

Na Figura 6.11 são mostrados os valores dos cenários para a Taxa Alta. A Figura 6.11(a) mostra os dados sem colisão e CL2 apresenta valores de eficiência superiores a PA em todos os nós, e menor que PB.

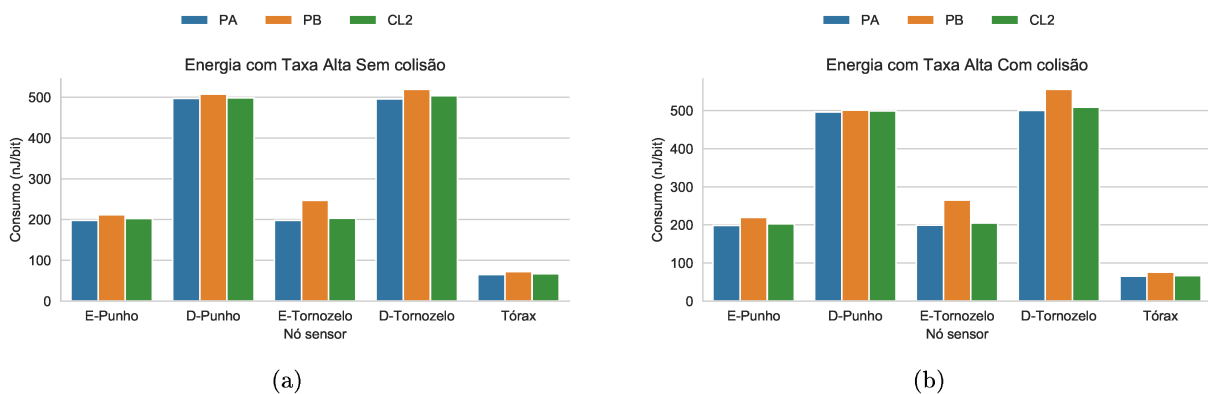


Figura 6.11: Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.

A Figura 6.11(b) mostra os valores para o cenário com colisão e apresenta pouca variação entre CL2 e PA com relação ao cenário sem colisão. CL2 obteve consumo mais eficiente que PB em todos os nós novamente. Os valores de PB são maiores que CL2 e PA porque entregam mais bits com eficiência

menor de energia.

Na Figura 6.11 observa-se que os nós punho esquerdo, tornozelo direito e tórax são menos eficientes em relação aos demais nós. A principal razão é a atenuação no enlace entre esses nós e o *sink*, uma vez que a taxa de dados é próxima ao limite teórico do canal.

A Figura 6.12 mostra os valores com Taxa Muito Alta. Na Figura 6.12(a) para o cenário sem colisão, CL2 e PA têm valores muito próximos. CL2 também tem valores próximos a PB, com exceção do nó do tornozelo esquerdo.

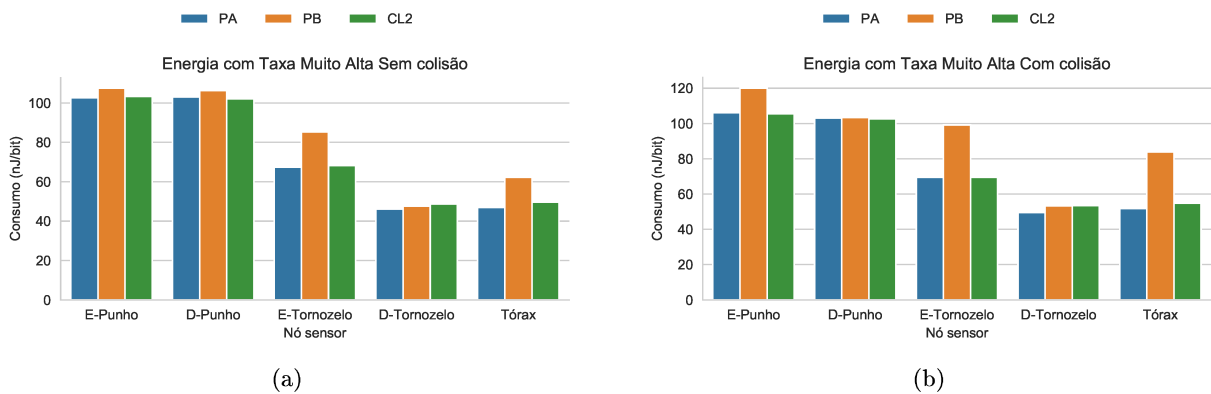


Figura 6.12: Eficiência energética rede para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.12(b) mostra os dados com colisão onde CL2 tem valores próximos de PA. Com relação a PB, CL2 é mais eficiente que os nós punho esquerdo e tornozelo esquerdo, enquanto mantém pouca diferença para os demais nós. PB é mais eficiente que CL2 e PA porque sua entrega de bits tem eficiência menor de energia, ainda que sua entrega de pacotes também seja menor. Essa eficiência é relacionada ao tempo de vida da rede.

O tempo de vida das redes em dias é calculado de acordo com a fórmula 6.5.

$$Dias = \frac{(EnergiaInicial(J) \times TempoSimulação(s))}{((EnergiaInicial(J) - EnergiaResidual(J)) \times 86400)} \quad (6.5)$$

Onde *EnergiaInicial* é a quantidade inicial em joules da bateria, *TempoSimulação* é o tempo da simulação da rede em segundos, *EnergiaResidual* é a quantidade final da bateria em Joules e 86.400 é a quantidade de segundos em dias.

A Figura 6.13 mostra o tempo de vida em dias para a Taxa Baixa sem e com colisão. Na Figura 6.13(a), no cenário sem colisão, CL2 tem 1 dia a mais em relação a PA no nó tornozelo esquerdo. Em relação a PB, CL2 tem tempo de vida menor em todos os nós, com valores menores aproximados de 37, 3, 25, 28 e 33 dias nos nós sensores.

A Figura 6.13(b) mostra a comparação em dias com colisão, e CL2 tem um 1 dia a menos que PA

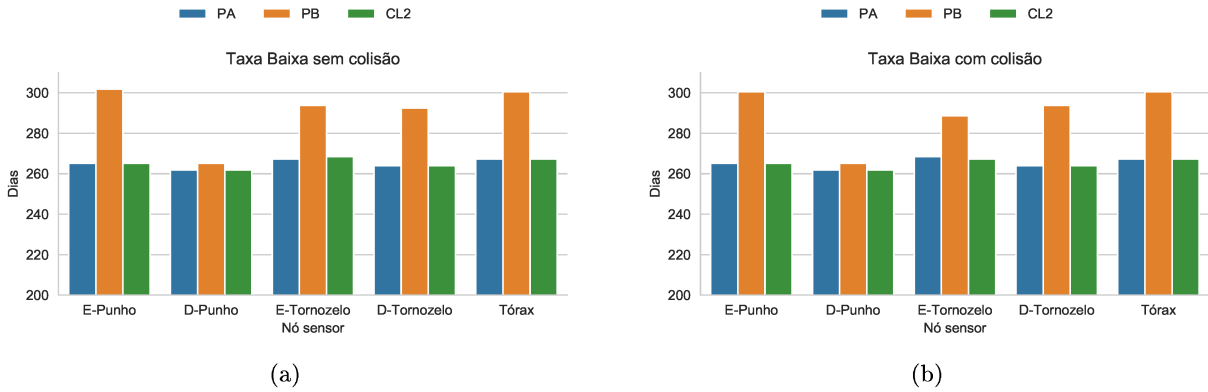


Figura 6.13: *Tempo de vida da rede para a Taxa Baixa.*

no nó tornozelo esquerdo e empata nos demais nós. CL2 tem o tempo de vida menor que PB em 35, 3, 21, 29 e 33 dias nos nós sensores, respectivamente.

A Figura 6.14 mostra o tempo de vida da rede para a taxa média e ambientes sem e com colisão. Na Figura 6.14(a) os valores são mostrados para o ambiente sem colisão, e CL2 tem 1 dia a mais de execução do que PA no nó tornozelo esquerdo e empata nos demais. CL2 é superado por PB em todos os nós com diferenças de 34, 3, 21, 29 e 33 dias, respectivamente.

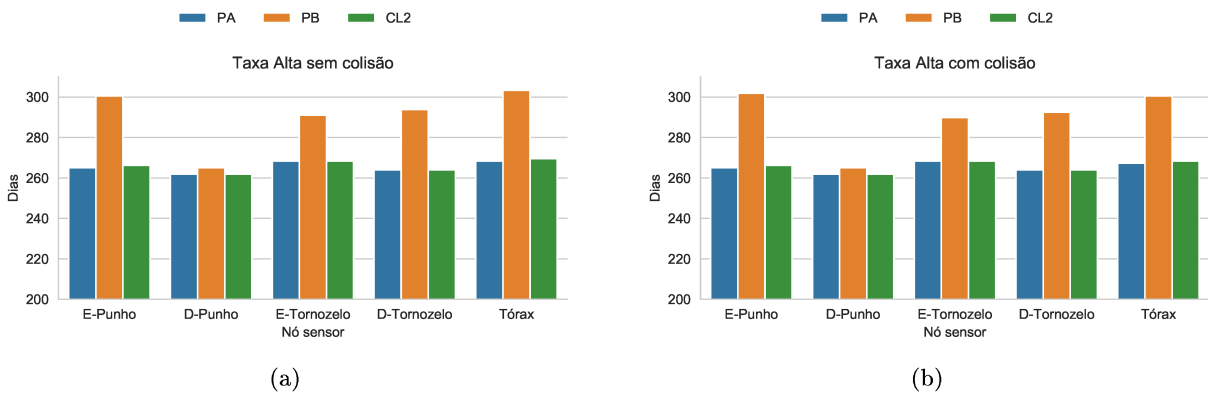


Figura 6.14: *Tempo de vida da rede para a Taxa Alta.*

A Figura 6.14(b) mostra os dados com colisão e CL2 tem 1 dia a mais de execução que PA nos nós punho esquerdo e tórax e empata nos demais. CL2 é superado por PB em todos os nós, com média de 36, 3, 21, 28 e 32 dias.

A Figura 6.15 mostra o tempo de dias para a Taxa Muito Alta. Na Figura 6.15(a) e 6.15(b) CL2 supera PA em 1 dia nos nós tornozelo esquerdo e tórax e empata nos demais.

No cenário sem colisão mostrado na Figura 6.15(a) CL2 é superado por PB em 37, 3, 20, 30 e 35 dias. A Figura 6.15(b) mostra o cenário com colisão, e CL2 é superado por PB em todos os nós em 35, 3, 20, 31 e 32 dias, respectivamente.

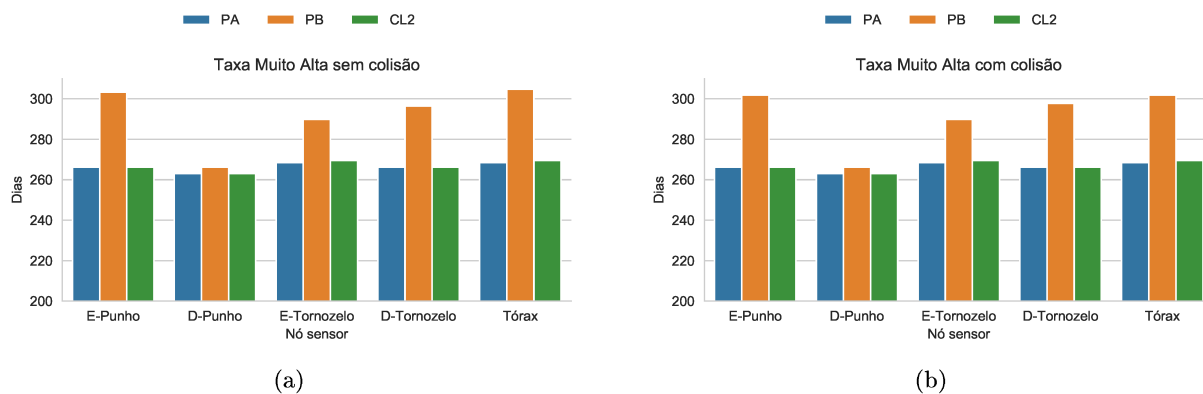


Figura 6.15: Tempo de vida da rede para a Taxa Muito Alta.

CL2 foi próximo a PA no consumo de energia em dias e na eficiência do nJ/bite inferior a PB. Os tempo de vida a mais de PB têm relação com sua eficiência no consumo de energia na entrega de bits, devido a sua menor potência. Entretanto, PB apresenta menor entrega de pacotes em relação a CL2 e PA.

A perda de pacotes devido ao estouro de *buffer*, em Taxa Muito Alta, foi maior em PB do que CL2 e PA, o que contribuiu para aumentar o tempo de vida da rede de PB no cenário com Taxa Muito Alta. Com o estouro de *buffer*, menos pacotes são enviados.

Como pode ser observado, o nó punho direito de PB tem o menor tempo de vida em relação aos seus demais nós, mas maior entrega de pacotes, tanto na PRR_APP quanto na PRR_MAC. O nó punho direito de PB obteve falhas menores de perdas de pacotes no não recebimento de ACK. Por isso, a potência baixa de PB oferece tempo maior de vida da rede para os demais nós, em relação ao nó punho direito, em detrimento da menor entrega de pacotes.

6.2.4 Considerações sobre CL2

CL2 supera PB na entrega de pacotes em todos os nós (Taxas Muito Alta, Alta e Baixa) e cenários (com e sem colisão). CL2 superou PA nos nós punho direito e tornozelo esquerdo na Taxa Muito Alta, mas foi superado nos demais nós. A maior diferença ficou nos nós no cenário Taxa Muito Alta, em que os nós tornozelo esquerdo e tórax obtiveram diferença superior de 4%. Nos cenários Taxa Alta e Baixa a diferença entre PA e CL2 foi no máximo de 3%. Apesar de CL2 variar entre as potências mínima e máxima do rádio, os resultados mostram que a estratégia de CL2 está mais próxima dos valores de PRR de PA do que PB.

As perdas de pacotes devido ao canal ocupado, que só ocorreram na Taxa Muito Alta, foram menores em CL2 do que PA e PB. As perdas de pacotes devido ao estouro do *buffer* também ocorreram apenas na Taxa Muito Alta e nós sensores tornozelos esquerdo e direito e tórax, com

taxas de dados de 15 pacotes por segundo nos dois primeiros e 25 no último nó. CL2 obteve mais falhas que PA nesses 3 nós e menos que PB no nó tornozelo direito.

A estratégia de CL2 em aumentar o número de retransmissão de pacotes não ocasionou maiores perdas devido ao canal ocupado, como foi mostrado na Figura 6.9. Por outro lado impactou no uso do *buffer*, mostrado na Figura 6.7, pois CL2 pode aumentar o número de retransmissão de pacotes, que ocorre na camada MAC.

A falha na entrega de pacotes devido ao não recebimento de ACK tem relação com a taxa de pacotes recebidos e com o meio de transmissão. O ACK só será enviado caso o *sink* receba o pacote transmitido pelo respectivo nó sensor. PB obteve as maiores perdas e PA obteve as menores. CL2 ficou com valores de perdas mais próximos de PA do que em relação a PB, como pode ser visto na Figura 6.8.

O rádio utilizado tem consumo mais alto na recepção do que na transmissão, como descrito na seção 4.2.1, e as alterações nas retransmissões de CL2 não causaram impacto significativo no consumo final de energia em relação à quantidade de retransmissões de PA.

A primeira e segunda hipóteses desse trabalho tem como premissa o uso de *cross-layer* para melhorar o desempenho da WBAN tanto no consumo de energia quanto na entrega de pacotes. Nesse sentido, CL2 foi mais eficiente que PA no consumo de energia mas não na entrega de pacotes. Com relação a PB, CL2 foi superior na entrega de pacotes porém inferior no consumo de energia. As duas hipóteses descrevem sobre a importância do compartilhamento de métricas para aumentar a QoS. Ao compartilhar a PRR, CL2 obteve confiabilidade, quanto a entrega de pacotes, superior a PB e inferior a PA; e o tempo de vida da rede maior que PA e inferior a PB.

A terceira hipótese tem como premissa a importância das métricas para a adaptação da WBAN ao meio de comunicação. Os resultados mostram que CL2 variou próximo de PA e PB em relação a entrega de pacotes e tempo de vida. A razão para isso foi a possibilidade de alterar a potência de transmissão do rádio e o número de transmissões de pacotes da camada MAC.

A proposta de CL2 explica que o compartilhamento da PRR pode ser benéfico em uma WBAN, onde possibilita a adaptação do nó sensor ao estado do meio de comunicação, como com e sem colisão, a atenuação do enlace e com valores diferentes nas taxas de dados e maiores em relação ao limite teórico do canal. Os resultados mostram que as variações do meio de comunicação e seu impacto na QoS pode ser diminuído com o uso do *cross-layer*. PA e PB não existe decisão que permita quaisquer possibilidades de adaptação às mudanças de topologia ou características do canal de comunicação.

6.3 Experimentos com CL4

6.3.1 Tráfego de Pacotes entre Camadas de Aplicação e MAC

A Figura 6.16 mostra a PRR_APP para a Taxa Baixa. A Figura 6.16(a) mostra o cenário sem colisão, e CL4 supera PA com diferenças menores de 1% nos nós pulso esquerdo e direito (0,11%) e tornozelo direito (0,13%), mas é superado por PA também com diferenças menores de 1% (0,12%, 0,68% e 0,28%) nos nós pulso esquerdo, tornozelo esquerdo e tórax. CL4 supera PB em todos os nós com valores de 16%, 1,7%, 25%, 12% e 22%, respectivamente.

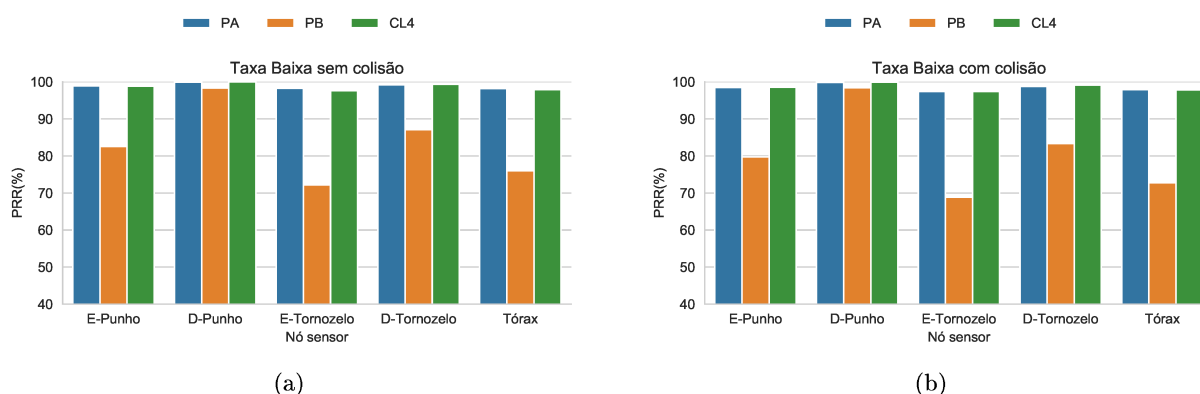


Figura 6.16: Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Baixa.

A Figura 6.16(b) mostra o cenário com colisão. CL 4 supera PA nos nós pulso e tornozelo esquerdos e direitos em 0,03%, 0,08%, 0,02%, e 0,36% respectivamente, e é superado por PA no nó tórax em 0,08%. CL4 supera PB em todos os nós com valores de 16%, 1,5%, 28,5%, 15,8% e 25%, respectivamente.

A Figura 6.17 mostra a PRR_APP para a Taxa Alta. Na Figura 6.17(a) é mostrado o cenário sem colisão, e CL4 supera PA e PB em todos os nós, com valores de 0,13%, 0,22%, 0,02%, 0,34% e 0,04% para os nós de PA, respectivamente; e 17,3%, 3,5%, 25,6%, 14% e 20%, respectivamente.

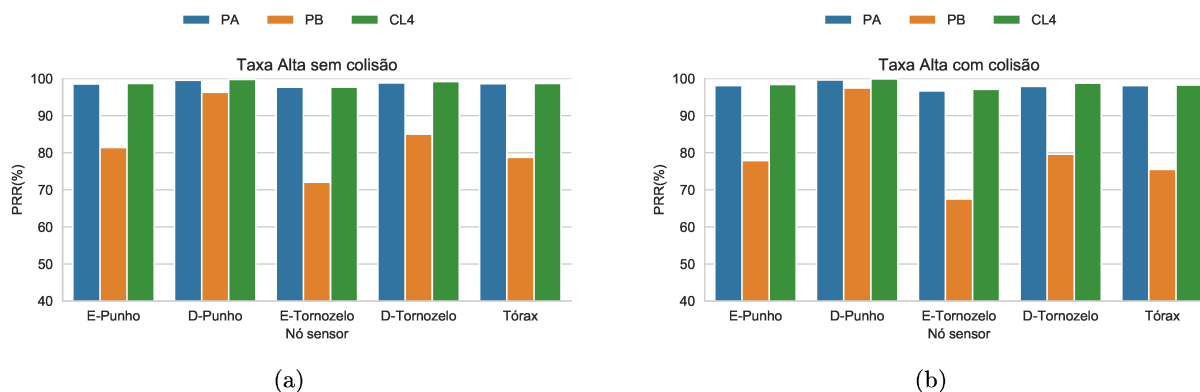


Figura 6.17: Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Alta.

A Figura 6.17(b) mostra o cenário com colisão e CL4 supera PA e PB em todos os nós. Os nós de PA são superados por CL4 em 0,26%, 0,3%, 0,4%, 0,9% e 0,15%, respectivamente, e os de PB em 20,5%, 2,5%, 30%, 19% e 23%, respectivamente.

A Figura 6.18 mostra a PRR_APP para a Taxa Muito Alta. Na Figura 6.18(a) é mostrado o cenário sem colisão. CL4 supera PA nos nós punhos esquerdo e direito e tornozelo esquerdo em 3%, 3% e 2,5%, respectivamente; é superado por PA nos nós tornozelo direito e tórax com os respectivos valores de 3% e 4,3%. CL4 supera PB em todos os nós sensores com valores de 18,5%, 7%, 28%, 8% e 23%, respectivamente.

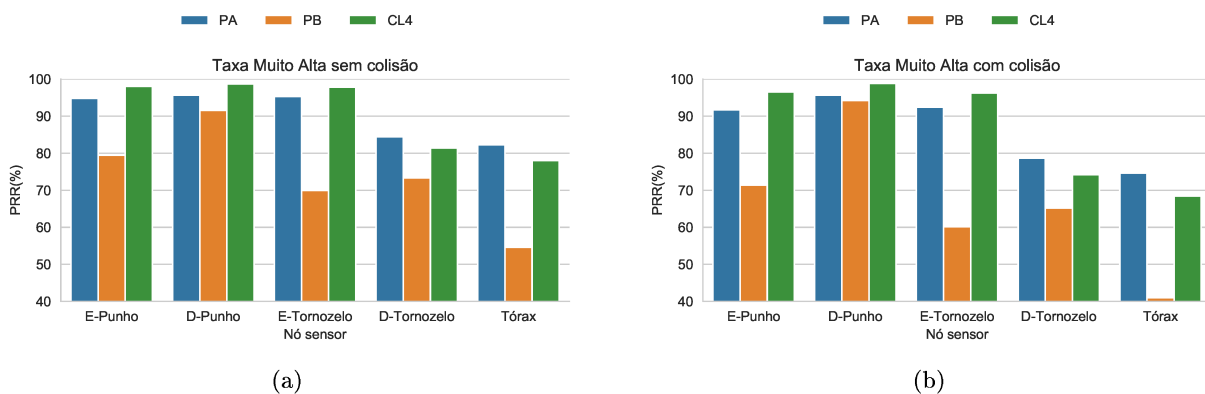


Figura 6.18: Entrega de pacotes entre camadas APP para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.18(b) mostra o cenário PRR_APP sem colisão e CL4 supera PA nos nós punhos esquerdo e direito e tornozelo esquerdo em 4,8%, 3,1% e 3,8%, respectivamente; mas é superado por PA nos nós tornozelo direito (4,5%) e tórax (6,2%). CL4 supera PB em todos os nós com valores de 25%, 4,6%, 36%, 9% e 27,5\$, respectivamente.

Na Figura 6.19 são mostrados os dados da PRR_MAC para Taxa Baixa. A Figura 6.19(a) mostra o cenário sem colisão onde CL4 é superado em todos os nós por PA, com valores respectivos de 4%, 0,6%, 7,3%, 2% e 5,7%. CL4 supera todos os nós de PB em 30%, 8,3%, 34%, 25% e 33% respectivamente.

A Figura 6.19(b) mostra o cenário com interferência e CL4 é superado por PA em todos os nós, com valores de 4,6%, 0,2%, 7%, 3% e 6%, respectivamente. CL4 supera PB em todos os nós com valores de 29%, 5,5%, 35%, 27% e 35%, respectivamente.

A Figura 6.20 mostra os valores da PRR_MAC para a Taxa Alta. No cenário sem colisão, mostrado na Figura 6.20(a), CL4 é superado por PA em todos os nós com os respectivos valores de 3,7%, 1%, 6,2%, 2,8% e 3,7%. CL4 supera PB em todos os nós em 28,8%, 9,6%, 35,4%, 26% e 33,4%, respectivamente.

A Figura 6.20(b) mostra o cenário com colisão e CL4 é superado em todos os nós por PA em 5%,

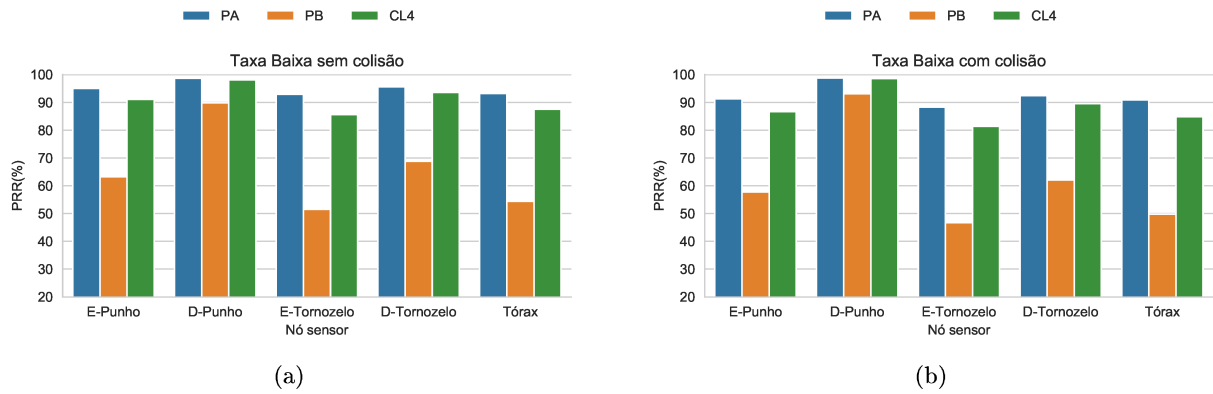


Figura 6.19: Entrega de pacotes entre camadas MAC com Taxa Baixa.

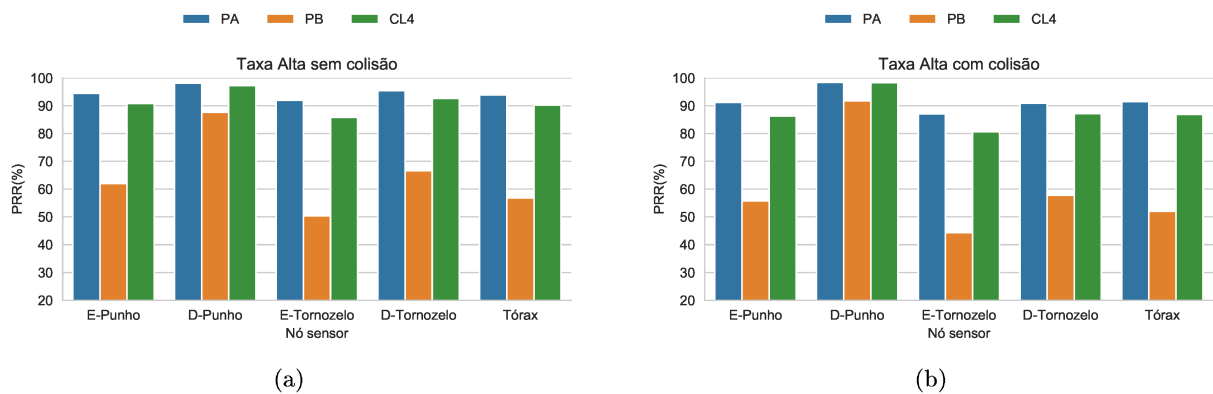


Figura 6.20: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.

0,1%, 6,5%, 3,7% e 4,6%, respectivamente. CL4 supera PB em todos os nós com valores de 30,5%, 6,5%, 36,3%, 29,4% e 34,9%, respectivamente.

Na Figura 6.21 são mostrados os valores de taxa mais alta para a PRR_{MAC}. CL4 é superado por PA em todos os nós, no cenário sem colisão mostrado pela Figura 6.21(a), em 2,1%, 0,7%, 8,4%, 3,8% e 11,7%. CL4 supera PB em 29,6%, 11,8%, 31%, 18% e 25,8% em todos os nós, respectivamente.

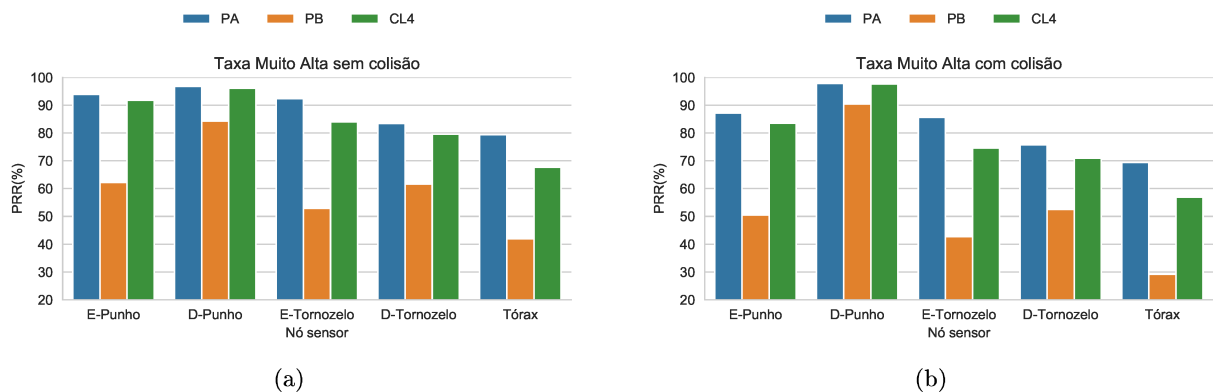


Figura 6.21: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.21(b) mostra o cenário com colisão e CL4 é superado por PA em todos os nós em 3,7%,

0,2%, 11%, 4,8% e 12,5%, respectivamente. CL4 supera PB em todos os nós em 33%, 7,2%, 32%, 18,4% e 27,7%, respectivamente.

CL4 apresentou valores superiores de PRR_APP que PA e PB, que não considera as retransmissões de pacotes. Por outro lado a PRR_MAC de PA superou CL4. A estratégia de CL4 foi desenvolvida analisando o comportamento das taxa de dados dos nós sensores, o que modificou a política de escolha da potência de transmissão do rádio, e obteve com isso maior entrega de pacotes do que PA e PB entre camadas APP.

6.3.2 Perdas de Pacotes

A Figura 6.22 mostra as perdas de pacotes devidas ao estouro de *buffer* para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa. As perdas ocorrem somente na Taxa Muito e no nós tornozelos e tórax, com e sem colisão.

CL4 obteve perda menor na Taxa Alta sem colisão em relação a PA nos nós tornozelo direito e tórax, com 4,5% e 6%, respectivamente, mas perdas maiores que PB no nó tornozelo direito em 2%, com e sem colisão. PB teve perdas maiores que CL4 em 8% tanto no nó tornozelo esquerdo quanto no nó tórax. PA obteve perdas menores que CL4 e PB.

CL4 obteve perdas maiores que PA em 6,6% e 9% no cenário com colisão nos nós tornozelo direito e tórax, e em 5% e 6% no cenário sem colisão nos mesmos nós. Como CL4 têm mais retransmissões de pacotes do que PA e PB as suas falhas devido ao estouro de *buffer* foram impactadas.

A Figura 6.23 mostra a falha na entrega de pacotes devido ao não recebimento de ACK. Para a Taxa Muito Alta, CL4 obteve menores perdas que PA em todos os nós sensores, com valores, no cenário sem colisão, de 1,6%, 1%, 1,6%, 1% e 1,3%, respectivamente, e 2,6%, 0,5%, 2,5%, 1,5% e 2,2% no cenário com colisão, respectivamente. Na Taxa Alta e Baixa as diferenças de perdas foram menores que 1%.

Com relação a PB, CL4 apresentou menores perdas em todos os nós sensores. A menor diferença de perda foi no nó punho direito, entre 2% e 6%. Nos demais nós a variação foi entre 11% a 33%.

A Figura 6.24 mostra as falhas devido ao canal ocupado. CL4 obteve perdas menores que PA em todos os nós e em ambos os cenários, com valores entre 0% e 3%. CL4 obteve maiores perdas que PB, com valores entre 0% a 1,3%.

CL4 obteve perdas de pacotes menores que PB na maioria dos nós no estouro de *buffer* na Taxa Muito Alta. A variação da sua potência de transmissão baseada na PRR e na taxa de dados diminuiu o estouro de *buffer*. CL4 também diminuiu a perda de pacotes devido ao canal ocupado em relação a PA e PB, os quais ocorreram também somente na Taxa Muito Alta.

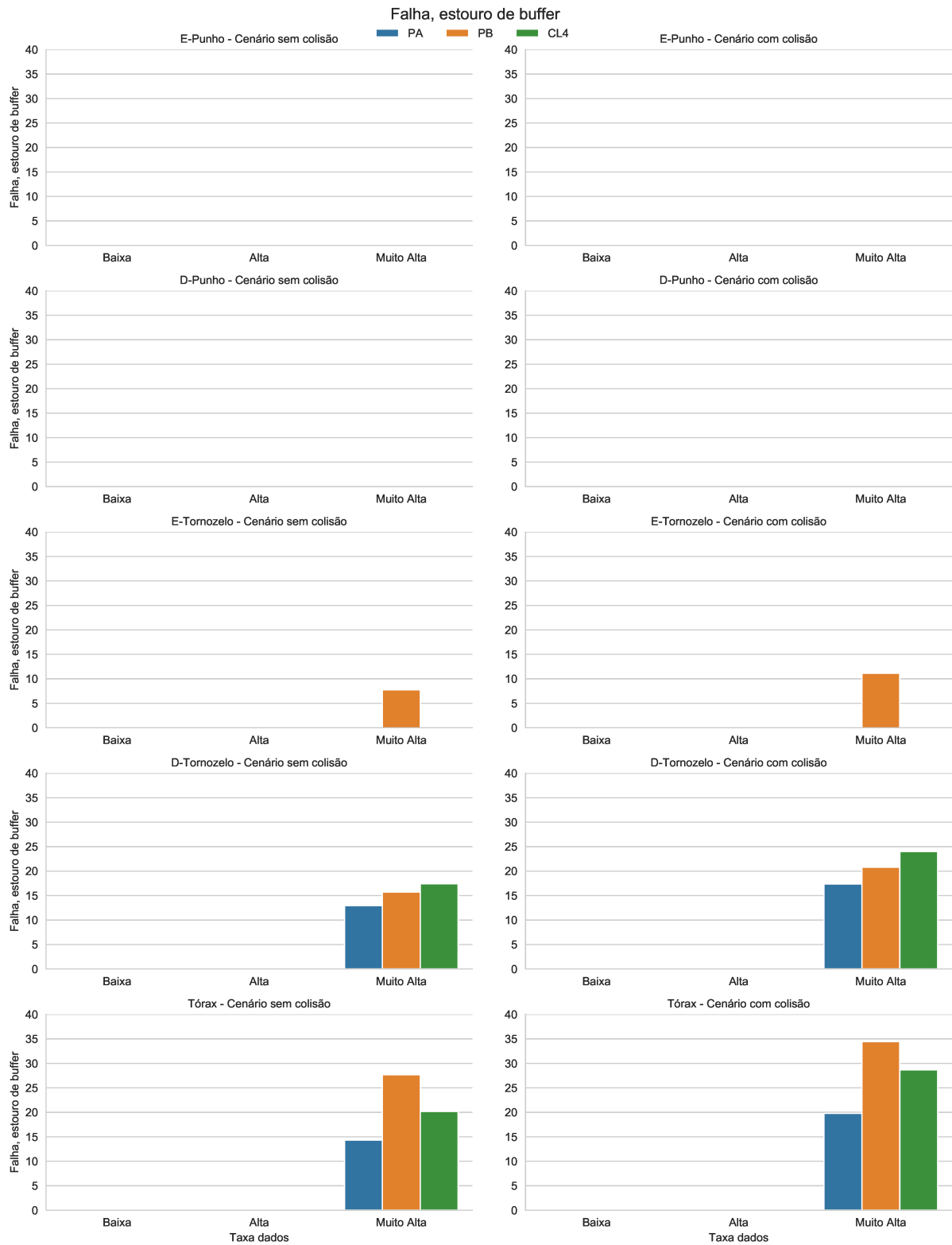


Figura 6.22: Falha devido ao estouro de buffer para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

O recebimento do ACK tem relação com a maior entrega de pacotes, pois também depende do envio do *sink* ao respectivo nó emissor. CL4 obteve perdas próximas de PA e bem inferiores a PB.



Figura 6.23: Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

6.3.3 Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede

A Figura 6.25 mostra o desempenho da eficiência energética para a Taxa Baixa. A Figura 6.25(a) mostra o cenário sem colisão onde CL4 obteve os mesmos valores que PA, mas foi superado por PB em todos os nós com valores de 37%, 3,2%, 25,5%, 28,5% e 33,2%, respectivamente.



Figura 6.24: Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

A Figura 6.25(b) mostra o cenário com colisão onde novamente CL4 tem os mesmos valores de PA e é superado por PB em todos os nós, com valores de 35,3%, 3,2%, 20,2%, 29,8% e 33,2%, respectivamente. Observa-se que o nó tórax tem a menor eficiência energética devido a atenuação no enlace com o *sink*. A proximidade do limite teórico do canal mostra que os valores dos cenários sem e

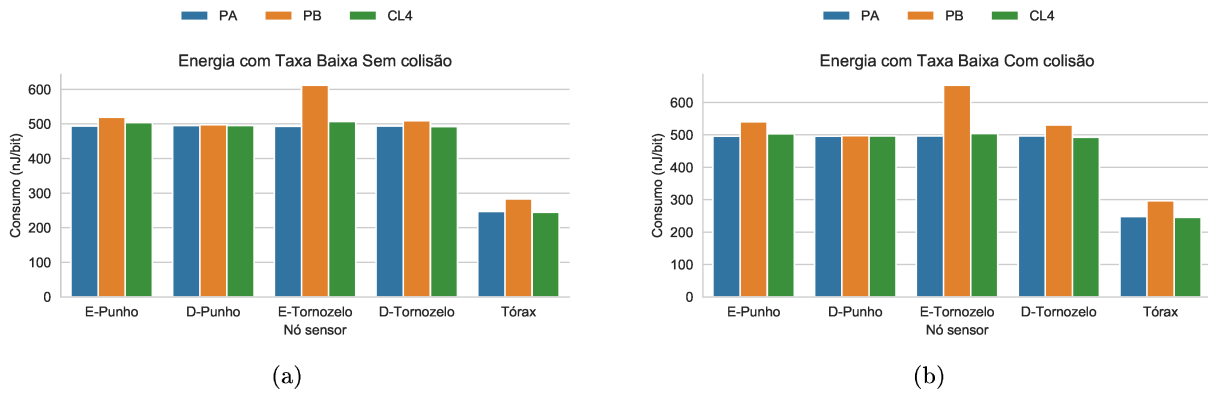


Figura 6.25: Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.

com colisão são próximos.

A Figura 6.26 mostra a eficiência energética com Taxa Alta. Na Figura 6.26(a) é mostrado que no cenário sem colisão CL4 obteve ganho de 1,1% no nó punho esquerdo em relação a PA e os mesmos percentuais nos demais nós. CL4 foi superado em todos os nós por PB com valores de 34,3%, 3,2%, 22,7%, 29,8% e 35%, respectivamente.

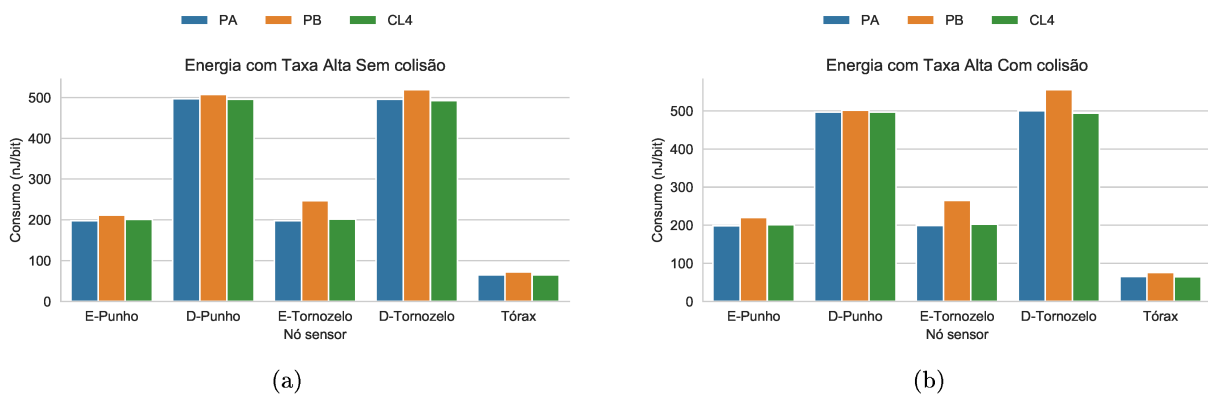


Figura 6.26: Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.

A Figura 6.26(b) mostra o cenário com colisão e CL4 supera PA nos nós punho esquerdo e no tórax, obtendo os mesmo valores nos demais nós. CL4 é superado por PB em todos os nós com valores de 35,7%, 3,2%, 21,5%, 28,5% e 32,2%, respectivamente. Assim como Taxa Baixa, a Figura 6.26 mostra que o comportamento dos resultados são próximos em ambos os cenários.

A Figura 6.27 mostra a eficiência energética com Taxa Muito Alta. A Figura 6.27(a) mostra o cenário sem colisão e CL4 supera PA em 1% nos nó punho esquerdo e tornozelo esquerdo, e obtém os mesmos valores nos demais. CL4 é superado por PB em todos os nós com valores de 36%, 3,2%, 20,4%, 30,2% e 36,4%, respectivamente.

A Figura 6.27(b) mostra o cenário com colisão e CL4 supera PA apenas no nó tornozelo esquerdo

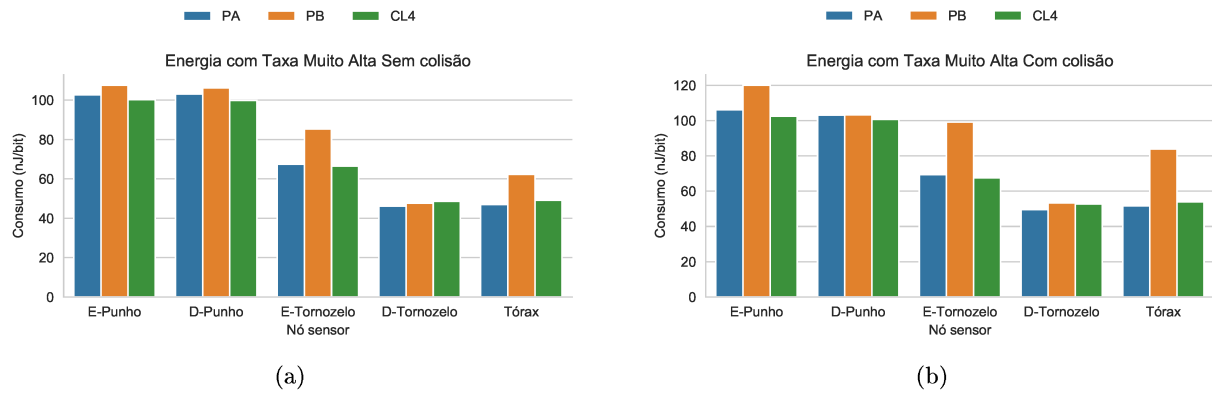


Figura 6.27: *Eficiência energética rede para a Taxa Muito Alta.*

em 2,2%, e tem os mesmos valores nos demais nós. PB supera CL4 em todos os nós com valores respectivos de 35,7%, 3,2%, 19,3%, 31,6% e 33,5%. Na Figura 6.27 observa-se que o comportamento com colisão tem variações maiores em relação a Taxa Baixa e Alta. O nó tórax de PB obteve eficiência maior com colisão do que sem colisão, devido ao número maior de pacotes enviados por esse nó.

A Figura 6.28 mostra o tempo de vida da rede medido para a Taxa Baixa. Na Figura 6.28(a) é mostrado cenário sem colisão e CL4 supera PA em 1 dia apenas no nó tornozelo esquerdo, e nos demais nós não há diferenças. CL4 é superado por PB em todos os nós, com valores respectivos de 36, 3, 25, 28 e 33 dias.

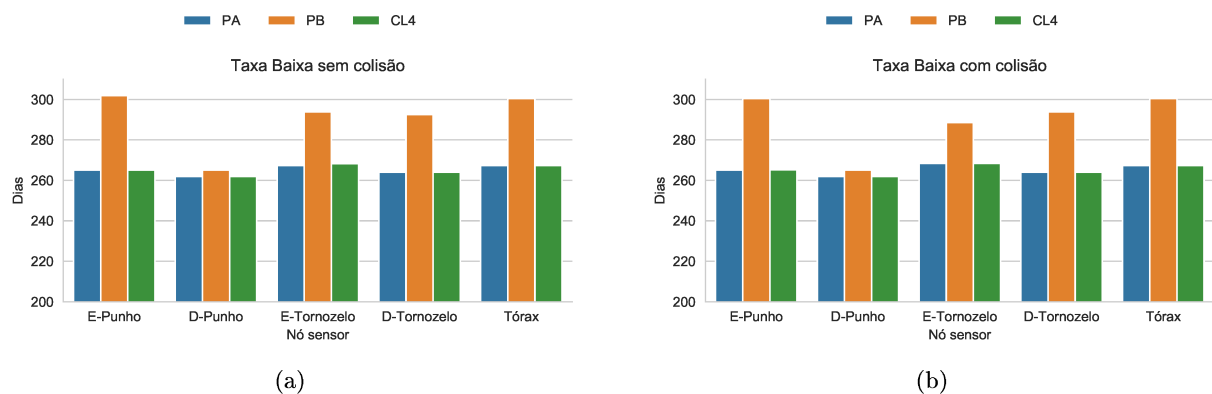


Figura 6.28: *Tempo de vida da rede em dias para a Taxa Baixa.*

A Figura 6.28(b) mostra o cenário com colisão e CL4 empata com PA em todos os nós. CL4 é superado por PB em todos os nós, com valores de 35, 3, 20, 30 e 33 dias, respectivamente.

A Figura 6.29 mostra o tempo de vida da rede Taxa Alta. Na Figura 6.29(a) é mostrado o cenário sem colisão, em que CL4 supera PA apenas no nó punho esquerdo em 1 dia, e permanece com valores iguais nos demais. CL4 é superado por PB em todos os nós com valores de 34, 3, 22, 30 e 35 dias,

respectivamente.

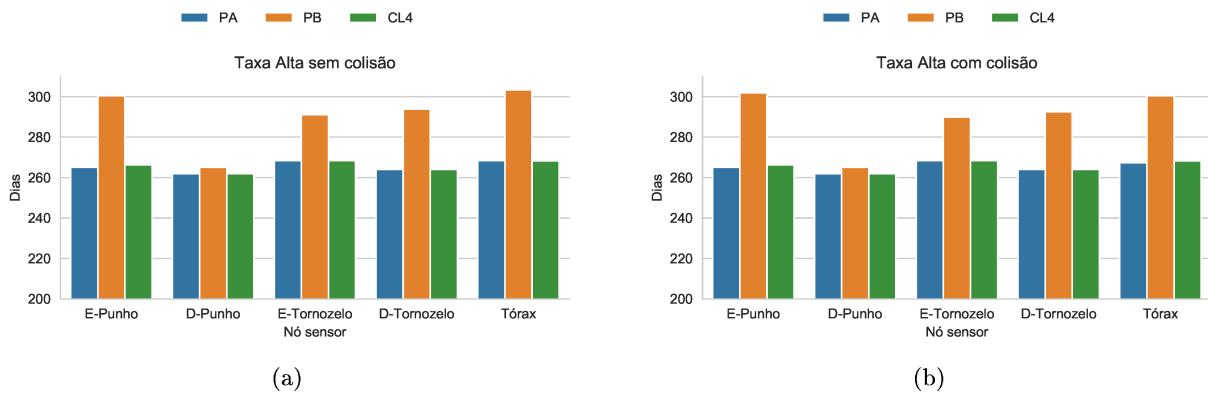


Figura 6.29: Tempo de vida da rede para a Taxa Alta.

Na Figura 6.29(b) é mostrado o cenário com colisão e CL4 supera PA nos nós punho esquerdo e do tórax em 1 dia. CL4 é superado por PB em todos os nós, com valores de 35, 3, 21, 28 e 32 dias, respectivamente.

A Figura 6.30 mostra o tempo de vida da rede para a Taxa Muito Alta. Na Figura 6.30(a) é mostrado cenário sem colisão e CL4 supera PA em 1 dia nos nós punho e tornozelo esquerdo, e nos demais nós não há diferenças. CL4 é superado por PB em todos os nós, com valores respectivos de 36, 3, 20, 30 e 36 dias.

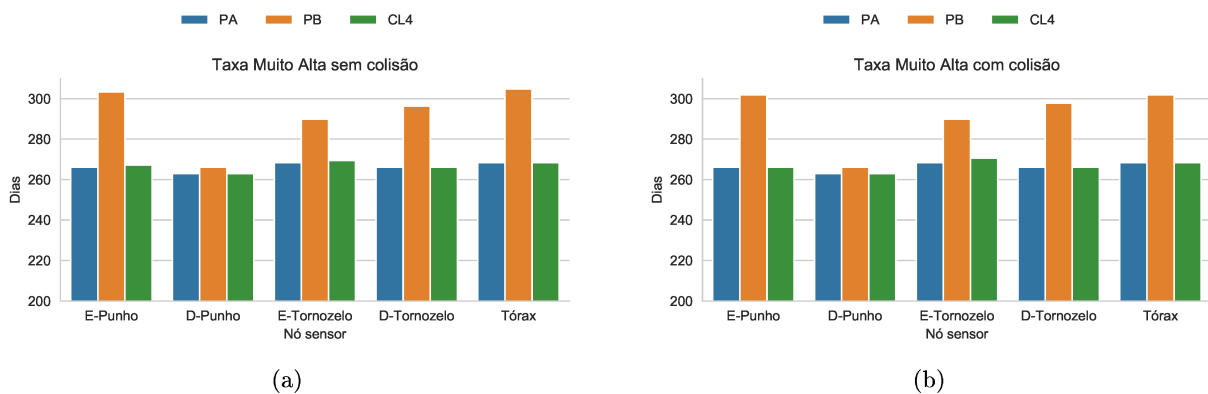


Figura 6.30: Tempo de vida para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.30(b) mostra o cenário com colisão e CL4 supera PA em 2 dias no nó tornozelo esquerdo, e permanece sem diferenças nos demais nós. CL4 é superado por PB em todos os nós, com valores de 35, 3, 19, 31 e 33 dias, respectivamente.

CL4 não obteve melhoras no consumo de energia, em que ficou próximo de PA e foi superado por PB em todos os nós. A estratégia de CL4 não avançou para melhorar o tempo de vida da rede.

6.3.4 Considerações sobre CL4

CL4 foi mais eficiente que PA na PRR_APP, mas foi superado quanto à PRR_MAC. Isso ocorreu devido a quantidade de retransmissões que CL4 possui. CL4 superou PB tanto nos cenários da PRR_APP quanto da PRR_MAC.

CL4 obteve perdas de pacotes menores que PA e PB devido ao canal ocupado, sem e com colisão, assim como nas perdas de pacotes devido a não entrega de ACK. As perdas por estouro de *buffer* de CL4 foram superiores a PA, em que tais perdas ocorreram apenas no cenário com Taxa Muito Alta.

CL4 superou PA no tempo de vida da rede, para todos os cenários, mas não superou PB no tempo de vida da rede. PB utiliza sempre a potência mínima do rádio baixa essa foi a razão responsável pelo tempo de vida mais alto da sua rede.

Em relação à hipótese de desempenho, CL4 melhorou a WBAN na entrega de pacotes em relação aos limites PA, na PRR_APP, e PB, tanto na PRR_APP quanto PRR_MAC, mas foi superado apenas por PB no consumo de energia. CL4 ficou acima de PA e abaixo de PB.

CL4 utilizou os valores das taxas de dados dos nós e a PRR para estabelecer sua estratégia para alterar a potência do rádio do BANRadio. A hipótese de compartilhamento de métrica contribuiu para que CL4 fosse mais eficiente que PA e PB na entrega de pacotes, ainda que tenha sido superada apenas por PB no tempo de vida da rede. A variação no número de retransmissões de pacotes não foi impactante no consumo de energia devido a característica do rádio, em que o estado RX consome mais energia que TX.

A hipótese de adaptar a WBAN ao estado do meio em tempo real foi comprovada por CL4 ao alterar a potência do rádio e as retransmissões com base na PRR, as taxas de dados dos nós e prioridades dos pacotes. Os experimentos mostraram que CL4 foi superior a PA e PB devido a essas alterações na sua rede.

6.4 Experimentos com CL-Bin

6.4.1 Tráfego de Pacotes entre Camadas de Aplicação e MAC

A Figura 6.31 mostra o comportamento da PRR_APP com Taxa Baixa. A Figura 6.31(a) mostra o cenário sem colisão e CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores de 1%, 0,03%, 2,4%, 0,8% e 1,4%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 15,3%, 1,5%, 23,7%, 11,3% e 20,8%, respectivamente.

A Figura 6.31(b) mostra o cenário sem colisão. CL-Bin é superado por PA em todos os nós,

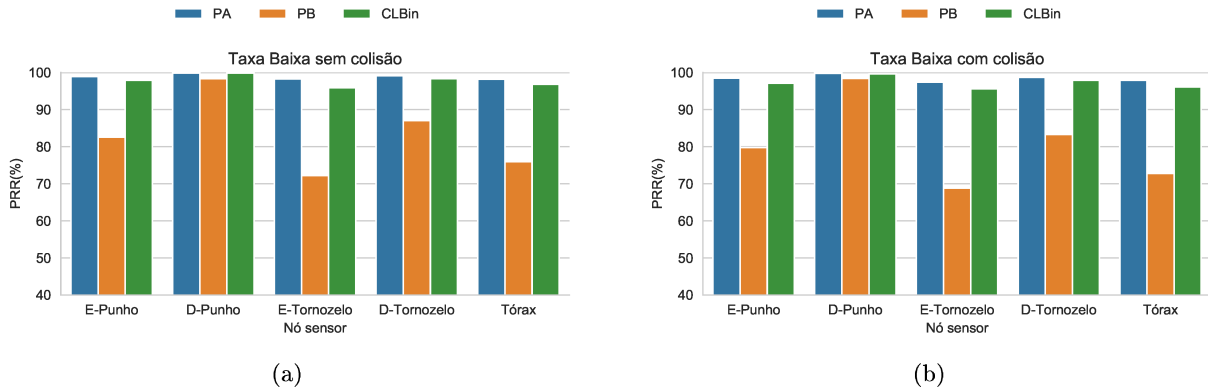


Figura 6.31: Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Baixa.

com valores de 1,3%, 0,2%, 1,7%, 0,8% e 1,8%, respectivamente. A diferença entre CL-Bin e PA nos cenários sem e com colisão são próximos. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 17,5%, 1,3%, 26,8%, 14,6% e 23,3%, respectivamente.

A Figura 6.32 mostra o comportamento da PRR_APP para taxa alta. No cenário sem colisão mostrado na Figura 6.32(a), CL-Bin é superado por PA em todos os nós, com valores respectivos de 1,2%, 0,15%, 2,2%, 1,1% e 1,5%. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 16%, 3,1%, 23,4%, 12,7% e 18,4%, respectivamente.

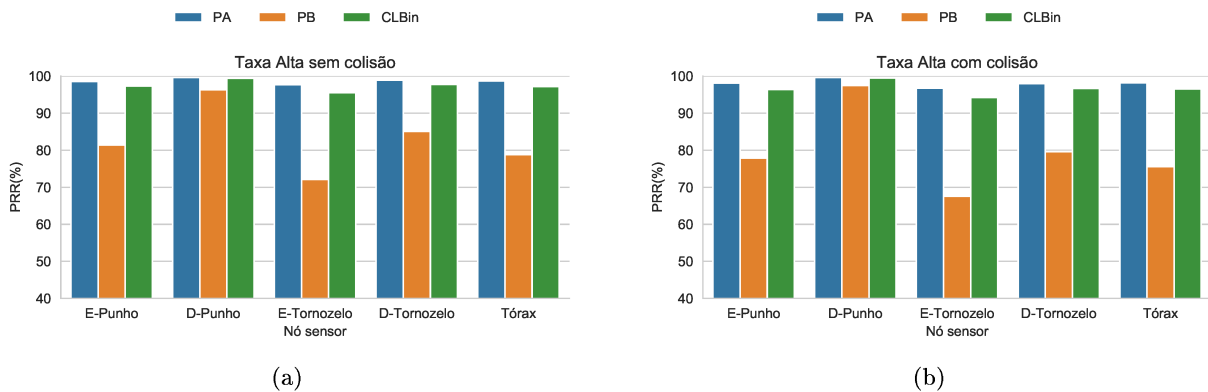


Figura 6.32: Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Alta.

A Figura 6.32(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin é superado por PA em todos os nós, com valores de 1,8%, 0,15%, 2,5%, 1,2% e 1,6%, respectivamente. CL-Bin supera novamente PB em todos os nós com valores de 18,5%, 2%, 26,7%, 17% e 21%, respectivamente.

A Figura 6.33 mostra os dados da PRR_APP para a Taxa Muito Alta. Na Figura 6.33(a) é mostrado o cenário sem colisão, e CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores respectivos de 1,46%, 0,5%, 1,8%, 1,1% e 2,2%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 14%, 3,5%, 23,6%, 10% e 25,3%, respectivamente.

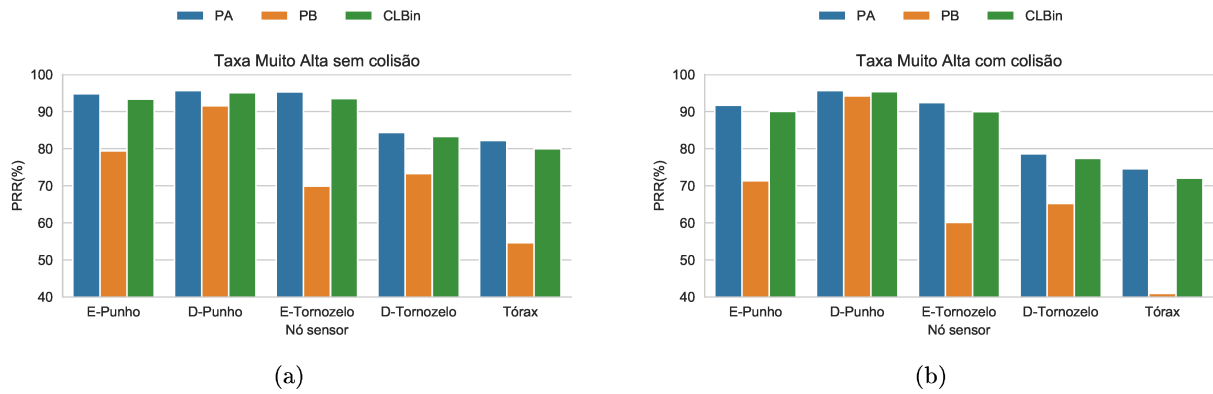


Figura 6.33: Entrega de pacotes entre camadas APP com Taxa Muito Alta.

A Figura 6.33(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores de 1,6%, 0,3%, 2,5%, 1,2% e 2,5%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 18,7%, 1,1%, 30%, 12,2% e 31%, respectivamente.

A Figura 6.34 mostra os valores da PRR_MAC para a taxa baixa. A Figura 6.34(a) mostra o cenário sem colisão. CL-Bin é superado PA em todos os nós com valores de 2,8%, 0,8%, 5,4%, 2,2% e 3,4%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 30%, 8%, 36%, 24,6% e 35,4%, respectivamente.

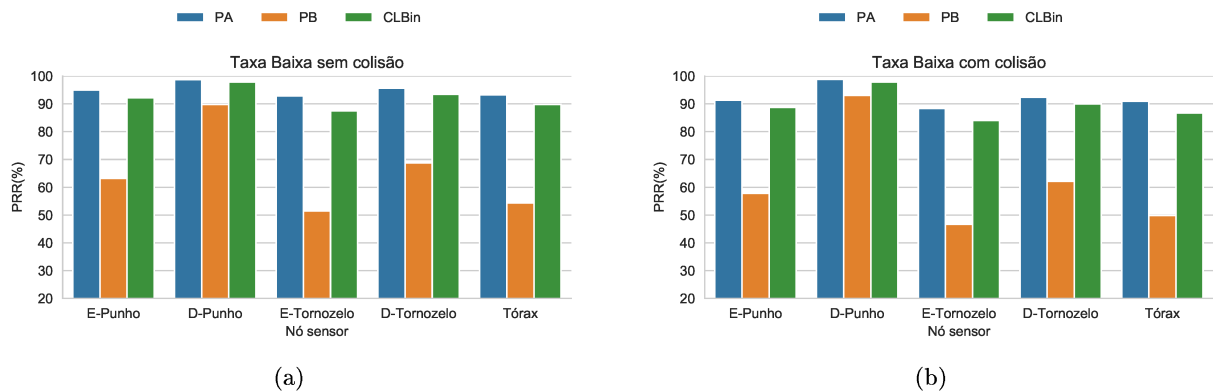


Figura 6.34: Entrega de pacotes entre camadas MAC Taxa Baixa.

No cenário com colisão mostrado na Figura 6.34(b) CL-Bin é superado por PA com valores respectivos de 2,6%, 0,9%, 4,3%, 2,4% e 4,2%. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 31%, 4,8%, 37,3%, 28% e 37%, respectivamente.

A Figura 6.35 mostra o comportamento da PRR_MAC com Taxa Alta. A Figura 6.35(a) mostra o cenário sem colisão, em que CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores respectivos de 3%, 1,1%, 5%, 2,8% e 3,5%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós novamente com valores de 29,6%, 9,4%, 36,7%, 26% e 33,6%, respectivamente.

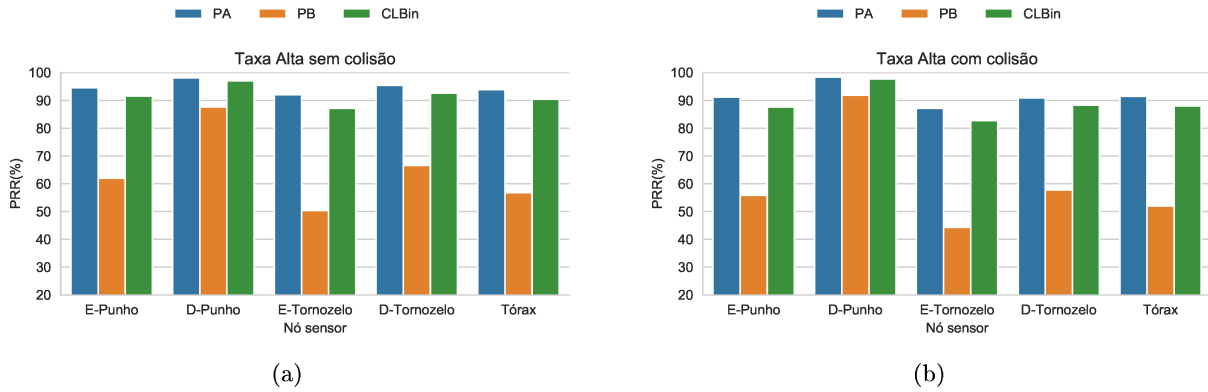


Figura 6.35: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Alta.

A Figura 6.35(b) mostra o cenário com colisão. CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores de 3,6%, 0,7%, 4,4%, 2,6% e 3,5%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores respectivos de 31,8%, 6%, 38,4%, 30,5% e 36%, respectivamente.

A Figura 6.36 mostra o comportamento da PRR_{MAC} para a taxa mais alta. A Figura 6.36(a) mostra o cenário sem colisão, e CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores de 3,1%, 1,6%, 4\$, 2,4% e 4,1%, respectivamente. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 28,6%, 11%, 35,6%, 19,4% e 33,4%, respectivamente.

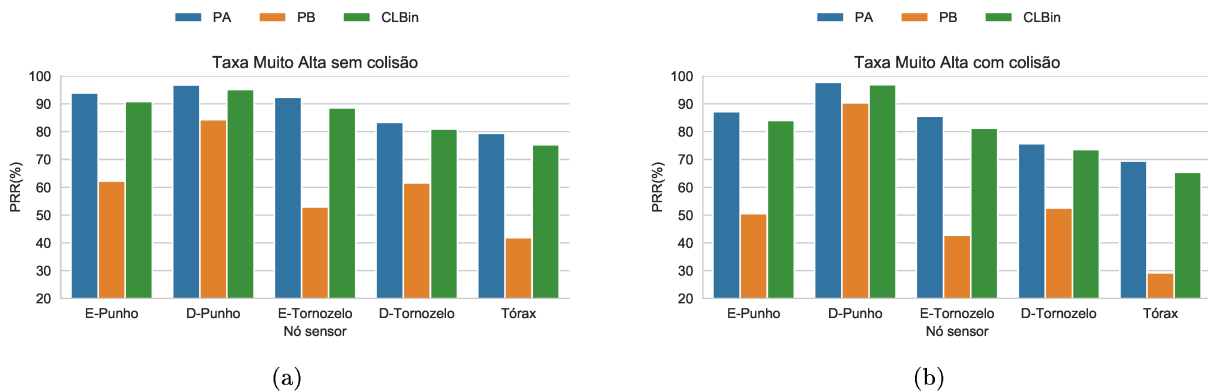


Figura 6.36: Entrega de pacotes entre camadas MAC para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.36(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin é superado por PA em todos os nós com valores respectivos de 3,2%, 0,9%, 4,4%, 2,1% e 4%. CL-Bin supera PB em todos os nós com valores de 33,5%, 6,5%, 38,5%, 21,1% e 36,2%, respectivamente.

CL-Bin foi proposto baseado no comportamento da PRR_{APP} de PA. Os resultados das simulações mostraram valores próximos de PA quanto a entrega de pacotes, sem e com colisão, tanto em relação a PRR_{APP} quanto a PRR_{MAC}. CL-Bin superou PB em todas as simulações e cenários de entrega de pacotes.

Como CL-Bin considerou o comportamento dos valores médios da PRR_APP de PA, e não de cada nó sensor, os seus resultados tiveram uma aproximação abaixo de PA. A proximidade, ainda que menor, de entrega de pacotes para PA indica que outras distribuições podem ser utilizadas ou parâmetros considerados para prever um comportamento esperado da WBAN, em que a potência máxima do rádio não necessite ser utilizada.

6.4.2 Perdas de Pacotes

A Figura 6.37 mostra a porcentagem de perda de pacotes devido ao estouro de *buffer* para todos os nós sensores. Houve ocorrência de perdas apenas nos cenários com Taxas Muito Altas, sem e com colisão, nos nós tornozelos e tórax.

PB obteve perdas maiores do que CL-Bin e PA com valores médios de 14% e 3% nos nós tornozelo direito e tórax, no cenário com colisão. E de 12% e 2,5% a mais no cenário sem colisão.

A Figura 6.38 mostra as falhas contabilizadas devido ao não recebimento do ACK do *sink*. Pode ser observado que PB apresentou muito mais falhas que CL-Bin e PA.

CL-Bin e PA aparecem com valores próximos em muitos cenários. As maiores diferenças, em que CL-Bin obteve mais perdas que PA, foram em Taxa Muito Alta, sem colisão, com 2% no tornozelo esquerdo, em 2,5% no tornozelo esquerdo e 2,2% no tórax; com 2,2% no tornozelo esquerdo no cenário sem colisão e Taxa Alta, e 2,4% no tornozelo esquerdo no cenário com colisão; e em 2,3% no tornozelo esquerdo no cenário sem colisão e taxa baixa.

Na Figura 6.39 é mostrada as perdas de pacotes devido ao canal de comunicação ocupado. CL-Bin e PA têm comportamentos semelhantes, onde as diferenças entre as perdas são menores que 0,2%. PB obteve perdas maiores que CL-Bin apenas nos cenários com Taxa Muito Alta, com diferença máxima de 1,3% no nó punho esquerdo e cenário sem colisão.

CL-Bin obteve valores próximo de PA em todos os cenários de perdas de pacotes. Como o CL-Bin foi proposto baseado no comportamento de PA, esses resultados são esperados.

6.4.3 Eficiência Energética e Tempo de Vida da Rede

A Figura 6.40 mostra a eficiência energética para a taxa baixa. A Figura 6.40(a) mostra o cenário sem colisão e CL-Bin tem desempenho melhor que PA nos nós punho esquerdo, tornozelo esquerdo/direito e tórax com valores de 5, 11, 3,8 e 3,5 nJ/bit. CL-Bin é superado por PB em todos os nós, com valores entre 2,5 a 108 nJ/bit.

A Figura 6.40(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin tem desempenho melhor que PA em todos os nós, com valores entre 1 a 8,8 nJ/bit. CL-Bin é superado por PB em todos os nós sensores.

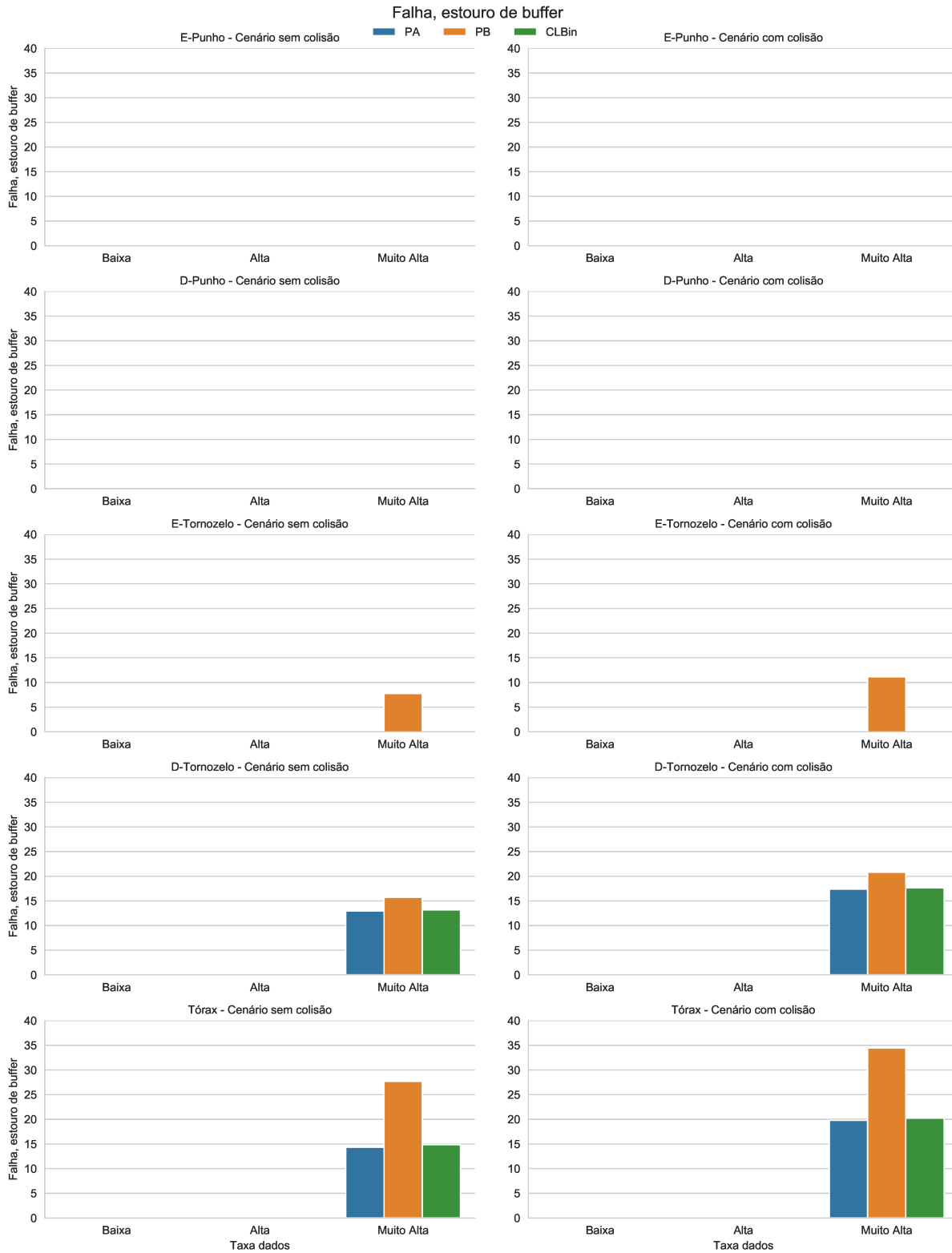


Figura 6.37: Falha devido ao estouro de buffer para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

A Figura 6.41 mostra os dados da eficiência energética para a taxa alta. A Figura 6.41(a) mostra os valores para o cenário sem colisão e CL-Bin supera PA em todos os nós com valores entre 1 e 6 nJ/bit. CL-Bin é superado por PB em todos os nós, com diferenças de valores entre 6 e 45 nB/bit.

A Figura 6.41(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin tem valores de consumo melhor que PA



Figura 6.38: Falhas devido ao não recebimento do ACK para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

em todos os nós, com valores que variam entre 1 e 7 nJ/bit. CL-Bin é superado por PB em todos os nós com valores entre 4,3 e 60 nJ/bit.

A Figura 6.42 mostra os dados da eficiência energética para a taxa mais alta. A Figura 6.42(a) mostra o cenário sem colisão. CL-Bin supera PA em todos os nós com valores entre 0,5 e 1,5 nJ/bit.

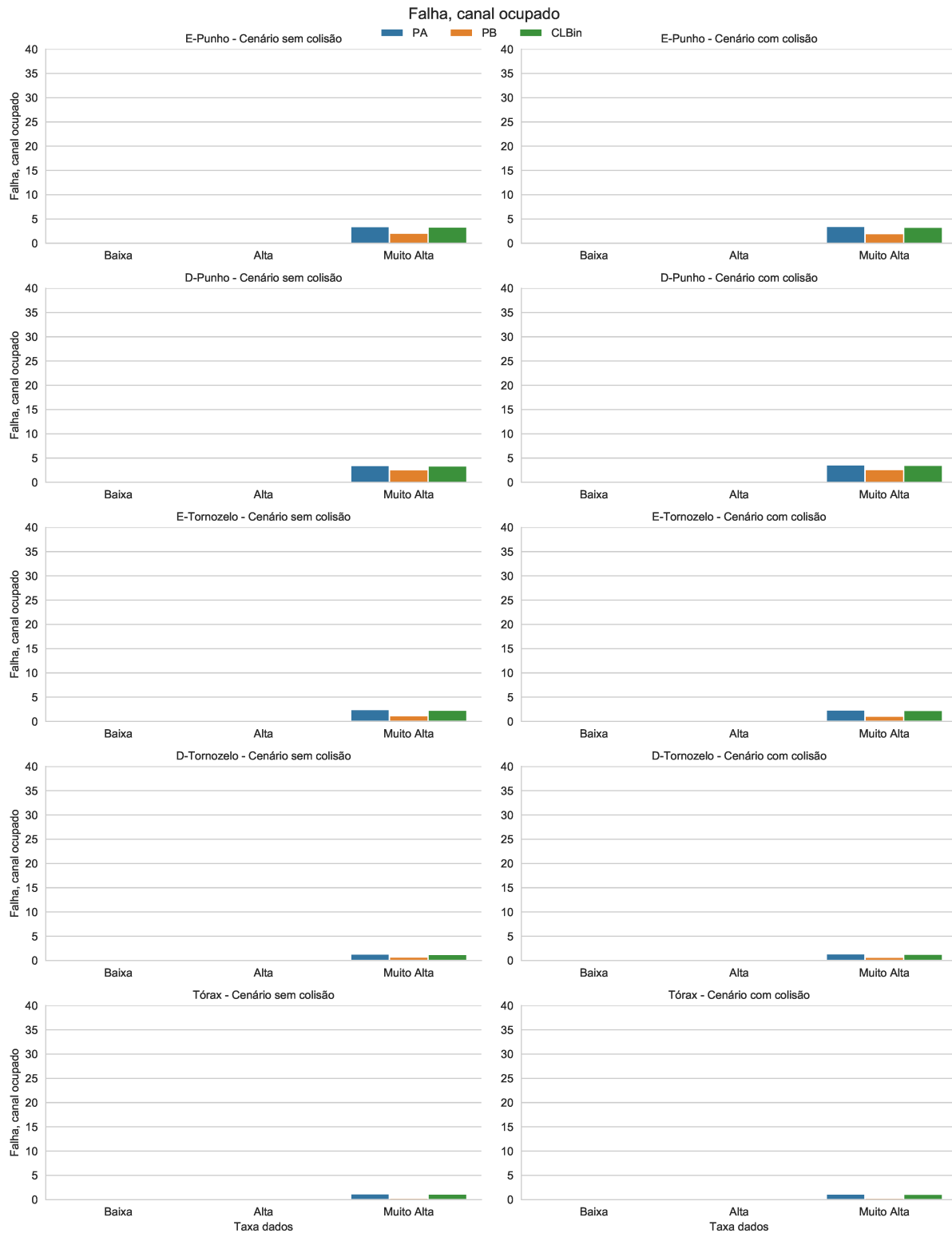


Figura 6.39: Falhas devido ao canal ocupado para as Taxas Muito Alta, Alta e Baixa.

CL-Bin é superado por PB em todos os nós com valores entre 1 e 16,7 nJ/bit.

A Figura 6.42(b) mostra o cenário com colisão e CL-Bin supera PA em todos os nós com valores entre 0,2 e 2 nJ/bit. CL-Bin é superado por PB em todos os nós, com valores entre 1 e 16,7 nJ/bit.

As figuras a seguir mostram as diferenças no tempo de vida da rede entre CL-Bin e PA e PB.

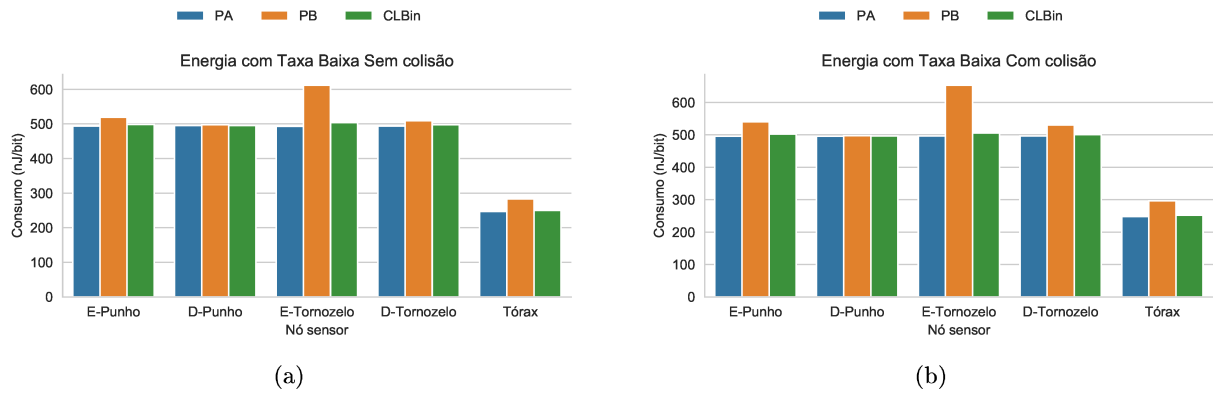


Figura 6.40: Eficiência energética da rede para a Taxa Baixa.

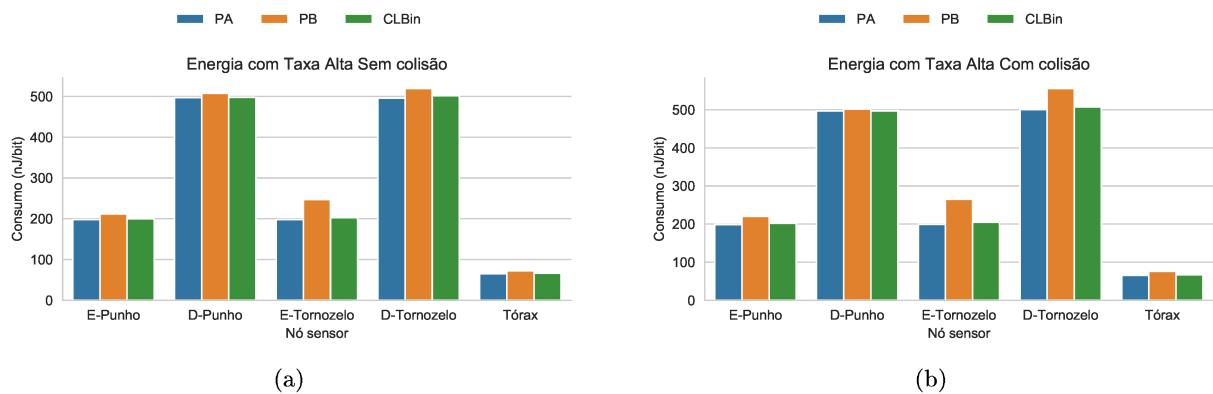


Figura 6.41: Eficiência energética da rede para a Taxa Alta.

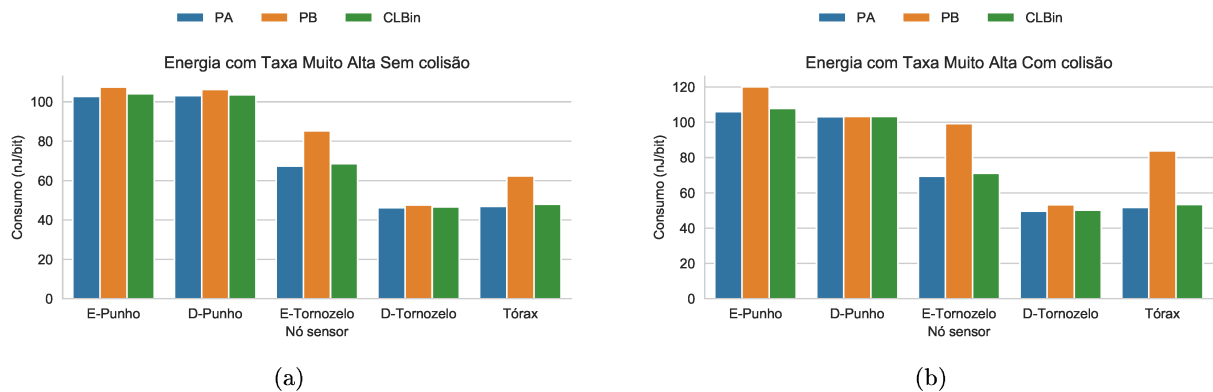


Figura 6.42: Eficiência energética para a Taxa Muito Alta.

A Figura 6.43 mostra o tempo de vida da rede em dias para a taxa baixa. Na Figura 6.43(a) é mostrado o cenário sem colisão e CL-Bin supera PA apenas no nó do tornozelo esquerdo em um dia e empata nos demais, mas é superado por PB nos demais nós, com valores de 37, 3, 25, 28 e 33 dias.

A Figura 6.43(b) mostra o tempo em dias com colisão e CL-Bin e PA empatam. CL-Bin é superado por PB em 35, 3, 20, 30 e 33 dias em todos os nós, respectivamente.

A Figura 6.44 mostra o tempo de vida da rede em taxa alta. Na Figura 6.44(a) é mostrado o

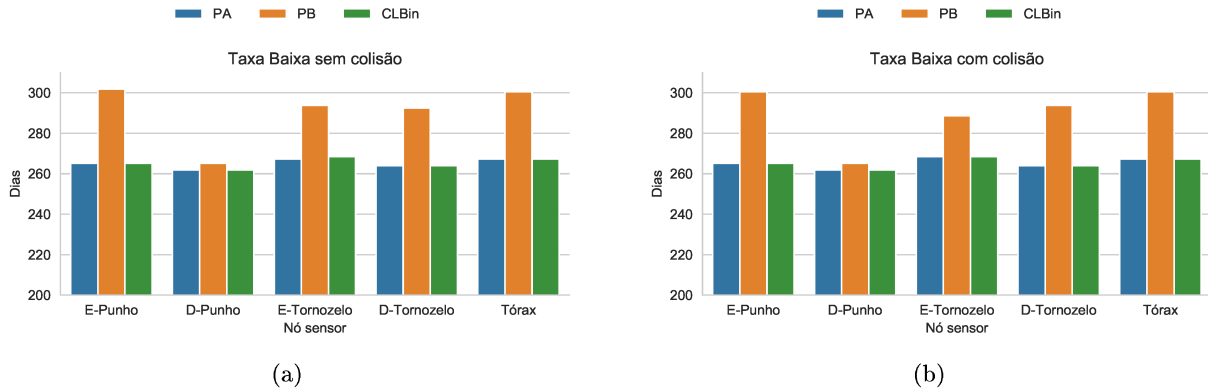


Figura 6.43: *Tempo de vida da rede para a Taxa Baixa.*

cenário sem colisão e CL-Bin supera PA em 1 dia apenas no nó do punho esquerdo, e empata nos demais nós. CL-Bin é superado por PB em todos os nós com valores de 34, 3, 23, 30 e 35 dias, respectivamente.

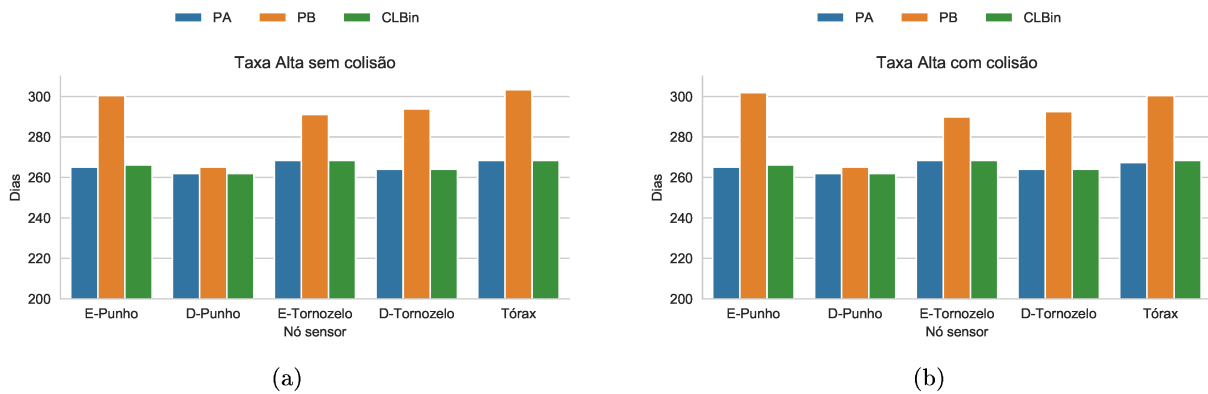


Figura 6.44: *Tempo de vida da rede para a Taxa Alta.*

Na Figura 6.44(b) é mostrado o cenário com colisão e CL-Bin empata com PA em todos os nós com exceção dos nós punho esquerdo e tórax, onde supera PA em 1 dia, mas é superado por PB em todos os nós com valores respectivos de 36, 3, 21, 28 e 32 dias.

A Figura 6.44(b) mostra o tempo de vida da rede com taxa mais alta. A Figura 6.45(a) mostra o cenário sem colisão. CL-Bin supera PA em 1 dia nos nós tornozelo esquerdo e tórax, e empata nos demais. CL-Bin é superado por PB novamente em todos os nós, com valores de 37, 3, 20, 30 e 35 dias, respectivamente.

A Figura 6.45(b) mostra o cenário com colisão onde CL-Bin supera PA no nó do tornozelo esquerdo em 1 dia e empata nos demais. CL-Bin é superado por PB em todos os nós com valores de 37, 3, 20, 30 e 35 dias, respectivamente.

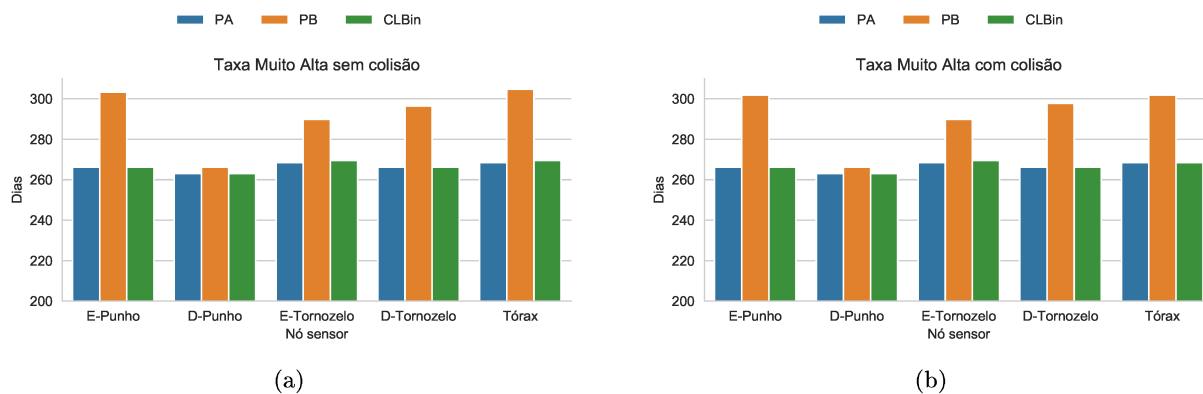


Figura 6.45: Tempo de vida da rede para a Taxa Muito Alta.

6.4.4 Considerações sobre CL-Bin

CL-Bin foi proposto baseado nas características de entrega de pacotes de PA, em que foram analisados os valores da PRR_MAC. A predição proposta por CL-Bin foi mais eficiente que PA no consumo devido ao seu algoritmo de troca de potências, mas obteve valores menores na entrega de pacotes. O comportamento de CL-Bin foi similar, porém abaixo, a PA e, portanto, as diferenças de ambos com PB foram próximas também.

CL-Bin mostra que é possível a predição do comportamento de características de uma WBAN considerando a potência de transmissão do rádio e a PRR, e pode ser uma alternativa ao cálculo em tempo real do estado do meio de comunicação. CL-Bin não foi baseada nos comportamentos de cada nó em relação aos seus valores da PRR_MAC, mas no comportamento médio dos resultados da PRR_MAC de toda a rede. O uso de uma média, e não de um valor específico para cada nó, pode ser a principal razão das perdas maiores na entrega de pacotes em relação a PA.

A hipótese de melhorar o desempenho da WBAN foi comprovada em CL-Bin em relação a PA no consumo de energia e do que PB na entrega de pacotes. Como o uso de CL-Bin ficou entre PA e PB, mas com eficiência próxima de PA no consumo de energia e do que PB em entrega de pacotes, o seu uso é viável. O compartilhamento de métrica foi utilizada na proposta de CL-Bin ao prever o comportamento de PA utilizando os valores da PRR_MAC. Através dos valores da PRR_MAC foi possível modelar a alteração da potência máxima de rádio utilizada por PA, que possui maior entrega de pacotes e menor tempo de vida da rede. CL-Bin obteve mais eficiência do que a PB na entrega de pacotes e maior eficiência de PA no tempo de vida da rede.

A hipótese de adaptação, através de métrica, dos nós sensores ao estado do meio de uma WBAN foi comprovada por CL-Bin com o estudo da PRR_MAC de PA. Os valores de CL-Bin no tempo de vida da rede foram melhores que PA, conforme mostram os resultados das Figuras 6.42, 6.41 e 6.40.

6.5 Adaptabilidade

Nos experimentos dos cenários sem colisão os nós sensores obtiveram a PRR_APP maior do que os cenários com colisão. Isso ocorreu porque no cenário sem colisão a probabilidade do sucesso no recebimento dos pacotes pelo *sink* é maior. A variação no sucesso e fracasso na entrega de pacotes ocorre nas WBANs devido a aspectos como mobilidade da rede, proximidade dos nós sensores ao corpo humano e de outras redes. Uma WBAN está sujeita a mudança de cenários que impactam em uma PRR_APP. Para diminuir esse impacto e manter a PRR_APP estável ou com a menor variação possível, a abordagem CL possibilita que a WBAN possa ajustar as configurações dos parâmetros das camadas dos seus nós sensores. Nesse trabalho o processo de ajuste de parâmetros é denominado adaptabilidade.

Adaptabilidade é a capacidade da WBAN de alterar dinamicamente os parâmetros de suas camadas para manter ou minimizar o impacto nos seus requisitos de QoS. Os resultados dos cenários sem e com colisão mostram esse impacto em relação à entrega de pacotes com as propostas simuladas.

Como o usuário da WBAN é um ser humano e devido a alterações dos ambientes ou das condições físicos do seu corpo, o tráfego de pacotes de envio e recebimento varia bastante, o que exige que a rede tenha boa adaptabilidade (Yuan *et al.*, 2019). Segundo Razzaque *et al.* (2014), a adaptabilidade é um requisito de QoS ao melhorar o desempenho de uma WBAN, o que é dificultado pela natureza dinâmica dos enlaces ou do canal sem fio. As mudanças no meio de transmissão podem afetar a QoS, entretanto uma WBAN pode prover mecanismos que diminuam o impacto em seus requisitos de qualidade, como na entrega de pacotes.

Esta seção têm como objetivo mostrar a adaptabilidade das propostas CL em relação às mudanças entre os cenários sem e com colisão. Para calcular a adaptabilidade foi criada a métrica *NA* (*Network Adaptability*) que é o resultado da subtração da média das PRR_APPS da rede no cenário sem colisão e da média das PRR_APPS no cenário com colisão, como mostra a equação 6.6.

$$NA_i^k = \overline{PRR_APP}_i^{sem} - \overline{PRR_APP}_i^{com} \quad (6.6)$$

Onde NA_i^k é um valor gerado para o nó sensor i da proposta k , $\overline{PRR_APP}_i^{sem}$ é a média do PRR_APP do nó i no cenário sem colisão, e $\overline{PRR_APP}_i^{com}$ é a média no cenário com colisão. O valor de *NA* é o resultado da perda média de pacotes em decorrência da mudança do cenário sem colisão e com colisão. Cada proposta k terá um valor de NA_i para um cenário com determinada taxa de dados. Quanto maior o valor de NA_i^k maior é o impacto decorrente dessa mudança, e quanto menor também menor será esse impacto. O resultado da equação 6.6 tem como objetivo mostrar qual

proposta tem a melhor adaptabilidade em relação a mudança de cenário.

A Figura 6.46 mostra os valores de NA para os nós da rede para Taxa Baixa. O aumento da taxa de dados impactou na variação entre as propostas CL para PA. Com exceção do nó punho direito que obteve valores menores no cenário com colisão, as propostas de CL foram superiores em sua maioria.

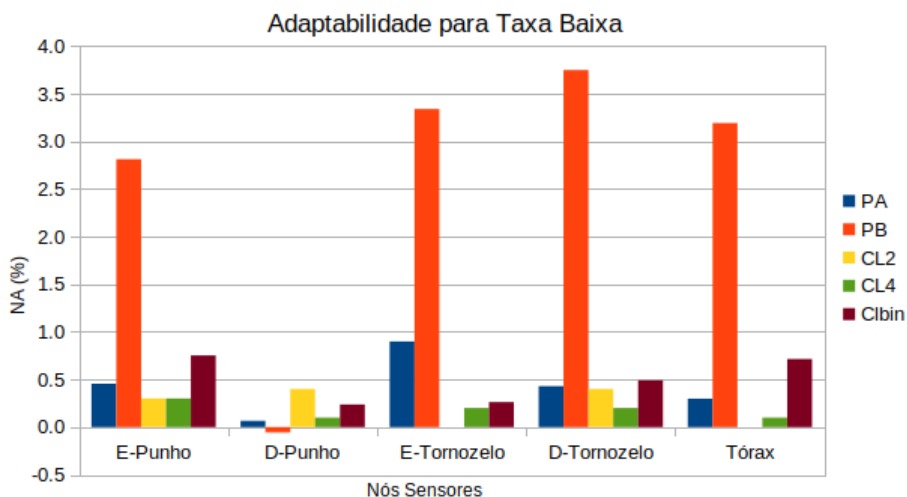


Figura 6.46: NA para Taxa Baixa.

Na Figura 6.46 CL4 supera PA em todos os nós, com exceção do nó punho direito, com valores de -0,15%, -0,7%, -0,23% e -0,2%, respectivamente; e CL2 supera PA em todos os nós, com exceção do nó punho direito, com valores de -0,15%, -0,9%, -0,03% e -0,3%. CL-Bin foi superior a PA apenas no nó tornozelo esquerdo com -0,64%, nos demais foi superado por PA com valores de 0,3%, 0,17%, 0,06% e 0,42%.

A Figura 6.47 os valores de NA para os nós da rede para Taxa Alta. Os valores da NA PB apresentam uma variação maior, em que o nó punho direito teve entrega de pacotes maior no cenário com colisão, com variação de -1,1%.

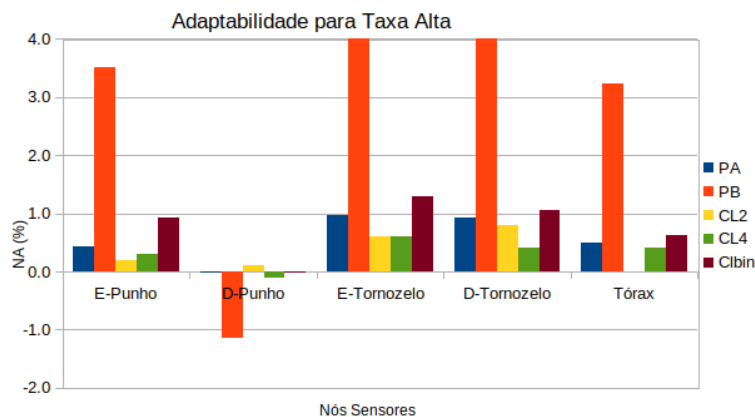


Figura 6.47: NA para Taxa Alta.

Na Figura 6.47 todos os nós punho direito obtiveram valores baixos de NA devido a baixa

atenuação da posição desse nó, e o impacto gerado pelo cenário com colisão em PB não foi suficiente para diminuir sua PRR_APP. Assim ocorreu com, em menor escala, os nós punho direito de CL4 e CL-Bin com -0,1% e -0,03%, respectivamente. Como os demais nós de PB tem atuação maior, os valores de NA no cenário com colisão mostram uma variação maior.

A Figura 6.47 mostra que as propostas CL2 e CL4 obtiveram variação menor que PA em todos os nós, com exceção do nó punho direito de CL2, o qual a atenuação da rede tem pouca influência. Por outro lado, no nó tórax, que tem atenuação maior que o nó punho direito, CL2 obteve NA igual a 0. A diferença de CL4 para PA é de -0,13%, -0,07%, -0,38%, -0,53% e -0,11% nos respectivos nós sensores. Esses valores indicam que a mudança entre o cenário sem e com colisão foi menos impactante nos resultados de CL2 e CL4 do que para PA. CL-Bin obteve NA maior do que PA, com diferenças nos nós de 0,5%, 0%, 0,3%, 0,13% e 0,12% respectivamente.

A Figura 6.48 mostra a variação da taxa de entrega de pacotes na Taxa Muito Alta. CL4 superou PA nos nós punhos esquerdo e direito e tornozelo esquerdo, com valores de -1,61%, -0,12% e -1,27%, e foi superado por PA nos nos tornozelo direito e tórax em 1,45% e 1,97%, respectivamente. CL2 superou PA em nós punho esquerdo, tornozelo esquerdo e tórax, com valores de -1,11%, -1,17% e -0,43% respectivamente. CL-Bin superou PA apenas no nó punho direito com -0,27%, e foi superado nos demais nós.

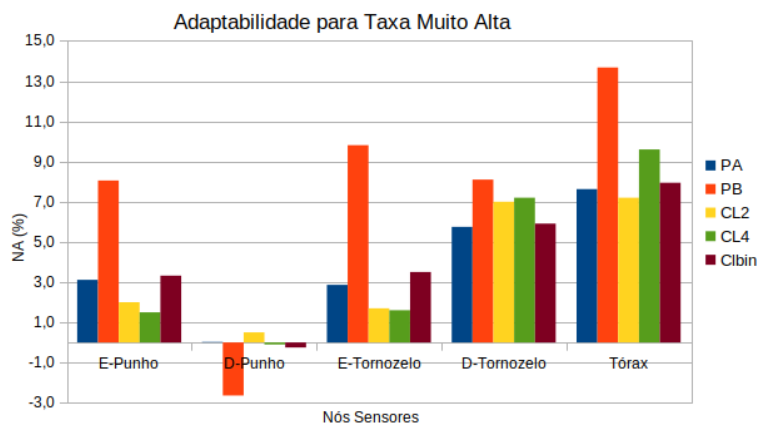


Figura 6.48: NA para Taxa Muito Alta.

As Figuras 6.46, 6.47 e 6.48 mostram que as propostas CL apresentam variações menores que PA e PB em relação a PRR_APP, e indica uma vantagem de *cross-layer* em relação aos padrões em camada.

6.6 Considerações

Neste capítulo as redes de PA e PB foram utilizadas como base para comparar as propostas de CL em entrega de pacotes (PA) e consumo de energia (PB). A potência máxima utilizada por PA foi impactante para melhorar a entrega de pacotes ao *sink* e a baixa potência de PB em prolongar o tempo de vida da rede. De forma contrária, PA tem tempo de vida baixo e PB entrega baixa de pacotes.

As propostas CL utilizaram PA e PB como limites inferior e superior, em que o objetivo foi analisar esses resultados, em relação à QoS, como a entrega de pacotes e no tempo de vida, respectivamente a PA e PB. As configurações de PA e PB são conflitantes, uma vez que o uso das potências máximas e mínimas quando impactam positivamente na entrega de pacotes diminuem o tempo de vida rede. As propostas CL desenvolvidas têm o objetivo de alcançar tanto a melhor entrega de pacotes quanto o maior tempo de vida.

A Tabela 6.1 compara os resultados alcançados pelas propostas de CL com PA e PB e relacionadas com as hipóteses desse trabalho.

Hipóteses	CL2	CL4	CL-Bin
Uso de <i>cross-layer</i> é mais eficiente do que a estrutura em camadas na entrega de pacotes ao <i>sink</i> em uma WBAN	Superou PB na PRR_APP e PRR_MAC mas foi inferior a PA.	Superou PA, na maioria dos nós, e PB, em todos os nós, na PRR_APP e PRR_MAC.	Supera a PRR_APP e PRR_MAC de PB e é superado por PA na PRR_APP e PRR_MAC.
Uso de <i>cross-layer</i> é mais eficiente do que a estrutura em camadas no consumo de energia em uma WBAN	Tempo de vida pior mas próximo de PA mas menos eficiente do que PB.	Superior a PA no tempo de vida e menos eficiente do que PB.	Superior a PA e menos eficiente do que PB.
Uso de <i>cross-layer</i> na adaptação de WBAN às mudanças no meio de comunicação em relação à estrutura em camadas	Superior a PB em todos os nós e cenários, e do que PA na maioria dos nós em todos os cenários.	Superior a PA e PB em todos os nós e cenários, com exceção dos nós tornozelo direito e tórax de PA na Taxa Muito Alta.	Superior a PB em todos os nós e cenários mas inferior a PA em todos os nós e cenários.

Tabela 6.1: Principais características de CL2, CL4 e CL-Bin em comparação com PA e PB.

A Figura 6.49 mostra as taxas PRR_APP, sem e com colisão, entre as propostas PA, PB, CL2, CL4 e CL-Bin. Observa-se que CL4 e PA têm os valores mais altos em todos os casos. CL4 é superado por PA apenas nos nós para a Taxa Muito Alta no nó tornozelo direito e tórax. No nó tórax a baixa potência de transmissão de PB é mais suscetível ao meio com colisão que as demais simulações. Esse nó apresenta a maior atenuação no enlace com o *sink*.

CL4 obteve resultados melhores por utilizar estratégias relacionadas tanto à PRR quanto à taxa de dados. Desse modo, os nós da rede foram melhor adaptados ao meio de comunicação. Essa

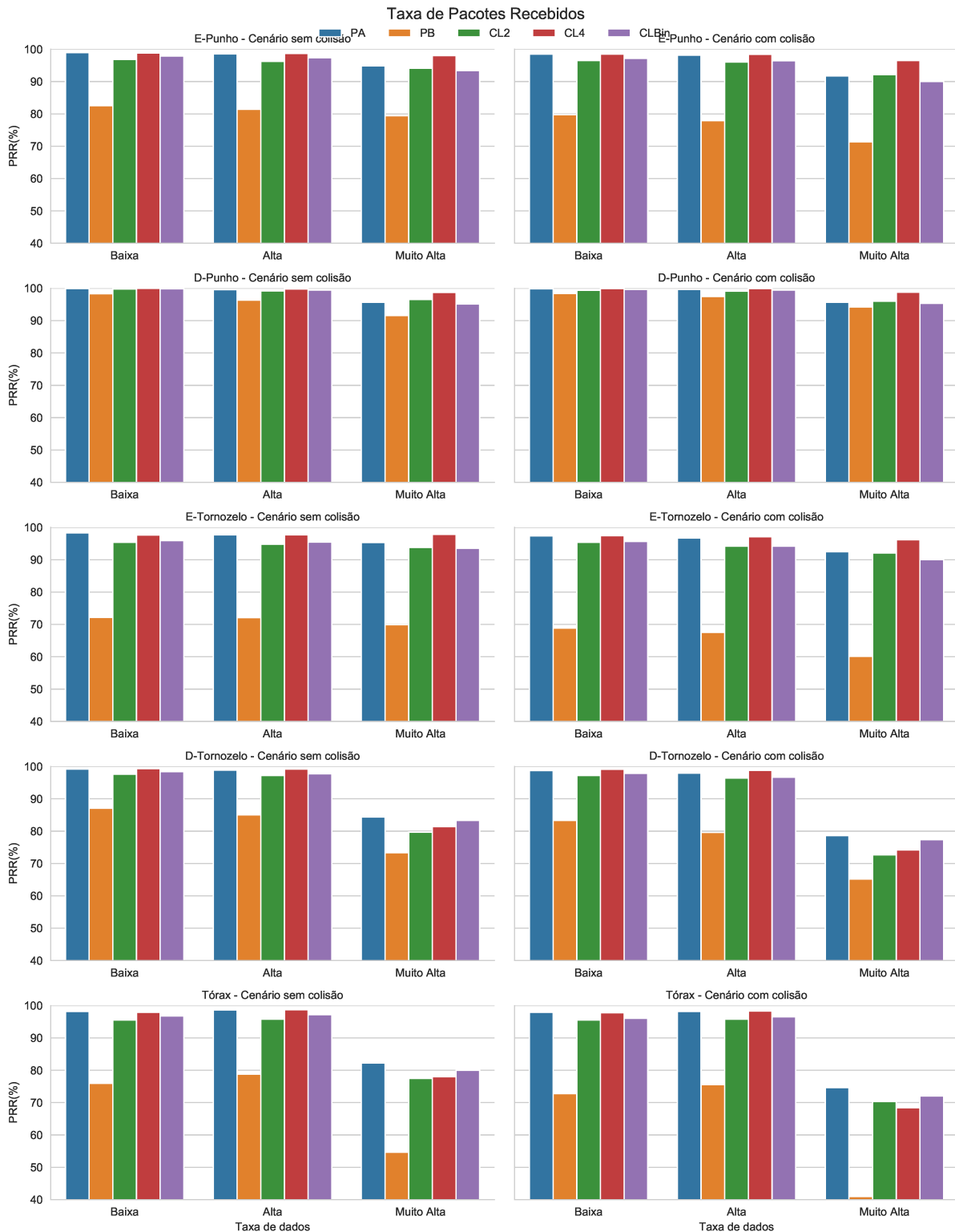


Figura 6.49: Pacotes recebidos entre APP com Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.

particularidade foi importante no desempenho maior em relação a PA nos nós punhos e tornozelo esquerdo.

A Figura 6.50 mostra a comparação para a taxa PRR_{MAC}. PA é próximo de CL-Bin mas supera as demais propostas. PA não tem alteração nas retransmissões, logo o número de pacotes

enviados pela camada MAC foi menor. PB obteve as menores taxas de entrega e no nó tórax apresentou maior sensibilidade ao cenário com colisão.

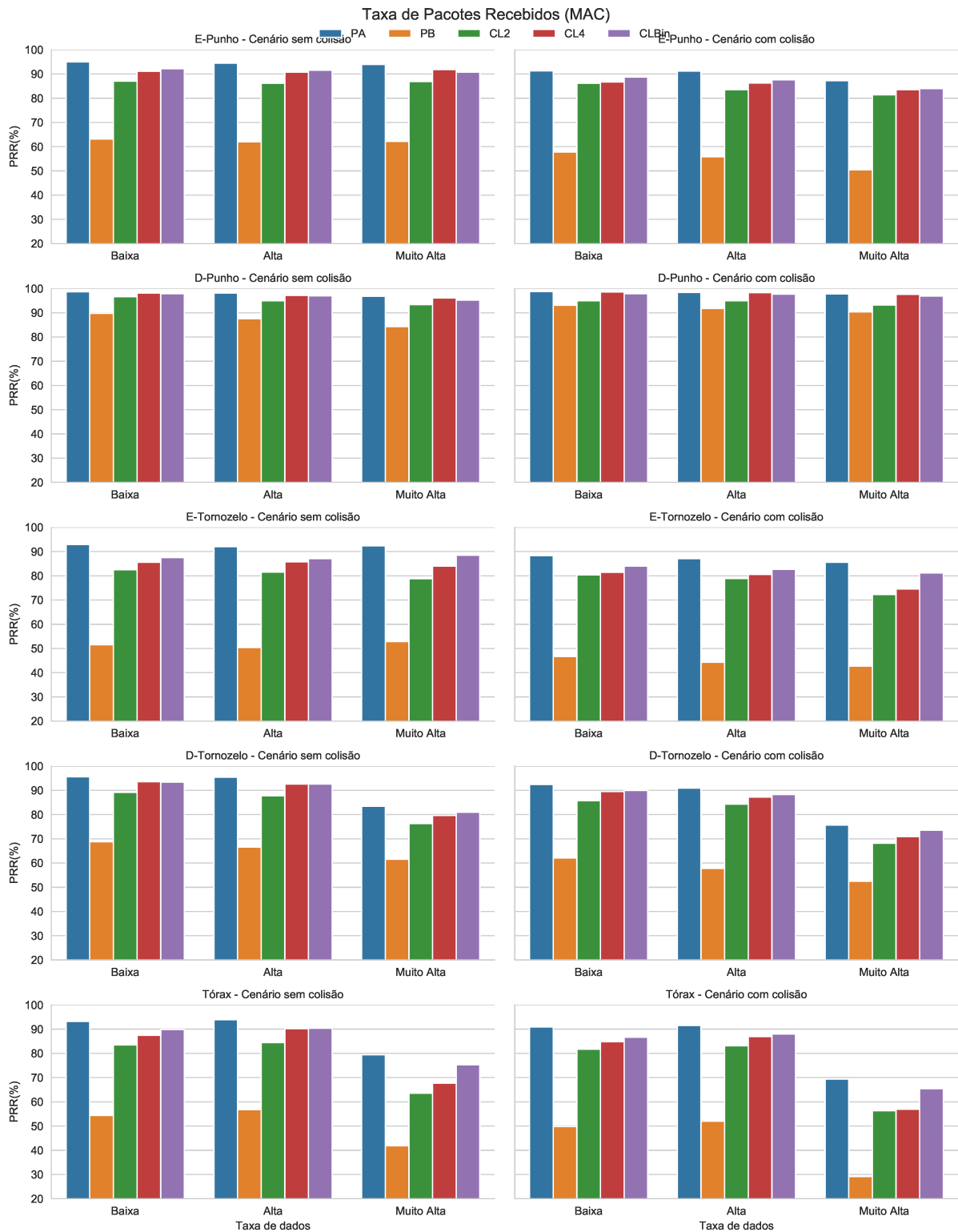


Figura 6.50: Comparação de pacotes recebidos entre camadas MAC com Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.

As propostas CL ficaram bem acima de PB e próximas a PA. Uma WBAN pode transitar em diferentes ambientes com problemas que impactam mais ou menos na entrega de pacotes. A

possibilidade de alterar a potência de transmissão e o número de retransmissões de pacotes de uma WBAN, em tempo real, pode diminuir esses impactos negativos. A impossibilidade de alterar as características de PA e PB tornam suas redes mais suscetíveis a problemas de variação do canal.

A Figura 6.51 mostra as falhas no envio de pacotes decorrentes da ocupação do canal. Observa-se que as falhas ocorreram somente na Taxa Muito Alta. CL4 e CL2 tiveram as menores perdas e CL-Bin ficou próximo de PA e acima de PB.

A Figura 6.52 mostra as falhas decorrentes do estouro de *buffer*. Observa-se que as falhas ocorreram somente na Taxa Muito Alta e foram nos nós que possuem a maior taxa de dados, tornozelos esquerdo e direito e tórax. Esses nós têm a taxa de dados acima do limite teórico do canal, o que ocasionou o uso e a quantidade maior de falha no envio de pacotes devido ao *buffer*.

Como mostra a Figura 6.52, CL4 e CL2 obtiveram perdas maiores, que todas as simulações, somente no nó tornozelo direito. No nó tórax CL4 e CL2 obtiveram perdas menores do que PB, mas perdas maiores que PA e CL-Bin. CL-Bin foi próxima de PA nos nós tornozelo direito e tórax.

A Figura 6.53 mostra a perda de pacotes decorrente do não recebimento do ACK. Observa-se que como PB obteve baixa entrega de pacotes, suas falhas devido ao não recebimento de ACK foram elevadas. Os nós com melhor taxa de entrega, próximas ao limite teórico do canal, como no nó punho direito, tem as taxas menores de falhas devido ao não recebimento do ACK.

CL4 obteve valores menores que PA em quase todos os nós. CL2 e CL-Bin foram superados por PA mas superaram PB em todos os nós.

A Figura 6.54 mostra a eficiência energética para o envio de um bit (nJ/bit). PB obteve melhor eficiência energética do que todos os demais, uma vez que usava a potência mínima do rádio. PB tem a taxa mais baixa de entrega de pacotes.

A Figura 6.55 mostra o tempo de vida da rede. PB tem o tempo de vida mais longo e as demais propostas têm valores muito próximos entre si.

A Figura 6.55 mostra que o nó punho direito foi o que obteve melhor entrega de pacotes entre todas as propostas, e por isso, consumiu mais energia e o tempo de vida de PB ficou próximo às demais. A maior entrega de pacotes tem impacto no consumo de energia e as propostas CL ficaram próximas e algumas acima de PA.

A Tabela 6.2 compara os resultados alcançados pelas propostas de CL e relacionadas com as hipóteses desse trabalho. CL4 foi superior a CL2 e CL-Bin na PRR_APP e PRR_MAC nos cenários com taxa Muito Alta, em que considera a taxa de dados dos nós sensores para elaborar sua estratégia. CL2 foi mais eficiente no consumo de energia do que CL4 e CL-Bin, uma vez que sua estratégia foi a mudança na potência de transmissão no nível máximo e mínimo do rádio. CL-Bin foi superado por

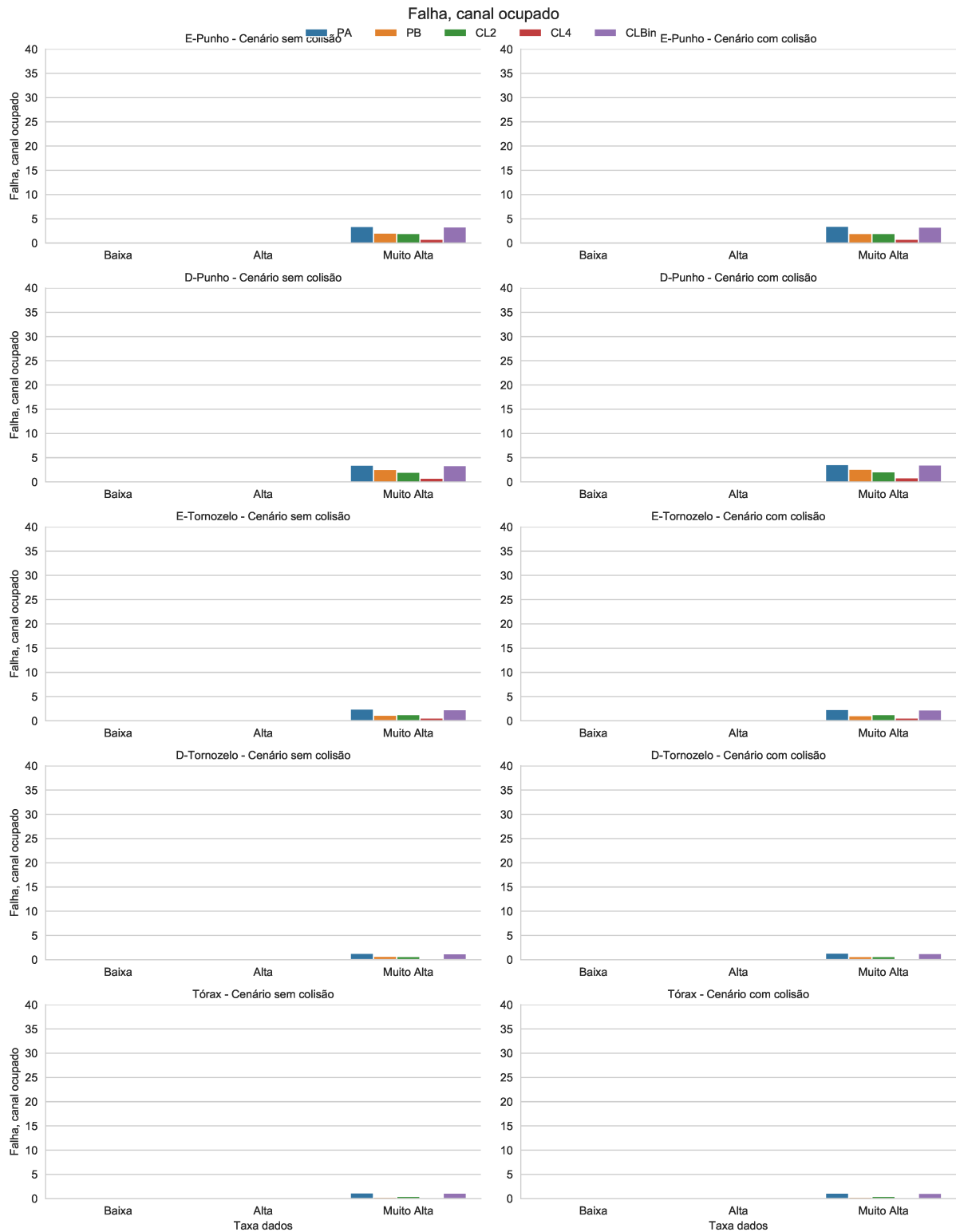


Figura 6.51: Falhas de envio de pacotes devido ao canal ocupado.

CL4 e CL2 na maioria dos cenários, e isso é justificado pela estratégia de predição de PA.

Os resultados deste capítulo mostraram que as propostas de CL foram mais eficientes que PB em relação a entrega de pacotes em todos os cenários. Com PA CL4 foi mais eficiente na maioria dos cenários quanto a entrega de pacotes. CL2 e CL-Bin ficaram abaixo e mais próximos às taxas

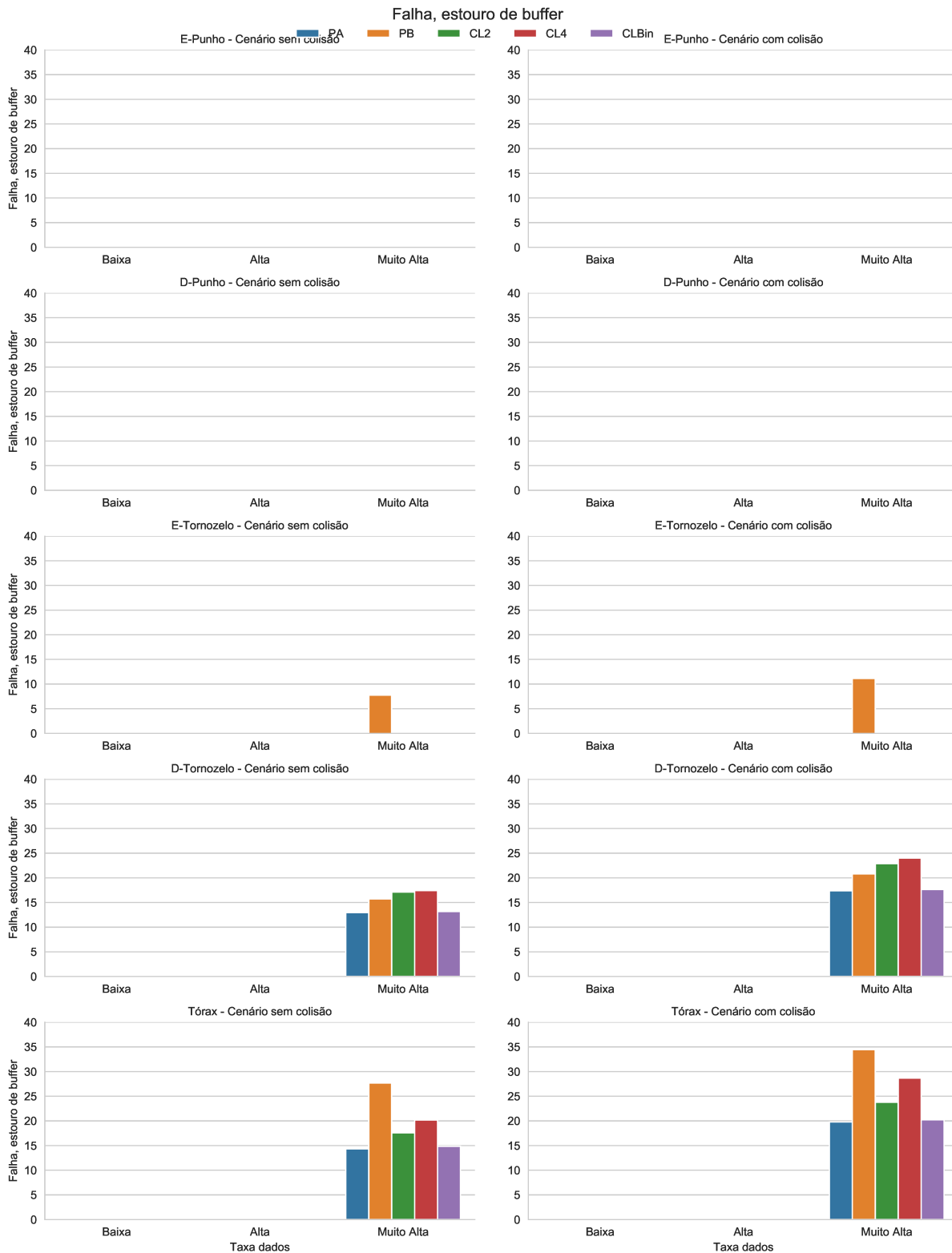


Figura 6.52: Falhas de envio de pacotes devido ao estouro de buffer.

de entrega de pacotes de PA. O compartilhamento entre as camadas das PRR para a alteração da potência do rádio viabilizou esses resultados. É possível considerar que a primeira hipótese foi comprovada, em que é verdadeiro que o uso de *cross-layer* é mais eficiente que a estrutura de em camadas para a entrega de pacotes ao *sink* nas WBANs desses cenários.



Figura 6.53: Falhas devido ao não recebimento do ACK.

As propostas de CL foram superior a PA na maioria dos cenários no consumo de energia, e foram superadas por PB em todos os cenários. O uso de *cross-layer* mostrou eficiência nos cenários com maior taxa de dados em relação à estrutura padrão. O consumo de energia de PB é proporcional a baixa entrega de pacotes, o que não o torna eficiente. Se por um lado as propostas CL não

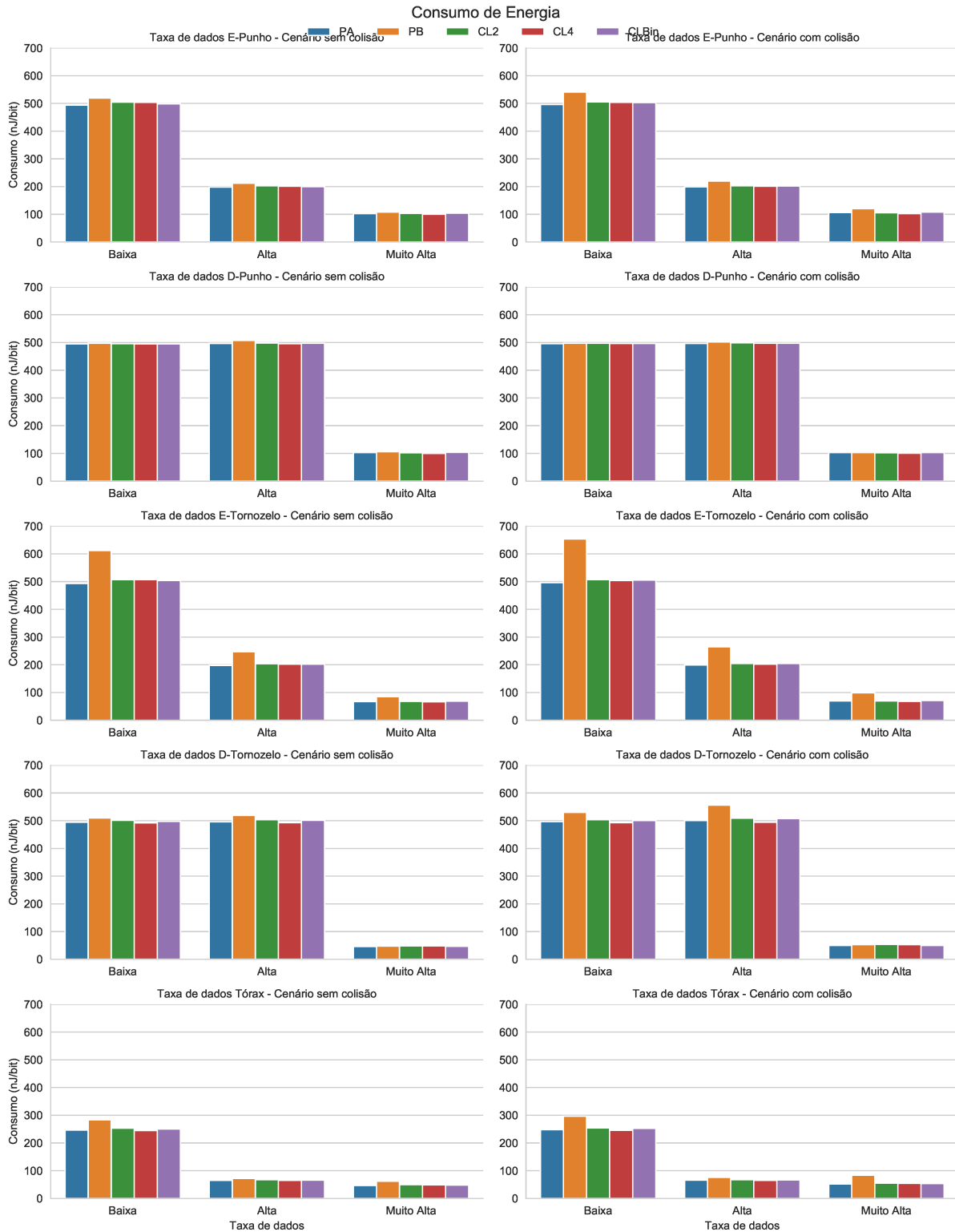


Figura 6.54: Eficiência energética para as Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.

obtiveram os melhores tempos de vida da rede do que PB, por outro foram superiores a PB em todos os cenários na entrega de pacotes. A mudança na potência de transmissão entre as camadas APP e Física tornaram viáveis a redução no consumo de energia. É possível afirmar que o uso de *cross-layer* é mais eficiente do que a estrutura em camadas em relação a eficiência energética nas

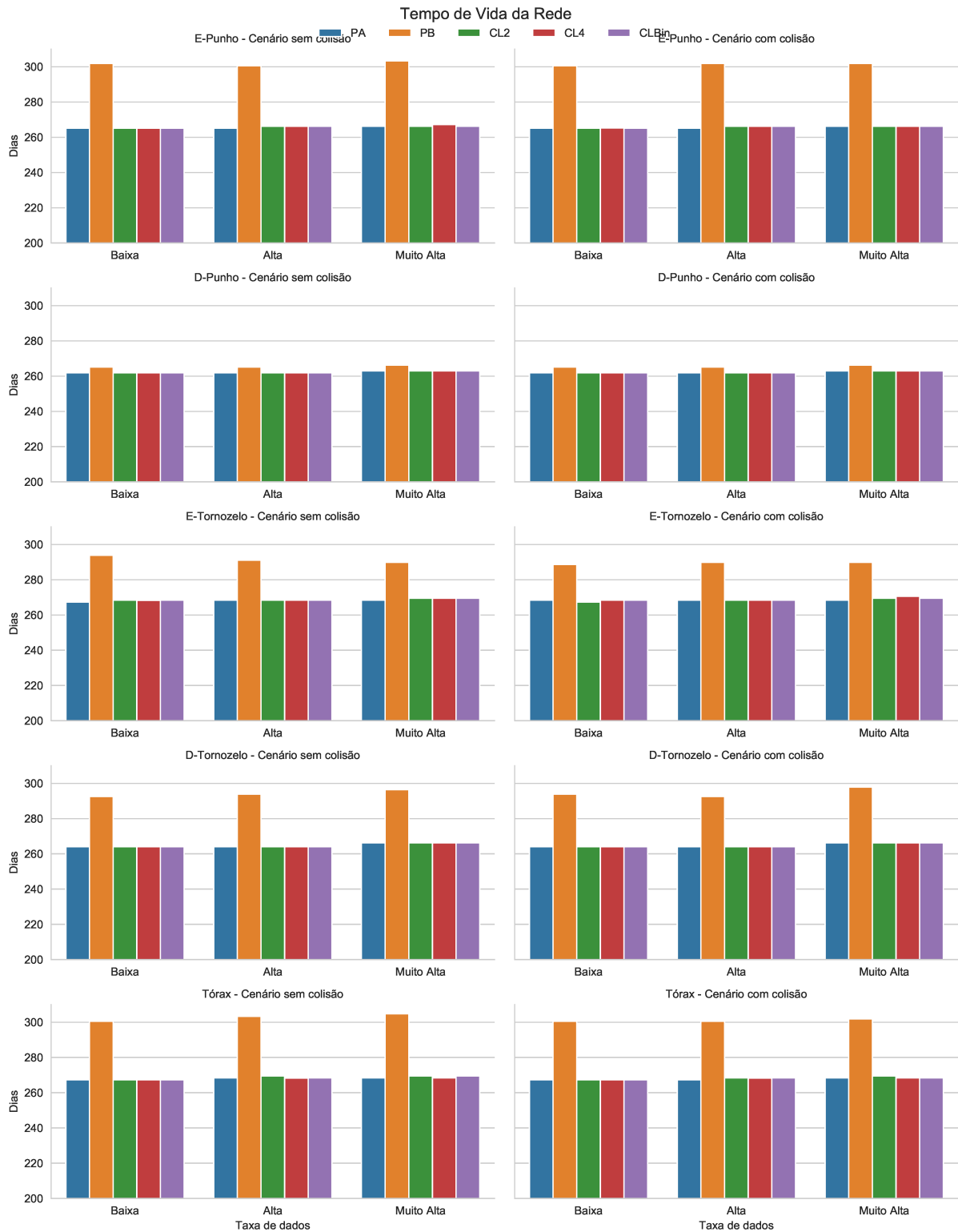


Figura 6.55: Tempo de vida para as Taxas Baixa, Alta e Muito Alta.

WBANs, nos cenários apresentados, quando utilizado a potência mais alta.

Na seção 6.5 foi mostrado que as propostas CL têm mais adaptabilidade para as PRR_APPS que PA e PB em relação às mudanças de cenários. Com isso, é possível garantir baixa oscilação na entrega de pacotes ao *sink*. Essa adaptabilidade foi viável pelo compartilhamento da PRR para ser

Hipóteses	CL2	CL4	CL-Bin
Uso de <i>cross-layer</i> é mais eficiente do que a estrutura em camadas na entrega de pacotes ao <i>sink</i> em uma WBAN	Foi inferior a CL4 e CL-Bin na PRR_APP e PRR_MAC. Superou CL-Bin apenas na Taxa Muito Alta e na PRR_APP nos nós punhos esquerdo e direito e tornozelo esquerdo.	Superou CL2 e CL-Bin na PRR_APP em todos os cenários, com exceção dos nós tornozelo direito e tórax na Taxa Muito Alta. Superou CL2 em todos os cenários da PRR_MAC. Não superou CL-Bin na PRR_MAC nos nós: tornozelo esquerdo em todas as taxas, tornozelo direito nas taxas Alta e Muito Alta e tórax em todas as taxas.	Superou CL2 e CL4 na PRR_APP nos nós tornozelo direito e tórax para a Taxa Muito Alta e foi superado nos demais. Superou CL2 e CL4 na PRR_MAC em todos os nós, com exceção do nó punho direito.
Uso de <i>cross-layer</i> é mais eficiente do que a estrutura em camadas no consumo de energia em uma WBAN	Foi mais eficiente que CL4 e CL-Bin em todos os cenários no consumo de energia. Superou o tempo de vida da rede de CL4 e CL-Bin no nó tórax em todas as taxas mas foi inferior nos demais.	Superou CL-Bin no tempo de vida nos nós punho esquerdo e tornozelo esquerdo para a Taxa Baixa. Superou CL2 nos nós tornozelo esquerdo e punho direito. O consumo de energia no envio de bit CL2 e CL-Bin foram mais eficientes.	Não superou CL2 e CL4 no tempo de vida da rede. Foi mais eficiente que CL4 no consumo de energia por bit, mas foi superado por CL2 .
Uso de <i>cross-layer</i> na adaptação de WBAN às mudanças no meio de comunicação em relação à estrutura em camadas	Superior apenas na maioria dos nós para Taxa Alta do que CL4 e CL-Bin	Superior na maioria dos nós para as Taxas Baixa e Muito Alta do que CL2 e CL-Bin , e superado apenas por CL-Bin na Taxa Alta.	Superior apenas no nó tornozelo direito para Taxa Muito Alta e superado nos demais nós e cenários.

Tabela 6.2: Comparação entre CL2 , CL4 e CL-Bin .

utilizado como métrica para alterar a potência do rádio. É possível afirmar que o uso de *cross-layer* é mais adaptável ao meio de transmissão de uma WBAN do que essa rede utilizando uma estrutura em camadas.

As vantagens no uso das propostas de CL em relação a PA, com a potência mais alta do rádio, são os melhores resultados na entrega de pacotes nos nós dos punhos e tornozelo direito. Os nós que CL foi menor que PA são os que tinham a taxa de dados muito acima do limite teórico do canal. No entanto, CL teve o tempo de vida superior, ainda que próximo, a PA. Como PA e PB são os limites utilizados, superior para entrega de pacotes e superior para tempo de vida da rede respectivamente, para as comparações, foi mostrado que as propostas CL ficaram na maioria das vezes próximas ou superiores a PA na entrega de pacotes e tempo de vida, e sempre superior a PB na entrega de pacotes mas inferior no tempo de vida da rede em todos os nós. O custo para a melhor entrega de pacotes de CL foi a perda no tempo de vida da rede para PB.

A mudança dos cenários sem e com interferência tem impacto na entrega de pacotes, mas foi

mostrado que as propostas CL obtiveram variação menor entre esses cenários. Esse comportamento indica que CL tem maior adaptabilidade do que PA e PB. CL mantém valores próximos de entrega de pacotes nos cenários sem e com colisão, e isso indica que a variação no meio de comunicação afeta menos CL, que tem uma proposta dinâmica de comportamento, do que PA e PB, que tem comportamentos estáticos. CL4 obteve perdas maiores que PA em 6,6% e 9% no cenário com colisão nos nós tornozelo direito e tórax, e em 5% e 6% no cenário sem colisão nos mesmos nós. Como CL4 têm mais retransmissões de pacotes do que PA e PB as suas falhas devido ao estouro de *buffer* foram impactadas.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma abordagem *cross-layer* para WBAN com o objetivo de aprimorar sua eficiência em relação a uma WBAN convencional estruturada em camadas. O desenvolvimento foi realizado com a sua implementação através de três experimentos denominados CL2 , CL4 e CL-Bin , que foram simulados no simulador Castalia e seus resultados foram analisados em relação à quantidade de pacotes entregues ao *sink* e ao consumo de energia.

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com duas redes WBANs denominadas PA e PB que caracterizaram, respectivamente, uma rede com alta entrega de pacotes e alto consumo de energia e uma rede com baixa entrega de pacote e baixo consumo de energia. Portanto, enquanto PA apresenta como ponto forte a confiabilidade, PB apresenta maior tempo de vida da rede.

CL2 foi implementado através da comparação do compartilhamento do valor da PRR_MAC com um limiar que define o valor da potência de transmissão como alta (PA) ou baixa (PB). Além da PRR_MAC, CL2 alterou a quantidade de transmissão de pacotes de acordo com a prioridade dos mesmos. Nos cenários com taxa de dados Baixa, Alta e Muito Alta os valores de CL2 obtiveram resultados melhores no consumo de energia em relação a PA e superiores na entrega de pacotes do que PB. Apenas no cenário com taxa Muito Alta os valores de entrega de pacotes de CL2 foram superiores em dois dos cinco nós de PA, e nos demais cenários os valores dos demais nós ficaram abaixo, mas com diferença máxima de 3%.

Com relação a PB, os valores de entrega de pacotes foram superiores em todos os cenários para todos os nós. CL2 corrobora com a hipótese de que a abordagem CL é mais eficiente, nos cenários apresentados, que uma WBAN com estrutura de camadas. Isso é considerado ao verificar que seu desempenho foi comparado com os limites de entrega de pacotes e de consumo de energia, e CL2 apresentou quando não os superou, ficou próximo desses limites. A possibilidade de alteração de

potência, utilizando *cross-layer*, contribui para a adaptabilidade de CL2 em relação a PA e PB, o que corrobora para a terceira hipótese.

CL4 foi implementado considerando quatro valores de potências de transmissão, e alterando o número de retransmissão de pacotes. CL4 foi superior a entrega de pacotes na maioria dos nós em relação a PA, em que as diferenças ficaram entre em uma média de 1% nas taxas Baixa e Alta e em 4,5% na taxa Muito Alta. CL4 superou PB e em todos os nós e em todos os cenários. CL4 teve mais eficiência energética do que PA em todos os nós, mas foi superado por PB também em todos os nós. O uso de mais potências de transmissão como estratégia contribuiu para a melhor adaptabilidade de CL4 em relação a PA e PB ao considerar as mudanças de cenários de taxas Baixa, Alta e muito Alta. Os resultados de CL4 corroboram para as hipóteses de eficiência na entrega de pacotes, consumo de energia e adaptabilidade em relação aos valores de PA e PB que utilizaram estrutura em camadas.

CL-Bin define de forma preditiva a potência de Tx para o próximo pacote através de uma função Binomial que foi baseada no comportamento dos valores de entrega de pacotes de PA. Os resultados de CL-Bin ficaram próximos a PA, ainda que inferiores, em relação a entrega de pacotes, mas superiores no consumo de energia. CL-Bin teve seus valores superiores a PB na entrega de pacotes mas não no consumo de energia. Como CL-Bin foi superior a PA no consumo de energia e superior a PB na entrega de pacotes, a hipótese de eficiência é corroborada mas não em relação à adaptabilidade, em que seus valores não obtiveram valores melhores em relação aos nós de PA, mas apenas aos nós de PB.

A abordagem *cross-layer* através do compartilhamento de informações entre camadas pode tornar uma WBAN mais eficiente em relação a uma implementação convencional, com estrutura de camadas. O meio de transmissão de uma WBAN tem influência maior na QoS, como confiabilidade e tempo de vida da rede, devido principalmente a mobilidade do usuário, que altera a topologia da rede e aumenta a probabilidade na ocorrência de interferências causadas pela proximidade dos dispositivos ao corpo ou a presença de outras redes com frequências próximas. A abordagem *cross-layer* se apresenta como uma alternativa para diminuir esses problemas nas WBANs e contribuir para garantir um nível de QoS diante da imprevisibilidade do meio de transmissão dessas redes.

7.1 Trabalhos Futuros

Sugere-se a comparação as propostas de CL usando o padrão IEEE 802.15.6, que também é implementado parcialmente pelo Castalia, e como mostrado no capítulo 3 é muito utilizado nos trabalhos da literatura. A comparação com o IEEE 802.15.6 pode ser interessante principalmente

para analisar o comportamento da camada MAC em relação ao CL que é baseado no IEEE 802.15.4. O estudo de revisão realizado no capítulo 3 mostra várias métricas que podem ser compartilhadas entre camadas e contribuir para otimizar os resultados mostrados no capítulo 6, como a latência, que é calculada no Castalia, *delay* e tamanho dos pacotes, que podem ter relações com a QoS e medições, como ECG e EEG.

O uso de outros rádios também é sugerido, uma vez que o Castalia tem o CC2420 que também é referenciado em vários trabalhos na literatura. O BANRadio, utilizado neste trabalho, e o CC2420 têm características diferentes, como a potência de transmissão e o consumo de energia. Nesse caso, poderia ser utilizado a comparação tanto com o IEEE 802.15.4 quanto o IEEE 802.15.6. Os resultados podem mostrar se as estratégias de CL ainda são pertinentes com rádios diferentes do que foi mostrado aqui.

Neste trabalho o CL foi implementado apenas nos nós sensores e não no *sink*. Foi observado que houve falhas na entrega de pacotes devido ao não recebimento do ACK. As atividades de gerenciamento da rede pelo *sink*, como o envio dos *beacons*, pode ser afetada também com a alteração da potência. O *sink* define a estrutura do *superframe*, e o compartilhamento da PRR, adaptada ao *sink*, pode ser utilizada para determinar os valores de formação dessa estrutura, como o tamanho do tempo de contenção.

O ciclo de trabalho (*duty cycle*) dos nós sensores pode ser analisado para economizar energia. Como o CL propõe o uso de métricas em tempo real, é possível diminuir ou aumentar o ciclo de trabalho do nó sensor baseado em estimativas. A relação da PRR e a porcentagem do ciclo de trabalho podem ser estudadas para verificar se, ao serem relacionadas, é possível diminuir o consumo de energia sem impactar na entrega de pacotes.

Nas simulações foi verificado que o uso das WBANs em taxas de dados muito acima do limite teórico do canal houve muitas perdas devido ao *buffer*. Um trabalho futuro pode ser explorado criando uma métrica que mostra qual a taxa de uso do *buffer*. Esse valor pode ser utilizado, quando possível, para diminuir a taxa de dados enviados para a camada MAC, uma vez que a probabilidade de perda desses pacotes é muito alta. Outro estudo que pode ser realizado é analisar se existe relação entre a taxa de uso do *buffer* com o número de retransmissão de pacotes.

As falhas de entrega de pacotes decorrentes do canal ocupado podem ser analisadas utilizando o CL para adaptar ou alterar o algoritmo CSMA/CA. Ao aumentar o tempo de *backoff* baseado nas métricas do respectivo nó sensor pode ser impactante no acesso ao meio de comunicação, uma vez que a probabilidade de sucesso pode ser maximizada. O trabalho de Shimly *et al.* (2018) tem como proposta a alteração do CSMA/CA, utilizando *cross-layer*, para melhorar o roteamento nas

WBANs, mas não compara métricas como entrega de pacotes para tanto.

Como mostrado no capítulo 3 são encontrados vários trabalhos na literatura sobre roteamento em WBAN. A arquitetura proposta neste trabalho pode ser expandida com a implementação de um novo fluxo que poderá compartilhar dados entre a camada de rede e a PHY. O fluxo pode compartilhar métricas como o RSSI ou LQI para estabelecer as melhores rotas para o encaminhamento de pacotes.

As propostas CL podem ser comparadas com simulações mais dinâmicas, como uma implementação de IEEE 802.15.4 que altere aleatoriamente as potências de transmissão. Nesse cenário, será possível determinar com mais precisão qual o impacto da estratégia utilizada pelas propostas de CL com uma solução não estática. Os resultados da comparação entre essas simulações podem reforçar as estratégias de CL embasadas em suas métricas propostas.

CL2 não apresentou melhoras na entrega de pacotes em relação a PA. Essa limitação pode ser melhorada ao aprofundar quais as melhores taxas de entrega para os diversos sensores fisiológicos, como temperatura, movimento e batimento cardíaco. Ao determinar quais os valores de pacotes entregues que indicam a qualidade mínima para esses nós, CL2 pode ser personalizada para o nós que utilizam esses sensores. Neste trabalho, CL2 utilizou um valor fixo para toda a WBAN o que pode ter sido determinante para que PA o superasse na entrega de pacotes.

CL4 foi mais eficiente que PA no consumo de energia, em todos os nós, e na entrega de pacotes, com exceção dos nós tornozelo esquerdo e tórax. Essa limitação pode ser pesquisada adicionando novas métricas para determinar qual a potência de transmissão e o número de retransmissão, como o RSSI adquirido do ACK recebido pelo *sink*. O valor do RSSI, como uma amostra da condição do meio de comunicação, pode indicar que o aumento da potência do rádio terá probabilidade baixa de sucesso na entrega de pacotes.

Outras distribuições podem ser pesquisadas e comparadas com CL-Bin, assim como analisar personalizar parâmetros ou técnicas aleatórias para avaliar o impacto no desempenho de uma WBAN. Neste estudo foi estabelecido o mesmo parâmetro p para a alteração da potência em todos os nós, logo, poderiam ser pesquisadas técnicas que estimassem este parâmetro individualmente para cada nó sensor, ao personalizar a amostragem da *PRR*.

A estratégia adota em CL-Bin foi baseada em uma variável aleatória e, portanto, não utilizou informações intrínsecas que possam comprovar o estado do meio físico de transmissão. Se por um lado a alteração da potência de transmissão contribui para melhorar o recebimento de pacotes, por outro é prejudicada com o aumento da quantidade de retransmissões. Foi descrito a *PRR* como parâmetro único entre a camada MAC e Aplicação para determinar os pacotes recebidos pelo nó *sink*.

Os valores de hardware RSSI e LQI (*Link Quality Indicator*) representam o estado do meio de acesso compartilhado e também podem colaborar para a respectiva adaptação do nó sensor, em conjunto com a PRR_MAC. A comparação com outros trabalhos, assim como o padrão IEEE 802.15.6, que tem uma proposta específica para WBANs, devem ser realizados para delinear o escopo no controle de potência e da CL .

Referências Bibliográficas

- 802.15.1(2005)** Standard IEEE 802.15.1. Ieee standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirements. - part 15.1: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for wireless personal area networks (wpans). IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002), páginas 01–580. doi: 10.1109/IEEESTD.2005.96290. Citado na pág. [3](#)
- 802.15.4(2011)** Standard IEEE 802.15.4. Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), páginas 1–314. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487. Citado na pág. [xi](#), [3](#), [52](#), [53](#)
- 802.15.6(2012)** Standard IEEE 802.15.6. Ieee standard for local and metropolitan area networks - part 15.6: Wireless body area networks. IEEE Std 802.15.6-2012, páginas 1–271. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6161600. Citado na pág. [3](#)
- Ababneh et al.(2015)** Nedal Ababneh, Nicholas Timmons e Jim Morrison. A cross-layer qos-aware optimization protocol for guaranteed data streaming over wireless body area networks. Telecommunication Systems, 58(2):179–191. ISSN 1572-9451. doi: 10.1007/s11235-014-9901-8. Citado na pág. [40](#), [45](#)
- Abbasi et al.(2014)** U. F. Abbasi, A. Awang e N. H. Hamid. A cross-layer opportunistic mac/routing protocol to improve reliability in wban. Em The 20th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2014), páginas 36–41. doi: 10.1109/APCC.2014.7091601. Citado na pág. [38](#), [45](#)
- Ahmed et al.(2015)** A. Sarfaraz Ahmed, T. Senthil Kumaran, S. Syed Abdul Syed e S. Subburam. Cross-layer design approach for power control in mobile ad hoc networks. Egyptian Informatics Journal, 16(1):1 – 7. ISSN 1110-8665. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2014.11.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866514000358>. Citado na pág. [40](#), [46](#)
- Akyildiz e Vuran(2010)** Ian Akyildiz e Mehmet Can Vuran. Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA. ISBN 047003601X, 9780470036013. Citado na pág. [xi](#), [7](#), [8](#), [20](#), [21](#), [26](#), [65](#)
- Ameen et al.(2008)** M. A. Ameen, A. Nessa e K. S. Kwak. Qos issues with focus on wireless body area networks. Em 2008 Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, volume 1, páginas 801–807. doi: 10.1109/ICCIT.2008.130. Citado na pág. [xi](#), [28](#), [29](#)
- Awad e Mohamed(2014)** A. Awad e A. Mohamed. Distributed cross-layer optimization for healthcare monitoring applications. Em 2014 12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), páginas 57–62. doi: 10.1109/WIOPT.2014.6850279. Citado na pág. [39](#), [44](#)
- Awang e Abbasi(2015)** A. Awang e U. F. Abbasi. Performance evaluation of cross-layer opportunistic mac/routing with node’s mobility for wireless body area networks. Em 2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), páginas 30–35. doi: 10.1109/MICC.2015.7725402. Citado na pág. [39](#)

- AWK(2019)** AWK. Awk, May. 2019. URL <http://awk.freeshell.org/>. May 09, 2019. Citado na pág. 61
- Barakah e Ammad-uddin(2012)** D.M. Barakah e M. Ammad-uddin. A survey of challenges and applications of wireless body area network (wban) and role of a virtual doctor server in existing architecture. Em Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on, páginas 214–219. doi: 10.1109/ISMS.2012.108. Citado na pág. xv, 10, 11, 12
- Ben Hamida et al.(2014)** E. Ben Hamida, M. M. Alam, M. Maman, B. Denis e R. D’Errico. Wearable body-to-body networks for critical and rescue operations - the crow2project. Em 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), páginas 2145–2149. doi: 10.1109/PIMRC.2014.7136527. Citado na pág. 38
- Benaissa et al.(2016)** S. Benaissa, D. Plets, E. Tanghe, G. Vermeeren, L. Martens, B. Sonck, F. A. M. Tuyttens, L. Vandaele, J. Hoebeke, N. Stevens e W. Joseph. Characterization of the on-body path loss at 2.45 ghz and energy efficient wban design for dairy cows. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64(11):4848–4858. ISSN 0018-926X. doi: 10.1109/TAP.2016.2606571. Citado na pág. 39
- Bouachir et al.(2016)** O. Bouachir, A. Ben Mnaouer e F. Touati. Peam: A polymorphic, energy-aware mac protocol for wban. Em 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), páginas 1–6. doi: 10.1109/ICT.2016.7500491. Citado na pág. 39, 44
- Bouazizi et al.(2017)** A. Bouazizi, G. Zaibi, M. Samet e A. Kachouri. Wireless body area network for e-health applications: Overview. Em 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), páginas 64–68. doi: 10.1109/SM2C.2017.8071260. Citado na pág. 2
- Boulis et al.(2012a)** A. Boulis, D. Smith, D. Miniutti, L. Libman e Y. Tselishchev. Challenges in body area networks for healthcare: the mac. Communications Magazine, IEEE, 50(5):100–106. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194389. Citado na pág. 50, 51, 60
- Boulis e Tselishchev(2011)** Athanassios Boulis e Yuriy Tselishchev. Castalia - A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Network. National ICT Australia, NICTA, Locked Bag 9013, Alexandria, NSW 1435, Australia, version 3.2 edição, Mar. 2011. Citado na pág. xv, 50, 59, 60
- Boulis et al.(2012b)** Athanassios Boulis, Yuriy Tselishchev, Lavy Libman, David Smith e Leif Hanlen. Impact of wireless channel temporal variation on mac design for body area networks. ACM Trans. Embed. Comput. Syst., 11(S2):51:1–51:18. ISSN 1539-9087. doi: 10.1145/2331147.2331161. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2331147.2331161>. Citado na pág. xi, 58, 60
- Castalia(2019)** Castalia. Castalia simulator, May. 2019. URL <https://github.com/boulis/Castalia/>. May 09, 2019. Citado na pág. xi, 48, 50
- Cavallari et al.(2014)** R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti e R. Verdone. A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. IEEE Communications Surveys Tutorials, 16(3):1635–1657. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2014.012214.00007. Citado na pág. 2, 3
- Chen e Chiu(2018)** D. Chen e W. Chiu. Collaborative link-aware protocols for energy-efficient and qos wireless body area networks using integrated sensors. IEEE Internet of Things Journal, 5(1): 132–149. ISSN 2327-4662. doi: 10.1109/JIOT.2017.2775048. Citado na pág. 40, 45
- Chen et al.(2011)** Min Chen, Sergio Gonzalez, Athanasios Vasilakos, Huasong Cao e Victor C. Leung. Body area networks: A survey. Mob. Netw. Appl., 16(2):171–193. ISSN 1383-469X. doi: 10.1007/s11036-010-0260-8. Citado na pág. 28
- Chen et al.(2017)** Xi Chen, Yixuan Xu e Anfeng Liu. Cross layer design for optimizing transmission reliability, energy efficiency, and lifetime in body sensor networks. Sensors, 17(4). ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s17040900. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/900>. Citado na pág. 39, 46

- Davaslioglu et al.(2016)** K. Davaslioglu, Y. Liu e R. D. Gitlin. Cloee - cross-layer optimization for energy efficiency of ieee 802.15.6 ir-uwband. Em 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), páginas 1–7. doi: 10.1109/GLOCOM.2016.7841659. Citado na pág. 39
- Di Francesco et al.(2011)** M. Di Francesco, G. Anastasi, M. Conti, S.K. Das e V. Neri. Reliability and energy-efficiency in ieee 802.15.4/zigbee sensor networks: an adaptive and cross-layer approach. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 29(8):1508–1524. ISSN 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2011.110902. Citado na pág. 64
- Dumanli et al.(2012)** S. Dumanli, S. Gormus e I.J. Craddock. Energy efficient body area networking for mhealth applications. Em Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2012 6th International Symposium on, páginas 1–4. doi: 10.1109/ISMICT.2012.6203037. Citado na pág. 44
- Edirisinghe e Zaslavsky(2014)** R. Edirisinghe e A. Zaslavsky. Cross-layer contextual interactions in wireless networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 16(2):1114–1134. ISSN 1553-877X. Citado na pág. 17
- Elhadj et al.(2015)** H. B. Elhadj, N. Bradai, S. Boudjit, L. Chaari e L. Kamoun. A priority based cross layer data dissemination protocol for healthcare applications. Em 2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), páginas 615–616. doi: 10.1109/CCNC.2015.7158049. Citado na pág. 39
- Foukalas et al.(2008)** F. Foukalas, V. Gazis e N. Alonistioti. Cross-layer design proposals for wireless mobile networks: A survey and taxonomy. IEEE Communications Surveys Tutorials, 10(1):70–85. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2008.4483671. Citado na pág. 17
- Fu et al.(2014)** B. Fu, Y. Xiao, H. J. Deng e H. Zeng. A survey of cross-layer designs in wireless networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 16(1):110–126. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2013.081313.00231. Citado na pág. 17, 28
- Gajjar et al.(2011a)** S.H. Gajjar, S.N. Pradhan e K.S. Dasgupta. Cross layer architectural approaches for wireless sensor networks. Em Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 2011 IEEE, páginas 557–562. doi: 10.1109/RAICS.2011.6069374. Citado na pág. 26
- Gajjar et al.(2011b)** S.H. Gajjar, S.N. Pradhan e K.S. Dasgupta. Cross layer architectural approaches for wireless sensor networks. Em Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 2011 IEEE, páginas 557–562. doi: 10.1109/RAICS.2011.6069374. Citado na pág. 3, 17, 22, 23, 24, 43
- Hefeida et al.(2012)** M. Hefeida, Min Shen, A. Kshemkalyani e A. Khokhar. Cross-layer protocols for wsns: A simple design and simulation paradigm. Em Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International, páginas 844–849. doi: 10.1109/IWCMC.2012.6314314. Citado na pág. 17
- Hughes et al.(2012)** Laurie Hughes, Xinheng Wang e Tao Chen. A review of protocol implementations and energy efficient cross-layer design for wireless body area networks. Sensors, 12(11):14730–14773. doi: 10.3390/s121114730. URL <https://doi.org/10.3390/s121114730>. Citado na pág. 17
- Issaoui e Sethom(2016)** L. Issaoui e K. Sethom. Cross-layer algorithm for qos in wbans. Em 2016 International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC), páginas 247–252. doi: 10.1109/ISIVC.2016.7893995. Citado na pág. 39
- Jaramillo et al.(2016)** R. Jaramillo, A. Quintero e S. Chamberland. Reliable transport protocol based on loss-recovery and fairness for wireless body area networks. Em 2016 IEEE First International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE), páginas 18–23. doi: 10.1109/CHASE.2016.47. Citado na pág. 39

- Jovanov e Milenkovic(2011)** Emil Jovanov e Aleksandar Milenkovic. Body area networks for ubiquitous healthcare applications: Opportunities and challenges. J. Med. Syst., 35(5):1245–1254. ISSN 0148-5598. doi: 10.1007/s10916-011-9661-x. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-011-9661-x>. Citado na pág. 27
- Jupyter(2019)** Jupyter. The jupyter notebook, May. 2019. URL <https://jupyter.org/>. May 09, 2019. Citado na pág. 61
- Karvonen et al.(2015)** Heikki Karvonen, Jari Iinatti e Matti Hämäläinen. A cross-layer energy efficiency optimization model for wban using ir-uwband transceivers. Telecommunication Systems, 58(2):165–177. ISSN 1572-9451. doi: 10.1007/s11235-014-9900-9. Citado na pág. 39
- Khan et al.(2012)** N. A. Khan, N. Javaid, Z. A. Khan, M. Jaffar, U. Rafiq e A. Bibi. Ubiquitous healthcare in wireless body area networks. Em Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), 2012 IEEE 11th International Conference on, páginas 1960–1967. doi: 10.1109/TrustCom.2012.289. Citado na pág. 27, 29
- Kitchenham e Charters(2007)** Barbara Kitchenham e S Charters. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Engineering, 2:1051. ISSN 00010782. doi: 10.1145/1134285.1134500. Citado na pág. 35
- Lahlou et al.(2015)** L. Lahlou, A. Meharouech, J. Elias e A. Mehaoua. Mac-network cross-layer energy optimization model for wireless body area networks. Em 2015 International Conference on Protocol Engineering (ICPE) and International Conference on New Technologies of Distributed Systems (NTDS), páginas 1–5. doi: 10.1109/NOTERE.2015.7293512. Citado na pág. 39
- Latré et al.(2011)** Benoît Latré, Bart Braem, Ingrid Moerman, Chris Blondia e Piet Demeester. A survey on wireless body area networks. Wirel. Netw., 17(1):1–18. ISSN 1022-0038. doi: 10.1007/s11276-010-0252-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>. Citado na pág. xv, 15, 17
- Liu et al.(2017)** Y. Liu, K. Davaslioglu e R. D. Gitlin. Energy efficiency and resource allocation of ieee 802.15.6 ir-uwband wbans: Current state-of-the-art and future directions. Em 2017 Information Theory and Applications Workshop (ITA), páginas 1–10. doi: 10.1109/ITA.2017.8023452. Citado na pág. 39
- Mendes e J.P.C. Rodrigues(2011)** Lucas D. P. Mendes e Joel J.P.C. Rodrigues. Review: A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. J. Netw. Comput. Appl., 34(2): 523–534. ISSN 1084-8045. doi: 10.1016/j.jnca.2010.11.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2010.11.009>. Citado na pág. xi, 18
- Movassaghi et al.(2014)** S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith e A. Jamalipour. Wireless body area networks: A survey. Communications Surveys Tutorials, IEEE, 16(3):1658–1686. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2013.121313.00064. Citado na pág. 33
- Nakanishi et al.(2012)** Y. Nakanishi, K. Toriyama, R. Watabe, K. Sentoku, S. Takayama e Y. Matsuda. Design of wearable sensing network system for monitoring dynamic physical condition. Em SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of, páginas 240–245. Citado na pág. xi, 9, 10
- Negra et al.(2016)** Rim Negra, Imen Jemili e Abdelfettah Belghith. Wireless body area network: Applications and technologies. Elsevier B.V., 3(1):1281. Citado na pág. xi, 15
- Numpy(2019)** Numpy. Numpy library, May. 2019. URL <https://www.numpy.org/>. May 09, 2019. Citado na pág. 61
- OMNeT++(2019)** OMNeT++. Objective modular network testbed in c++, May. 2019. URL <https://omnetpp.org/>. May 09, 2019. Citado na pág. 47

- Pan et al.(2015)** R. Pan, D. Chua, J. S. Pathmasuntharam e Y. P. Xu. An opportunistic relay protocol with dynamic scheduling in wireless body area sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 15(7):3743–3750. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2015.2400052. Citado na pág. 39
- Pandas(2019)** Pandas. Pandas library, May. 2019. URL <https://pandas.pydata.org/>. May 09, 2019. Citado na pág. 61
- Pantelopoulos e Bourbakis(2010)** A. Pantelopoulos e N.G. Bourbakis. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 40(1):1–12. ISSN 1094-6977. doi: 10.1109/TSMCC.2009.2032660. Citado na pág. xv, 14
- Pozza e Silva(2015)** R.S. Pozza e D.C. Silva. Uma abordagem cross-layer para comunicação em redes corporais sem fio. Em *SBRC 2015 - WP2P+ (XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos)*, Vitória,ES, Brasil. Citado na pág. xi, 63
- Prabh et al.(2012)** K.S. Prabh, F. Royo, S. Tennina e T. Olivares. Banmac: An opportunistic mac protocol for reliable communications in body area networks. Em *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2012 IEEE 8th International Conference on*, páginas 166–175. doi: 10.1109/DCOSS.2012.37. Citado na pág. 43
- Punj e Kumar(2018)** Roopali Punj e Rakesh Kumar. Technological aspects of wbans for health monitoring: a comprehensive review. *Wireless Networks*. ISSN 1572-8196. doi: 10.1007/s11276-018-1694-3. URL <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1694-3>. Citado na pág. 3
- Razzaque et al.(2017)** M. A. Razzaque, Muta Tah Hira e Mukta Dira. Qos in body area networks: A survey. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 13(3):25:1–25:46. ISSN 1550-4859. doi: 10.1145/3085580. Citado na pág. xi, 15, 16, 29, 31, 33
- Razzaque et al.(2014)** Mohammad Abdur Razzaque, Saeideh Javadi, Coulibaly Yahaya e Muta Tah Hira. Qos-aware error recovery in wireless body sensor networks using adaptive network coding. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15:440–464. doi: 10.3390/s150100440. Citado na pág. 119
- Rochol(2018)** J. Rochol. *Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações*. Série Livros Didáticos Informática UFRGS. Bookman Editora. ISBN 9788582604564. URL <https://books.google.com.br/books?id=QD1NDwAAQBAJ>. Citado na pág. xi, 52, 54
- Salayma et al.(2017)** Marwa Salayma, Ahmed Al-Dubai, Imed Romdhani e Youssef Nasser. Wireless body area network (wban): A survey on reliability, fault tolerance, and technologies coexistence. *ACM Comput. Surv.*, 50(1):3:1–3:38. ISSN 0360-0300. doi: 10.1145/3041956. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3041956>. Citado na pág. 2
- Santagati e Melodia(2015)** G. Enrico Santagati e Tommaso Melodia. U-wear: Software-defined ultrasonic networking for wearable devices. Em *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '15*, páginas 241–256, New York, NY, USA. ACM. ISBN 978-1-4503-3494-5. doi: 10.1145/2742647.2742655. Citado na pág. 39
- Santos e Motoyam(2018)** N. Santos N. Santos e S. Motoyama S. Motoyam. A large scale platform using wban technology for patient monitoring. *IEEE Latin America Transactions*, 16(3):705–711. ISSN 1548-0992. doi: 10.1109/TLA.2018.8358645. Citado na pág. 3
- Sevin et al.(2016)** Abdullah Sevin, Cuneyt Bayilmis e Ismail Kirbas. Design and implementation of a new quality of service-aware cross-layer medium access protocol for wireless body area networks. *Computers and Electrical Engineering*, 56(C):145–156. ISSN 0045-7906. doi: 10.1016/j.compeleceng.2016.02.003. Citado na pág. 16

- Sharavanan et al.(2018)** P. T. Sharavanan, D. Sridharan e R. Kumar. A privacy preservation secure cross layer protocol design for iot based wireless body area networks using ecDSA framework. *J. Med. Syst.*, 42(10):1–11. ISSN 0148-5598. doi: 10.1007/s10916-018-1050-2. Citado na pág. **39**
- Shimly et al.(2017)** S. Shimly, D. B. Smith e S. Movassaghi. Cross-layer optimized routing with low duty cycle tdma across multiple wireless body area networks. Em *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–6. doi: 10.1109/ICC.2017.7996895. Citado na pág. **39**
- Shimly et al.(2018)** S. M. Shimly, D. B. Smith e S. Movassaghi. Cross-layer designs for body-to-body networks: Adaptive csma/ca with distributed routing. Em *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–6. doi: 10.1109/ICC.2018.8422792. Citado na pág. **39, 135**
- Singelée et al.(2008)** Dave Singelée, Benoît Latré, Bart Braem, Michael Peeters, Marijke Soete, Peter Cleyne, Bart Preneel, Ingrid Moerman e Chris Blondia. A secure cross-layer protocol for multi-hop wireless body area networks. Em *Proceedings of the 7th international conference on Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks, ADHOC-NOW '08*, páginas 94–107, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-85208-7. doi: 10.1007/978-3-540-85209-4_8. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85209-4_8. Citado na pág. **43**
- Srivastava e Motani(2005)** V. Srivastava e M. Motani. Cross-layer design: a survey and the road ahead. *Communications Magazine, IEEE*, 43(12):112–119. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2005.1561928. Citado na pág. **xi, 3, 4, 17, 18, 19, 20, 25, 64**
- Su e Zhang(2009)** Hang Su e Xi Zhang. Battery-dynamics driven tdma mac protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 27(4):424–434. ISSN 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2009.090507. Citado na pág. **44**
- Takabayashi et al.(2017)** K. Takabayashi, H. Tanaka, C. Sugimoto, K. Sakakibara e R. Kohno. Cross-layer design and performance analysis of quality of service control scheme for wireless body area networks. *IEEE Access*, 5:22462–22470. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2762078. Citado na pág. **39, 45**
- Takahashi et al.(2007)** D. Takahashi, Yang Xiao e Fei Hu. Ltrt: Least total-route temperature routing for embedded biomedical sensor networks. Em *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, páginas 641–645. doi: 10.1109/GLOCOM.2007.125. Citado na pág. **45**
- Torabi e Leung(2014)** N. Torabi e V. C. M. Leung. Cross-layer design for prompt and reliable transmissions over body area networks. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 18(4):1303–1316. ISSN 2168-2194. doi: 10.1109/JBHI.2013.2283232. Citado na pág. **39**
- Tseng e Chuang(2013)** H. Tseng e Y. Chuang. A cross-layer judgment scheme for solving retransmission problem in ieee 802.15.4-based wireless body sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 13(8):3124–3135. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2013.2260146. Citado na pág. **43**
- Tseng et al.(2016)** H. Tseng, R. Wu e Y. Wu. An efficient cross-layer reliable retransmission scheme for the human body shadowing in ieee 802.15.6-based wireless body area networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(9):3282–3292. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2016.2523461. Citado na pág. **9, 38**
- Ullah et al.(2012)** Sana Ullah, Henry Higgins, Bart Braem, Benoit Latre, Chris Blondia, Ingrid Moerman, Shahnaz Saleem, Ziaur Rahman e KyungSup Kwak. A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of Medical Systems*, 36(3):1065–1094. ISSN 0148-5598. doi: 10.1007/s10916-010-9571-3. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-010-9571-3>. Citado na pág. **14, 28, 43**
- Wang e Wang(2013)** Jianqing. Wang e Qiong. Wang. *Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC*. John Wiley & Sons Singapore. ISBN 9781118188484. Citado na pág. **9**

- Wang et al.(2017)** S. Wang, Y. Ji, D. Gibbins e X. Yin. Impact of dynamic wideband mimo body channel characteristics on healthcare rehabilitation of walking. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16:505–508. ISSN 1536-1225. doi: 10.1109/LAWP.2016.2586299. Citado na pág. 39
- Wang et al.(2012)** Y. Wang, M. C. Vuran e S. Goddard. Cross-layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 20(1): 305–318. ISSN 1063-6692. doi: 10.1109/TNET.2011.2159845. Citado na pág. 17
- Wang et al.(2014)** Yufei Wang, Qixin Wang, Guanbo Zheng, Zheng Zeng, Rong Zheng e Qian Zhang. Wicop: Engineering wifi temporal white-spaces for safe operations of wireless personal area networks in medical applications. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 13(5):1145–1158. ISSN 1536-1233. doi: 10.1109/TMC.2013.31. Citado na pág. 66
- Xu e Li(2012)** Zhao Xu e Ye Li. A cross-layer optimization design for implanted ban communication system. Em Biomedical and Health Informatics (BHI), 2012 IEEE-EMBS International Conference on, páginas 396–399. doi: 10.1109/BHI.2012.6211598. Citado na pág. 44
- Yang(2006)** Guang-Zhong Yang. Body Area Networks. Springer-Verlag. ISBN 1-84628-272-1. Citado na pág. 9
- Yuan et al.(2019)** Deying Yuan, Guoqiang Zheng, Huahong Ma, Jiaqing Shang e Jishun Li. An adaptive mac protocol based on ieee802.15.6 for wireless body area networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2019:1–9. doi: 10.1155/2019/3681631. Citado na pág. 119
- Yun e Xia(2010)** YoungSang Yun e Ye Xia. Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sink in Delay-Tolerant Applications. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 9(9): 1308–1318. ISSN 1536-1233. doi: 10.1109/TMC.2010.76. Citado na pág. 8
- Zhou et al.(2011)** Gang Zhou, Qiang Li, Jingyuan Li, Yafeng Wu, Shan Lin, Jian Lu, Chieh-Yih Wan, Mark D. Yarvis e John A. Stankovic. Adaptive and radio-agnostic qos for body sensor networks. ACM Trans. Embed. Comput. Syst., 10(4):48:1–48:34. ISSN 1539-9087. doi: 10.1145/2043662.2043672. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2043662.2043672>. Citado na pág. 28