

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE COMPUTAÇÃO  
TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

GILIARD ALMEIDA DE GODOI

**ANÁLISE DO IMPACTO DA ALTERAÇÃO DA POTÊNCIA DE  
TRANSMISSÃO SOBRE O DESEMPENHO DE REDES CORPORAIS  
SEM FIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

**GILIARD ALMEIDA DE GODOI**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA ALTERAÇÃO DA POTÊNCIA DE  
TRANSMISSÃO SOBRE O DESEMPENHO DE REDES CORPORAIS  
SEM FIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

Orientador: Prof. Rogério Santos Pozza

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2018**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Análise do impacto da alteração da Potência de Transmissão sobre o desempenho de Redes Corporais Sem Fio

por

Giliard Almeida de Godoi

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas” e aprovado em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 05 de dezembro de 2018.

---

Prof. Me. Rogério Santos Pozza  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Roberto Sadao Yokoyama  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Danilo Sipoli Sanches  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

Esta monografia marca o fim de um ciclo e um novo recomeço – este são os momentos propícios para olharmos para trás e agradecer àqueles que compartilharam comigo desta jornada.

Agradeço primeiramente à Deus, à força criadora do Universo, ao mistério que nós ajuda a definir quem somos.

À minha mãe, Dona Maria de Lourdes, minha conselheira e a pessoa mais sábia que conheço. Ao meu irmão, Altieres, pelos exemplos de dedicação, esforço e trabalho.

Ao Professor Rogério Santos Pozza, pela orientação, pela amizade e por acreditar no meu trabalho – muita vezes, mais do que eu mesmo.

Aos meu colegas de curso Ricardo Carreiro Alvim e Athos Castro Moreno pelo companheirismo – certamente aprendi muito mais do que pude contribuir com este grupo.

Ao meu companheiro, Juan Marcus, pelo apoio recebido e por me lembrar que existe vida além de livros e computadores.

Aos meus companheiros de viagem para Cornélio Procópio, que tornaram este trajeto mais alegre e menos exaustivo.

À todas as demais pessoas que ajudaram de alguma forma a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

GODOI, Giliard Almeida de. Análise do impacto da alteração da Potência de Transmissão sobre o desempenho de Redes Corporais Sem Fio. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O potencial das aplicações das Redes Corporais Sem Fio (WBAN) tem estimulado a pesquisa e o desenvolvimento desta tecnologias. Ao mesmo tempo, a natureza específica destas aplicações impõe restrições e desafios que não podem ser resolvidos apenas importando os padrões e tecnologias já utilizados por outros Redes de Sensores Sem Fio. Um dos desafios que se impõe é conciliar os requisitos de confiabilidade da comunicação com as severas limitações de energia. Neste cenário a arquitetura *cross-layer* propõe fluxos alternativos para a troca de mensagens ou compartilhamento de recursos entre as tradicionais camadas da pilha de protocolos, visando a otimização de parâmetros do nó sensor. O desenvolvimento de novas estratégias para o Controle da Potência de Transmissão podem se beneficiar das novas trocas de informação proposta pela arquitetura *cross-layer*. Desta forma, a definição e o estudo de novas métricas podem beneficiar o entendimento sobre o funcionamento destas redes e propor otimizações. Este estudo tem como principal objetivo aprofundar as análises sobre o impactos de uma estratégia de alteração da potência de transmissão segundo as probabilidades definidas pela Distribuição Binomial. Os resultados obtidos indicam que diferentes métricas podem ser complementares entre si, para representar as condições do nó sensor.

**Palavras-chave:** Redes Corporais Sem Fio, Controle da Potência de Transmissão, Arquitetura *cross-layer*

## ABSTRACT

GODOI, Giliard Almeida de. Impact Analysis of the Transmission Power Change on the Performance of Wireless Body Networks. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Wireless Body Area Networks(WBAN) has stimulated the many types of research in this field. At the same time, the specific nature of these applications imposes constraints and challenges that cannot be solved only by standards and technologies already used by other Wireless Sensor Networks. For instance, get in balance the communication reliability requirements and energy limitations is a significant challenge. Cross-layer architecture proposes alternative flows for the exchange of messages or sharing resource between the standard layered architecture pattern. This architecture aims the optimization of sensor node parameters. The development of new strategies for Transmission Power Control can benefit from the cross-layer architecture. In this way, the definition and study of new metrics are necessary for understanding the operation of these networks. This study has as primary objective to more profound the analyzes on the impacts of a transmission power alteration strategy according to the probabilities defined by the Binomial Distribution. The results indicate that different metrics can be complementary to each other to represent the conditions of the sensor node.

**Keywords:** Wireless Body Area Network, Transmission Power Control, Cross-Layer Architecture

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Exemplo de uma arquitetura WBAN (NEGRA et al., 2016). . . . .	15
FIGURA 2	– Medição do RSSI de acordo com três cenários: (a) Totalmente em re- poso. (b) Mudança de postura. (c) Caminhada (KIM; EOM, 2014). . . . .	18
FIGURA 3	– Um modelo ilustrativo de três camadas. . . . .	22
FIGURA 4	– Propostas para projetos de interação <i>cross-layer</i> ((SRIVASTAVA; MO- TANI, 2005)). . . . .	24
FIGURA 5	– Arquitetura de quatro camadas com dois exemplos de interação <i>cross- layer</i> (MENDES; RODRIGUES, 2011). . . . .	25
FIGURA 6	– Arquitetura Cross-Layer proposta por Pozza e Silva (2015). . . . .	26
FIGURA 7	– Arquitetura do Castalia demonstrada em módulos e mensagens (PEDIA- DITAKIS et al., 2010). . . . .	32
FIGURA 8	– Estrutura do Nó Sensor no Castalia (FORTINO et al., 2013). . . . .	32
FIGURA 9	– Variação do RSSI observados nos nós D-Punho (a) e E-Tornozelo (b) para uma simulação transmitindo a uma potência de -10dBm. . . . .	35
FIGURA 10	– Comparação da taxa de recebimento de pacotes (PRR) entre as simula- ções CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	40
FIGURA 11	– Comparação do número absoluto de pacotes recebidos entre as simula- ções CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	42
FIGURA 12	– Comparação da taxa de sucessos na primeira tentativa entre as simula- ções CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	43
FIGURA 13	– Comparação da taxa de sucessos nas retransmissões (a partir da segunda tentativa) entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	44
FIGURA 14	– Comparação da taxa de falhas ocasionadas pelo não recebimento do ACK entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	46
FIGURA 15	– Comparação da taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	48
FIGURA 16	– Comparação da taxa de falhas ocasionadas por estouro da capacidade do <i>buffer</i> entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	50
FIGURA 17	– CL-Binomial - Histograma mostrando a utilização do buffer por cada nó sensor (linhas) e modelo de colisão (colunas). . . . .	52
FIGURA 18	– CL-Uniforme - Histograma mostrando a utilização do buffer por cada nó sensor (linhas) e modelo de colisão (colunas). . . . .	53
FIGURA 19	– Comparação da relação Nanojoule por bit entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. . . . .	54
FIGURA 20	– Frequência dos valores observados para a <i>taxaMAC</i> na simulação CL- Binomial, considerando os três modelos de colisão. . . . .	57
FIGURA 21	– CL-Uniforme: frequência dos valores observados para a <i>taxaMAC</i> con- siderando os três modelos de colisão. . . . .	57
FIGURA 22	– Total de pacotes recebidos pelo nó <i>sink</i> . . . . .	60
FIGURA 23	– Taxa de falhas decorrentes do estouro da capacidade do <i>buffer</i> na camada MAC. . . . .	62
FIGURA 24	– Taxa de falhas por estouro de buffer: alteração do número de tentativas. . . . .	63

FIGURA 25 – Taxa de sucessos ocorridos na primeira tentativa. ....	63
--	----



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Descrição da posição e taxa de dados .....	27
TABELA 2	– Exemplificação da Estratégia de níveis adotado por (OLIVEIRA, 2017) .....	28
TABELA 3	– Estratégias para seleção de potência baseada na divisão da escala PRR - (OLIVEIRA, 2017) .....	28
TABELA 4	– Valores do <i>path loss</i> : atenuação média percebida no enlace entre dois nós distintos. ....	35
TABELA 5	– Parâmetros do rádio conforme (BOULIS; TSELISHCHEV, 2011) .....	36
TABELA 6	– Descrição da posição e taxa de dados utilizada neste trabalho e em (POZZA; SILVA, 2015) e (POZZA et al., 2018). ....	39
TABELA 7	– Taxa de entrega de pacotes (PRR %) para a simulação CL-Binomial ( $p = 0,7$ ). ....	40
TABELA 8	– Taxa de entrega de pacotes (PRR %) para a simulação CL-Uniforme. ..	41
TABELA 9	– Taxa de sucessos (%) obtido na primeira tentativa na simulação CL-Binomial. ....	43
TABELA 10	– Taxa de sucesso (%) obtido na primeira tentativa, na simulação CL-Uniforme. ....	43
TABELA 11	– Taxa de sucessos (%) obtidos na retransmissões da simulação CL-Binomial. ....	45
TABELA 12	– Taxa de sucessos (%) obtidos na retransmissão da simulação CL-Uniforme. ....	45
TABELA 13	– Taxa de falhas (%) ocasionadas pelo não recebimento de ACK na simulação CL-Binomial. ....	47
TABELA 14	– Taxa de falhas (%) ocasionadas pelo não recebimento de ACK na simulação CL-Uniforme. ....	47
TABELA 15	– Taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado na simulação CL-Binomial. ....	48
TABELA 16	– Taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado na simulação CL-Uniforme. ....	49
TABELA 17	– Taxa de falhas (%) ocasionadas por estouro da capacidade do <i>buffer</i> na simulação CL-Binomial .....	50
TABELA 18	– Taxa de falhas (%) ocasionadas por estouro da capacidade do <i>buffer</i> na simulação CL-Uniforme .....	50
TABELA 19	– Relação nanojoule por bit resultante, na simulação CL-Binomial. ....	53
TABELA 20	– Relação Nanojoule por bit resultante na simulação CL-Uniforme. ....	54
TABELA 21	– Estatísticas descritivas para a taxaMAC na simulação CL-Binomial. ...	59
TABELA 22	– Estatísticas descritivas para a taxaMAC na simulação CL-Uniforme. ...	59

## LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgments</i> – Pacote de confirmação
CCA	Clear Channel Assessment
CL	Arquitetura Cross-layer
CSI	Channel State Information
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Controle de Acesso ao Meio
NED	Network Description
OSI	Open System Interconnection
PDF	Probability Distribution Function
PRP	Packet Reception Probability
PRR	Packet Reception Rate
QoS	Quality of Service
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SNR	Signal Noise Ratio
WBAN	Wireless Body Area Network

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
2.1	REDES CORPORAIS SEM FIO	14
2.2	CANAL DE COMUNICAÇÃO	16
2.3	CONTROLE DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO	19
2.4	ARQUITETURA <i>CROSS-LAYER</i>	22
2.5	TRABALHOS RELACIONADOS	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
3.1	SIMULADOR <i>CASTALIA</i>	31
3.1.1	Módulo do canal de comunicação	32
3.1.2	Módulo do rádio	35
3.1.3	Módulo da camada de acesso ao meio	36
3.1.4	Módulo da aplicação	37
3.2	TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE DADOS	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
4.1	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES CL-BINOMIAL E CL-UNIFORME	40
4.1.1	Comparação do sucesso na primeira tentativa e nas retransmissões	42
4.1.2	Comparação de falhas ocasionadas pelo não recebimento de ACK	45
4.1.3	Comparação de falhas ocasionadas por canal ocupado	47
4.1.4	Comparação de falhas ocasionadas por estouro de <i>buffer</i>	49
4.1.5	Comparação da relação nanojoule por bit	52
4.2	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA <i>TAXAMAC</i>	55
4.3	ANÁLISE DA OCUPAÇÃO DO <i>BUFFER</i> EM SIMULAÇÕES VARIANDO A TAXA DE DADOS	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>64</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	66

## 1 INTRODUÇÃO

As pesquisas em Redes Corporais sem Fio (WBAN – *Wireless Body Area Network*) e tornaram-se emergentes em aplicações de serviços de saúde, devido à possibilidade de seu uso na monitoração de condições fisiológicas do corpo humano de forma contínua (MOVASSAGHI et al., 2014). O aumento no custo na assistência médica, maior expectativa de vida e o crescimento da população idosa motivaram novas propostas no aperfeiçoamento dessa tecnologia.

Uma WBAN é formada por dispositivos pequenos, denominados nós sensores, que podem ser fixados ou implantados no corpo humano, e tem por objetivo a coleta de dados fisiológicos e o seu envio para outras redes (LATRÉ et al., 2011). Uma WBAN pode ser empregada no monitoramento de pacientes em clínicas, hospitais ou em situações mais cotidianas do que aqueles ambientes controlados.

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; KUMAR, 2018). Na literatura existem propostas de alteração dinâmica na potência do rádio dos nós sensores para diminuir tal impacto. De acordo com (FRANCO et al., 2015), as soluções existentes de outras redes de sensores para o controle de potência de transmissão não são otimizados para canais WBAN, devido a variabilidade de problemas e a baixa potência de transmissão. O controle de energia adaptativo é uma proposta para oferecer uma comunicação confiável e eficiente para o balanceamento entre consumo e entrega de pacotes (ARCHASANTISUK et al., 2016) (FRANCO et al., 2015).

No aspecto de arquitetura, a pilha de protocolos das WBAN também possui particularidades. As dificuldades no seu desenvolvimento, impostas pelas limitações dos aspectos das WBAN e a recente área de pesquisa, ainda não consolidaram um padrão de comunicação. Segundo (MOVASSAGHI et al., 2014), entre os padrões mais utilizados e referenciados nas WBANs estão o IEEE 802.15.4 (802.15.4, 2011) e o IEEE 802.15.6 (802.15.6, 2012), que definem as camadas física e de enlace, deixando disponível a especificação das demais camadas (rede e aplicação).

Em Srivastava e Motani (2005) é descrita uma arquitetura denominada de *cross-layer*, que consiste na interação entre duas ou mais camadas da pilha de protocolos, em que a hierarquia de comunicação adjacente é quebrada. Esta proposta oferece novas formas de interconexão, que podem ser melhor exploradas em relação à estrutura do modelo em camadas, como a adaptabilidade de um elemento transmissor da rede ao meio de acesso compartilhado da mesma.

Este trabalho apresenta um estudo sobre o impacto da potência de transmissão em cenários variados, como tipos diferentes de colisão de pacotes e diferentes taxas de dados, de uma WBAN com arquitetura *cross-layer*. As conclusões, sobre as análises dos resultados, permitem identificar novas estratégias, que podem utilizar a potência de transmissão dos rádios das WBANs como forma de melhorar a entrega de pacotes.

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho compara a estratégia para alteração da potência de transmissão proposto em Pozza et al. (2018), baseado em uma Distribuição Binomial de Probabilidades, com uma estratégia alternativa baseada em uma Distribuição Uniforme de Probabilidades.

A partir desta análise foi identificado que as falhas ocasionadas por estouro da capacidade do *buffer* representam uma significativa parcela dos casos de falhas nos cenários analisados em Pozza et al. (2018). Um novo conjunto de simulações foi proposto para analisar detalhadamente o comportamento do *buffer* em relação a diferentes potências de transmissão, estratégia de alteração da potência e variação da taxa de dados.

O objetivo principal é analisar a dinâmica do meio de transmissão em relação a diferentes estratégias de alteração da potência de transmissão e discutir a utilização de outras métricas no controle da potência de transmissão.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Simular cenários que ofereçam resultados para analisar o meio de transmissão de uma WBAN;
- Comparar duas estratégias para alteração da potência de transmissão baseadas em distribuições probabilística – Distribuição Binomial Pozza et al. (2018) e Distribuição Uniforme – em relação aos casos de sucessos e aos casos de perda de pacote (falhas);

- Analisar o comportamento do *buffer* relacionando-o a utilização de estratégias com potência fixa e a estratégia de alteração da potência proposto em Pozza et al. (2018);
- Caracterizar o desempenho da rede utilizando as métricas *taxaMAC* e *taxaBuffer*;
- Identificar novos critérios para o desenvolvimento de estratégias para alteração da potência de transmissão, visando a melhoria no desempenho de WBANs para arquitetura *cross-layer*.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Os capítulos deste trabalho seguem a seguinte organização. No Capítulo 1 é apresentado as redes WBAN, a sua importância, o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

A Fundamentação Teórica é desenvolvida no Capítulo 2, onde são apresentados apresentados mais detalhadamente as características das WBAN, alguns de seus requisitos e restrições, as características específicas do canal de comunicação. O Controle de Potência de Transmissão é apresentado como uma proposta para balancear os requisitos de entrega de pacotes (confiabilidade na comunicação) e consumo de energia.

O simulador *Castalia* utilizado na condução das análises é apresentado no Capítulo 3. É feita uma breve descrição dos seus módulos: canal de comunicação, rádio, camada de acesso ao meio (MAC) e o módulo da aplicação. Sucintamente é apresentado as ferramentas (linguagens e bibliotecas) utilizadas para a análise de dados.

As simulações e os resultados são discutidos no Capítulo 4. E a conclusão do trabalho é apresentada no capítulo 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos de Redes Corporais Sem Fio, controle de potência de transmissão, arquitetura *cross-layer* e os trabalhos relacionados que contribuíram para a fundamentação deste trabalho.

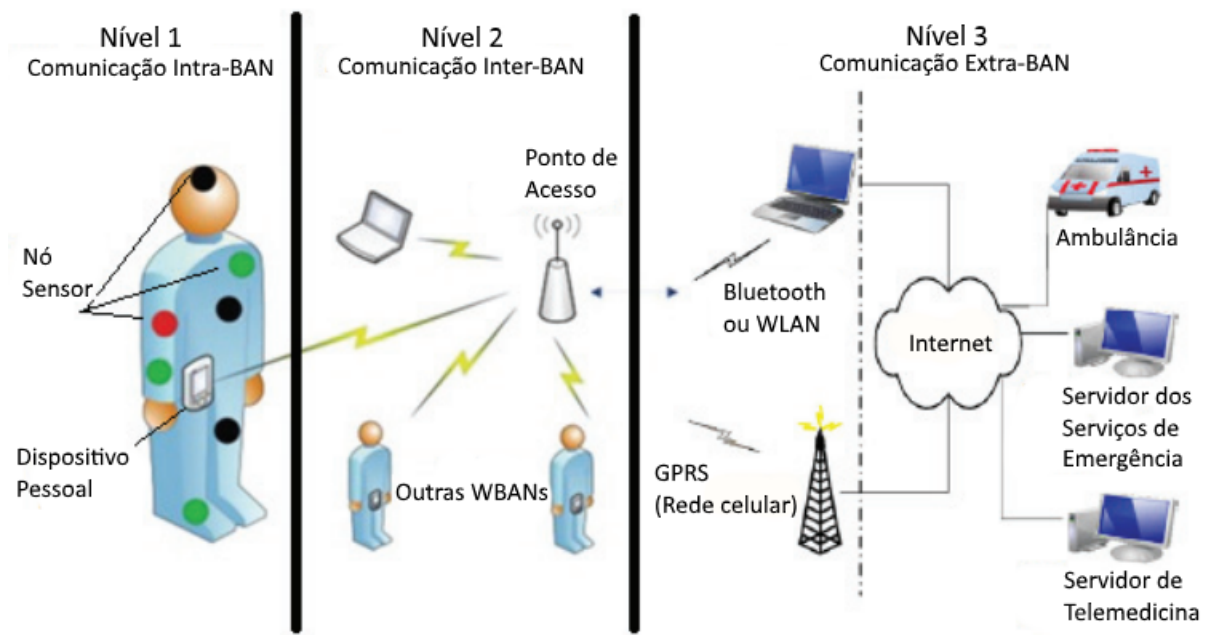
### 2.1 REDES CORPORAIS SEM FIO

Uma Rede Corporal Sem Fio constitui-se de um conjunto de dispositivos, denominados nós sensores, que podem ser vestíveis ou implantados no corpo humano. O principal objetivo de uma WBAN é a coleta de dados fisiológicos ou do ambiente, e o seu envio para outras redes (LATRÉ et al., 2011). Na Figura 1 é mostrada uma arquitetura em nível de rede corporal, em que os dados coletados de nós sensores localizados em um usuário (comunicação intra-BAN) são transmitidos para outras redes (inter e extra-BAN) por meio do Dispositivo Pessoal. A comunicação pode ser realizada com e sem fio e neste trabalho serão consideradas as transmissões sem fio no nível de intra-BAN.

As WBANs podem ser aplicadas em áreas como medicina, esportes e entretenimento, em que possibilitam melhorar o acompanhamento de um usuário, ao enviar informações em tempo real ou armazená-las afim de gerar um respectivo histórico de monitoramento dos seus dados (MOVASSAGHI et al., 2014). Essas redes podem ser utilizadas para o acompanhamento de pacientes em hospitais ou clínicas ou até mesmo em ambientes mais cotidianos como o seu próprio lar ou em casas de repouso.

Segundo (BARAKAH; AMMAD-UDDIN, 2012), os dispositivos presentes em uma WBAN são 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. Os componentes são constituídos de sensores, unidade de bateria, processador, memória e transceptor;
- **nó atuador sem fio:** é um nó sensor que possui um atuador, como por exemplo inserir no



**Figura 1: Exemplo de uma arquitetura WBAN (NEGRA et al., 2016).**

corpo do usuário uma determinada dosagem de medicamento, possibilitando colaborar na autonomia da rede. O momento da ação no atuador pode ser em horários pré agendados, mediante uma análise de dados coletados pelos sensores baseados em limiares estabelecidos ou pelo médico ou pela equipe responsável que decide remotamente. Esse dispositivo possui os mesmos itens do nó sensor sem fio acrescido de um atuador;

- **dispositivo pessoal (PD – *Personal Device*)**: seu objetivo principal é receber as informações sensoreadas pelos nós sensores e realizar a comunicação com o usuário (paciente, enfermeira, médico, equipe, entre outros). Os componentes desse dispositivo (também denominado de nó *sink*) têm maior capacidade que os demais, como 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 Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) e, por isso, acrescentam tanto conceitos quanto limitações. Devido a natureza de suas aplicações, é importante que uma WBAN atenda alguns requisitos, como (LATRÉ et al., 2011):

- **Quanto ao tamanho dos dispositivos**: É desejável que o uso dos nós sensores não seja intrusivo e que não cause qualquer tipo de desconforto para o paciente. Portanto, os nós de uma WBAN são de tamanho reduzido o que leva a severas restrições de energia disponível, devido ao tamanho da bateria.



- **Quanto ao tempo de utilização:** A substituição frequente dos nós sensores dos usuários não é desejável. Assim, as tecnologias adotadas em uma WBAN devem sempre considerar prolongar o tempo de vida da rede, o que se traduz em otimizar o uso da bateria.
- **Quanto a confiabilidade:** A capacidade de entrega de pacotes é importante uma vez que a rede trabalha com dados críticos para representação das condições do paciente.
- **Quanto a segurança das informações:** Uma vez que estas redes operam sobre dados críticos de pacientes, surgem várias questões relacionada à disponibilidade, integridade, confidencialidade, autenticidade e atualidade destes dados.

Os requisitos para WBAN impõe restrições diferentes daquelas observadas em outras redes *Ad Hoc*, como as redes de sensores sem fio e alguns destes requisitos podem ser conflitantes uns com os outros. Por exemplo, mesmo com as restrições de energia espera-se que o tempo de vida da rede seja longo o suficiente para evitar a substituição dos seus nós sensores. Entretanto, uma WBAN deve ter uma taxa de entrega de pacotes, entre nó sensor e nó *sink*, considerada alta, de forma a não comprometer os resultados de monitoramento de um usuário. Para obter taxas mais altas a potência do rádio pode ser aumentada e empregado repetições nas transmissões dos pacotes, o que consumiria mais energia, diminuindo o tempo de vida da rede.

Na próxima seção será apresentado as características do canal de comunicação de uma WBAN, a qual é importante ao se propor novas soluções em relação aos requisitos descritos por (LATRÉ et al., 2011).

## 2.2 CANAL DE COMUNICAÇÃO

Segundo Movassaghi et al. (2014) devido a complexidade da estrutura do corpo humano, como a diferente composição dos tecidos dos seus órgãos, um modelo de atenuação do sinal (*path loss*) não pode ser facilmente atribuído às WBAN. Devido a proximidade dos nós sensores ao corpo humano e suas características tais como o peso, altura, envergadura dos membros e, até mesmo, o seu movimento natural e a posição de um membro em relação ao outro, influenciam de forma significativa a atenuação do sinal de transmissão.

Da mesma forma, fatores do meio ambiente em que uma WBAN está inserida também podem influenciar a atenuação do sinal. Por exemplo, as vestimentas do paciente, a presença de obstáculos (móveis, pessoas, máquinas) entre o nó sensor e o *sink* ou o local (ar livre ou em uma sala) podem impactar e oferecer resistência à propagação do sinal. Um indicador que pode ser

utilizado para medir as condições de atenuação do sinal no canal de transmissão é o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) que mede a intensidade do sinal recebido pelo nó receptor.

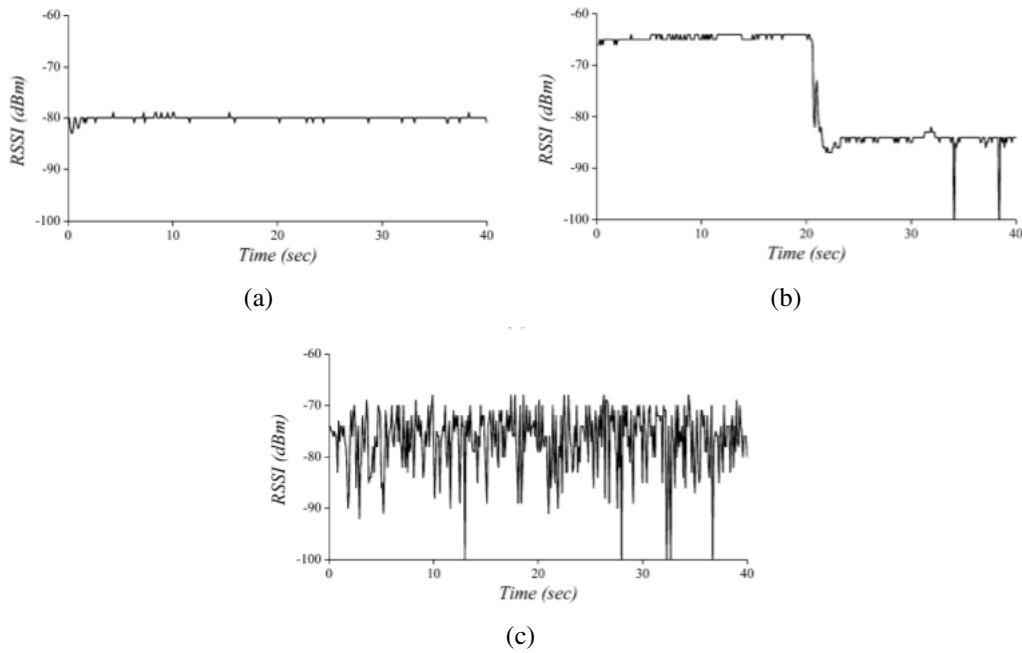
Vários estudos podem ser encontrados na literatura que caracterizam a atenuação do canal baseado na observação da distribuição dos valores do RSSI durante determinado intervalo de tempo – na ordem de horas ou minutos. Estes estudos tentam determinar um modelo probabilístico que melhor aproxime a variação das condições do canal de comunicação ao longo do tempo. Para as WBANs, os modelos probabilísticos mais comumente atribuídos para a atenuação do sinal são a Distribuição Lognormal, Distribuição de Nakagami-m e Distribuição de Weibull (MOVASSAGHI et al., 2014) (BOULIS et al., 2012).

Kim e Eom (2014) realizaram um experimento com uma WBAN composta de um nó *sink* fixado no lado esquerdo da cintura de um paciente, e um nó sensor posicionado no braço direito, em que realizaram a leitura do RSSI em três cenários diferentes. No primeiro o paciente permaneceu imóvel, sentado em uma cadeira, sem movimentar o corpo e os nós da rede. No segundo, o paciente foi instruído a cruzar e a descruzar os braços a cada dez segundos, ainda permanecendo em repouso após esse movimento. Por fim, no terceiro cenário, o paciente foi instruído a fazer uma pequena caminhada no local do experimento.

Os gráficos da Figura 2 mostram a variação das leituras do RSSI para cada um dos três cenários. No cenário de repouso – Figura 2 (a) – os valores estão definidos em torno da média sem grandes variações. No cenário de mudança de postura (cenário 2) há um salto na variação do RSSI, que volta se estabilizar quando os nós sensores voltam ao estado de repouso. Na Figura 2 (c) (cenário em movimento) percebe-se uma grande variabilidade dos valores do RSSI. Portanto, dependendo do comportamento do indivíduo, se está em repouso ou em movimento, as condições do canal de comunicação se alteram significativamente.

Boulis et al. (2012) explicam a variação do sinal de atenuação em pequenos intervalos de tempo – na ordem dos milissegundos. Estes autores propõem um modelo de correlação temporal que determina a atenuação do sinal com base na perda observado na última transmissão e o intervalo de tempo transcorrido desde esta última observação até a atual. Para tanto, consideraram que o canal de comunicação em uma WBAN possui as seguintes características:

- variação significativa do valor de atenuação em torno da média – grande variabilidade da perda do sinal;
- a atenuação do sinal não é dependente da distância entre receptor e transmissor, uma vez que os nós transmissores se encontram próximos ao corpo humano;
- os valores de RSSI dos pacotes recebidos aproximam-se de uma distribuição log-normal



**Figura 2: Medição do RSSI de acordo com três cenários: (a) Totalmente em repouso. (b) Mudança de postura. (c) Caminhada (KIM; EOM, 2014).**

ou de Weibull - *long term fading*;

- mesmo para enlaces com comunicação entre os nós, podem ocorrer períodos de indisponibilidade no canal em intervalos na ordem de 50ms a 100ms.

Devido a estas características do canal de comunicação e as restrições no consumo de energia, o uso de potências de transmissão fixas não é adequado no cenário das redes WBAN. O controle de energia adaptativo é uma proposta para oferecer uma comunicação confiável e eficiente para o balanceamento entre consumo e entrega de pacotes (ARCHASANTISUK et al., 2016) (FRANCO et al., 2015). Apesar de já existirem propostas de alteração dinâmica na potência do rádio transmissor, de acordo com Franco et al. (2015), os algoritmos convencionais não são otimizados para canais WBAN, devido a variabilidade do sinal percebido no meio e a baixa potência de transmissão.

Na próxima seção serão detalhados algumas soluções para controle da potência de transmissão encontradas na literatura e na seção 2.4 será apresentado a arquitetura *Cross-Layer*, cujo o objetivo é facilitar o compartilhamento de informações entre as camadas da pilha de protocolo, como uma alternativa para promover a adaptabilidade necessárias às condições do meio de transmissão.

## 2.3 CONTROLE DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO

Os algoritmos e protocolos para WBANs devem ser projetados considerando o requisito de baixo consumo de energia ao mesmo tempo que devem garantir a confiabilidade do enlace, em termos de entrega de pacotes, mesmo em condições adversas de transmissão. Nas redes corporais, os níveis de atenuação do sinal de transmissão podem se modificar radicalmente ao longo do tempo, dependendo do estado de movimento do corpo humano: se em repouso, ou se em movimentos periódicos ou, até mesmo, se este está se movimentando em rápida velocidade (MOVASSAGHI et al., 2014).

Uma vez que a comunicação de dados é a tarefa que mais consome energia em um nó sensor a otimização da potência de transmissão tem um fator impactante no balanceamento entre consumo de energia e entrega de pacotes (XIAO et al., 2009). A adaptação dinâmica de parâmetros do nó sensor, como a potência de transmissão, utilizam estimativas da qualidade do enlace que, segundo Pires (2017), são métricas estabelecidas matematicamente sobre parâmetros relevantes, aplicada em um conjunto de dados amostrais.

Para Baccour et al. (2012), ao se estabelecer uma métrica deve-se considerar os seguintes requisitos: o consumo de energia utilizado na sua operacionalização (eficiência energética); a acurácia da métrica para inferir às condições do meio de comunicação; a reatividade da métrica às mudanças das condições do meio; e a estabilidade que se refere à tolerância aos estados transientes que evitem a execução dos algoritmos de forma desnecessária.

Segundo Baccour et al. (2012), os estimadores mais comuns para redes de sensores sem fio podem ser classificados em métricas baseados em *hardware* ou em *software*. Dentre as métricas baseadas em *hardware* estão o RSSI, LQI (*Link Quality Indicator*) ou SNR (*Signal Noise Ratio*). As métricas baseadas em *software* são representadas por valores gerados pelos cálculos das taxas de entrega de pacotes entre nó sensor e *sink*, denominados de PRR (*Packet Reception Rate*), ou alguma variação, como por exemplo, a contagem de pacotes de confirmação ACKs (*Acknowledgments*) recebidos.

Nikodem et al. (2014) comparam três estratégias para alteração dinâmica da potência de transmissão: uma baseada em contagem de ACKs, RSSI e PRR. Na estratégia baseada em ACK são definidos um contador de sucesso  $S$  e um contador de falhas  $F$  de transmissão. Quando o número de sucessos excede um limiar  $S_{max}$  (sucessos máximo) a potência é diminuída, por outro lado, se o número de falhas superar o limiar  $F_{max}$  (numero máximo de falhas) a potência é aumentada. Aos contadores  $S$  e  $F$  são atribuído o valor zero a todo momento que a potência de transmissão é alterada. Quando o número de sucessos ou falhas não ultrapassam esses limiares

uma nova transmissão é realizada utilizando a mesma potência que a transmissão anterior. Finalmente, quando o limite  $F_{max}$  é atingido com o maior valor de potência disponibilizado pelo rádio, o pacote é descartado.

Em uma segunda proposta, Nikodem et al. (2014) definiram um algoritmo que compara o RSSI obtido com um intervalo de referência ( $RSSI_{min}, RSSI_{max}$ ). Se o RSSI auferido estiver abaixo do limiar inferior ( $RSSI_{min}$ ) a potência é aumentada ou então, se estiver acima do limiar superior ( $RSSI_{max}$ ) a potência é diminuída. Uma vez que o valor do RSSI se refere ao valor da intensidade do sinal no recebimento de um pacote, segundo Nikodem et al. (2014) o valor do RSSI pode ser conhecido pelo menos de duas formas:

- medindo-se no nó sensor o valor do RSSI referente ao pacote ACK enviado pelo nó *sink*;
- anexando ao ACK o valor do RSSI medido no *sink* referente ao pacote enviado pelo nó sensor.

A solução principal apresentada por Nikodem et al. (2014) se baseia em PRR, em que a potência é alterada considerando os limiares  $S_{max}$  e  $F_{max}$  de forma semelhante ao estabelecido na proposta baseada em ACK. Contudo o critério de seleção da potência leva em consideração a proporção de pacotes entregues para determinado valor de potência e o seu consumo médio para realizar uma transmissão. Esta proporção de sucessos em relação às transmissões efetivadas é calculada pela relação de pacotes recebidos (PRR).

A partir desta probabilidade de sucesso é estabelecido um custo médio de energia consumido dado pela Equação 3 em que  $e_i$  é o consumo de energia de uma transmissão para a  $i$ -énésima potência;  $p_i$  que é a probabilidade de sucesso auferido pelo seu PRR; e  $q_i$ , por outro lado, é a probabilidade de falha na transmissão, valendo a relação  $p_i = 1 - q_i$ .

Nikodem et al. (2014) consideraram que para um número  $n$  de tentativas suficientemente grande a Equação 3 pode ser desenvolvida a partir da Equação 1. O número de tentativas de transmissão é limitado a um pequeno conjunto de valores: 2, 3 ou 4.

$$E_i = e_1 p_1 + 2e_2 p_2 q_2 + \dots + ne_i p_i q_i^{n-1} = e_i p_i \sum_{j=1}^n j q_i^{j-1} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n j q_i^{j-1} = \frac{\partial (\sum_{j=1}^n q_i^j)}{\partial q_i} \approx \frac{1}{(1 - q_i)^2} \quad (2)$$

$$E_i \approx e_i p_i \frac{1}{(1 - q_i)^2} = \frac{e_i}{1 - q_i} = \frac{e_i}{p_i} \quad (3)$$

Dado a Equação 3 é possível definir a potência de transmissão de forma a minimizar o

consumo médio de energia. Este equacionamento permite formalizar a relação sobre o que seria mais vantajoso em termos de consumo de energia: utilizar uma potência com maior chance de entrega na primeira tentativa, mas que também consumiria mais energia, ou tentar transmitir com uma potência menor, que consome menos energia e que potencialmente poderia utilizar mais de uma tentativa.

Nikodem et al. (2014) concluíram que não há uma única solução que supera o desempenho das demais em todos os cenários analisados. Ademais, as soluções apresentadas dependem de parâmetros cuja otimização não é facilmente estabelecida.

Xiao et al. (2009) propõem um algoritmo que calcula a média ponderada entre a média anterior do RSSI e o último valor de RSSI obtido. Se o valor do RSSI está abaixo ou acima da média anterior diferentes pesos são considerados para realizar o cálculo desta média. Se o resultado obtido está abaixo de um limiar inferior então a potência de transmissão é dobrada, caso seja acima de um limiar superior a potência é diminuída por uma constante. Se o valor médio obtido está entre esses limiares de referência nenhuma ação é realizada. Segundo Xiao et al. (2009), ainda persiste o problema de estabelecer os valores e pesos envolvidos em seus cálculos que otimize os recursos da rede WBAN.

Kim e Eom (2014) definem um processo para definição dinâmica da potência dividido em duas etapas. A primeira etapa estima a qualidade do enlace em um período curto de tempo – *Short-Term-Link-State Estimation* em que, a partir de  $n$  amostras de RSSI é calculado um coeficiente que considera apenas aqueles valores que estão abaixo ou acima dos limiares que definem o intervalo de referência. A potência de transmissão é então corrigida por este fator. Na segunda etapa, denominada *Long-Term-Link-State Estimation*, o limiar superior do intervalo de referência é atualizado com base no desvio padrão das medidas do RSSI dos último 5 intervalos utilizados no cálculo *Short-Term-Link-State Estimation*.

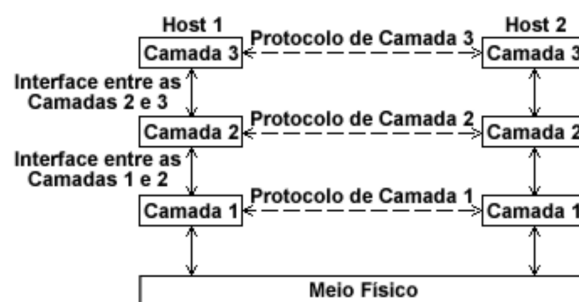
Segundo Archasantisuk et al. (2016) a atenuação (ganho do canal) pode ser aproximado por uma distribuição *lognormal*, em que a média e a variância mudam de acordo com a posição do nó e o movimento do corpo humano. As condições do canal para a próxima transmissão (média e a variância) são estimadas com base em uma correlação temporal em relação ao ganho do canal observado na transmissão anterior e o intervalo de tempo transcorrido entre as transmissões. Esse ganho é conhecido comparando-se a potência de transmissão e a potência de recepção do sinal. Para tanto, a informação da potência do sinal recebido, informado pelo RSSI, é anexado ao ACK que será enviado ao nó sensor como indicação do recebimento do pacote pelo nó *sink*. Desta forma, a potência de transmissão é definida com base em uma estimativa para o decaimento do sinal e no intervalo de tempo entre uma transmissão e outra.

As soluções apresentadas nesta seção utilizam unicamente um estimador da qualidade do enlace para definir alguma propriedade do nó sensor, nos casos apresentados, a potência de transmissão. Cada estimador possui as suas particularidades, vantagens e desvantagens. E também, estes algoritmos são implementados sob a tradicional arquiteturas em camadas. Na próxima seção será apresentado a arquitetura *Cross-Layer* que propõe novas formas de comunicação e cooperação entre as camadas que compõe a pilha de protocolos dos nós sensores. Com esta nova forma de comunicação entre as camadas procura-se aperfeiçoar a adaptabilidade dos nós sensores às condições do meio de transmissão.

## 2.4 ARQUITETURA *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 (ISO/ITU-T<sup>1</sup>). Nesse tipo de arquitetura, a comunicação ocorre por meio de interfaces entre camadas vizinhas, como pode ser observado na Figura 3. Historicamente, a arquitetura em camadas foi motivada pelo uso bem sucedido nos protocolos da Internet (AKYILDIZ; VURAN, 2010).

Observa-se na mesma figura que os protocolos são específicos para cada camada, realizando a comunicação horizontal com sua camada correspondente em um dispositivo de destino. Para a informação chegar até a camada correlata, realiza-se a comunicação vertical entre as camadas, tanto para enviar quanto para receber dados. O tráfego desses dados, demonstrados na Figura 3 pelas linhas cheias, ocorre pelas interfaces das camadas.



**Figura 3: Um modelo ilustrativo de três camadas.**

As funções específicas de cada camada proporcionam flexibilidade a essa arquitetura, o que pode ter colaborado na evolução e desenvolvimento das redes de computadores. Contudo, arquiteturas em camadas possuem desvantagens, como o *overhead* proporcional ao número de camadas, impossibilidade de ajuste de parâmetros com base no comportamento de outras camadas e a implementação duplicada de funções. Como exemplos de duplicidade de funções

<sup>1</sup>Telecommunication Standardization Sector - Setor de Normalização de Telecomunicação

tem-se o controle de erro e criptográfica (ambas nas camadas de aplicação, transporte, rede e enlace).

Segundo Srivastava e Motani (2005), em uma arquitetura para redes sem fio de modo geral, três razões justificam a comunicação entre camadas não adjacentes para redes sem fio: a possibilidade da comunicação oportunista, novas modalidades de comunicação oferecidas pelo meio e problemas característicos das transmissões sem fio. Os autores exemplificam a conveniência dessa abordagem, descrevendo protocolos desenvolvidos que apresentam falhas devido à sua estrutura de comunicação em camadas, que não foram projetadas supondo as especificidades do meio de acesso sem fio. Por exemplo, no mecanismo de transmissão do TCP que envia um pacote de erro, por engano, em um enlace sem fio para indicar que o mesmo está congestionado, conforme (SRIVASTAVA; MOTANI, 2005) e (KHAN; ZAKI UDDIN, 2013).

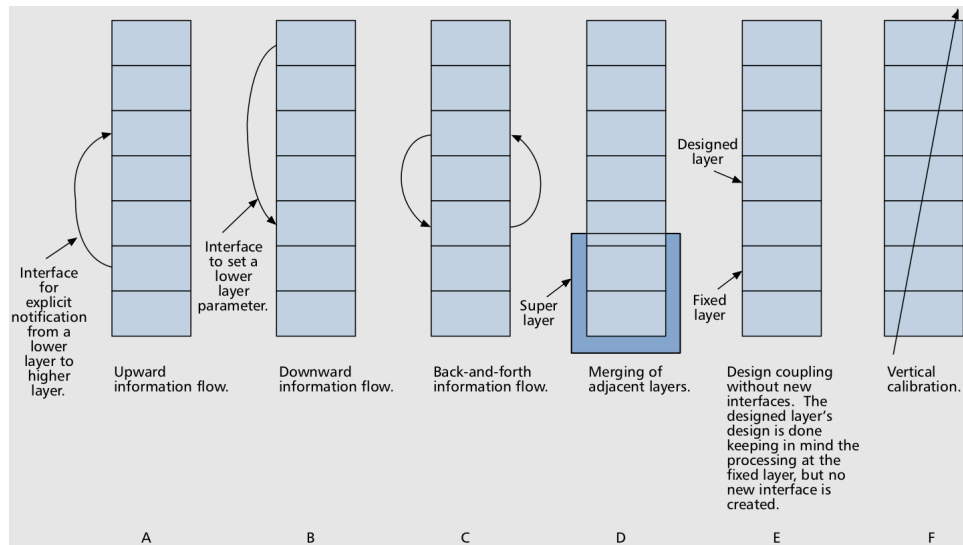
Uma rede com comunicação sem fio oferece novas formas de interconexão, que não podem ser exploradas com a estrutura do modelo em camadas. Como descrito em (SRIVASTAVA; MOTANI, 2005), a comunicação oportunista, em que parâmetros das camadas podem ser dinamicamente alterados e disponibilizados para a adaptação da qualidade dos canais, é inviável sem a quebra na rigidez da estrutura das camadas. Devido à natureza *broadcast* da comunicação sem fio, a camada física é capaz de receber vários pacotes simultaneamente, e utilizar esse modo de envio para a colaboração com os nós sensores vizinhos para o uso dos canais.

O desenvolvimento de uma nova arquitetura pode incorrer na violação das regras das camadas, permitindo uma comunicação direta entre protocolos de camadas não-adjacentes ou o acesso a variáveis globais (protocolo oportunista). Esse tipo de arquitetura é denominada de *cross-layer* (CL), que pode reduzir a complexidade da arquitetura em camadas. (LATRÉ et al., 2011) definindo CL como um meio de melhorar a eficiência e a interação entre duas ou mais camadas da pilha de protocolos, e que a pesquisa dessa arquitetura em redes de sensores vem aumentando.

Segundo (SRIVASTAVA; MOTANI, 2005), as propostas para arquiteturas *cross-layer* podem ser ilustradas pela Figura 4, em que os retângulos representam as camadas de protocolos. Na Figura 4-a até 4c, existe a necessidade da criação de novas interfaces de comunicação para que um protocolo de uma camada consiga informações de outra camada, de forma dinâmica. As informações de cada camada estão relacionadas a determinados estados da rede, como o meio de acesso, taxa de dados, potência de sinal, e outros. E essas novas interfaces permitem que as camadas tenham acesso a variáveis que indiquem as condições ou estados atuais de outra camada. A ciência dessas variáveis podem ser relevantes para o aperfeiçoamento dos serviços



específicos de cada camada.



**Figura 4: Propostas para projetos de interação *cross-layer* ((SRIVASTAVA; MOTANI, 2005)).**

O projeto mostrado na Figura 4-d é caracterizado pela união ou fusão entre 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 da pilha de protocolo com as interfaces já existentes. Essa implementação não assegura vantagens em relação ao tipo *Back-and-forth information flow*, mostrado na Figura 4-c, que pode ser entendida como um tipo de fusão entre camadas. O que as difere é a análise de desempenho entre a necessidade da criação ou não de novas interfaces.

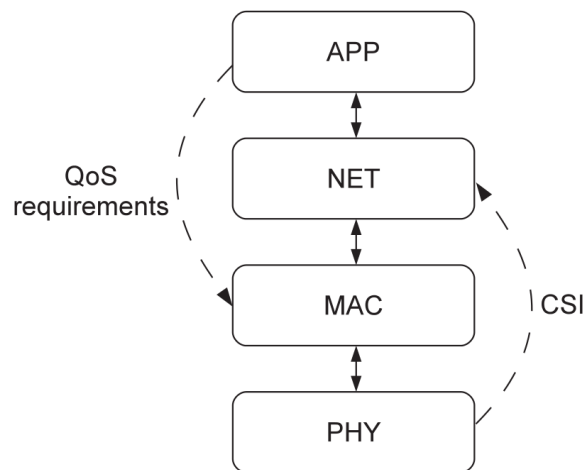
Na Figura 4-e é mostrado o acoplamento de projetos em que parâmetros de camadas são utilizados por um protocolo específico presente em outra camada. Nessa modalidade de projeto não há o desenvolvimento de novas interfaces. Na Figura 4-f é mostrado um projeto que envolve o uso dos parâmetros de várias camadas, denominado de calibração vertical. Nesse caso, o ajuste global dos parâmetros, de todas as camadas, colabora para um objetivo da camada de aplicação, de forma a melhorar seu desempenho.

## 2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura de redes corporais, o desenvolvimento de protocolos *cross-layer* ainda é incipiente, e muitos são baseados em soluções de redes *ad hoc*. A seguir são descritos os trabalhos relacionados que relatam as vantagens, camadas utilizadas e estratégias adotadas pelos autores, utilizando técnicas *cross-layer*.

No aspecto da arquitetura, a pilha de protocolos das WBAN também possui particularidades. As limitações impostas pelas características das WBAN e por se tratar de uma área recente de pesquisa, dificultam a consolidação de um padrão. Segundo Movassaghi et al. (2014), entre os padrões mais utilizados e referenciados nas WBANs estão o IEEE 802.15.4 (802.15.4, 2011) e o IEEE 802.15.6 (802.15.6, 2012), que definem as camadas física e de enlace, deixando disponível a implementação das demais (rede e aplicação).

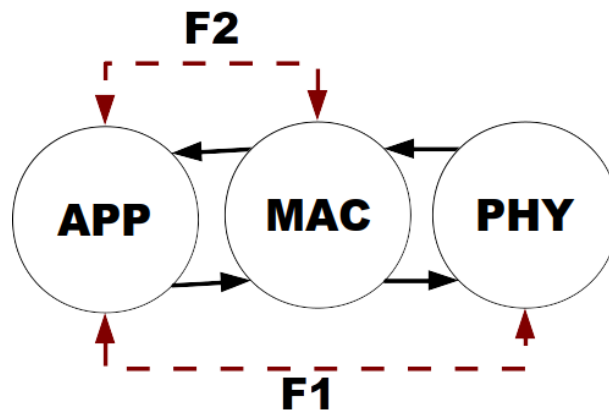
Na Figura 5 é mostrado um exemplo de interação CL com uma arquitetura de quatro camadas. A camada de aplicação pode orientar a camada MAC para o agendamento de acesso ao meio (QoS); a camada física pode informar a camada de rede sobre o estado do canal de comunicação (CSI – *Channel State Information*) (MENDES; RODRIGUES, 2011).



**Figura 5: Arquitetura de quatro camadas com dois exemplos de interação *cross-layer* (MENDES; RODRIGUES, 2011).**

A variação natural das condições ambientais no canal de comunicação afeta o desempenho em comunicação sem fio. A impossibilidade da comunicação, compartilhamento ou troca de informações entre camadas não adjacentes agravam esse problema (HEFEIDA et al., 2012). Essas limitações impulsionaram a pesquisa das vantagens da violação das regras em arquiteturas em camadas, como do modelo OSI, para o desenvolvimento de novas abordagens e protocolos para o aprimoramento na comunicação sem fio.

Ahmed et al. (2015) implementam um protocolo *cross-layer* para controle de potência em uma rede *Ad Hoc* por meio de simulações, baseado na troca de informações entre as camadas de rede e a física. A estratégia utilizada é que, a partir da leitura do RSSI de pacotes de controle enviados pelos nós da rede, cada um possa estimar a área de alcance em relação aos demais. O objetivo de Ahmed et al. (2015) não é apenas obter a menor, mas também a mais confiável rota para transmissão de pacotes pela rede.



**Figura 6: Arquitetura Cross-Layer proposta por Pozza e Silva (2015).**

Para Chen et al. (2017) a otimização dos recursos em uma WBAN deve 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 mutuas entre a escolha da potência de transmissão, roteamento e o tamanho do pacote são explicitadas e uma formalização matemática é definida. A partir de tal formalização, é definido um algoritmo para inicialização da rede que pode ser iterado por uma quantidade pré-definida de repetições. Esse estudo considera uma rede composta de dez nós sensores e um nó *sink* em uma topologia com múltiplos saltos.

O algoritmo proposto por Chen et al. (2017) utiliza uma arquitetura *cross-layer* entre a cooperação da camada MAC e física, a qual 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 retransmissão) com o balanceamento do consumo de energia entre os nós sensores. A potência do rádio dos nós sensores folhas é recalculado, entre a camada MAC e física, considerando que estes nós gastam menos energia, de modo a melhorar a confiabilidade da rede. Chen et al. (2017) utilizam informações das camadas de rede, MAC e física para otimizar o tamanho dos pacotes para toda rede, com o objetivo de melhorar a eficiência da transmissão e o consumo de energia.

Em Pozza e Silva (2015) é proposto o uso de uma arquitetura *cross-layer*, com a troca de mensagens entre camadas não adjacentes, baseado no padrão IEEE 802.15.4 e implementada no simulador Castalia - conforme Figura 6. No Fluxo F2 a camada de acesso ao meio (MAC) informa à camada de aplicação (APP) em um intervalo definido de pacotes transmitidos o PRR obtido. Uma taxa PRR é definida como a razão entre a quantidade de transmissões bem sucedidas em relação a um intervalo de 100 pacotes transmitidos. O valor da potência de transmissão

**Tabela 1: Descrição da posição e taxa de dados**

<b>Identificador</b>	<b>Mnemônico</b>	<b>Posição</b>	<b>Taxa de dados</b>
1	E-Pulso	Pulso esquerdo	10
2	D-Pulso	Pulso direito	10
3	E-Tornozelo	Tornozelo esquerdo	15
4	D-Tornozelo	Tornozelo direito	25
5	Peito	Peito	25

é definido comparando-se o valor de PRR com um limiar de referência. Se a proporção de sucessos obtidos estiver abaixo desse limiar então a maior potência de transmissão é escolhida. Por outro lado, se a potência de transmissão estiver acima desse limiar, então a menor potência de transmissão é escolhida. Definida a potência de transmissão a camada de aplicação informa a camada física a potência de transmissão do próximo intervalo de avaliação do PRR utilizando o Fluxo F1.

Pozza e Silva (2015) compararam a sua solução com dois experimentos que utilizavam potência fixa. O primeiro denominado Potência Alta (PA) utilizando o maior valor de potência disponível de -10dBm, que corresponde ao melhor índice de entrega sob as demais potências. E uma segunda simulação denominada Potência Baixa (PB) que utilizava uma potência de -25 dBm que corresponde ao mais baixo consumo de energia.

A rede simulada nos estudos de Pozza e Silva (2015) consistia de um nó coordenador, denominado *sink*, posicionado na cintura de uma pessoa e outros cinco nós sensores espalhados pelo corpo. Na Tabela 1 é informada a posição e a taxa de dados para cada nó.

No trabalho de Oliveira (2017) foi definido experimentalmente os limiares que produzem os melhores resultados, das taxas de entrega de pacotes, apoiado na análise de algumas simulações. Conforme mostrado na Tabela 2 se a taxa PRR ficasse abaixo de 40% a potência de -10 dBm era escolhida; abaixo de 70% a potência de -12 dBm; abaixo de 90%, a potência de -15 dBm; acima de 90% a potência de -20 dBm. Esta estratégia apresentava os melhores resultados em relação a entrega de pacotes e consumo de energia para os nós 1, 2 e 3 que possuem baixa taxa de dados. Para os nós 4 e 5 com alta taxa de dados (25 pacotes por segundo) ainda não foi possível perceber melhora no desempenho em relação ao consumo de energia e entrega de pacotes.

Com as conclusões referentes a Tabela 2, Oliveira (2017) propôs um novo algoritmo para seleção da potência considerando o cenário apresentado por Pozza e Silva (2015) em que relaciona valores de potência de transmissão à níveis atingidos pela taxa de recebimento PRR, como mostrado na Tabela 3. A taxa PRR foi definida como uma proporção de confirmação de

**Tabela 2: Exemplificação da Estratégia de níveis adotado por (OLIVEIRA, 2017)**

Nível	Potência associada	Intervalo	Amplitude	Porcentagem
1	-10 dBm	0 → 40	41	40.60%
2	-12 dBm	41 → 69	29	28.71%
3	-15 dBm	70 → 89	20	19.80%
4	-20 dBm	90 → 100	11	10.90%

**Tabela 3: Estratégias para seleção de potência baseada na divisão da escala PRR - (OLIVEIRA, 2017)**

Estratégia	PRR 1 (%)	PRR 2 (%)	PRR 3 (%)	PRR 4 (%)
	-10 dBm	- 12 dBm	- 15 dBm	- 20 dBm
A	<40	<70	<90	>= 90
B	<30	<60	<80	>=80
C	<20	<50	<70	>=70
D	<10	<40	<60	>=60

recebimento em relação ao intervalo de pacotes enviados variando de zero a cem. Esta escala foi dividido em intervalos menores para que correspondessem aos valores de potência utilizados (-10 dBm, -15 dBm e -20 dBm).

Nestes dois últimos trabalhos a variação da potência é dependente dos valores assumidos pela taxa PRR. Contudo, a alteração da potência também objetivava influir nos valores resultantes da PRR. Esta recorrência dificulta a análise da relação entre a potência de transmissão assumida e o resultado auferido pela taxa PRR.

Em Pozza et al. (2018) as chances de ocorrência dos valores de potência foram associados com as probabilidades da variável aleatória de uma Distribuição Binomial de Probabilidades. O procedimento de alteração da potência foi simulado em um intervalo de 5 transmissões utilizados para contabilizar uma métrica de software denominada de *taxaMAC*. Assim como a PRR, a *taxaMAC* realiza a média de pacotes recebidos, porém considera todas as transmissões realizadas na camada MAC, ao contrário da PRR que contabiliza os pacotes da camada de Aplicação.

A Distribuição Binomial de Probabilidades é caracterizada pela realização de  $n$  tentativas de um experimento com dois resultados possíveis: sucesso com probabilidade constante  $p$ ; ou fracasso, com probabilidade  $(1 - p)$  (experimento de Bernoulli). Define-se a variável aleatória (VA)  $X$  como o número de sucessos obtidos em  $n$  tentativas que assume valores discretos, como  $X = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ . Sua função de distribuição de probabilidade (PDF – *Probability Density Function*) possui a seguinte equação:

$$P(X = x) = \binom{x}{n} p^x (1 - p)^{n-x} \quad (4)$$

O rádio utilizado nos nós sensores modelado no Castalia possui um conjunto discreto de valores de potência de transmissão, representados no Algoritmo 1 como *VetorPotencia* (linha 4). O valor da variável *indice* (linha 5) é um inteiro calculado conforme as probabilidades da variável aleatória de uma Distribuição Binomial com  $n$  tentativas e probabilidade  $p$ . Portanto, a probabilidade de ocorrer determinado valor de potência é associado a ocorrência de  $X$  sucessos em  $n$  tentativas da Distribuição Binomial (Equação 4). Deve-se observar que o parâmetro  $n$  está relacionado a última posição válida do *VetorPotencia*.

---

**Algoritmo 1:** Definição da potência em CL-B

---

**Saída:** Valor inteiro da potência de transmissão

```

1 início
2    $n = 4$ 
3    $p = 0.9$ 
4    $VetorPotencia = [-25, -20, -15, -12, -10]$ 
5    $indice = CalculaDistribuicaoBinomial(n, p)$ 
6    $potencia = VetorPotencia[indice]$ 
7 fim
8 retorna ( $potencia$ )
```

---

No Algoritmo 1, a menor potência de transmissão (-25 dBm) se encontra na posição zero do índice de *VetorPotencia* e a maior potência de transmissão (-10 dBm) na quarta e última posição de *VetorPotencia*. Assim, a probabilidade  $P(W = -15dBm)$  da potência -15 dBm ( $w_i$ ) ser selecionada corresponde ao valor da probabilidade  $P(X = 2)$  (Equação 5), ou seja, obter dois sucesso em  $n$  tentativas, já que -15 dBm se encontra na posição de índice 1 do vetor.

$$P(W = w_i) = P(X = i) \quad (5)$$

Uma vez que as potências de transmissão do rádio são pré-definidas no simulador (-10, -12, -15, -20 e -25 dBm) o valor do parâmetro  $n$  torna-se constante. As simulações foram analisadas sob o aspecto da variação de  $p$  e seu impacto no desempenho da rede. Dado que este parâmetro pode assumir qualquer valor entre zero e um, foram simulados apenas os seguinte valores para  $p$ : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. Quando o valor de  $p$  está mais próximo de 1, as potências altas são escolhidas com maior frequência e a variação na troca da potência é menor, seguindo as propriedades do valor médio e variância da Distribuição Binomial. Logo existe maior probabilidade na entrega de pacotes e maior consumo de energia. Quando o valor de  $p$  está próximo de 0, são escolhidas com maior probabilidade as potências baixas, o que

resulta em baixa probabilidade de entrega mas consumo menor de energia.

No próximo capítulo serão apresentadas e discutidas as características do simulador e dos cenários utilizados para a realização deste trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o simulador Castalia, os módulos utilizados nas simulações e as tecnologias utilizadas durante a etapa de análise dos dados produzidos pela simulação.

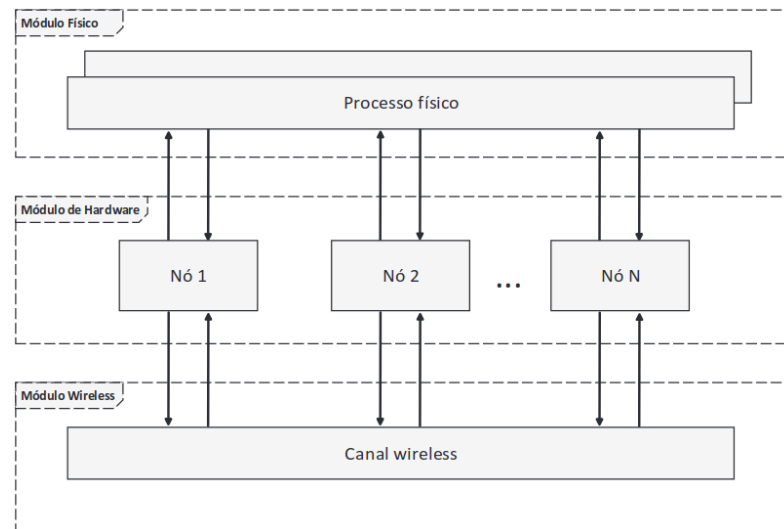
#### 3.1 SIMULADOR CASTALIA

O Castalia foi projetado para a simulação de redes de sensores sem fio, redes corporais sem fio e redes correlatas que consistem em dispositivos com recursos limitados. Possui um projeto modular baseado em uma pilha de protocolos, permitindo que seus componentes sejam alterados baseados nos projetos de simulação. Como mostrado na Figura 7, sua arquitetura é baseada em módulos e mensagens, em que cada módulo é definido como uma unidade básica de execução que recebe mensagens de outros módulos (PEDIADITAKIS et al., 2010). O módulo físico tem por funcionalidade representar o ambiente que os nós sensores devem monitorar; o módulo de hardware representa os nós sensores da rede e o módulo canal *wireless* emula o canal sem fio no qual os nós sensores se comunicam. As setas que interligam os módulos demonstram a troca de mensagens entre eles.

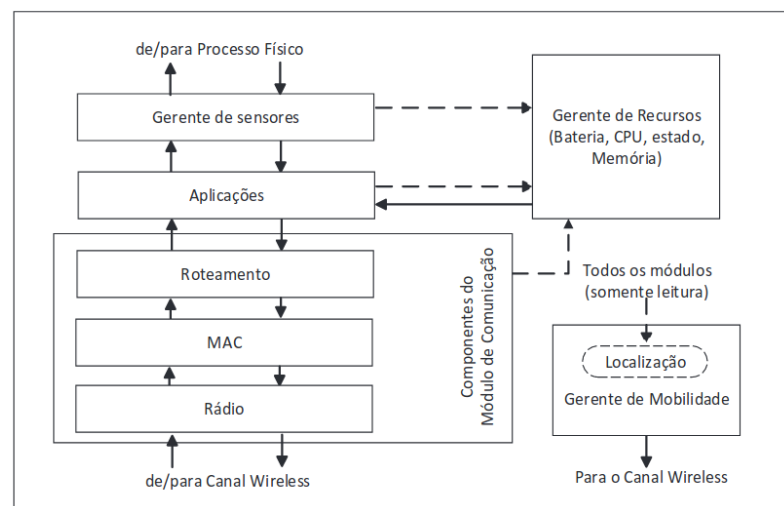
Na Figura 8 é apresentado o modelo lógico que implementa os nós sensores. As setas sólidas representam as trocas de mensagens entre os elementos e as setas tracejadas indicam a relação entre os métodos entre os módulos. Por exemplo, os módulos podem executar uma função do Gerente de Recursos para sinalizar que uma determinada quantidade de energia foi consumida. Os módulos Aplicações, Roteamento, MAC, Rádio e Gerente de Mobilidade podem ser modificados para implementarem novos algoritmos, protocolos e modelos. Atualmente, diversos módulos estão disponíveis e podem ser configurados por meio de parâmetros. A parametrização é permitida com o uso de uma linguagem de alto nível denominada NED (*Network Description*) que é disponibilizado pelo *framework* OMNet++, sobre o qual o simulador Castalia foi desenvolvido (FORTINO et al., 2013).

Nas seções seguintes serão apresentados os principais módulos utilizados para simular





**Figura 7:** Arquitetura do Castalia demonstrada em módulos e mensagens (PEDIADITAKIS et al., 2010).



**Figura 8:** Estrutura do Nó Sensor no Castalia (FORTINO et al., 2013).

WBANs no Castalia.

### 3.1.1 MÓDULO DO CANAL DE COMUNICAÇÃO

A propagação das ondas eletromagnéticas altera as características do sinal emitido e no receptor, a potência recebida não depende apenas da sua distância do emissor, mas também desse meio de propagação. Conforme apresentado na Seção 2.2 o canal de comunicação em WBANs possui características bem específicas. Segundo Boulis e Tselishchev (2011) vários modelos teóricos foram propostos para simular a atenuação do sinal em redes WBAN como, por exemplo, as Distribuições de *Weibull*, *Nakagami-m* e o Modelo *Log-normal*. Entretanto, para estes autores, os modelos propostos não se ajustavam ao comportamento das variações no

decorrer do tempo.

A proposta de Boulis et al. (2012) se baseia na ideia da correlação temporal da variação do sinal. Neste modelo, a probabilidade de ser observado determinado valor de atenuação em uma transmissão dependeria do último valor observado e do intervalo de tempo transcorrido entre uma observação e outra.

Em termos práticos (ou de implementação) os autores propõem que:

- se a diferença de tempo entre uma transmissão de dois eventos for menor que 10 ms (dez milissegundos) então a atenuação do sinal não se modifica;
- se a diferença entre as transmissões for maior que 5 s (cinco segundos) então a variação do sinal é considerada independente entre uma transmissão e outra;
- qualquer período de tempo entre os intervalos de 10 ms a 5 s é aplicado o modelo de correlação temporal.

Para diferentes intervalos entre esses dois valores limites (10 ms e 5 s) foram estabelecidas probabilidades condicionais que representassem a aleatoriedade da atenuação do sinal. Obviamente não seria possível descrever todas as combinações possíveis de valores (tempo e último valor observado) uma vez que estas variações eram obtidas a partir de dados empíricos (observacionais). Na falta de um modelo matemático para computar essas probabilidades, as condições do canal foram quantificadas em um arquivo denominado *Temporal Model*.

Este arquivo possui uma estrutura de acesso que possibilita descrever as funções de densidade de probabilidade (pdf) em relação ao tempo e ao último valor de atenuação observado. Esta descrição é conveniente uma vez que o Castalia é um simulador orientado a eventos. Para Boulis et al. (2012) um modelo para simulação do canal de comunicação mais realista é importante para se efetivamente avaliar o desempenho dos algoritmos e protocolos propostos para as redes WBANs.

Na modelagem do canal sem fio é estimado a perda média de caminho entre dois nós sensores ou, em geral, de dois pontos no espaço. O Castalia utiliza o modelo de sombreamento *lognormal*, junto 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 3 modelos (0, 1 e 2) de colisões de pacotes. Se configurado como interferência 0, não haverá 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 puder receber ambos os sinais – ainda que minimamente – haverá sempre uma colisão no receptor. Logo, é possível ter duas possibilidades: ter uma colisão ou o receptor recebe o sinal mais forte das duas transmissões (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, adicionando linearmente seu efeito no receptor.

Para as RSSF a distância entre os nós sensores são descritos em dezenas ou centenas de metros e, 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:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (6)$$

onde  $PL(d_0)$  é a perda de caminho em uma distância de referência  $d_0$ ,  $\eta$  é o expoente de perda de caminho e  $X_\sigma$  é um ruído aleatório Gaussiano de média 0 com desvio padrão  $\sigma$ . Um valor de 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; TSELISHCHEV, 2011). Por essa razão, o *Castalia* utiliza o modelo de correlação temporal proposto por Boulis et al. (2012) para modelar a atenuação do sinal no meio de comunicação. Neste modelo, o próximo valor da atenuação do sinal para um enlace está correlacionado ao último valor observado e ao tempo transcorrido entre estas duas transmissões. De uma forma prática, a implementação desta correlação no simulador *Castalia* segue a seguinte regra (BOULIS et al., 2012): 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 a atenuação são consideradas independentes; qualquer intervalo entre estes valores são especificadas probabilidades condicionais que correlaciona o valor da atenuação com o previamente observado.

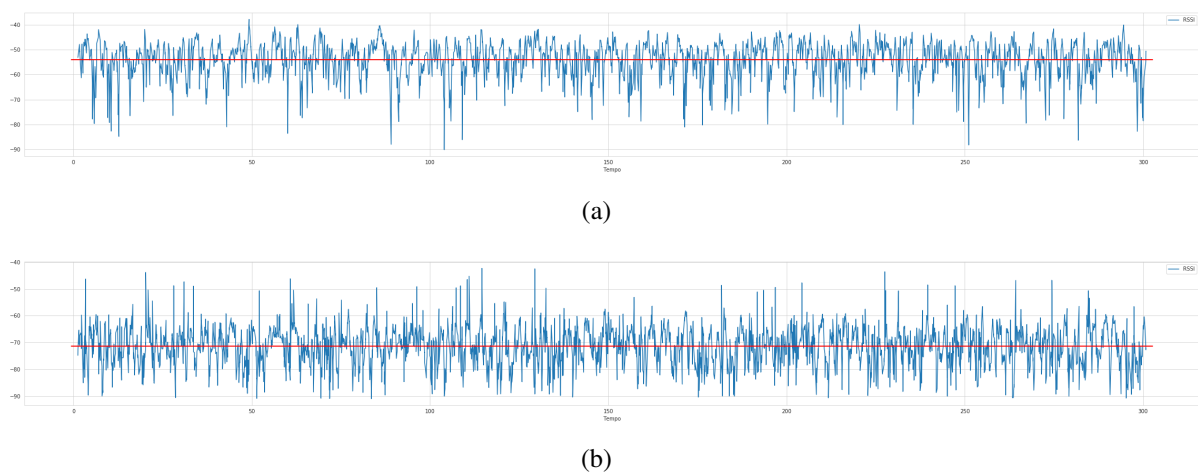
Para tanto, são considerados dois arquivos para parametrização do canal de comunicação. O primeiro deles é o *Path Loss Map* que define a perda média de sinal no enlace entre dois nós da rede, cujo valores são apresentados na Tabela 4. Por exemplo, o nó D-quadril (nó *sink*) possui em média uma perda de -56 dBm ao transmitir para o nó sensor E-Pulso, localizado no pulso esquerdo.

A variação temporal da atenuação do enlace (em dBm) é descrito em um segundo arquivo denominado *Temporal Model* que quantifica uma função de distribuição de probabilidade (PDF – *probability distribution function*) para certos intervalos pré-definidos, entre duas

transmissões consecutivas.

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



**Figura 9: Variação do RSSI observados nos nós D-Punho (a) e E-Tornozelo (b) para uma simulação transmitindo a uma potência de -10dBm.**

A título de exemplo, a Figura 9 apresenta a variação do RSSI obtidos no *sink* a partir de pacotes transmitidos pelos nós D-Punho e E-Tornozelo. O traço em vermelho representa o valor médio de atenuação (*path loss*) informado pela Tabela 4. Pode-se perceber que, apesar de todos os nós sensores compartilharem o mesmo arquivo *Temporal Model* a atenuação do sinal experimentada por cada nó é influenciada pelo valor do *Path Loss*.

### 3.1.2 MÓDULO DO RÁDIO

Para a camada física foi utilizado um modelo de referência, denominado *BANRadio* e definido por (BOULIS; TSELISHCHEV, 2011). Foi utilizado o modo de recepção *low* cujos parâmetros são mostrados na Tabela 5. O mesmo modelo também define o tempo de transição entre os diferentes estados do rádio (recepção, transmissão ou inativo – *sleeping*), o consumo de energia de cada estado, as potências disponíveis pelo rádio e qual o consumo de energia para realizar uma transmissão. As baterias dos nós sensores foram definidas com carga inicial de 18.720 Joules.

Parâmetros	Valor
Taxa de dados	512 Kbps
Modulação	Diff BPSK
Sensibilidade RX	-91 dBm
Potências de Transmissão	-10 -12 -15 -20 -25 (dBm)

**Tabela 5: Parâmetros do rádio conforme (BOULIS; TSELISHCHEV, 2011)**

$$T = \frac{R_{(radio)} * D_{(cycle)}}{Q} \quad (7)$$

(BOULIS et al., 2012) apresenta o cálculo para o limite teórico do canal de comunicação. Este cálculo pode ser realizado através da Equação 7, em que:

- $T$  é o resultado do tráfego que cada nó sensor sustenta trafegar em Kbps;
- $R_{(radio)}$  é o valor da taxa de dados do rádio, que no caso deste trabalho apresenta valor de 512 Kbps;
- $D_{(cycle)}$  indica a proporção de tempo que o nó sensor permanece ativo, que para este trabalho é um valor de 25% ;
- $Q$  é a quantidade de nós sensores utilizados no sistema, como já foi informado anteriormente, este valor é de cinco nós sensores para este trabalho;

### 3.1.3 MÓDULO DA CAMADA DE ACESSO AO MEIO

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, em que os nós sensores enviam pacotes ao nó *sink* em apenas um salto. 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 tem por padrão um *duty cycle* de 25%, e representa o período de tempo em que o nó sensor tentará enviar seus pacotes, e os 75% que permanecerá com o rádio desligado (BOULIS et al., 2012). Como a camada física foi configurada com taxa de dados 512 Kbps (Tabela 5), o *duty cycle* com 25% e a WBAN com cinco nós sensores, o máximo sustentável por nó sensor seria, sem considerar as retransmissões de pacotes e envio de *beacons*, de 25,6 Kbps (BOULIS et al., 2012).

### 3.1.4 MÓDULO DA APLICAÇÃO

O módulo de aplicação do Castalia é responsável por enviar dados com informações fisiológicas do usuário ao nó *sink*. Como ilustrado na Figura 7, as aplicações são têm relação com o Gerente de Recursos (bateria, memória, etc.) e o Gerente de Sensores, que pode ser implementado especificamente para um tipo de dado fisiológico (temperatura, batimento cardíaco, etc.).

Neste trabalho a aplicação utilizada envia pacotes de tamanhos fixos de 130 bytes, incluindo os *overheads*, para o nó *sink*. A aplicação possui vários parâmetros e os que serão definidos neste trabalho, com os respectivos valores são:

- *packet\_rate*: quantidade de pacotes a ser enviados por segundo (5, 10, 15 e 25);
- *startupDelay*: tempo de configuração inicial da rede (1);
- *packetHeaderOverhead*: tamanho em bytes do *overhead* dessa camada (5);
- *constantDataPayload*: tamanho em bytes dos pacotes a serem transmitidos (100);
- *isSink*: indica se o nó sensor é um *sink* (o nó sensor 0 será configurado como *sink* e os demais não).

O padrão IEEE 802.15.4 foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, assim como a aplicação denominada *ThroughputTest*, que está disponível no Castalia. Neste trabalho os parâmetros foram alterados e outros foram introduzidos para que o meio de acesso pudesse ser estudado.

## 3.2 TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE DADOS

As análises de dados foram feitas utilizando-se majoritariamente a linguagem de programação *Python*, versão 3.6. A linguagem implementa conceitos do paradigma da Orientação a Objetos (como classes, herança e polimorfismo) e também conceitos do paradigma da Programação Funcional – uma vez que oferece implementações *built-in* das funções *map*, *filter* e *reduce*, além de funções anônimas (lambda) e a passagem de funções como parâmetros de outras funções.

As análises de dados foram feitas com auxílio das bibliotecas *Numpy* e *Pandas*. 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* que permite executar comandos da linguagem Python diretamente em um navegador web. A utilização deste ambiente facilitou a prototipação dos *scripts* utilizados para a análise de dados.

Por ser uma linguagem de alto nível e por isso de fácil prototipação de algoritmos, a linguagem Python tem se tornado cada vez mais adotada em projetos de análise de dados. Por ser uma linguagem de *script* um algoritmo implementado em Python pode consumir um tempo maior de execução se comparado a outras linguagens. Entretanto as bibliotecas especializadas tem implementado meios para reduzir essa diferença no tempo de execução.

Para analisar o arquivo com os *logs* das simulações, foi utilizado a linguagem Awk que disponibiliza funcionalidades básicas para análise e tratamento de textos no ambiente Linux. A linguagem Awk interpreta um ou mais espaços entre palavras como delimitador de campo. Isso permite identificar palavras ou informações como se estivessem dispostas em colunas em uma tabela. Além disso é possível utilizar expressões regulares, funções, operações de comparação, entre outros, facilitando a análise de grandes arquivos de texto. Este recurso foi utilizado para extrair informações de interesse do arquivo de *log* (*Castalia-Trace.txt*) que foram utilizadas para monitorar o comportamento dos nós sensores em relação aos valores da *taxaMAC*, ocorrência das potências utilizadas e ocupação do *buffer*.

No próximo capítulo serão mostrados as configuração utilizadas em vários cenários do Castalia, para aprofundar o estudo do meio de acesso. Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto das estratégias de alteração de potência de transmissão em uma WBAN. Foram utilizados as configurações dos trabalhos de (POZZA; SILVA, 2015) e (POZZA et al., 2018)<sup>1</sup> como base para as novas simulações, em que os resultados foram analisados.

---

<sup>1</sup> Este trabalho teve a participação do autor deste TCC e é apresentado como contribuição.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações que utilizam duas estratégias para alteração da potência de transmissão segundo distribuições probabilísticas conhecidas. A primeira simulação reproduziu o experimento com alteração da potência de transmissão segundo uma Distribuição Binomial de Probabilidades. O parâmetro  $p$  – probabilidade de sucesso em uma tentativa – da Distribuição Binomial foi configurado com o valor 0,7. A esta simulação denominou-se CL-Binomial.

A segunda realiza a alteração de potência de transmissão segundo uma Distribuição Uniforme de Probabilidades. Nesta distribuição todas as potência utilizadas (-10 dBm, -12 dBm, -15 dBm, -20 dBm e -25 dBm) possuem a mesma chance de ser escolhida. Esta simulação foi denominada CL-Uniforme.

As simulações foram realizadas considerando os três modelos de colisão disponíveis no Castalia, explicado na seção 3.1.1. Para cada modelo de colisão as simulações foram repetidas 35 (trinta e cinco) vezes com tempo de 3601 (três mil e seiscentos e um) segundos, o que corresponde a aproximadamente uma hora e o primeiro segundo é utilizado para a inicialização da rede. A taxa de dados dos nós sensores corresponde àquela apresentada em (POZZA; SILVA, 2015) e (POZZA et al., 2018), mostrada novamente na Tabela 6.

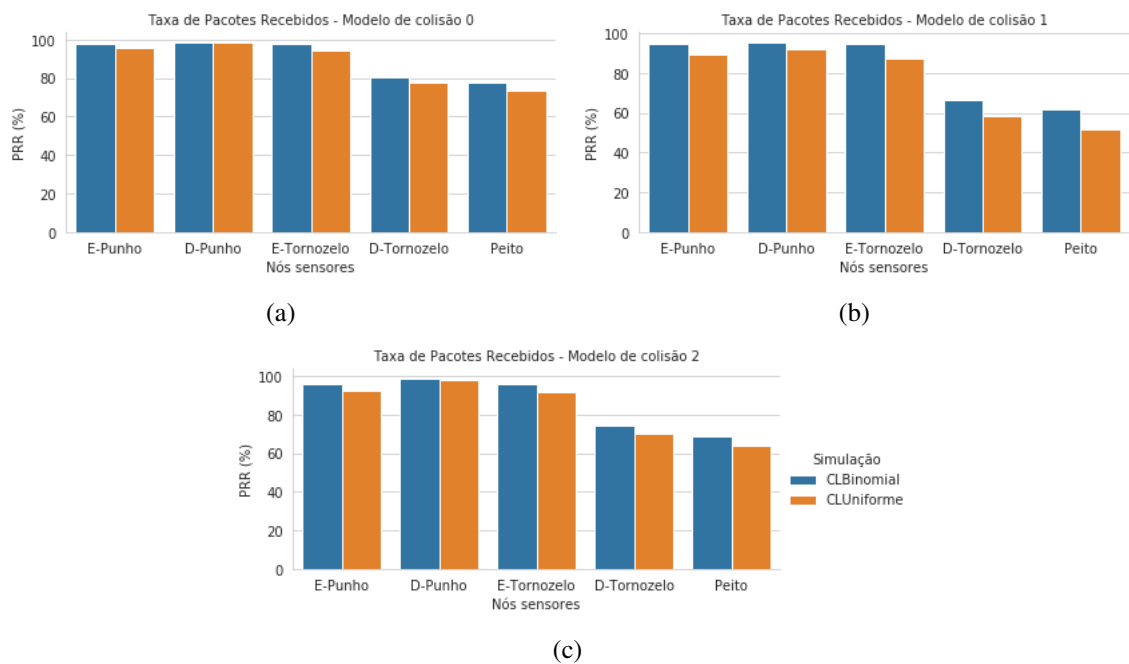
**Tabela 6: Descrição da posição e taxa de dados utilizada neste trabalho e em (POZZA; SILVA, 2015) e (POZZA et al., 2018).**

Identificador	Mnemônico	Posição	Taxa de dados
1	E-Pulso	Pulso esquerdo	10
2	D-Pulso	Pulso direito	10
3	E-Tornozelo	Tornozelo esquerdo	15
4	D-Tornozelo	Tornozelo direito	25
5	Peito	Peito	25



#### 4.1 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES CL-BINOMIAL E CL-UNIFORME

Os gráficos da Figura 10 comparam a taxa de recebimento de pacotes (PRR) nos três modelos de colisão disponíveis no *Castalia* entre as duas estratégias para a alteração da potência. De um modo geral, a taxa de entrega (PRR) é maior em todos os nós da simulação CL-Binomial. Os dados da Tabela 7 informam o PRR (em porcentagem) para a simulação CL-Binomial, enquanto na Tabela 8 é mostrado o mesmo resultado para CL-Uniforme.



**Figura 10: Comparação da taxa de recebimento de pacotes (PRR) entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

Contudo, é possível identificar comportamentos específicos para cada nó. Para o nó sensor localizado no punho direito (D-Punho) que possui a menor perda média de sinal (de -49 dBm) e uma taxa de dados de 10 pacotes por segundo, existe uma pequena diferença nos resultados entre CL-Binomial e CL-Uniforme.

**Tabela 7: Taxa de entrega de pacotes (PRR %) para a simulação CL-Binomial ( $p = 0,7$ ).**

Modelo de Colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	97,8%	98,9%	97,5%	80,7%	77,9%
1	94,7%	95,8%	94,8%	66,6%	61,7%
2	96,1%	98,9%	95,9%	74,0%	68,5%

Apesar do Modelo de Colisão Zero ser um modelo simplista e que dificilmente ocorrerá em um cenário real, ainda é útil compará-lo com os cenários onde existe colisão. Na simulação CL-Binomial o PRR médio do nó D-Punho possui uma diferença de 3,097% entre o modelo de

colisão 0 e 1. Por outro lado, este mesmo nó apresenta um desempenho ligeiramente superior no modelo de colisão 2 se comparado ao modelo de colisão 0 - a diferença é de 0,065%. Apesar desta diferença ser ou não significativa, pode-se afirmar que o desempenho do nó D-Punho foi, no mínimo, equivalente entre estes modelos (0 e 2). Esta mesma situação se repete na simulação CL-Unifome. Para o nó D-Punho, a diferença entre o modelo de colisão 0 e 1 é de 5,987%, e entre o modelo 0 e 2 a diferença é de apenas 0,04%. É interessante observar que para os demais nós da rede o desempenho é sempre menor nos cenários com colisão em relação ao modelo sem colisão (Modelo Zero).

**Tabela 8: Taxa de entrega de pacotes (PRR %) para a simulação CL-Unifome.**

<b>Modelo de Colisão</b>	<b>E-Punho</b>	<b>D-Punho</b>	<b>E-Tornozelo</b>	<b>D-Tornozelo</b>	<b>Peito</b>
0	95,5%	98,3%	94,6%	77,5%	73,7%
1	89,6%	92,3%	87,6%	58,5%	51,4%
2	92,6%	98,2%	91,8%	70,1%	63,5%

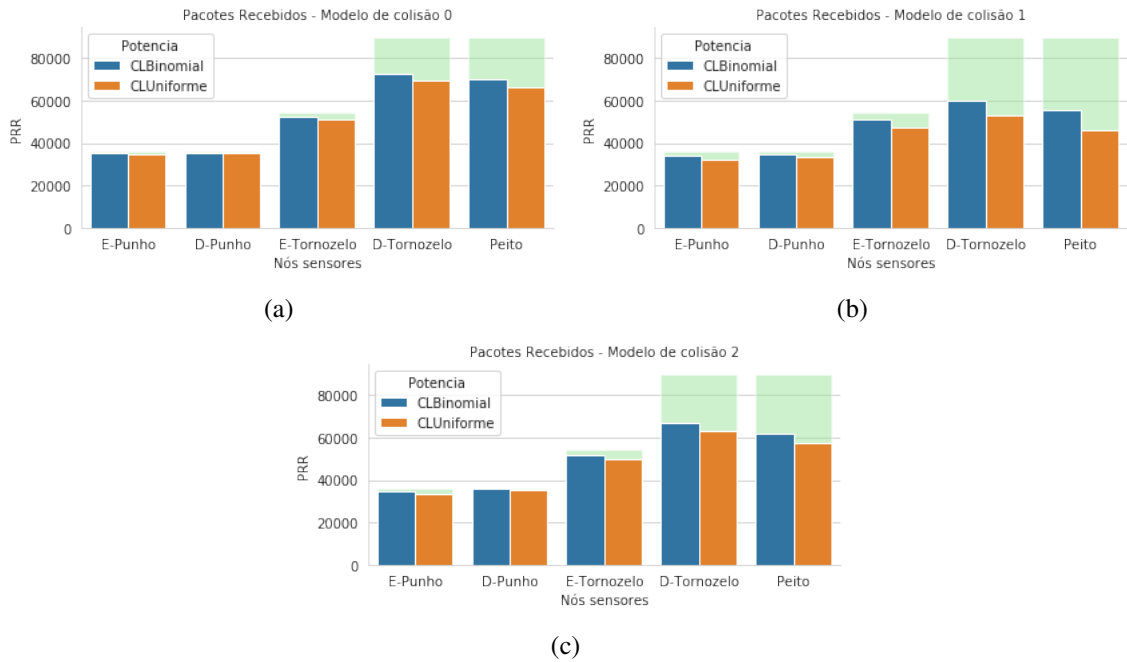
Esta observação indica que no Modelo de Colisão 2, quando há escolha entre receber um pacote e descartar o outro com base na força do sinal recebido, o nó sensor com a menor perda média do sinal de atenuação teria alguma vantagem sobre os demais nós sensores.

Os nós com taxa de dados de 25 pacotes por segundos – Peito e D-Tornozelo – são os que possuem a maior diferença nos resultados de entregas de pacotes (PRR) em relação à variação dos modelos de colisão nas simulações CL-Binomial e CL-Unifome. De fato, estes nós sensores apresentam um desempenho pior nos experimentos com alteração de potência de transmissão em relação aos resultados obtidos com os experimentos com a potência de transmissão fixa a -10 dBm para todos os nós (POZZA; SILVA, 2015) (OLIVEIRA, 2017) (POZZA et al., 2018).

Na seção 4.1.4 é sugerido que se o nó sensor está operando acima da capacidade do canal então ocorrerá um aumento na perda de pacotes por estouro da capacidade do *buffer*, uma vez que a latência de transmissão do nó sensor não conseguirá em média ser menor que o tempo de geração de um novo pacote.

A Figura 11 mostra os valores absolutos de pacotes que o nó *sink* recebeu de cada pacote. A área sombreada indica a quantidade esperada de pacotes a serem gerados durante o tempo de simulação (3600 segundos). Esta quantidade total é calculada multiplicando-se a taxa de dados ( $Tx_i$ ) do nó sensor pelo tempo ( $\Delta t$ ) da simulação (Equação 8).

$$K = Tx_i * \Delta t \quad (8)$$



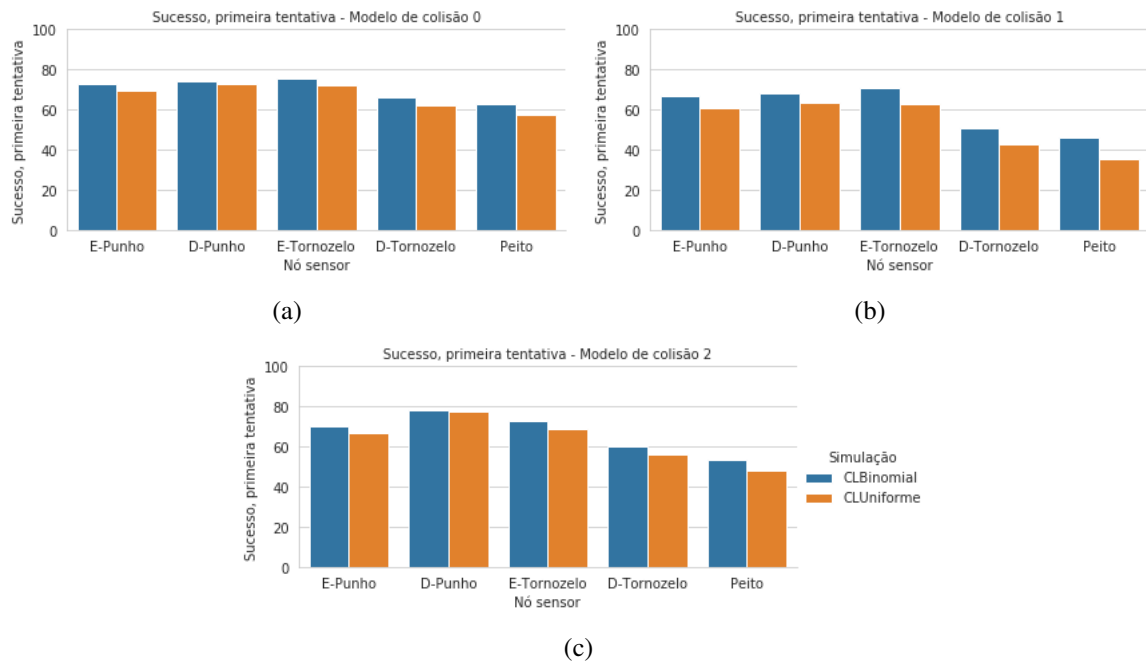
**Figura 11: Comparação do número absoluto de pacotes recebidos entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

Conforme os dados apresentados na Figura 10 os nós E-Punho e D-Punho conseguem entregar grande parte da quantidade de seus pacotes (aproximadamente 95%) enquanto os nós D-Tornozelo e Peito possui um grande intervalo entre o resultado de pacotes entregues e a quantidade de pacotes gerados. A quantidade absoluta de pacotes entregues terá grande influência na análise do consumo de energia que será apresentada na seção 4.1.5.

Nas próximas subseções serão analisados os impactos das estratégias para alteração da potência de transmissão baseadas nas métricas da camada MAC, disponibilizadas pelo simulador *Castalia*.

#### 4.1.1 COMPARAÇÃO DO SUCESSO NA PRIMEIRA TENTATIVA E NAS RETRANSMISSÕES

Através do parâmetro *maxFrameRetries* existente no módulo da camada MAC é possível configurar quantas tentativas de transmissão serão realizadas antes de um pacote ser descartado definitivamente. Um pacote é descartado quando o contador de número de tentativas torna-se igual a zero. O número de tentativas é decrementado quando: o tempo de espera pelo pacote de confirmação *ACK* é excedido; ou quando o número máximo de desistências (*backoffs*) do algoritmo CSMA/CA é atingido. Além disso, um pacote pode ser descartado quando não houver espaço para o seu armazenamento temporário no *buffer* – no simulador *Castalia* o tamanho do *buffer* pode ser configurado, sendo adotado para as simulações um valor padrão de



**Figura 12: Comparação da taxa de sucessos na primeira tentativa entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

32 (trinta e dois) pacotes. Cada uma destas falhas serão analisadas posteriormente.

Na Figura 12 é mostrada a proporção de transmissões bem sucedidas já na primeira tentativa para cada nó sensor. Já na Figura 13 é ilustrada a proporção de sucessos obtidos nas retransmissões – nas simulações realizadas foi adotado como padrão o número de duas tentativas.

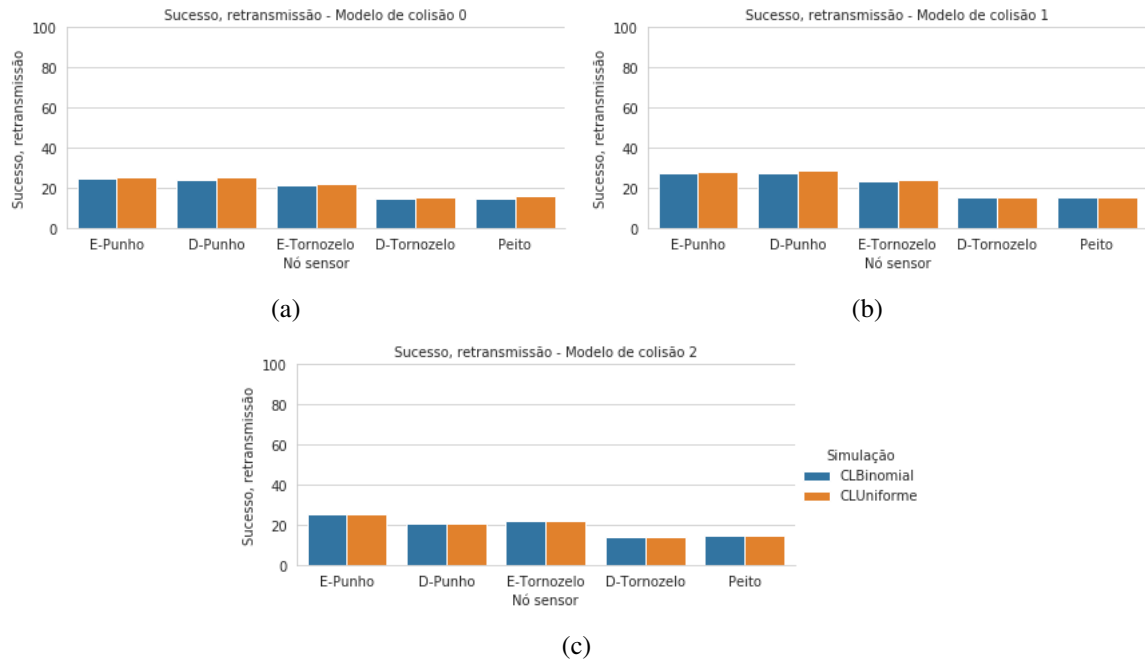
**Tabela 9: Taxa de sucessos (%) obtido na primeira tentativa na simulação CL-Binomial.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	72,9%	74,5%	75,6%	66,1%	62,6%
1	66,7%	68,4%	70,5%	51,0%	45,8%
2	70,4%	78,5%	73,1%	59,9%	53,2%

**Tabela 10: Taxa de sucesso (%) obtido na primeira tentativa, na simulação CL-Uniforme.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	69,5%	73,0%	71,9%	62,0%	57,3%
1	60,7%	63,2%	62,8%	42,7%	35,5%
2	66,7%	77,3%	68,9%	55,8%	48,3%

Ao analisar a Figura 12 observa-se que a simulação CL-Binomial possui um desempenho ligeiramente superior em relação à CL-Uniforme. As maiores diferenças nos resultados ocorrem no cenário com colisão 1, em que ambos os pacotes são descartados, demonstrando que em um cenário com maior interferência, a utilização de potências maiores com maior frequên-



**Figura 13: Comparação da taxa de sucessos nas retransmissões (a partir da segunda tentativa) entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

cia, como ocorre em CL-Binomial, pode ser mais eficiente quanto ao tempo de entrega. Nas Tabelas 9 e 10 estão os valores ilustrados na Figura 12.

Ainda analisando a Figura 12, o nó sensor D-Punho apresenta uma melhora no resultado para o modelo de colisão 2, enquanto há uma diminuição das taxa de sucessos para os demais nós.

De forma geral, observa-se uma equivalência nos resultados entre as simulações CL-Binomial e CLUniforme para o nó D-Punho em todos os cenários de colisão. Esta observação indica que a seleção de potências segundo a Distribuição Uniforme poderia ser utilizada sem grandes prejuízos para a entrega de pacotes e com a possibilidade de economizar energia.

De acordo com a Figura 13, a simulação CL-Uniforme possui um desempenho semelhante em relação a CL-Binomial, considerando apenas as retransmissão. Boulis et al. (2012) argumentam que as retransmissões são pouco significativas para o resultado final, uma vez que as retransmissões ocorrem em um curto intervalo de tempo, onde não são percebidas mudanças significativamente nas condições de atenuação. Os resultados semelhantes apresentados na Figura 13 indicam que as condições de melhora da atenuação foram semelhantes nas duas simulações.

Como os nós sensores alteram a sua potência em um intervalo fixo de transmissões realizadas, se ocorrer duas tentativas de transmissão em um mesmo intervalo (janela) e conse-

**Tabela 11: Taxa de sucessos (%) obtidos na retransmissões da simulação CL-Binomial.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	24,4%	24,2%	21,1%	14,4%	14,8%
1	27,4%	27,3%	23,6%	15,4%	15,5%
2	25,2%	20,4%	22,0%	13,9%	14,8%

**Tabela 12: Taxa de sucessos (%) obtidos na retransmissão da simulação CL-Uniforme.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	25,3%	25,0%	21,9%	15,1%	15,9%
1	28,3%	28,7%	23,9%	15,5%	15,2%
2	25,3%	20,8%	22,0%	14,0%	14,7%

quentemente com a mesma potência de transmissão, uma melhora nas condições de transmissão é observada se houver uma alteração favorável da atenuação do canal na segunda tentativa.

Se a proporção de sucessos fossem iguais entre a primeira tentativa e as retransmissões, seria de se esperar que a proporção de sucessos seguissem uma Distribuição Geométrica de Probabilidades. Ou seja, poderia-se argumentar que o aumento no número de tentativas aumentaria as chances de sucesso na entrega de pacotes de uma forma conhecida. Entretanto não é isso que se observa nos dados das simulações mostrados nas Tabelas 11 e 12.

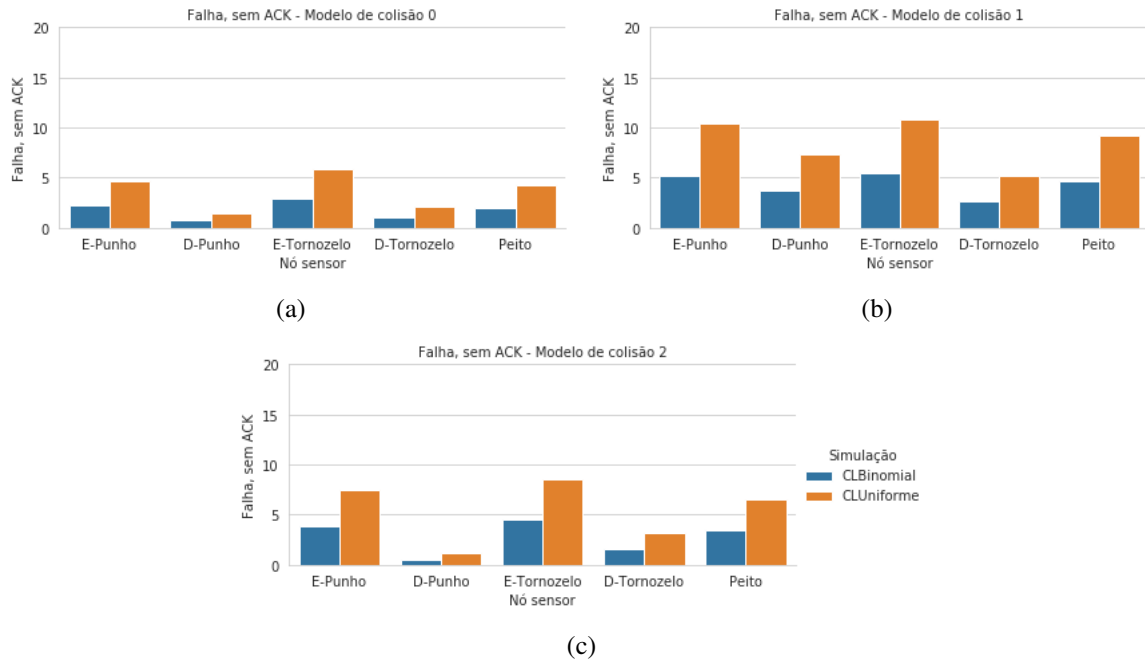
Diante deste fato, poderia-se se o equacionamento proposto por Nikodem et al. (2014) para estimar o custo das retransmissões em relação ao gasto de energia.

#### 4.1.2 COMPARAÇÃO DE FALHAS OCASIONADAS PELO NÃO RECEBIMENTO DE ACK

O pacote de confirmação ACK (*acknowledgment*) é uma forma do nó *sink* indicar ao nó sensor o recebimento de um pacote, para que ele possa iniciar os procedimentos para transmitir o próximo pacote. Nas simulações foi observado que o uso de ACK é necessário quando existe retransmissão, caso contrário poderia-se simplesmente enviar um pacote sem esperar por confirmação.

É definido um tempo limite para a espera pelo ACK. Quando este intervalo é excedido um evento de *ACK\_TIMEOUT* é disparado e uma falha por não recebimento de ACK é registrada. Entretanto, é possível detalhar ainda mais as causas relacionadas ao não recebimento do ACK, por exemplo:

- Um pacote foi transmitido pelo nó sensor mas a atenuação do sinal no meio de transmissão foi superior a sensibilidade do rádio e não foi possível receber o sinal (perda por atenuação do sinal) – fenômeno conhecido como *deep fade* (BOULIS; TSELISHCHEV, 2011);



**Figura 14: Comparação da taxa de falhas ocasionadas pelo não recebimento do ACK entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

- b. O nó *sink* recebeu um pacote de dados porém o ACK sofreu atenuação no meio e não foi recebido pelo nó sensor (perda do ACK);
- c. O algoritmo CSMA/CA foi insuficiente para impedir que dois pacotes fossem transmitidos ao mesmo tempo levando a uma colisão (ou interferência).

A ocorrência do caso b é mitigada por 3 fatores: nas simulações realizadas o nó *sink* transmitia a uma potência fixa de -10 dBm; a transmissão do ACK no nó *sink* é realizada logo após o recebimento do pacote e, considerando o modelo de correlação temporal proposto por (BOULIS et al., 2012), é provável que a atenuação do canal seja semelhante à anterior.

Na Figura 14 são apresentados as proporções referente ao não recebimento de ACK. No cenário sem colisão – Figura 14(a) – as falhas ocorrem quase que exclusivamente pela atenuação do sinal (Item a). Nas Figuras 14(b) e 14(c) os efeitos da existência de colisões é percebido como o aumento nas proporções destas falhas.

No cenário em que os pacotes são descartados em caso de colisão (Figura 14(b)) em todos os nós sensores há um considerável aumento neste tipo falhas se comparado com o cenário sem colisão apresentado na Figura 14(a). Neste caso todos os nós sensores são penalizados da mesma maneira.

Na Figura 14(c) observa-se uma redução nas taxa de falhas pelo não recebimento de ACK. Porém essa redução não é igualmente favorável a todos os nós sensores, por exemplo,

**Tabela 13: Taxa de falhas (%) ocasionadas pelo não recebimento de ACK na simulação CL-Binomial.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	2,2%	0,8%	2,9%	1,0%	2,0%
1	5,2%	3,7%	5,5%	2,6%	4,6%
2	3,9%	0,5%	4,5%	1,6%	3,4%

**Tabela 14: Taxa de falhas (%) ocasionadas pelo não recebimento de ACK na simulação CL-Uniforme.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	4,6%	1,4%	5,9%	2,1%	4,2%
1	10,4%	7,4%	10,8%	5,2%	9,2%
2	7,4%	1,1%	8,5%	3,2%	6,5%

o nó D-Punho experimenta uma proporção desse tipo de falhas comparável ao cenário sem colisão. Esta observação pode estar relacionada ao fato do nó sensor D-Punho possuir a menor perda média de sinal (-49 dBm) entre todos os nós. Assim, os pacotes transmitidos por este nó teriam maiores chances de serem recebidos com uma potência maior que os demais, sendo a provável escolha do nó *sink*.

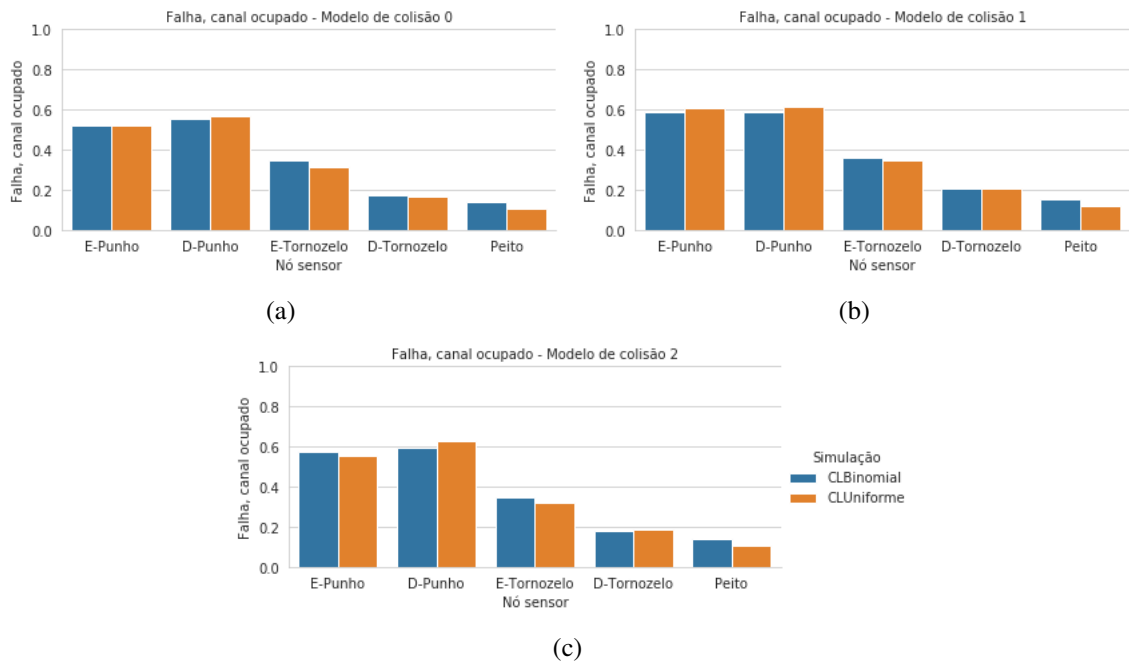
É importante notar que alguns algoritmos de controle de potência de transmissão encontrados na literatura (ARCHASANTISUK et al., 2016) (KIM; EOM, 2014) (XIAO et al., 2009) consideram o RSSI como forma de inferir as condições de atenuação do meio de transmissão e a partir disso definir a potência de transmissão. Contudo, os resultados apresentados na Figura 14 sugerem que os modelos de colisão definidos no simulador *Castalia* (BOULIS et al., 2012) influenciam a dinâmica entre os nós sensores interferindo no desempenho da rede – neste caso em específico, na taxa de falhas por não reconhecimento de ACK. Portanto, uma solução visando a alteração da potência de transmissão deve considerar a existência de colisão e formas de melhor tratá-las.

A ocorrência de colisão está relacionado ao funcionamento do algoritmo CSMA/CA na camada MAC – quando ocorra uma colisão no *sink* os procedimentos do algoritmo CSMA/CA não foram suficientes para evitá-la. Na próxima seção serão analisados as falhas ocasionadas por canal, isto é, quando o número de desistências (*backoffs*) do algoritmo CSMA/CA foi atingido, pois não encontrou o canal ocioso para transmissão.

#### 4.1.3 COMPARAÇÃO DE FALHAS OCASIONADAS POR CANAL OCUPADO

Uma vez que o meio de transmissão é compartilhado entre os nós sensores é necessário estabelecer meios para evitar que dois nós sensores tentassem transmitir simultaneamente. Estes





**Figura 15: Comparação da taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

mecanismos são implementados pelo algoritmo CSMA/CA na camada MAC e pelo CCA na camada física.

A Figura 15 apresenta os resultados observados para falhas relacionadas ao canal ocupado. Destaca-se o fato que este tipo de falha não ultrapassam 1% em todos os cenários simulados – de fato, as taxas para o pior caso giram em torno de 0.6%.

A proporções destas falhas parecem não se alterar – ou se alteram ligeiramente em alguns casos – com a modificação dos cenários de colisão e entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. Os nós mais penalizados (E-Punho e D-Punho) são aqueles que apresentam a menor taxa de dados de 10 pacotes/segundos. Provavelmente, devido a taxa de dados dos outros nós (15 e 25 pacotes/segundo) as chances dos nós E-Punho e D-Punho encontrarem o canal ocupado tornam-se ligeiramente maior, explicando o alto índice desta falha.

**Tabela 15: Taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado na simulação CL-Binomial.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	0,522%	0,555%	0,344%	0,171%	0,136%
1	0,586%	0,59%	0,358%	0,203%	0,15%
2	0,575%	0,597%	0,345%	0,182%	0,142%

Poderia-se argumentar que uma aprimoramento do algoritmo CSMA/CA para reduzir estes índices (Figura 15) não surtiriam efeitos significativos no desempenho da rede. Contudo, os dados sobre a entrega de pacotes em relação aos modelos de interferência (Figura 14) sugere-

**Tabela 16: Taxa de falhas ocasionadas por canal ocupado na simulação CL-Uniforme.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	0,522%	0,57%	0,315%	0,69%	0,107%
1	0,611%	0,615%	0,346%	0,207%	0,121%
2	0,555%	0,63%	0,321%	0,184%	0,108%

rem que colisões poderiam ser evitadas. Esta melhora poderia estar relacionada com a avaliação do algoritmo CCA na camada física que verifica se o canal está ou não ocioso.

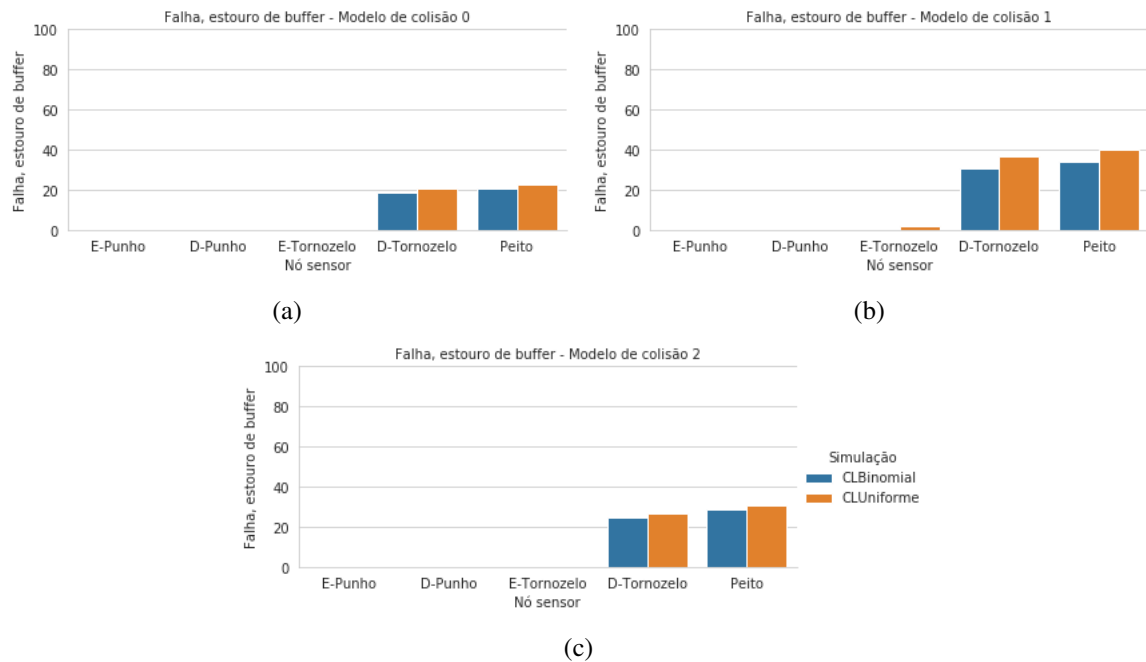
No simulador *Castalia*, a implementação do algoritmo CCA na camada física faz uma avaliação ingênua sobre o canal: se ele consegue captar a transmissão de outro pacote então ele avalia que o canal está ocupado, caso contrário, se ele não escuta (ou não consegue) escutar a transmissão de outro nó, o canal está livre. Portanto, quando utilizado uma potência mais alta, maior é a possibilidade do algoritmo CCA avaliar corretamente o estado do canal de comunicação.

Portanto, ao se propor estratégias para alteração dinâmica da potência de transmissão, deve-se considerar a sua influência na avaliação do estado do meio de transmissão pelo procedimento CCA (se está ocupado ou ocioso) e consequentemente a ocorrência de falhas decorrente de colisão.

#### 4.1.4 COMPARAÇÃO DE FALHAS OCASIONADAS POR ESTOURO DE *BUFFER*

A função do *buffer* é ajustar a diferença entre a taxa de recebimento e a taxa de processamento de dados, no presente caso, o tempo de transmissão de um pacote. No módulo da camada MAC do simulador *Castalia*, o *buffer* é implementado como uma estrutura de fila (FIFO) que comporta 32 pacotes. Quando esta capacidade é excedida um novo pacote vindo da camada APP é descartado. A este tipo de falha denomina-se de falha por estouro do *buffer* ou *buffer overflow*. As taxas de falhas ocasionadas por estouro do *buffer* são apresentados na Figura 16 e nas Tabelas 17 e 18.

Apesar dos nós sensores operarem acima do limite teórico máximo do canal de comunicação – cinco pacotes por segundo para cada nó da rede – a utilização do *buffer* permite a transmissão dos pacotes gerados após um intervalo de espera na fila para transmissão. Nos nós sensores E-Punho e D-Punho, que possuem taxa de dados de 10 pacotes/segundo, não ocorrem estouro de *buffer* nos cenários analisados. Já o nó sensor E-Tornozelo é observado uma pequena ocorrência deste tipo de falha quando existe interferência (Modelo de colisão) na dinâmica da rede – neste caso que o canal está saturado.



**Figura 16: Comparação da taxa de falhas ocasionadas por estouro da capacidade do *buffer* entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

Os nós sensores D-Tornozelo e Peito, cuja taxa de dados é de 25 pacotes/segundos, apresentam as maiores taxas destes tipo de falha. No cenário onde ambos os pacotes são descartados (Modelo de colisão 1) é observado a maior taxa deste tipo de falhas em ambas as simulações – CL-Binomial e CL-Uniforme. Neste cenário observa-se a menor taxa de transmissões bem sucedidas na primeira tentativa. Por consequência, os nós recorrem a segunda tentativa de transmissão com maior frequência, elevando também o tempo de processamento do pacote, isto é, o tempo que o nó sensor tenta transmitir o pacote até descartá-lo. Com o aumento deste tempo de processamento do pacote juntamente com a alta taxa de dados do nó sensor, as falhas por estouro do *buffer* ocorrem com maior frequência.

**Tabela 17: Taxa de falhas (%) ocasionadas por estouro da capacidade do *buffer* na simulação CL-Binomial**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	0	0	0	18,28%	20,422%
1	0	0	0,091%	30,788%	34,006%
2	0	0	0,013%	24,367%	28,376%

**Tabela 18: Taxa de falhas (%) ocasionadas por estouro da capacidade do *buffer* na simulação CL-Uniforme**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	0	0	0	20,502%	22,404%
1	0	0	2,12%	36,357%	39,815%
2	0	0	0,158%	26,738%	30,323%

No simulador Castalia, como os nós operam a uma taxa constante de dados  $H$ , significa que a cada  $\frac{1}{H}$  segundos um novo pacote será enviado da camada de Aplicação (APP) para a camada de acesso ao meio (MAC) para ser transmitido. Se um nó possui uma taxa de dados de 25 pacotes por segundos, a cada  $\frac{1000}{25} = 40$  milissegundos um novo pacote será encaminhado da camada APP para a camada a MAC. Assim, se o primeiro pacote demorar mais que 40 milissegundos para ser transmitido (com sucesso ou falha) um novo pacote será enviado à camada MAC o qual será mantido no *buffer* a espera de uma oportunidade para transmissão.

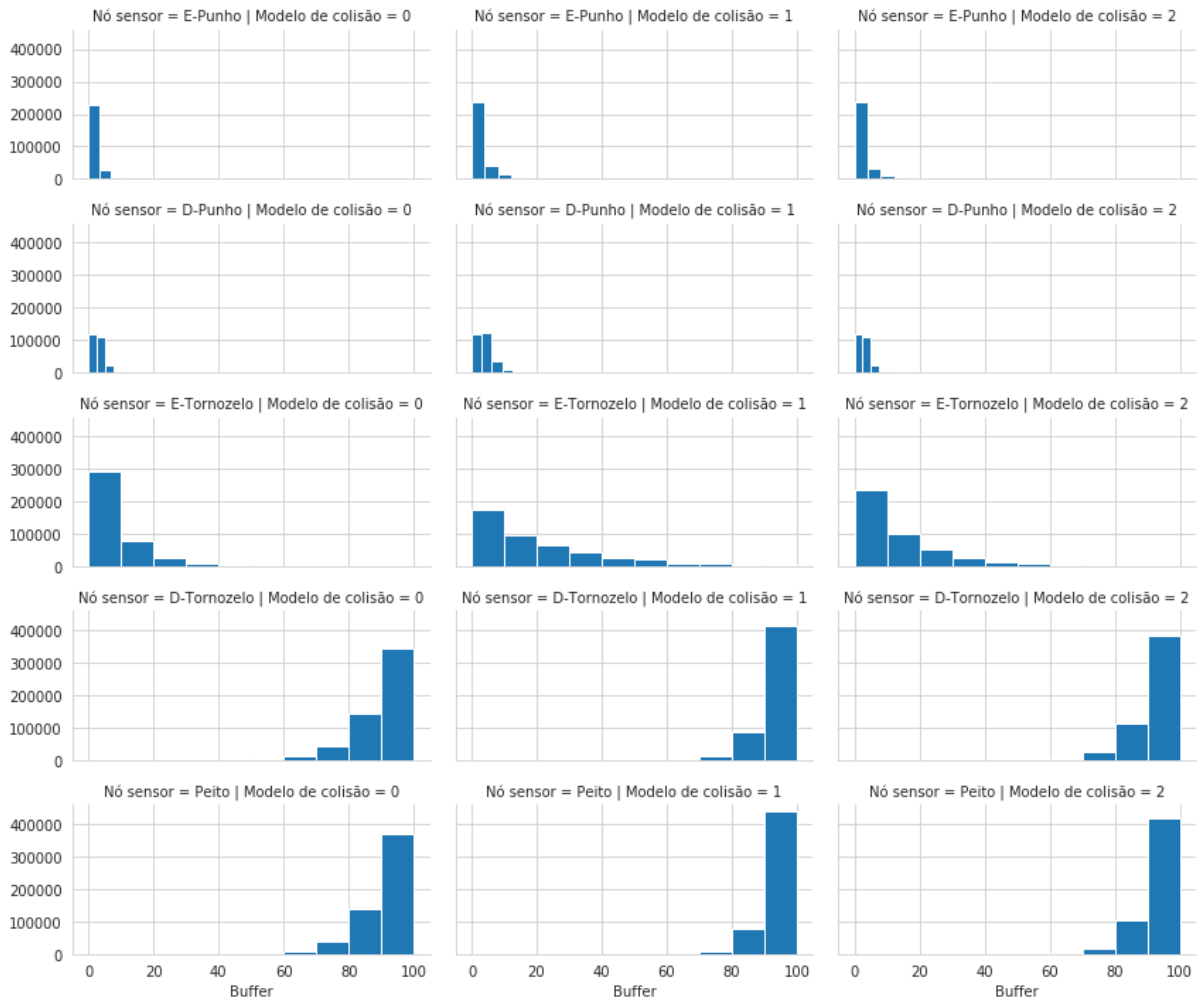
Entretanto o tempo para a transmissão dos pacotes é variável, e seus sucesso depende de outros fatores. Por exemplo:

- o tempo de transmissão pode durar apenas o tempo de recebimento do pacote de confirmação *ACK*;
- existe o tempo de espera aleatória relacionado à identificação do canal ocupado do algoritmo CSMA/CA;
- se ocorrer uma retransmissão, existe o tempo de espera para o recebimento do *ACK* da transmissão anterior;
- não é possível garantir em qual *slot* de tempo ocorrerá uma nova oportunidade para transmissão para o nó sensor, nem mesmo se a transmissão será no mesmo período ativo do *superframe* – neste caso haverá o tempo de espera para que o nó sensor saia do período inativo.

Para analisar a ocupação do *buffer* foi utilizada uma métrica definida como a porcentagem de sua ocupação em cada nós sensor. Esta medida foi calculada em uma janela de 5 transmissões. As Figuras 17 e 18 apresenta histogramas que resumem a ocupação do *buffer* em que cada nó sensor está representado por uma linha e os modelos de colisão em cada coluna.

Mesmo sendo executado acima do limite teórico do canal, os nós sensores E-Punho e D-Punho pouco utilizam o *buffer*. Já os nós sensores D-Tornozelo e Peito, em ambas as simulações, apresentam um grande índice de utilização do *buffer* como é esperado a partir dos dados fornecidos pelas Tabelas 17 e 18.

O nó sensor E-Tornozelo cuja taxa de dados é de 15 pacotes/segundo apresenta maior variação da ocupação do *buffer* na simulação CL-Uniforme (Figura 18) para o Modelo de Colisão 1. A taxa de dados deste nó sensor e a dificuldade superior aos nós sensores dos punhos de transmitir o pacote, uma vez que o Modelo de Colisão 1 é o mais agressivo, ocasionam uma variação maior no uso do *buffer*.



**Figura 17: CL-Binomial - Histograma mostrando a utilização do buffer por cada nó sensor (linhas) e modelo de colisão (colunas).**

O simulador *Castalia* informa os dados de latência para cada variação das simulações, entretanto esta informação não é categorizada por nó sensor, não sendo possível visualizar a latência individualmente para cada nó da rede. Mas pode-se concluir que, quanto maior a taxa de ocupação do *buffer*, maior o tempo de espera para que o pacote seja transmitido.

#### 4.1.5 COMPARAÇÃO DA RELAÇÃO NANOJoule POR BIT

O módulo de gerência de recursos do simulador *Castalia* considera o consumo de energia em vários estados do nó sensor (transmissão, recepção, período inativo, processamento etc.) no intuito de prover um cenário mais realista neste quesito. O módulo de rádio adotado nas simulações é definido em (BOULIS; TSELISHCHEV, 2011), atribui um valor de consumo distinto para cada potência de transmissão, porém são valores próximos – a diferença máxima encontrada entre dois valores adjacentes é de 0,01 mW.



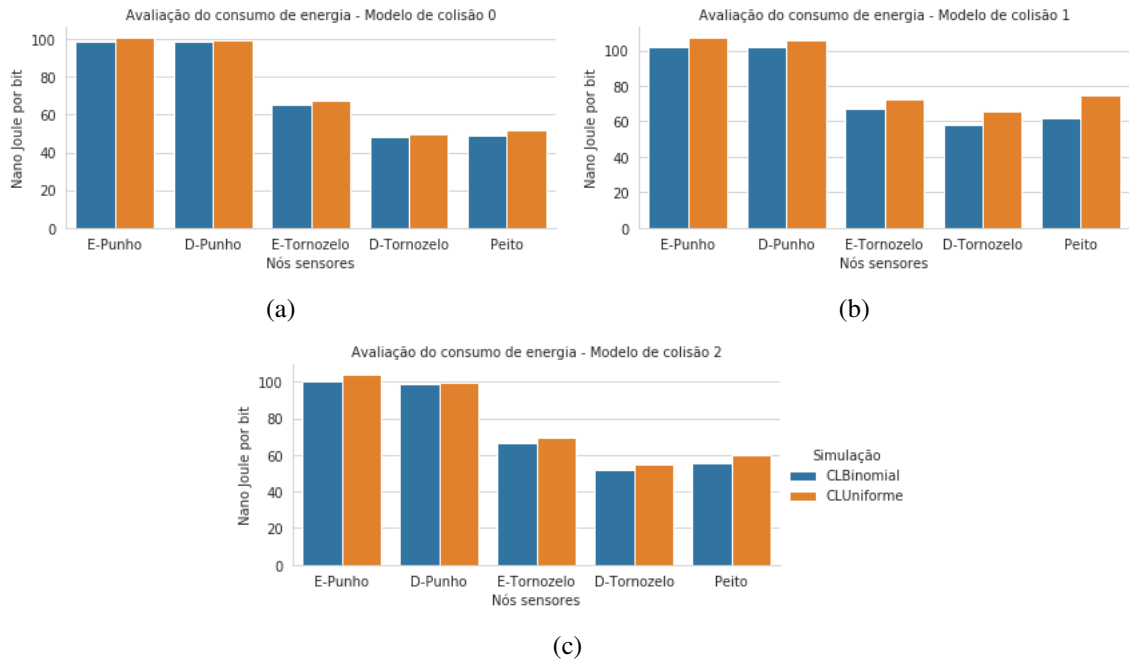
**Figura 18: CL-Uniforme - Histograma mostrando a utilização do buffer por cada nó sensor (linhas) e modelo de colisão (colunas).**

A análise do consumo de energia dos nós sensores não apresentam variação significativa entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme. A estreita diferença entre os valores de consumo de energia torna a eventual diferença de transmissões pouco significativa entre as simulações.

Portanto, é relevante analisar o consumo de energia ao considerar o desempenho do nó sensor em relação à entrega de pacotes. Os dados apresentados na Figura 19 e Tabelas 19 e 20 comparam os valores de nanojoule por bit (nJ/bit) resultantes das simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.

**Tabela 19: Relação nanojoule por bit resultante, na simulação CL-Binomial.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	98.7	98.9	65.2	47.8	49.1
1	101.9	102.1	67.1	58.0	62.0
2	100.4	98.9	66.3	52.2	55.8



**Figura 19: Comparação da relação Nanojoule por bit entre as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme.**

**Tabela 20: Relação Nanojoule por bit resultante na simulação CL-Uniforme.**

Modelo de colisão	E-Punho	D-Punho	E-Tornozelo	D-Tornozelo	Peito
0	101.1	99.5	67.2	49.8	51.8
1	107.5	105.8	72.5	65.9	74.3
2	104.1	99.5	69.1	55.0	60.1

A relação nanojoule por bit é calculada segundo a Fórmula 9, onde *spentEnergy* é a quantidade de energia em joule, gasta pelo nó sensor na simulação e *byteDelivered* é a quantidade de bytes efetivamente entregues ao nó coordenador. A multiplicação ( $spentEnergy * 10^9$ ) tem como função converter a unidade de medida de joule para nanojoule, assim como o fator ( $byteDelivered * 8$ ) converter a quantidade de bytes em bits. Portanto, a Fórmula 19 é um indicador da quantidade de nanojoules necessários para transmitir um bit de informação. Nos gráficos da Figura 19 quanto maior a barra, maior a quantidade de nanojoules necessários para transmitir um bit.

$$NjBitRate = \frac{spentEnergy * 10^9}{byteDelivered * 8} \quad (9)$$

Observa-se que os nós sensores D-Punho e E-Punho utilizam mais nanojoules/bit do que os nós sensores D-Tornozelo e Peito. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em números absolutos (Figura 11) os dois últimos nós entregam muito mais pacotes de dados do que os dois primeiros, apesar de apresentarem os piores índices de desempenho e relação a entrega de

pacotes – que foram apresentados nas seções 4.1 e 4.1.1. Conforme analisado na seção 4.1.4, a maior taxa de falhas dos nós D-Tornozelo e Peito ocorrem por estouro da capacidade do *buffer*, em que estes pacotes não foram transmitidos.

Ao comparar as simulações, CL-Binomial apresenta um resultado ligeiramente menor em relação à CL-Uniforme, mesmo com potências mais altas com maior frequência. A maior diferença entre as simulações pode ser observada no cenário de colisão 1. Como nos outros resultados discutidos, D-Punho mostra uma certa equivalência de resultados entre as duas simulações.

Observa-se também os efeitos de adicionar um modelo de colisão no processo de transmissão. Quando as condições de transmissão pioram (Modelo de colisão 1) a relação nanojoule/bit se eleva em todos os nós.

Portanto, mesmo apresentando os melhores resultados em termos de entrega de pacotes os nós E-Punho e D-Punho não possuem eficiência energética se comparado com os outros nós – utilizam aproximadamente 100 nJ/bit. O nó E-Tornozelo, ao considerar os resultados anteriores (taxa de entrega de pacotes e as falhas consideradas) apresenta a melhor relação custo energético.

## 4.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA *TAXAMAC*

Em Nikodem et al. (2014) a taxa PRR é definida como uma relação entre a quantidade de pacotes recebidos em um intervalo de pacotes transmitidos. De forma semelhante, Pozza et al. (2018) define a *taxaMAC* com uma relação entre as transmissões bem sucedidas e um número fixo de tentativas – Equação 10. Esta pequena alteração é importante porque determina em qual camada da pilha de protocolos a métrica é calculada, e as retransmissões de um mesmo pacote são consideradas distintas para o cálculo da métrica, enquanto que, a definição de PRR não explicita a camada e as transmissões.

Os estudos sobre os algoritmos de controle de potência encontrados na literatura não especificam em qual camada calculam as suas métricas. Esta observação é relevante neste trabalho pois a definição de uma métrica deve considerar precisamente os eventos e propriedades que pode mensurar. Por exemplo, durante as análises concluiu-se que a *taxaMAC* não considera as falhas ocasionadas por estouro do *buffer*. Assim como o RSSI não se mostra eficiente para indicar a existência falhas decorrentes de colisão entre pacotes.



$$taxaMAC = \frac{\sum_{i=1}^{janela} ACK_i}{janela} * 100 \quad (10)$$

A *taxaMAC* é dada pela Equação 10, em que o valor  $ACK_i$  pode assumir o valor 0 (fracasso) ou 1 (sucesso). Nas simulações realizadas o intervalo considerado para o cálculo, em que a janela de transmissões foi definido em 5 (cinco) tentativas.

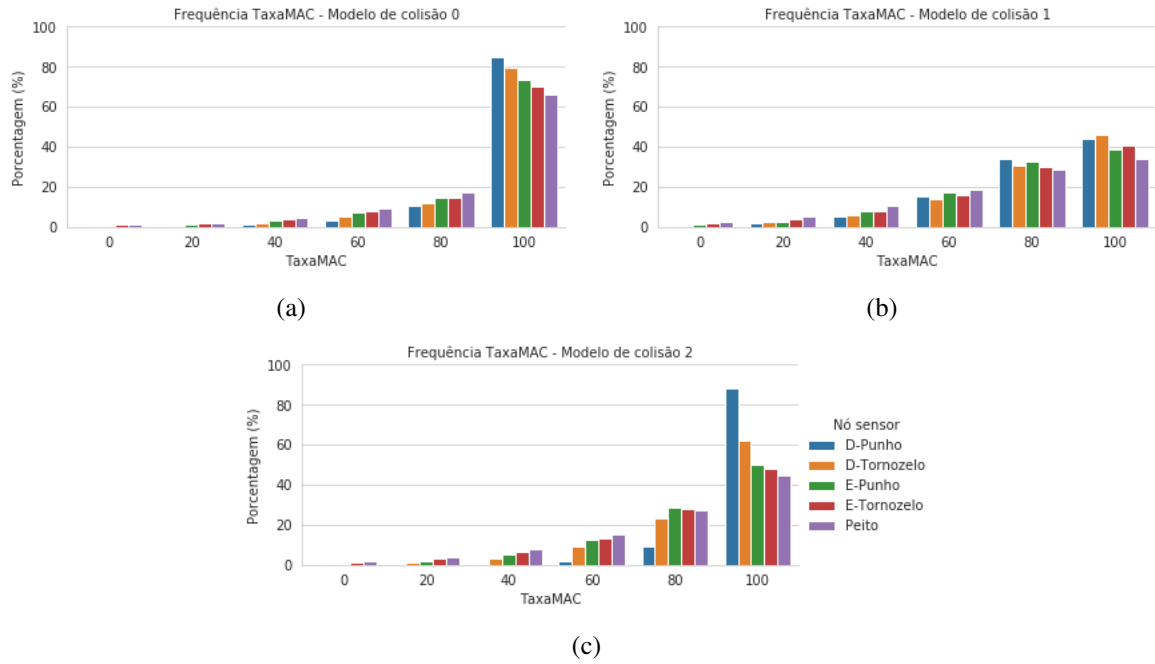
Conforme a definição apresentada para a *taxaMAC* – contagem do número de sucessos em  $n$  tentativas de transmissão – era esperado que a distribuição de frequência dos seus valores seguisse uma Distribuição Binomial. Entretanto, isso não é confirmado pela análise das distribuições nas Figuras 20 e 21, indicando que a probabilidade de sucesso  $p$  pode ser variável ao longo do tempo.

A Figura 20 apresenta a frequência das ocorrências da *taxaMAC*, considerando os três modelos de colisão para a simulação CL-Binomial. É possível verificar que o nó sensor D-Tornozelo, que apresentou uma baixa entrega na primeira e segunda tentativa, nesse cenário apresentou um dos melhores índices para a *taxaMAC* – sendo melhor que os nós E-Tornozelo, E-Punho e Peito ao considerar os modelos de colisão 0 e 2. Este resultado indica que, para aqueles pacotes que o nó sensor D-Tornozelo efetivamente transmitiu, a sua taxa de sucessos foi maior do que os nós anteriormente mencionados.

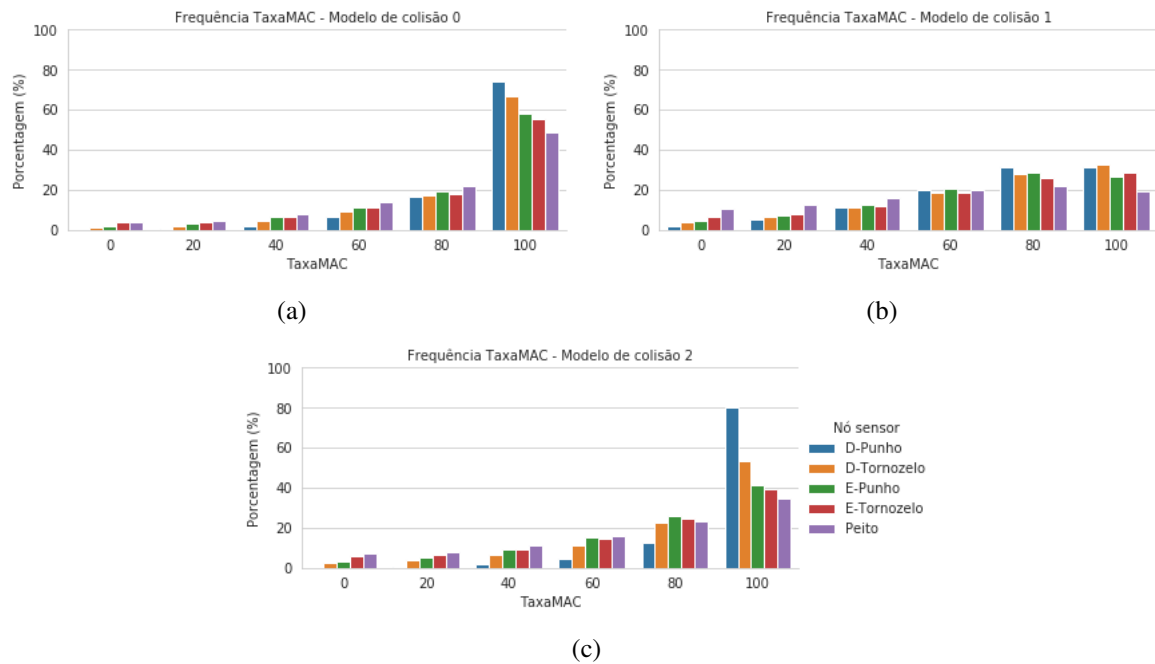
Conforme definido, a *taxaMAC* desconsidera os erros ocasionados por falha do estouro do *buffer*. Por exemplo, pode-se definir uma estratégia para seleção da potência de transmissão com apenas a *taxaMAC*. Se o resultado do nó sensor D-Tornozelo tendesse a 100% e potências mais baixas fossem escolhidas com menor frequência, a escolha dessas frequências poderia aumentar a latência do nó sensor (devido ao tempo despendido para a sua transmissão) ocasionando maiores ocupações e falhas por estouro no *buffer*.

Nas Figuras 20(b) e 21(b) pode-se observar que a inclusão de um modelo mais agressivo de colisão interfere significativamente a distribuição da *taxaMAC* pelos nós sensores, neste caso todos os nós sensores foram igualmente penalizados. Para o Modelo de Colisão 2 (Figuras 20(c) e 21(c)) o nó sensor D-Punho apresenta resultado equiparável ao cenário sem colisão (Figuras 20(a) e 21(a)) enquanto os demais nós sensores apresentaram uma tendência de diminuição da *taxaMAC*. Uma vez que o modelo de colisão 2 considera a força do sinal recebido para decidir sobre os casos de colisão, é possível que o nó sensor D-Punho possa ser favorecido uma vez que apresenta a menor perda média de sinal – o *path loss* para o nó D-Punho é de -49 dBm.

As Tabelas 21 e 22 apresentam um resumo estatístico da variação das *taxaMAC* para as



**Figura 20: Frequência dos valores observados para a *taxaMAC* na simulação CL-Binomial, considerando os três modelos de colisão.**



**Figura 21: CL-Uniforme: frequência dos valores observados para a *taxaMAC* considerando os três modelos de colisão.**

simulações CL-Binomial e CL-Uniforme, respectivamente. Conforme os dados apresentados, em média CL-Uniforme apresenta um desempenho pior do que CL-Binomial, isto é, o valor médio da *taxaMAC* diminui em CL-Uniforme, enquanto a variância aumenta.

A mesma análise pode ser feita considerando os diferentes cenários de colisão. O valor médio da *taxaMAC* são maiores nos nós sensores para o cenário sem colisão (Modelo 0) e menores no modelo de colisão mais agressivo (Modelo de colisão 1) – o desvio padrão também aumenta neste último caso. Também pode ser observado a variação, para um mesmo nó sensor, do número de registros da *taxaMAC* entre os Modelos de Colisão e simulações. Esta variação pode ser interpretada como uma variação no número de retransmissões ocasionadas em cada caso.

É importante destacar que o canal de comunicação simulado pelo *Castalia* possui uma alta variação da atenuação do canal. E isso influencia na variação observada da *taxaMAC*, em que mesmo a maior potência de transmissão (-10dBm) é possível que nenhuma tentativa obtenha sucesso – *taxaMAC* = 0%. Igualmente, a menor potência disponível (-25 dBm) pode retornar em 100% de aproveitamento das tentativas. Esta variação do canal pode ser percebida em intervalos na ordem de milésimos de segundos.

Os dados experimentais deste trabalho mostram que, para um nó sensor fixo, quando menor a potência de transmissão maior é a variação da *taxaMAC*. Logo, estudos sobre o valor da janela de transmissão considerada para o cálculo da *taxaMAC* podem ser realizados. Estes estudos devem considerar que, quando maior o valor desta janela, maior a granularidade dos valores possíveis para a *taxaMAC*, porém maior será o tempo demandado para o cálculo da taxa.

#### 4.3 ANÁLISE DA OCUPAÇÃO DO *BUFFER* EM SIMULAÇÕES VARIANDO A TAXA DE DADOS

Conforme os resultados apresentados para as simulações CL-Binomial e CL-Uniforme, a *taxaMAC* definida em Pozza et al. (2018) não tem relação com as falhas ocasionadas por estouro de *buffer*.

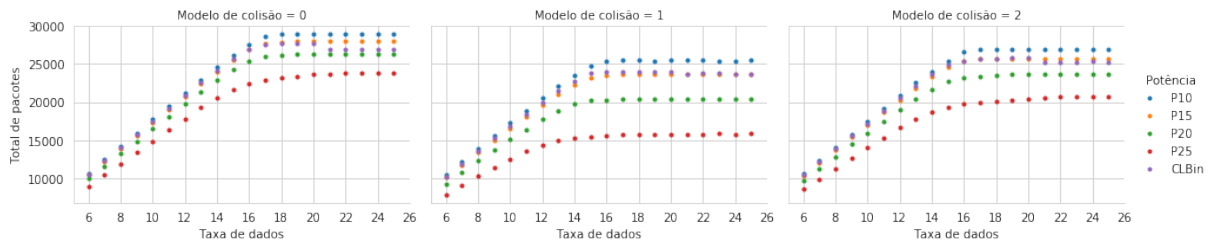
As taxa de dados consideradas para os nós sensores (Tabela 6) estão acima do limite teórico do canal conforme definido por Boulis et al. (2012), definido como 5 pacotes/segundo para cada nó sensor dessa rede. Contudo somente os nós D-Tornozelo e Peito apresentam falhas ocasionadas por estouro do *buffer* conforme os dados apresentados na seção 4.1.4 – o nó sensor E-Tornozelo apresenta falhas por estouro de *buffer* na simulação CL-Uniforme, considerando

**Tabela 21: Estatísticas descritivas para a taxaMAC na simulação CL-Binomial.**

Nó sensor	Modelo de colisão	Média (taxaMAC)	Desvio padrão	Nro. Registros
D-Punho	0	95.796	11.257	259533
	1	82.411	19.877	292545
	2	96.825	9.622	257343
D-Tornozelo	0	93.275	15.491	543598
	1	81.880	21.629	510657
	2	88.080	18.809	527698
E-Punho	0	91.057	17.681	269095
	1	78.930	22.330	300584
	2	83.403	21.134	288623
E-Tornozelo	0	88.860	20.782	411551
	1	78.184	24.258	454695
	2	81.344	23.388	442066
Peito	0	87.906	20.755	554537
	1	73.476	26.303	524866
	2	79.279	24.523	540558

**Tabela 22: Estatísticas descritivas para a taxaMAC na simulação CL-Uniforme.**

Nó sensor	Modelo de colisão	Média (taxaMAC)	Desvio Padrão	Qtd. de Registros
D-Punho	0	92.380	15.058	267429
	1	73.390	25.248	315853
	2	93.965	14.390	263262
D-Tornozelo	0	87.749	21.330	554188
	1	71.475	27.904	513224
	2	81.846	25.323	537399
E-Punho	0	83.583	24.437	285842
	1	68.289	28.177	328365
	2	75.453	27.787	307230
E-Tornozelo	0	80.252	28.078	441701
	1	66.807	30.641	490595
	2	72.610	30.308	473851
Peito	0	78.209	27.639	589690
	1	57.697	31.979	554595
	2	68.891	31.551	576034



**Figura 22: Total de pacotes recebidos pelo nó sink.**

os cenários com colisão 1 e 2.

Ao considerar essas observações foram realizadas simulações para analisar detalhadamente o comportamento da ocupação do *buffer*, a sua relação com a taxa de entrega e as potências de transmissão. As simulações a seguir analisam o comportamento do *buffer* na camada MAC, sob a perspectiva da variação da taxa de dados dos nós sensores. Neste cenário todos os nós operam sob a mesma taxa de dados, variando de 6 a 25 pacotes/segundo em cada simulação. Os resultados consideram os três modelos de colisão apresentados anteriormente (0, 1 e 2) e as transmissões com valores fixos de potência (-10dBm, -15dBm, -20dBm e -25dBm) e também a estratégia CL-Binomial (com  $p = 0,7$ ) de Pozza et al. (2018).

A Figura 22 compara o total de pacotes recebidos pelo nó *sink* de acordo com a potência de transmissão utilizada. A quantidade total de pacotes é a soma dos pacotes entregues pelos demais nós sensores. De modo geral, este gráfico ilustra que a partir de determinada taxa de dados, a quantidade de total de pacotes não varia significativamente (permanece quase constante) a despeito do aumento da quantidade de pacotes gerados.

Deve-se observar que para cada estratégia de transmissão – para cada valor de potência e CL-Binomial – e para cada modelo de colisão, o ponto limite de pacotes é diferente. No cenário sem colisão (Modelo 0) a quantidade limite se encontra próximo à 17 pacotes/segundo; já no cenário em que ambos os pacotes são descartados (Modelo 1), o máximo se dá entre 14 ou 15 pacotes/segundo; por fim, no cenário onde há disputa entre os pacotes (Modelo 2) está próximo à 16 pacotes/segundo.

Este último resultado contribui para detalhar o comportamento observado nas taxas de falhas ocasionadas por estouro da capacidade do *buffer* apresentado na Figura 23 que discrimina cada nó sensor. Verifica-se que ao utilizar potências menores para transmissão aumenta-se a ocorrência destas falhas em relação aos nós E-Punho, E-Tornozelo e Peito. Entretanto, o nó D-Punho apresenta uma relação inversa, em que os menores valores de potência de transmissão apresentam as menores taxas do tipo de falha considerado. Destaca-se também o nó D-Tornozelo que apresenta pouca variação dos resultados ao longo dos cenários considerados.

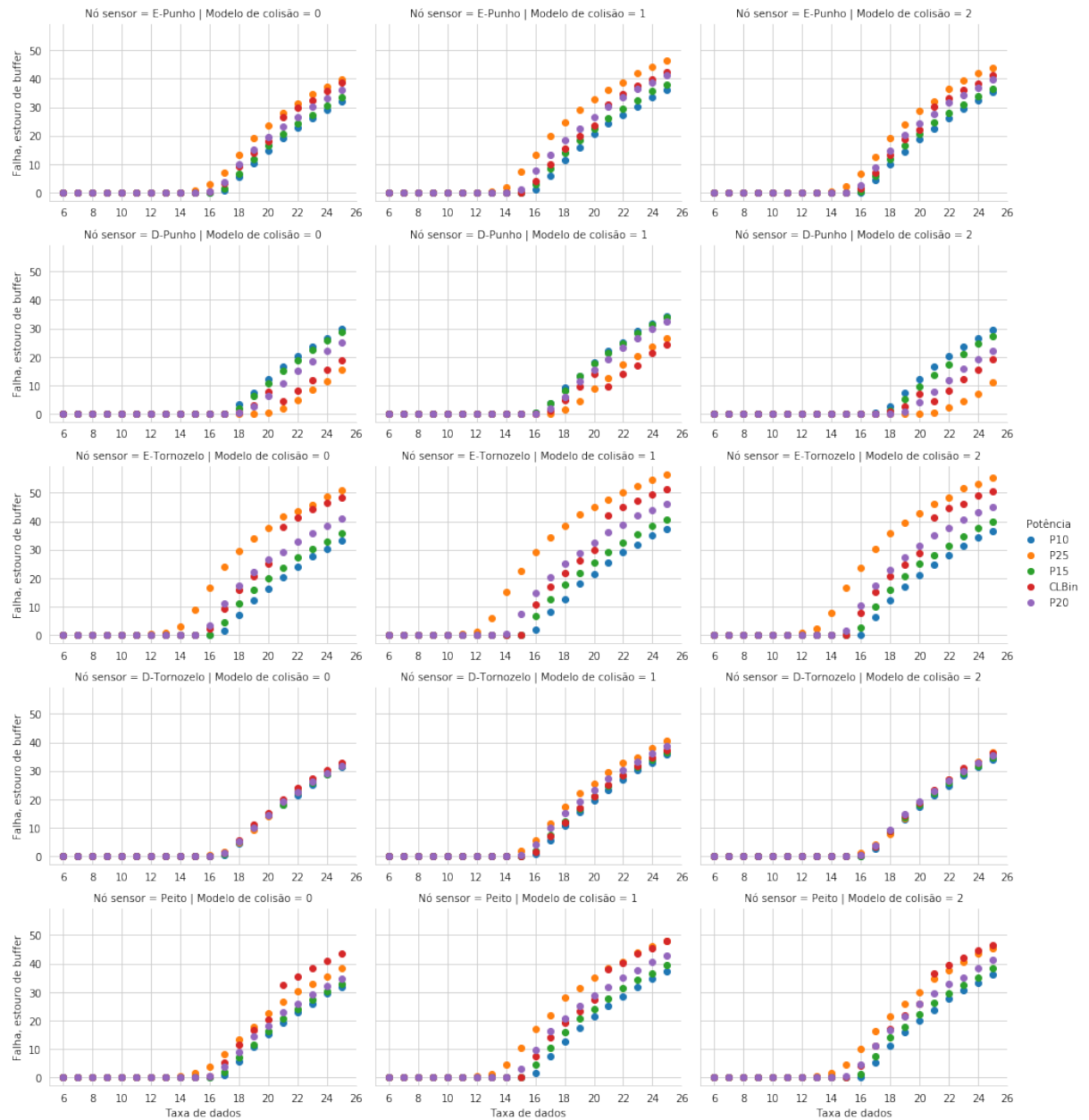
Já a estratégia CL-Binomial apresentou um resultado semelhante às potências (-25 dBm e -20 dBm).

Conforme pode ser depreendido da Figura 22 a estratégia CL-Binomial não apresenta uma melhora de resultados em relação a entrega de pacotes e ao uso de potência fixa de transmissão (-10 dBm). Também foram realizadas um segundo conjunto de simulações, utilizando as mesmas configurações prévias apresentadas nesta seção, mas com o objetivo de verificar qual o efeito de diminuir o número de tentativas para uma única retransmissão quando se identificar que a ocupação do *buffer* ultrapassou determinado limiar. Com isso, pode ser verificado se descartar um pacote tentando realizar uma transmissão é mais impactante do que descartar este pacote por não ter espaço para armazená-lo temporariamente no *buffer*.

Nestas simulações a cada momento que um novo pacote era armazenado no *buffer* uma nova taxa para ocupação era calculada (*taxaBuffer*) e comparada com valor de referência. Se o valor resultante fosse maior que este limiar, então as próximas transmissões ocorriam com apenas uma tentativa. Por outro lado, se a ocupação do *buffer* diminuísse então os pacotes realizavam duas tentativas para transmissão. A redução de tentativas vem ao encontro de se diminuir o tempo gasto para processamento do pacote e consequentemente a diminuição da fila do *buffer*.

A esta alteração do número de tentativas denominou-se *Esquema Buffer*. A Figura 24 apresenta os resultados para as falhas envolvendo *buffer*. Para as simulações com potência fixa, foram realizadas simulações em que as transmissões se davam em apenas uma tentativa, para efeito de comparação com os outros cenários.

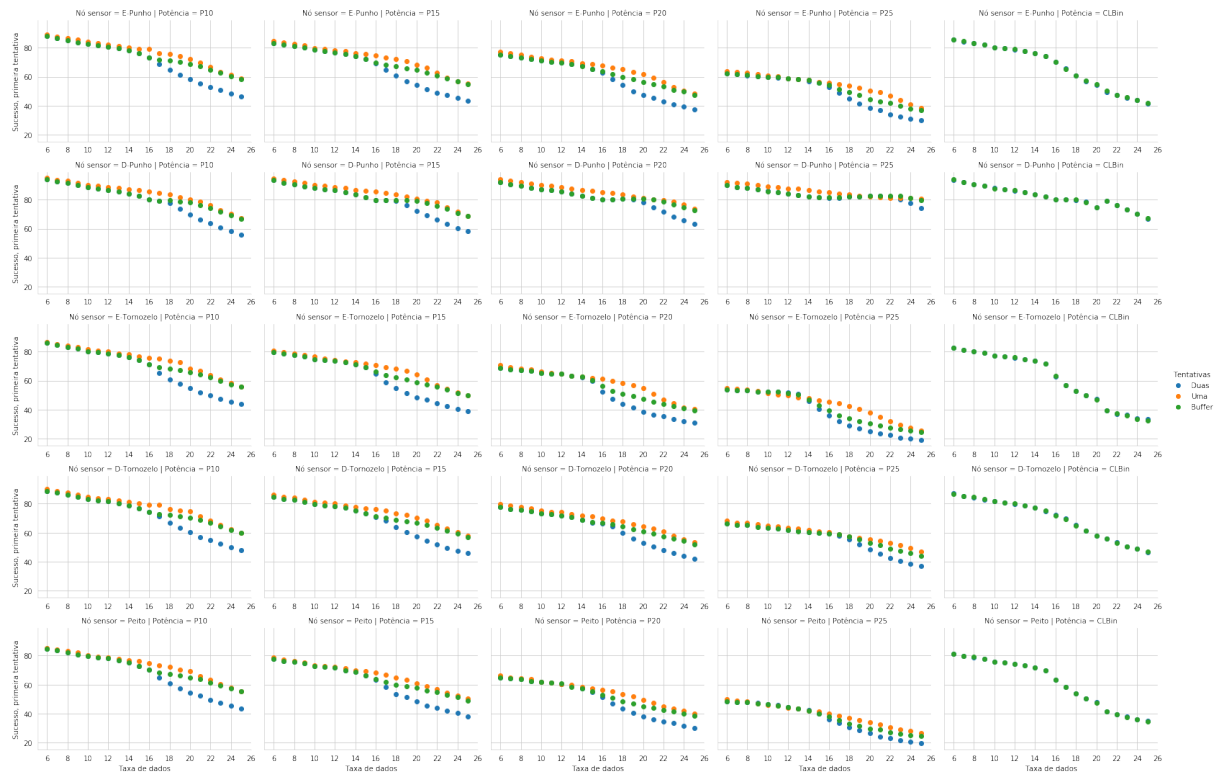
Os resultados (Figuras 24 e 25) apontam que a estratégia não surtiu em aumento do número de tentativas. Quando a taxa de dados ultrapassa o limite de saturação do canal, o *Esquema Buffer* tende a se assemelhar com o caso de apenas uma única tentativa. Para a simulação CL-Binomial ocorre uma sobreposição dos pontos no gráfico que diferenciam a utilização das convencionais duas tentativas de transmissão e a alteração do número de tentativas pelo *Esquema Buffer*. Estes últimos dados trata-se de resultados iniciais e necessitam de uma melhor análise.



**Figura 23: Taxa de falhas decorrentes do estouro da capacidade do *buffer* na camada MAC.**



**Figura 24: Taxa de falhas por estouro de buffer: alteração do número de tentativas.**



**Figura 25: Taxa de sucessos ocorridos na primeira tentativa.**



## 5 CONCLUSÃO

A principal contribuição deste trabalho é discutir a utilização de outras métricas em algoritmos para o controle da potência de transmissão. As análises conduzidas apontam que, ao considerar apenas uma métrica nestes algoritmos, outros fatores podem prejudicar o desempenho da rede WBAN. Desta forma, ao se definir uma métrica para caracterização do comportamento do nó sensor, é necessário entender quais fenômenos esta métrica é capaz de medir.

Os fatores considerados neste trabalho que interferem no desempenho da rede são: a existência de colisão e como são resolvidas; a relação entre a taxa de dados e os níveis de ocupação do *buffer* e a latência das transmissões. Os estudos sobre o controle dinâmico da potência de transmissão, que não utilizam a arquitetura *cross-layer* (XIAO et al., 2009) (NIKODEM et al., 2014) (KIM; EOM, 2014) (ARCHASANTISUK et al., 2016) utilizam somente um tipo de métrica em suas estratégias – RSSI ou PRR. Cada estratégia é definida considerando apenas pressupostos sobre a métrica que utiliza.

A métrica *taxaMAC* utilizada neste trabalho não se mostrou suficiente para representar as alterações do uso do *buffer* dos nós sensores. Fora proposto então o uso de uma segunda métrica denominada de *taxaBuffer*, que representa o nível de ocupação do *buffer* em determinados instantes. Esta métrica foi utilizada em um segundo conjunto de simulações que alterava o número de tentativas de transmissão. Os resultados preliminares apresentados na seção 4.3 entretanto não representam uma melhora na entrega de pacotes pelos nós sensores.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Foi mostrado que diversas variáveis no meio de transmissão podem colaborar com a adaptação do nó sensor às condições de transmissão do meio. Esta adaptabilidade pretende conciliar a confiabilidade da comunicação (taxa de entrega de pacotes) e o baixo consumo de energia, os quais são aspectos conflitantes. A *taxaMAC* pode ser melhor explorada em conjunto com outras métricas, como o RSSI, LQI e a *taxaBuffer* em algoritmos de controle de potência de transmissão que considerem os diversos aspectos em uma WBAN.

A *taxaBuffer* e a *taxaMAC* não foram exaustivamente exploradas e podem indicar alguma correlação, em que a potência de transmissão ou a quantidade de retransmissão de pacotes podem ser melhor definidas.

Por outro lado, a comparação da estratégia de alteração probabilística definida em (POZZA et al., 2018) com as estratégias encontradas na literatura (XIAO et al., 2009) (NIKODEM et al., 2014) (KIM; EOM, 2014) (ARCHASANTISUK et al., 2016) podem ser realizadas a fim de expandir as discussões iniciadas neste trabalho.

Como o *cross-layer* permite o compartilhamento dos dados entre as camadas da pilha de protocolo, esta arquitetura pode ser melhor explorada para implementação de algoritmos de controle da potência de transmissão que utilizam diversas métricas para caracterizar o meio de transmissão.

O *Castalia*, como um simulador de código aberto, foi utilizado neste trabalho e seu código foi alterado para a execução dos cenários. Devido ao pequeno espaço de tempo no desenvolvimento deste trabalho, não foi possível refatorar os códigos do simulador e, caso isso seja feito, pode-se considerar em contribuir com o projeto deste simulador com as novas métricas descritas.

## REFERÊNCIAS

802.15.4, S. I. 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)*, p. 1–314, 2011.

802.15.6, S. I. Ieee standard for local and metropolitan area networks - part 15.6: Wireless body area networks. *IEEE Std 802.15.6-2012*, p. 1–271, 2012.

AHMED, A. S. et al. Cross-layer design approach for power control in mobile ad hoc networks. **Egyptian Informatics Journal**, v. 16, n. 1, p. 1 – 7, 2015. ISSN 1110-8665. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866514000358>>.

AKYILDIZ, I.; VURAN, M. C. **Wireless Sensor Networks**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 047003601X, 9780470036013.

ARCHASANTISUK, S. et al. Transmission power control in wban using the context-specific temporal correlation model. In: **2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey. **ACM Trans. Sen. Netw.**, ACM, New York, NY, USA, v. 8, n. 4, p. 34:1–34:33, set. 2012. ISSN 1550-4859. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2240116.2240123>>.

BARAKAH, D.; AMMAD-UDDIN, M. A survey of challenges and applications of wireless body area network (wban) and role of a virtual doctor server in existing architecture. In: **Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 214 –219.

BOULIS, A.; TSELISHCHEV, Y. **Castalia - A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Network**. Version 3.2. NICTA, Locked Bag 9013, Alexandria, NSW 1435, Australia, Mar. 2011.

BOULIS, A. et al. Impact of wireless channel temporal variation on mac design for body area networks. **ACM Trans. Embed. Comput. Syst.**, ACM, New York, NY, USA, v. 11, n. S2, p. 51:1–51:18, ago. 2012. ISSN 1539-9087. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2331147.2331161>>.

CHEN, X.; XU, Y.; LIU, A. Cross layer design for optimizing transmission reliability, energy efficiency, and lifetime in body sensor networks. **Sensors**, v. 17, n. 4, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/900>>.

FORTINO, G.; GRECO, R.; GUERRIERI, A. Modeling and evaluation of the building management framework based on the Castalia WSN simulator. In: **Proceedings of the 2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2013**. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781467360852.

FRANCO, F. D. et al. Channel estimation and transmit power control in wireless body area networks. **IET Wireless Sensor Systems**, v. 5, n. 1, p. 11–19, 2015. ISSN 2043-6386.

HEFEIDA, M. et al. Cross-layer protocols for wsns: A simple design and simulation paradigm. In: **Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 844–849.

KHAN, M.; ZAKI UDDIN, S. Research review of development of novel routing algorithms for mobile ad-hoc networks. In: **Digital Information Management (ICDIM), 2013 Eighth International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 61–66.

KIM, S.; EOM, D. S. Link-state-estimation-based transmission power control in wireless body area networks. **IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics**, v. 18, n. 4, p. 1294–1302, July 2014. ISSN 2168-2194.

LATRE, B. et al. A survey on wireless body area networks. **Wirel. Netw.**, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 17, n. 1, p. 1–18, jan. 2011. ISSN 1022-0038. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>>.

MENDES, L. D. P.; RODRIGUES, J. J. Review: A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. **J. Netw. Comput. Appl.**, Academic Press Ltd., London, UK, v. 34, n. 2, p. 523–534, mar. 2011. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2010.11.009>>.

MOVASSAGHI, S. et al. Wireless body area networks: A survey. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 16, n. 3, p. 1658–1686, Third 2014. ISSN 1553-877X.

NEGRA, R.; JEMILI, I.; BELGHITH, A. Wireless body area network: Applications and technologies. **Elsevier B.V.**, v. 3, n. 1, p. 1281, 2016.

NIKODEM, M. et al. Transmission power control based on packet reception rate. In: **2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. ISSN 2157-4952.

OLIVEIRA, F. E. T. **Cross Layer Development for Wireless Body Area Network**. 2017. 48 p. Term Paper - Computer Engineering Course. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio.

PEDIADITAKIS, D.; TSELISHCHEV, Y.; BOULIS, A. Performance and scalability evaluation of the castalia wireless sensor network simulator. In: **Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques**. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2010. (SIMUTools '10), p. 53:1–53:6. ISBN 978-963-9799-87-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8727>>.

PIRES, B. M. **Seleção Dinâmica de interface em redes IEEE 802.15.4**. 2017. 65 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Universidade Estadual Paulista - UNESP. São José do Rio Preto.

POZZA, R. S.; GODOI, G. A. d.; SILVA, D. C. Um Estudo da Estimativa de Controle de Potência de Transmissão para Redes Corporais Sem Fio. In: **Sociedade Brasileira de Computação. VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering**. Salvador - BA, 2018.

POZZA, R. S.; SILVA, D. C. Uma abordagem cross-layer para comunicação em redes corporais sem fio. In: Sociedade Brasileira de Computação. **33.º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores E Sistemas Distribuídos**. Vitória - ES, 2015. p. 99–104.

PUNJ, R.; KUMAR, R. Technological aspects of wbans for health monitoring: a comprehensive review. **Wireless Networks**, Feb 2018. ISSN 1572-8196. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11276-018-1694-3>>.

SRIVASTAVA, V.; MOTANI, M. Cross-layer design: a survey and the road ahead. **Communications Magazine, IEEE**, v. 43, n. 12, p. 112–119, 2005. ISSN 0163-6804.

XIAO, S. et al. Transmission power control in body area sensor networks for healthcare monitoring. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 27, n. 1, p. 37–48, January 2009. ISSN 0733-8716.

ACK

CCA

CL

CSI

CSMA/CA

LQI

MAC

NED

OSI

PDF

PRP

PRR

QoS

RSSF

RSSI

SNR

WBAN