

# Um Estudo da Estimativa de Controle de Potência de Transmissão para Redes Corporais sem Fio

Rogério Santos Pozza\*<sup>†</sup>, Giliard Almeida de Godoi<sup>†</sup>, Diógenes C. da Silva Jr.\*

\*Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil

<sup>†</sup>Departamento de Computação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Cornélio Procópio – Paraná – Brasil

pozza@utfpr.edu.br – giliardgodoi@alunos.utfpr.edu.br – diogenes@ufmg.br

**Resumo**—The miniaturization of electronic devices and the research of wireless network have provided considerable advances in Wireless Body Area Network (WBAN) which motivates new solutions in energy efficiency and reliability in delivery of packets. This work aims at the improvement of a transmission power control developed with a cross-layer approach to ensure reliability in the delivery of packets. The results from the simulations have shown an increase in the rate of sent packets, which ensures more reliability in the studied scenarios.

**Keywords**—WBANS, cross-layer, simulator, protocol, metrics.

## I. INTRODUÇÃO

As pesquisas em Redes Corporais sem Fio (WBAN – *Wireless Body Area Network*) conquistaram interesse e tornaram-se emergentes em aplicações de serviços de saúde, devido à possibilidade de seu uso na monitoração de condições humanas de forma contínua [1]. 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 [2]. Uma WBAN pode ser empregada no monitoramento de pacientes em clínicas, hospitais ou em situações cotidianas e mais naturais 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 [3]. Na literatura existem propostas de alteração dinâmica na potência do rádio dos nós sensores para diminuir tal impacto. De acordo com [4], os algoritmos convencionais de 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 [5] [4].

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. Segundo [1], entre os padrões mais utilizados e referenciados nas WBANs estão o IEEE 802.15.4 [6] e o IEEE 802.15.6 [7], que definem as camadas física e de enlace, deixando disponível a implementação das demais (rede e aplicação). Em [8] 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 tem por objetivo estimar a potência de transmissão do rádio dos nós sensores de uma WBAN, desenvolvida a partir da proposta *cross-layer* de [9], utilizando uma Distribuição Binomial e aplicada no simulador Castalia [10].

Na seção II serão descritos os trabalhos relacionados; nas seções III e IV a metodologia e a solução desenvolvida serão detalhadas; os resultados serão discutidos na seção V e após a conclusão e trabalhos futuros apresentados.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura há trabalhos que descrevem o problema do ajuste da potência de transmissão, assim como que utilizam a arquitetura *cross-layer*. Segundo [11] as soluções para controle de potência podem ser classificadas em três estratégias para a estimação do estado do meio de transmissão (*link*): os baseados em conectividade, que procuram caracterizar o meio conforme o número de nós vizinhos acessíveis; os baseados em taxa de recebimento de pacotes (PRR – *Packet Received Rate*), que estabelecem um limiar de comparação para poderem definir uma potência de transmissão; e os baseados no indicador da força do sinal recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), que avalia o estado da conexão por esse indicador.

A proposta de [11] é verificar a variação do RSSI em relação a um intervalo de referência. Primeiramente, é calculado um estimador como a soma entre as médias que considera apenas as variações do RSSI acima e abaixo dos limites desse intervalo. A potência é aumentado ou diminuída com base nesse estimador. Em seguida, é verificado a necessidade de adequar o limite superior do intervalo de referência, uma vez

que, se o corpo está em repouso ou em movimento, a amplitude do intervalo de referência precisa se adequar à amplitude da variação do RSSI. Os experimentos realizados apenas consideraram um nó sensor posicionado no pulso esquerdo e um nó *sink* posicionado na cintura do lado esquerdo.

Segundo [5] a atenuação (ganho do canal) pode ser descrito 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 da transmissão anterior. Por sua vez, 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, com base na atenuação da transmissão anterior.

[12] implementa 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 [12] não é apenas obter a menor, mas também a mais confiável rota para transmissão de pacotes pela rede.

Para [13] 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 mútuas entre a escolha da potência de transmissão, roteamento e o tamanho do pacote são explicitadas e uma formalização matemática é definida. Esse estudo considera uma rede composta de dez nós sensores e um nó *sink* em uma topologia com múltiplos saltos. O algoritmo utiliza a abordagem *cross-layer* entre a 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. [13] utiliza as 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 [9] é proposto o uso de uma abordagem *cross-layer*, baseado no padrão IEEE 802.15.4 e implementada no Castalia, através da troca de mensagens entre camadas não adjacentes. As trocas de mensagens ocorrem entre a camada MAC, que informa o PRR dentro de um intervalo definido de pacotes transmitidos e a camada de aplicação; a camada de aplicação informa a camada física a potência de transmissão do próximo intervalo de avaliação do PRR. A taxa PRR foi definida como a razão entre a quantidade de pacotes enviados pelo nó sensor, fixado em um intervalo de 100 pacotes transmitidos, e o número de ACK recebidos do nó *sink*.

As soluções apresentadas procuram definir a potência de transmissão mais adequada de acordo com alguma variável

ou informação que indicaria as condições de transmissão do meio. O presente estudo propõe que a seleção da potência de transmissão seja realizada segundo uma Distribuição Binomial conhecida, e apresenta a relação entre essa mudança e as condições do meio de acesso físico e a taxa de sucessos de pacotes entregues (PRR).

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

A implementação e validação do algoritmo proposto foi realizada no Castalia, um simulador de código aberto que implementa um conjunto de módulos e classes escritos em C++, utilizando-se da estrutura do *framework Omnet++*. Seu objetivo é oferecer cenários mais realistas para simulação de redes de sensores corporais sem fio (WBAN) e outras redes de sensores em dispositivos de baixo consumo de energia [14].

As simulações podem ser parametrizadas através de arquivos de inicialização utilizando uma linguagem de especificação denominada *.ned* – tal linguagem é disponibilizada pelo *framework Omnet++*. As simulações relatadas neste trabalho utilizam parâmetros semelhantes, diferenciando-se somente na estratégia para definição da potência de transmissão. Esta seção detalha as configurações comuns a todas as simulações.

O simulador Castalia fornece um módulo para a simulação do canal de transmissão baseado em dados obtidos empiricamente. Para tanto o simulador utiliza dois arquivos para parametrização. O primeiro deles é o *Path Loss Map* que define a perda média de sinal entre o enlace de dois nós da rede. A variação temporal de perda do sinal no enlace (dBm) é quantificado em um segundo arquivo denominado *Temporal Model*. Para esse arquivo também é definido uma estrutura e um modo especial de acesso que garanta a aleatoriedade da atenuação observado em uma WBAN real [14].

Para a camada física foi utilizado um modelo de referência, denominado *BANRadio* e definido por [15]. Foi utilizado o modo de recepção *low* cujos parâmetros são mostrados na Tabela I. 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 I. PARÂMETROS DO RÁDIO CONFORME [15]

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 [15]. Como a camada física foi configurada com taxa de dados 512 Kbps (Tabela I), 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 [15].

A camada de aplicação apenas envia pacotes de 100 bytes, a taxas de dados diferentes para cada nó sensor, conforme demonstra a Tabela II. Como proposto em [9] a rede simulada possui uma topologia estrela e consiste de cinco nós sensores posicionados nos punhos e tornozelos (direito e esquerdo) e no peito. O nó *sink* está posicionado no lado direito da cintura do usuário. Portanto, a camada de Rede não é implementada uma vez que os nós sensores estão a um salto do nó *sink*.

Nó sensor	Pacotes/segundo	Posição
1	10	punho esquerdo
2	10	punho direito
3	15	tornozelo esquerdo
4	25	tornozelo direito
5	25	peito

Tabela II. TAXA DE DADOS PARA OS NÓS SENSORES CONFORME [9]

As simulações foram realizadas considerando dois modos de colisão disponibilizados pelo Castalia. No primeiro modelo não existe colisão e, caso dois pacotes sejam enviados ao mesmo tempo, ambos são recebidos sem distinção. No segundo modelo, quando ocorre uma colisão, o pacote com menor potência é descartado e o outro é recebido.

Cada simulação foi repetida 100 vezes, com duração de 301 segundos, em que o primeiro segundo foi utilizado para inicialização da rede e os demais (300 s) para a simulação propriamente dita. Para garantir credibilidade dos resultados foi definido um intervalo de confiança de 95%, calculado pelo próprio Castalia. Na próxima seção será detalhada a para alteração da potência de transmissão dos nós sensores e justificar as razões para o desenvolvimento dessa estratégia.

#### IV. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho é baseado na abordagem *cross-layer* desenvolvida por [9], que a implementou no Castalia e foi fundamentada no padrão IEEE 802.15.4. Em [9] é estabelecido dois fluxos unidirecionais para a troca de informações entre camadas não adjacentes, conforme mostrado na Figura 1. No fluxo F1, a camada de aplicação envia mensagens para alterar a potência de transmissão do rádio. No fluxo F2, a camada MAC informa o resultado do cálculo da razão entre os ACKs recebidos (transmissões bem sucedidas) correspondente ao intervalo definido de tentativas de transmissões de pacotes (PRR). A estratégia adotada em [9] altera a potência de transmissão dos rádios dos nós sensores com base na comparação da PRR com um valor ou limiar de referência adotado. Foi simulado novamente a proposta de [9] no cenário deste trabalho para comparação dos novos resultados.

A dificuldade da estratégia adotada em [9] é estabelecer um critério para escolha do limiar para comparação. Tal critério deve ser flexível o suficiente para adaptar rapidamente à variabilidade das condições de transmissão. Além disso, deve

ser preciso o suficiente para garantir confiabilidade na entrega dos pacotes sem comprometer o consumo de energia, o que impacta no tempo de vida da WBAN.

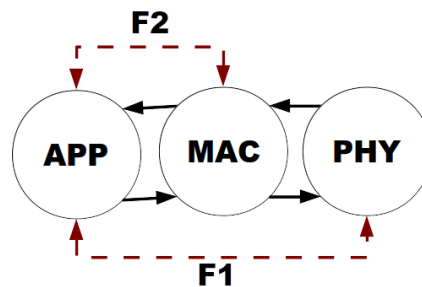


Figura 1. Proposta *Cross-Layer* desenvolvida por [9].

Neste trabalho, os valores da PRR foram utilizados como amostras adquiridas pela camada MAC para caracterizar o meio físico de transmissão em relação à potência utilizada. Diferentemente de [9], foi definido o intervalo de 5 pacotes transmitidos (amostra) para efetuar o cálculo da taxa. Portanto, os valores possíveis para essa taxa são 0, 20, 40, 60, 80 e 100 (Figura 2) que correspondem a 0, 1, 2, 3, 4 e 5 pacotes recebidos respectivamente. Como a PRR relaciona pacotes enviados pela camada MAC, neste trabalho essa taxa será denominada de *taxaMAC*.

Primeiramente, foram realizados dois experimentos utilizando padrões convencionais, sem a proposta *cross-layer*, com potência de transmissão fixa, denominada de PA (Potência Alta, com -10 dBm) e de PB (Potência Baixa, com -20 dBm), e ambas com duas retransmissões de pacotes em caso de não recebimento de ACK do nó *sink*. A Figura 2, exibe o gráfico de ocorrência dos valores da *taxaMAC* nas simulações PA e PB. Observa-se que enquanto os resultados da simulação de PB tende a uma distribuição mais uniforme, em PA há uma predominância de valores mais a direita do gráfico. Os valores com as maiores taxas de entregas de pacotes e as mais relevantes para este trabalho estão no intervalo, de pacotes recebidos, entre 80 e 100.

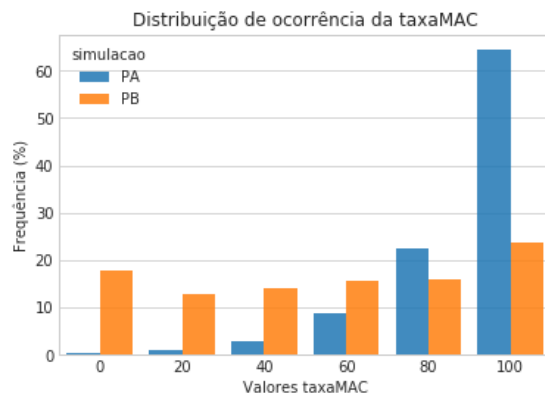


Figura 2. Distribuição da frequência dos valores da *taxaMAC* nas simulações de PA e PB.

A estratégia de alteração da potência adotada por [9] e a distribuição das ocorrências da *taxaMAC* nas simulações de PA e de PB (Figura 2) mostra que valores da *taxaMAC* influenciam na escolha da potência de transmissão, que também tem relação nos valores da *taxaMAC*. Essa recorrência dificulta a análise dos efeitos da potência de transmissão sobre os valores da *taxaMAC*. Neste trabalho, a seleção da potência é feita de forma independente da variação da *taxaMAC* ao se empregar uma distribuição probabilística para tal. Desta forma pretende-se compreender as implicações da alteração da potência sobre os valores assumidos pela *taxaMAC*, bem como, no resultado da entrega de pacotes.

Conforme a Figura 2, existe uma relação entre a distribuição dos valores da *taxaMAC* e o resultado final de pacotes recebidos pelo nó *sink*. Portanto, para se atingir um resultado satisfatório em relação a entrega de pacotes, assume-se que a distribuição da *taxaMAC* em uma estratégia de alteração de potência deve ser semelhante àquela observada em PA. Para se conseguir tal efeito, esta estratégia poderia selecionar uma potência com maiores chances de entrega de pacotes e conseqüentemente obter valores maiores para a *taxaMAC*, mas sem a exigência de selecionar sempre a mesma potência considerando a variabilidade das condições de transmissão e o requerimento de poupar energia.

Neste trabalho, 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 executava no mesmo intervalo de 5 transmissões utilizado para contabilizar a *taxaMAC*.

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:

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

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 1). Deve-se observar que o parâmetro  $n$  está relacionado a última posição válida do *VetorPotencia*.

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

---

### 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)

```

---

$P(W = -15dBm)$  da potência -15 dBm ( $w_i$ ) ser selecionada corresponde ao valor da probabilidade  $P(X = 2)$  (Equação 2), ou seja, obter dois sucesso em  $n$  tentativas, já que -15 dBm se encontra na posição de índice 1 do vetor.

$$P(W = w_i) = P(X = i) \quad (2)$$

Uma vez que as potências de transmissão do rádio são fixas (-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 seguintes 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. Na próxima seção são discutidos e apresentados os resultados das simulações baseadas nesses conceitos.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As configurações do Castalia permitem a coleta de dados dos diversos módulos utilizados em uma simulação. Neste trabalho serão considerados como métricas a taxa de pacotes recebidos, a quantidade de pacotes recebidos de cada nó e os respectivos consumos de energia (relação nanojoule por bit – nJ/bit). Além disso o simulador indica as falhas para o não envio ou recebimento dos pacotes, como o *buffer overflow* (falta de espaço no buffer), *busy channel* (canal ocupado) e *no ACK* (não recebimento do ACK).

A *taxaMAC*, desenvolvida em [9], indica para cada nó sensor a proporção de pacotes recebidos com sucesso pelo nó *sink* em relação ao total de pacotes enviados em uma janela de pacotes enviados. Essa medida pode ser utilizada como um indicativo da confiabilidade da rede, baseada na sua capacidade em entregar pacotes.

A Figura 3 mostra a relação do total de pacotes recebidos pela alteração de potência dos nós sensores, de acordo com a proposta de Distribuição Binomial e da arquitetura *cross-layer* de [9], aqui denominada de CL-B (*Cross-Layer Binomial*).

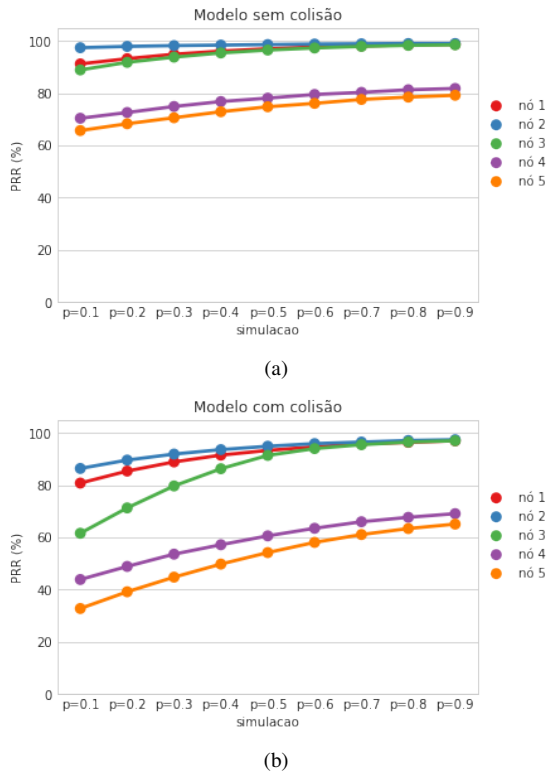


Figura 3. Variação da taxa de pacotes recebidos nas simulações CL-B, de acordo com a alteração do parâmetro  $p$ .

Quando o parâmetro  $p$  tende a zero as potências que consomem pouca energia ocorrem com maior frequência influenciando no consumo de energia do nó sensor, porém há uma redução no valor na taxa de pacotes recebidos. O valor pretendido seria um  $p$  próximo a zero e que não comprometesse a entrega de pacotes ao nó *sink*. No cenário com colisão ocorre maior diferença entre os valores de pacotes recebidos em relação a variação de  $p$ . Tal variação se mostra estabilizada a partir de CL-B com  $p = 0,7$  e, por essa razão, esse valor foi utilizado como referência para as simulações deste trabalho. Portanto, pretende-se comprovar que a observação das amostras, calculadas pela *taxaMAC* e retiradas do meio de transmissão, sejam suficientes para estimar o comportamento da WBAN, quanto a entrega de pacotes ao nó *sink* (confiabilidade) e sem comprometer o consumo de energia (tempo de execução da rede).

A Figura 4 compara os valores da *taxaMAC* entre as simulações PA, PB e CL-B. Os resultados mostram que a estratégia CL-B se mostrou mais eficiente em quase todos os casos em relação a PA quanto a PB. Entretanto, para os nós sensores com taxa de 25 pacotes por segundo (nós 4 e 5) a estratégia de PA se mostrou mais efetiva do que CL-B. No cenário sem colisão (Figura 4(a)) os nós sensores 1, 2 e 3 com CL-B, apresentam uma melhora de 3,37%, 3,21% e 2,55%, respectivamente, em relação a PA. Já no cenário com colisão (Figura 4(b)) estes mesmos nós apresentam uma melhora de 5,66%, 5,69% e 4,16%. CL-B, em relação a PB, aumenta a taxa

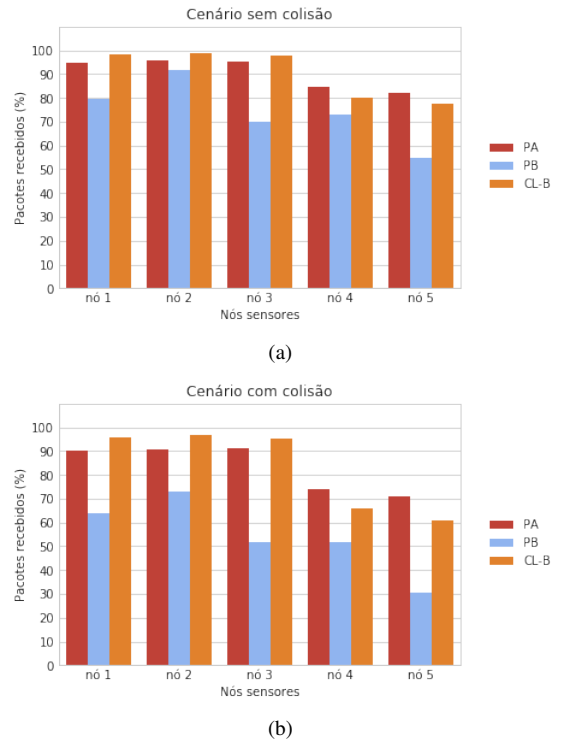


Figura 4. Taxa de pacotes recebidos nas simulações PA, PB e CL-B com parâmetro  $p=0,7$ .

de entrega em 18,74%, 7,30% e 27,83% no cenário sem colisão e em 32,04%, 23,62% e 43,62% no cenário com colisão, para os mesmos nós sensores (1, 2 e 3, respectivamente).

O CL-B apresenta para os nós 4 e 5 um resultado de 4,30% e 4,43% pior em relação a PA, no cenário sem colisão, de 8,05% e 9,77%. Essa perda de entrega de pacotes é devido a taxa de dados dos nós sensores 4 e 5 estar próxima do limite de saturação do canal de comunicação física da rede. Como descrito, em relação à PB, o CL-B apresentou melhores resultados em todos os cenários.

A Tabela III mostra a frequência relativa das ocorrências observadas para cada valor de potência utilizada, considerando a simulação CL-B com o valor parâmetro  $p = 0,7$ . Desta forma, a potência  $-20dBm$  ocorreu 7,56% das vezes, enquanto a potência  $-12dBm$  ocorreu 41,142%. Verifica-se que os valores observados são próximos aos valores teóricos obtidos pela fórmula 1.

Potência (dBm)	-25	-20	-15	-12	-10
Frequência observada (%)	0.807	7.562	26.468	41.142	24.020
Probabilidade teórica (%)	0.81	7.56	26.46	41.16	24.01

Tabela III. OCORRÊNCIA DAS POTÊNCIAS TRANSMISSÃO SEGUNDO UMA DISTRIBUIÇÃO BINOMIAL COM  $P = 0,7$ .

Estratégias encontradas na literatura, como [12] e [13], estimam as condições de atenuação do meio de comunicação para as próximas transmissões e assim tentam definir a potência de

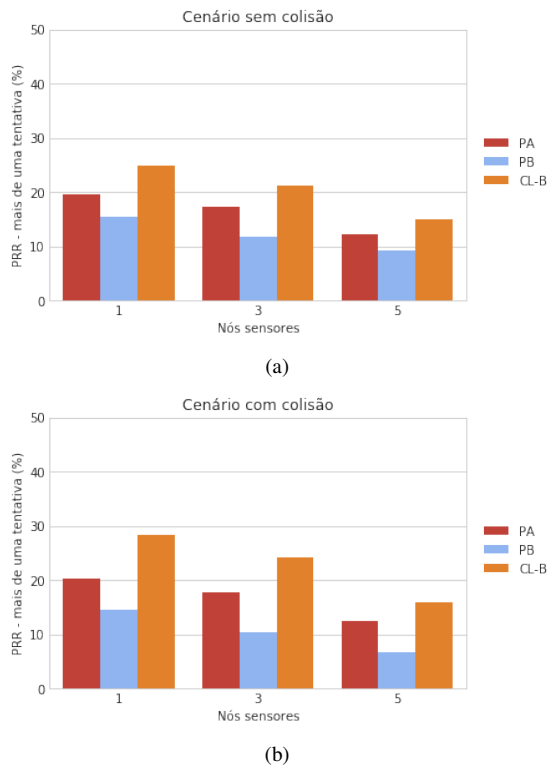


Figura 5. Comparação das taxas de transmissões bem sucedidas a partir da segunda retransmissão, entre as simulações PA, PB e CL-B ( $p=0,7$ ).

transmissão mais adequada. A solução proposta neste trabalho utiliza a mesma potência para as próximas  $n$  transmissões. Devido a grande variabilidade da perda de sinal durante esse intervalo, é possível discutir sobre a precisão dos algoritmos que utilizam algum tipo de medida do meio de comunicação como estimador, em relação a proposta de seleção randômica da potência segundo uma distribuição probabilística.

Como os nós sensores apresentam taxas de dados distintas (Tabela II) e um mesmo valor para a janela da *taxaMAC*, conclui-se que os nós sensores trocam de potência em intervalos distintos. Desta forma, os nós sensores com taxa de dados menores (10 ou 15 pacotes por segundo) demoram mais tempo para trocar a potência, e os nós sensores com taxa de dados mais alta (25 pacotes por segundo) trocam de potência com maior frequência.

A Figura 5 apresenta a taxa de transmissões bem sucedidas com mais de uma tentativa em relação ao total de pacotes transmitidos pela camada MAC. Observa-se que o número de sucessos obtidos a partir da segunda tentativa é maior nos cenários com alteração da potência do que aqueles com potência fixa – PA e PB. Esse aumento indica que as tentativas de transmissões estão sendo realizadas por mais tempo.

Na Figura 6 pode ser observado as taxas de falhas de transmissão dos pacotes ocasionada por estouro do *buffer*, dos nós sensores 3 e 5. O nó sensor 1 não apresentou falhas devido a sua baixa taxa de dados. Observa-se que as simulações com alteração de potência apresentam taxas maiores desse tipo de

falha em relação a PA, para os nós 4 e 5, que possuem alta taxa de dados (25 pacotes por segundo). Essas falhas começam a diminuir à medida que a potência de -10 dBm ocorre com maior frequência, ou seja, quando o parâmetro  $p$  se aproxima de 1.

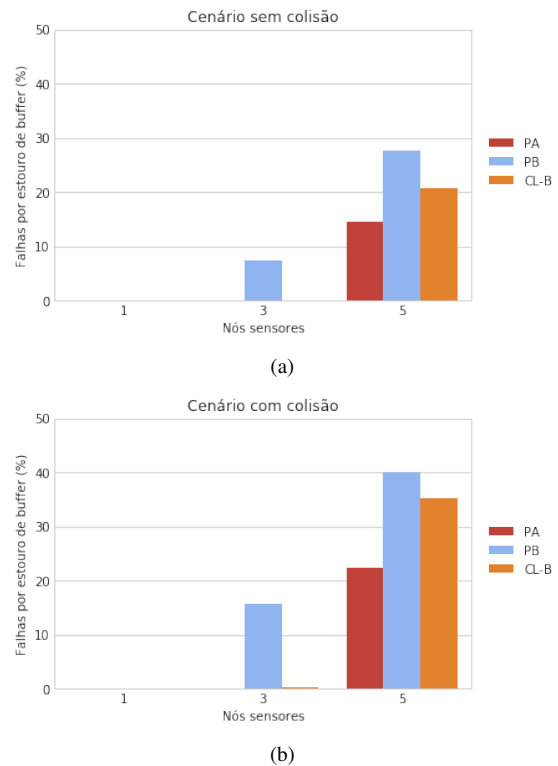


Figura 6. Comparação da taxa de falhas ocasionadas por estouro de *buffer* entre as simulações PA, PB e CL-B ( $p=0,7$ ).

Em contrapartida, os esquemas de alteração da potência apresentam melhores resultados nos erros relacionados às condições de transmissão. Na Figura 7 é possível observar menores taxas de erros relacionadas a canal ocupado (*busy channel*) de CL-B em relação às potências fixas (PA e PB). Essa tendência é observada em ambos os modelos de colisão.

Na Figura 8 observa-se novamente que as falhas ocorridas em decorrência do não recebimento do ACK, isto é, quando o nó *sink* não consegue notificar ao nó emissor o recebimento do pacote, é menor na estratégia CL-B. Nos experimentos realizados, esse valor decresce a medida que o parâmetro  $p$  se aproxima de 1.

A pouca variação do consumo de energia pode ser explicada pelo pouco tempo de simulação (301 segundos, aproximadamente 5 minutos) e pela pequena variação de consumo energético definido no arquivo de configuração do rádio utilizado para simulação de WBAN pelo Castalia.

A Figura 9 apresenta o consumo de energia das três abordagens. CL-B é mais eficiente para os nós sensores com menores taxas de dados (nós 1 e 3, mas perde para os nós com alta taxa de dados).

Estes resultados corroboram aqueles alcançados por [9] e

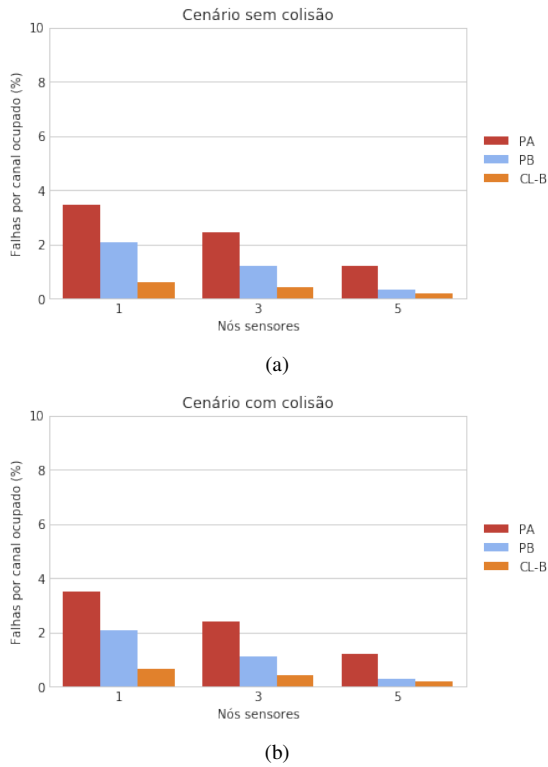


Figura 7. Comparação entre a taxa de falhas ocasionada por canal ocupado, entre as simulações PA, PB e CL-B ( $p=0,7$ ).

[5] de que os mecanismos de alteração da potência são mais eficientes com nós com baixa taxa de dados, pois a alteração de potência pode implicar em mais tentativas de retransmissão dos pacotes. Essas retransmissões levam os nós sensores a dedicarem um intervalo de tempo maior para tentar enviar um pacote ao nó *sink* o que, aliada a alta taxa de dados, acarretam as maiores taxas de erros por estouro de *buffer* ou canal ocupado.

Na Figura 10 é mostrada a comparação de desempenho (entrega de pacotes) entre as propostas de *cross-layer* de estimativa (CL-B) e a de tempo real (CL-1) de [9]. Assim como mostrados nos gráficos anteriores, os nós sensores com taxas altas, 4 e 5, não houve bom desempenho com o uso da estimativa binomial. Nos demais nós sensores os valores são próximos. O desempenho computacional pode ser considerado equivalente, pois a estimativa binomial utiliza uma estrutura de matrizes assim como o algoritmo que calcula a *taxaMAC* em CL-1.

## VI. CONCLUSÃO

As propostas para controle de potência de transmissão em uma WBAN podem ser classificadas de acordo com a estratégia utilizada para inferir as condições do meio de transmissão: conectividade, PRR (*Packet Received Rate*) ou RSSI [11]. Uma forma de avaliar estes algoritmos é comparar o seu desempenho entre simulações que utilizam uma potência fixa, normalmente a maior e a menor potência disponibilizada pela

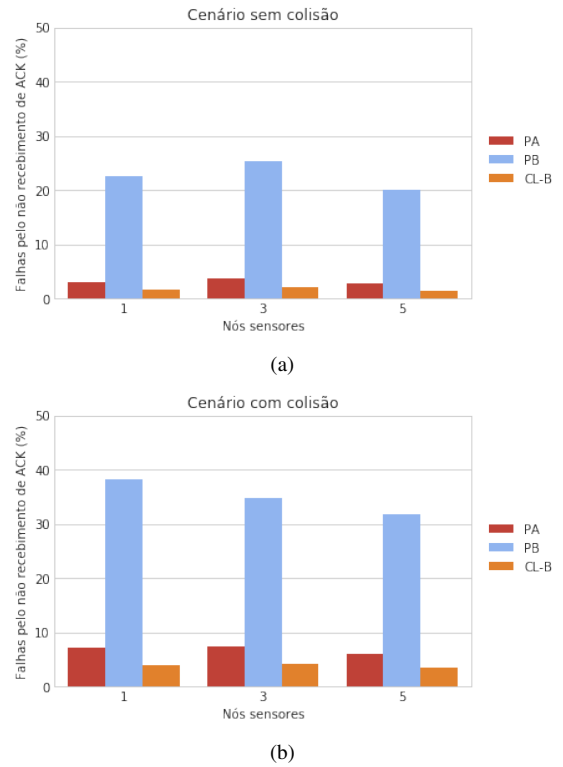


Figura 8. Comparação entre as taxa de falhas ocasionadas pelo não recebimento de ACK entre as simulações PA, PB e CL-B ( $p=0,7$ ).

configuração do rádio, ou com propostas de outros autores. No presente estudo sugere-se a avaliação dessas propostas comparadas a uma solução com estimadores, que é a alteração aleatória da potência seguindo um modelo matemático e probabilístico conhecido. Portanto, foi analisada a viabilidade de um parâmetro aleatório no controle de potência de transmissão em uma WBAN, sem afetar o consumo de energia e melhorar a confiabilidade na entrega de pacotes ao *sink*. A implementação dos fluxos entre as camadas de aplicação, MAC e física [9], utilizadas neste trabalho, tiveram como objetivo compartilhar informações e alterar seus estados para adaptação ao estado do meio. Os resultados deste trabalho mostraram que a abordagem *cross-layer* desenvolvida apresentou também uma característica de imunidade, em relação à taxa de entrega de pacotes ao nó *sink*, às mudanças dos estados do meio de acesso dos cenários simulados. A estimativa binomial é uma alternativa ao cálculo em tempo real do estado do meio físico, como mostrado na Figura 10.

Como trabalhos futuros pode-se pesquisar outras distribuições, parâmetros ou técnicas aleatórias para analisar o seu impacto no desempenho de uma WBAN. Por exemplo, neste estudo foi estabelecido o mesmo parâmetro  $p$  para a alteração da potência em todos os nós. Logo, poderiam ser pesquisadas técnicas que estimassem este parâmetro individualmente para cada nó utilizando a amostragem da *taxaMAC*. Assim como utilizar a abordagem de *cross-layer* para implementar uma estratégia visando a diminuição das

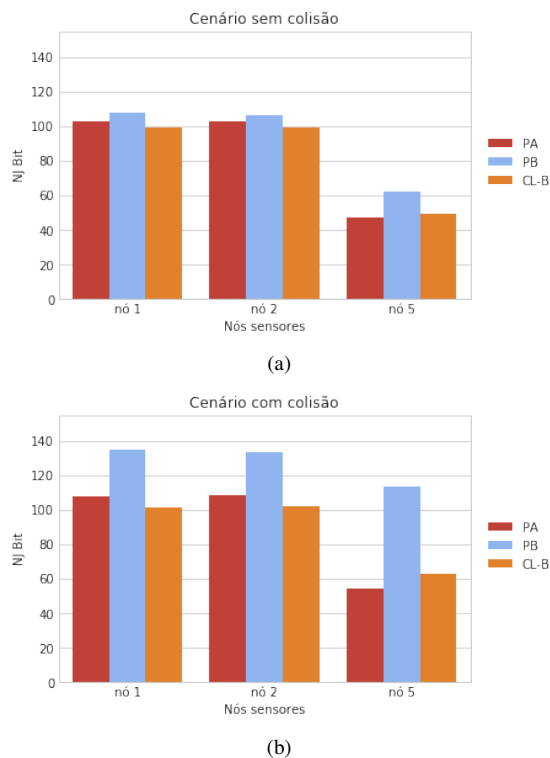


Figura 9. Consumo de energia (em nJ/bit) para PA, PB e CL-B ( $p=0,7$ ).

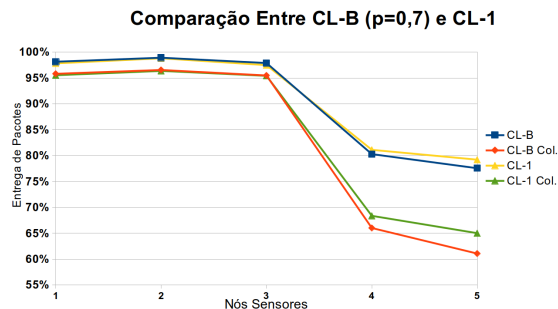


Figura 10. Comparação entre propostas da estimativa binomial e do cálculo em tempo real.

falhas por estouro de *buffer*.

A estratégia adota neste trabalho foi baseada em uma variável aleatória e, portanto, não utilizou informações intrínsecas que possam comprovar o estado do meio físico de transmissão. Se por um lado a alteração da potência de transmissão contribui para melhorar o recebimento de pacotes, por outro é prejudicada com o aumento da quantidade de retransmissões. Foi descrito a variável *taxaMAC* como parâmetro único entre a camada MAC e Aplicação para determinar os pacotes recebidos pelo nó *sink*. Os valores de hardware RSSI e LQI (*Link Quality Indicator*) representam o estado do meio de acesso compartilhado e também podem colaborar para a respectiva adaptação do nó sensor, em conjunto com a *taxaMAC*. A comparação com outros trabalhos, assim como

o padrão IEEE 802.15.6, que tem uma proposta específica para WBANs, devem ser realizados para delinear o escopo no controle de potência e da abordagem *cross-layer*.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless body area networks: A survey," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, Third 2014.
- [2] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, "A survey on wireless body area networks," *Wirel. Netw.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>
- [3] R. Punj and R. Kumar, "Technological aspects of wbans for health monitoring: a comprehensive review," *Wireless Networks*, Feb 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1694-3>
- [4] F. D. Franco, C. Tachtatzis, R. C. Atkinson, I. Tinnirello, and I. A. Glover, "Channel estimation and transmit power control in wireless body area networks," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 11–19, 2015.
- [5] S. Archasantisuk, T. Aoyagi, M. Kim, and J. i. Takada, "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)*, Sept 2016, pp. 1–6.
- [6] S. I. 802.15.4, "Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans)," *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–314, 2011.
- [7] S. I. 802.15.6, "Ieee standard for local and metropolitan area networks - part 15.6: Wireless body area networks," *IEEE Std 802.15.6-2012*, pp. 1–271, 2012.
- [8] V. Srivastava and M. Motani, "Cross-layer design: a survey and the road ahead," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 12, pp. 112–119, 2005.
- [9] Pozza, Rogério Santos; Silva, Diógenes Cecílio, "Uma abordagem cross-layer para comunicação em redes corporais sem fio," in *33.º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores E Sistemas Distribuídos*. Vitória - ES: Sociedade Brasileira de Computação, may 2015, pp. 99–104.
- [10] D. Peditakis, Y. Tselishchev, and A. Boulis, "Performance and scalability evaluation of the castalia wireless sensor network simulator," in *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, ser. SIMUTools '10. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2010, pp. 53:1–53:6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8727>
- [11] S. Kim and D. S. Eom, "Link-state-estimation-based transmission power control in wireless body area networks," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 1294–1302, July 2014.
- [12] A. S. Ahmed, T. S. Kumaran, S. S. A. Syed, and S. Subburam, "Cross-layer design approach for power control in mobile ad hoc networks," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 1 – 7, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110866514000358>
- [13] X. Chen, Y. Xu, and A. Liu, "Cross layer design for optimizing transmission reliability, energy efficiency, and lifetime in body sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 4, 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/900>
- [14] Y. Boulis, Athanassios; Tselishchev, *Castalia - A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Network*, version 3.2 ed., National ICT Australia, NICTA, Locked Bag 9013, Alexandria, NSW 1435, Australia, Mar. 2011.
- [15] A. Boulis, D. Smith, D. Miniutti, L. Libman, and Y. Tselishchev, "Challenges in body area networks for healthcare: the mac," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 5, pp. 100–106, 2012.