

Avaliando Estratégias de Comunicação em Redes de Área Corporal sem Fio sob Diferentes Contextos de Mobilidade, Interferência e Carga de Aplicação

Willians de P. Pereira*[†], Jorge F. Herculano*[‡] e Alirio S. de Sá*

*Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD)

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM)

Departamento de Computação Interdisciplinar (DCI)

Instituto de Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)

[†]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

[‡]Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB)

Resumo—As Redes de Área Corporal Sem Fio (WBAN, Wireless Body Area Network) devem suportar requisitos de aplicações médicas e não-médicas, contornando falhas de comunicação provocadas pela mobilidade do corpo e ruídos nas transmissões sem fio. Para isso, estratégias de comunicação baseadas em múltiplos saltos (multi-hop) têm sido estudadas na tentativa de melhorar a eficiência e confiabilidade no encaminhamento das mensagens na rede. Contudo, o desempenho dessas estratégias de comunicação em WBAN, observando o efeito combinado de mobilidade do corpo, interferência e diferentes cargas de aplicação, ainda não foi estudado de forma adequada na literatura. Nesse contexto, o presente artigo avalia o desempenho de abordagens de comunicação em diferentes situações de mobilidade do corpo, interferência e carga de aplicação. Para tanto, foram realizados experimentos com interferência na comunicação, contextos variados de mobilidade do corpo e diferentes condições de carga de aplicação. Os resultados mostram que usar abordagens de comunicação sensíveis a interferência, mobilidade do corpo e condições de carga melhora a eficiência de tráfego e a eficiência energética da rede.

Index Terms—Topologia, WBAN, Abordagens de Múltiplos Saltos

Abstract—Wireless Body Area Networks (WBANs) must support medical and non-medical application requirements, masking communication faults caused by body mobility and noise in wireless transmissions. For this, multi-hop communication strategies have been studied to improve the efficiency and reliability of message forwarding in WBAN. However, the performance of these communication strategies in WBAN, combining the effect of body mobility, interference, and different application workloads, has not yet been appropriately evaluated. Then, this paper evaluates the performance of communication approaches in different situations of body mobility, interference, and application workload. For that, the experiments were carried out with interference in communication, varied contexts of body mobility, and different application workload conditions. The obtained results show that using communication approaches aware of interference, body mobility, and load conditions improves the traffic and energy efficiency of the WBAN.

Index Terms—Topology, WBAN, multi-hop approaches

I. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de comunicação sem fio tem oportunizado o desenvolvimento de novas aplicações móveis destinadas aos cuidados da saúde. É o caso das Redes de Área Corporal sem Fio (WBAN, *Wireless Body Area Network*), composta por sensores acoplados ao corpo humano para monitorar dados vitais¹ [1]. Essas redes também podem ser compostas por atuadores capazes de realizar intervenções em parâmetros fisiológicos do paciente². Esses dois tipos de dispositivos são conectados a um dispositivo central, e.g., *smartphone* ou *tablet*, com capacidade de coordenar a rede e trocar dados com uma aplicação [2].

Nas WBANs, os dispositivos são conhecidos, em número limitado, fixados em pontos específicos do corpo e com características físicas e taxas de transmissão que podem variar de acordo com o tipo de dado que eles manipulam. Para não oferecerem risco à saúde, esses dispositivos transmitem sinais de radiofrequência de baixa potência e curto alcance [2]–[4]. Por isso, os canais de comunicação da WBAN não são confiáveis, pois o movimento do corpo pode causar intermitência na conexão entre os dispositivos e as transmissões são susceptíveis a interferências de sinais de radiofrequência, oriundos, por exemplo, de outras redes sem fio. Além disso, para não comprometerem a mobilidade do corpo, os dispositivos possuem dimensões bastante reduzidas, implicando em poder computacional e autonomia de energia também bastante limitados [3], [4].

Para suportar aplicações médicas e não-médicas, as WBANs devem garantir que as mensagens sejam entregues de forma confiável e eficiente, atendendo às restrições temporais das aplicações e consumindo o mínimo de energia possível para assegurar um maior tempo de operação à rede [1]. Assim, um dos desafios de projeto dessas redes é atender a esses requisitos, considerando estratégias de comunicação que re-

¹e.g. pressão arterial, oxigenação, temperatura, glicose, etc.

²e.g., bombas de infusão, marcapasso, etc.

alitem o encaminhamento das mensagens, contornando as mudanças dinâmicas de conectividade entre os dispositivos. Nesse sentido, a eficiência e a confiabilidade de diferentes estratégias de comunicação, típicas de Redes de Sensores sem Fio, tais como *broadcast*, *multicast*, *convergecast* [5], têm sido avaliadas em WBAN [6]–[10]. Contudo, essas avaliações não consideraram a eficiência e a confiabilidade dessas estratégias de comunicação quando os efeitos da interferência, da mobilidade do corpo e de taxas de transmissão heterogêneas são combinados.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é avaliar a eficiência e a confiabilidade das estratégias de comunicação *broadcast*, *multicast*, *convergecast*, em cenários com interferência e em diferentes contextos de mobilidade do corpo e taxas de transmissão. Para verificar em quais cenários as estratégias de comunicação obtêm o melhor desempenho, elas foram analisadas considerando topologias sugeridas na literatura e topologias adaptadas ao contexto de movimento do corpo, interferência e carga de dados. As estratégias de comunicação *broadcast*, *multicast* e *convergecast* foram implementadas no Castalia/OMNeT++ [11] e o desempenho foi analisado em termos da vazão e latência de entrega das mensagens e em termos da eficiência energética da rede. A partir dos cenários considerados, os resultados mostram que, em WBANs, adotar topologias de comunicação adaptadas ao contexto de movimentação do corpo melhoram o desempenho de estratégias *multicast* e *convergecast*, enquanto que as estratégias de *broadcast* apresentam desempenho inferior na grande maioria dos cenários.

Nas demais seções deste artigo, são apresentados: os trabalhos relacionados (Seção II); os cenários e ambiente da simulação (Seção III); os resultados da avaliação de desempenho (Seção IV); e, as considerações finais deste trabalho (Seção V).

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Estratégias de comunicação baseadas em *broadcast* foram analisadas em WBANs por [6]. Eles identificaram que essas estratégias conseguem disseminar mensagens para todos os dispositivos da WBAN, mas aumentam o número de transmissões realizadas por cada dispositivo. Contudo, diferente deste trabalho, eles não avaliaram o consumo de energia, um requisito relevante para as WBANs.

Em [7], foram avaliadas estratégias de comunicação baseadas em *convergecast* para WBAN, considerando diferentes contextos de movimento do corpo. Eles identificaram que essas estratégias, por usarem rotas pré-definidas, realizam menos retransmissões que as estratégias baseadas em *broadcast*. Todavia, diferente do que é investigado neste trabalho, eles avaliaram apenas um tipo de rota fixa para sete diferentes movimentos do corpo, sem observar como a adaptação da topologia baseada no contexto de movimento do corpo impacta no desempenho dessas abordagens de *convergecast* em WBANs. Além disso, eles também não consideram interferência de outros sinais de radiofrequência na comunicação entre dispositivos.

Em [8], é comparado o desempenho em WBAN de diferentes estratégias de comunicação baseadas em *broadcast*, *multicast* e *convergecast*, considerando diferentes contextos de movimentos do corpo. Dentre as abordagens, eles observaram que os algoritmos com melhor desempenho foram: FloodToSink baseado em *broadcast*; APAP (*All Parents to All Parents*), baseado em *multicast*; e APPP (*All Parents to Probabilistic Parent*), baseado em *convergecast*. Contudo, diferente do que é avaliado neste trabalho, nos cenários simulados eles não analisaram a eficiência energética e a interferência de outros sinais de radiofrequência na comunicação entre dispositivos. Baseado nos resultados apresentados por [8], os algoritmos FloodToSink, APAP e APPP foram selecionados para as avaliações de desempenho realizadas no presente artigo.

Diferentes estratégias de comunicação adaptativas têm sido consideradas para lidar com diferentes requisitos de disseminação de mensagens em WBANs. Em [9], por exemplo, é proposta uma estratégia de comunicação que adapta o encaminhamento das mensagens observando o consumo de energia dos dispositivos. No entanto, essa adaptação não considera outros aspectos, como o contexto de movimentação do corpo, por exemplo. Em [10], rotas de encaminhamento de mensagens são adaptadas de modo a evitar que os dispositivos elevem demasiadamente suas temperaturas e, conseqüentemente, provoquem queimaduras nos pacientes. Com o intuito de melhorar a taxa de entrega de mensagens dessa abordagem, eles utilizam dois dispositivos coordenadores posicionados na cintura do indivíduo. Apesar de observarem as situações de movimentação do corpo, as taxas de transmissão dos dispositivos e o consumo de energia, eles não consideraram a interferência de outros sinais de radiofrequência na comunicação entre dispositivos. Diferentes dessas abordagens, o presente trabalho não propõe novas estratégias de comunicação. Ao invés disso, espera-se que os resultados apresentados neste trabalho ofereçam subsídios para a proposição de novas abordagens de comunicação adaptativas para WBANs.

III. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS: AMBIENTE, FATORES E MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

A. Estrutura da WBAN e do modelo de comunicação

Nos experimentos, simulando casos típicos de uso, a WBAN é composta por sete dispositivos fixados no corpo humano, nas seguintes localizações: cintura (0); peito (1); cabeça (2); braço (3); tornozelo (4); coxa (5); pulso (6), conforme apresenta a Figura 1. Esse número de dispositivos foi escolhido por ser suficiente para o monitoramento da maioria dos dados fisiológicos do corpo e, por conta disso, vem sendo utilizado em vários trabalhos – e.g., [6]–[8], [12].

Os canais físicos de comunicação entre cada par de dispositivos da WBAN seguem o modelo definido em [12]. Esse modelo foi obtido observando as médias de atenuação de sinal de radiofrequência (i.e., *path loss*), provocada pela movimentação do dispositivo e pela taxa específica de absorção de radiofrequência do corpo humano (SAR, *Specific Absorption Rate*). Especificamente, nos experimentos realizados no presente trabalho, são utilizados os movimentos: andando; correndo;



Figura 1: Posição dos dispositivos no corpo

sentando; e deitando. Os movimentos andando e correndo mudam a posição dos dispositivos de forma parecida. Contudo, as mudanças de postura corporal são mais estáveis andando do que correndo, por conta da velocidade com que as mudanças de postura são realizadas. O movimento sentando aproxima o dispositivo coordenador, localizado na cintura, dos dispositivos que estão no tornozelo e na coxa. O movimento deitado realiza mudanças na posição dos dispositivos de forma mais lenta do que os demais movimentos. Dessa forma, cada movimento possui particularidades que afetam os canais de comunicação de formas distintas.

B. Estratégias de Comunicação

Para analisar o impacto das mudanças de posturas no desempenho da WBAN, foram escolhidas estratégias de comunicação de vários saltos (*multi-hop*), pois, conforme apresentaram [6]–[8], [12], essas estratégias são mais eficientes que as de único salto (*single-hop*). Dentre os algoritmos utilizados pelas estratégias de comunicação, foram escolhidos aqueles que obtiveram os melhores desempenhos nos experimentos realizados por [8]:

- **FloodToSink** – é uma estratégia de comunicação *broadcast* em que os dispositivos transmitem suas mensagens ou retransmitem mensagens de seus vizinhos até que cheguem ao destino final, i.e., coordenador da WBAN. Mensagens serão descartadas nos seguintes casos: se o dispositivo receber uma mensagem de sua autoria encaminhada de outro dispositivo; a mensagem passar por mais de 6 dispositivos antes de chegar ao coordenador; e mensagens duplicadas que chegarem ao coordenador [6].
- **APAP (All Parents to All Parents)** – é uma estratégia de comunicação *multicast* com rotas pré-definidas. Conforme apresenta a Figura 2, é criada uma relação pai-filho entre os dispositivos, na qual um filho pode ter mais de um pai – os filhos são representados pelo círculo azul (dispositivo 6) e os pais pelo círculo preto (dispositivos 0, 1 e 3). Dessa forma cada filho emite suas próprias mensagens ou encaminham as mensagens de seus filhos para seus pais, até que a mensagem chegue ao coordenador (dispositivo 0). Os círculos laranja representam dispositivos que estão esperando pra transmitir ou receber mensagens. As rotas foram definidas considerando

que todos os dispositivos precisam de pelo menos um retransmissor. Mensagens são descartadas nas seguintes condições: a) duplicidade de mensagens; b) a mensagem foi recebida por rota diferente da esperada [7].

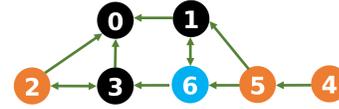


Figura 2: Rotas pré-definidas

- **APPP (All Parents to Probabilistic Parent)** – é uma estratégia de comunicação *convergecast*, baseada no APAP, na qual o filho escolhe o pai utilizando uma abordagem probabilística baseada em pesos. Esse peso é definido por uma variável aleatória r e comparada com uma probabilidade P . Nos experimentos, os pais tem chances iguais de serem selecionados (i.e., $P = 0,5$). Os critérios para descarte de mensagens são os mesmos do APAP [8].

Além das versões básicas dos algoritmos APAP e APPP, também foram avaliadas variações das mesmas, nomeadas de APAP-TA e APPP-TA, adaptadas para topologias específicas, considerando cada situação de movimento do corpo.

C. Carga de Aplicação

Em termos da carga de trabalho (*workload*) de aplicação, foram definidos três cenários (ver Tabela I): Carga alta, no qual os dispositivos possuem altas taxas de transmissão e conjuntamente emitem uma média de 430 pacotes por segundo; Carga baixa, onde os dispositivos possuem baixas taxas de transmissão e conjuntamente emitem uma média de 42 pacotes por segundo; e Carga típica de aplicação médica, cujas taxas de transmissão dos dispositivos variam de acordo com o sinal específico que está sendo monitorado, similar ao utilizado em [13] – nesse caso os dispositivos emitem conjuntamente uma média de 315 pacotes por segundo.

D. Métricas de desempenho

O desempenho das estratégias de comunicação foi avaliado em termos de:

- Eficiência do tráfego: analisada a partir do percentual de perda e da latência de entrega das mensagens;
- Eficiência Energética: observada usando a média de consumo de energia em relação ao total de *bits* trafegados na rede.

E. Implementação do Ambiente de Simulação

Os algoritmos utilizados pelas estratégias de comunicação foram implementados no simulador Castalia/OMNeT++ [11]. O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos que possui abstrações para simulação de diferentes tipos de rede e fornece ferramentas para o desenvolvimento de protocolos [14]. O Castalia fornece abstrações para simular WBANs e outras redes de sensores sem fio, utilizando as implementações do OMNeT++. Essas abstrações estão divididas nas camadas física, controle de acesso ao meio (MAC, *Medium Access*

Tabela I: Carga de aplicação (em pacotes por segundo) para cada cenário de simulação

Dispositivo	Carga alta	Carga baixa	Carga típica	
1	40	4	86	Eletroencefalograma (EEG)
2	80	8	1.2	Pressão sanguínea
3	100	12	1	Glicose
4	50	3	192	Eletrocardiograma (ECG)
5	70	6	0.048	Batimento cardíaco
6	90	9	35	Movimento do corpo
Carga total	430	42	315	-

Control), roteamento e aplicação. Além disso, esse *framework* disponibiliza ferramentas para configuração de movimentos corporais e consumo de energia dos dispositivos [11], [15]. A escolha desse conjunto de ferramentas viabilizaram a implementação das estratégias de comunicação em um cenário de simulação mais realista de WBAN.

O ambiente para as simulações foi preparado de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela II. O tempo de simulação considera um intervalo suficientemente largo para se obter certa estabilidade nos valores médios das métricas de desempenho utilizadas nas avaliações. Os experimentos são realizados com 10 replicações, de modo a permitir que a variabilidade das condições experimentais possa ser adequadamente observada e estimada nas métricas de desempenho. Para cada replicação, uma nova semente foi gerada para variáveis aleatórias, tais como interferência, instantes de transmissão etc. Os parâmetros do rádio, seguindo [11], foram definidos de acordo com o IEEE 802.15.6 para uma WBAN que utiliza banda estreita (*narrowband*). O modelo de interferência adotado é o SINR que simula ruído de fundo (*Noise-Floor*), considerando um ambiente com transmissões de dispositivos de outras redes sem fio. Na subcamada MAC, o protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* [16]) foi escolhido por permitir que os dispositivos transmitam na rede a qualquer momento.

Tabela II: Parâmetros do Ambiente de Simulação

Parâmetro	Valor
Simulação	
Tempo	500s
Dispositivos	6 + 1 (coordenador)
Replicações	10
Sementes	10
Canal de Comunicação sem Fio	
Interferência	SINR
Canal de Comunicação	[12]
Acesso ao Meio	
MAC	CSMA/CA
Rádio	
Payload	100 bytes
Potência de Transmissão	-25dBm
Taxa de Transferência	512 kbps
Ruído	-104dBm
Modulação	DBPSK
Sensibilidade	-91dBm
Frequência da Portadora	2,4 GHz
Avaliação de Canal Livre	-95dBm

F. Identificação das Topologias em Cada Movimento do Corpo

A identificação das topologias é realizada a partir das perdas de mensagens provocadas pela atenuação do sinal de radiofrequência devido a mudança de posição dos dispositivos, causada pelo movimento do corpo, e pela absorção de parte do sinal de radiofrequência pelo corpo. Para isso, foram identificadas e isoladas cada uma das fontes de perda de mensagem: atenuação do sinal pela absorção do corpo; transceptores ocupados realizando outra transmissão e impossibilitados de receber as mensagens que chegam; estouro do *buffer* de armazenamento de mensagens; e colisões das transmissões.

Para selecionar as topologias lógicas mais adequadas para cada movimento do corpo e interferência no canal, foram realizadas simulações com a estratégia de comunicação APPP utilizando a topologia lógica apresentada na Figura 2, considerando todos os cenários adotados de carga de aplicação e movimentos do corpo, como apresentado anteriormente. A estratégia APPP foi escolhida, pois é aquela que realiza menos retransmissões de mensagens, implicando em menos colisões. Então, foram analisadas as perdas de mensagens em cada canal de comunicação entre pares de dispositivos. Foi verificado que, dependendo do movimento do corpo: no cenário de Carga alta, as perdas variam entre 4% e 48%; no cenário de Carga baixa, essas perdas variam entre 7% e 38%; e, no cenário de Carga típica, essas perdas variam entre 0,14% e 69%. As menores perdas ocorrem nos canais de comunicação dos dispositivos que estão próximos – e.g., nos canais entre os dispositivos que estão no peito e na cintura. Já as maiores taxas de perda ocorrem nos canais de comunicação dos dispositivos que estão mais distantes entre si, como entre dispositivos do tornozelo e da cabeça.

Em seguida, identificou-se todos os canais de comunicação, entre os dispositivos da WBAN e o coordenador, com perda de mensagens menor que 20%. Se comunicam com o coordenador por meio de um dispositivo retransmissor aqueles dispositivos cujas perdas em seus canais com o coordenador são superiores a 20%. O retransmissor é escolhido baseado no canal de comunicação com menor perda de mensagens por atenuação. Todos os dispositivos possuem dois canais de comunicação para transmitir suas mensagens, contudo, quando um dos canais de comunicação possui taxa de perda maior que 20%, esse dispositivo transmite suas mensagens somente pelo outro canal de comunicação.

A partir desse procedimento, foram selecionadas as topologias lógicas apresentadas na Figura 3. Os círculos pretos

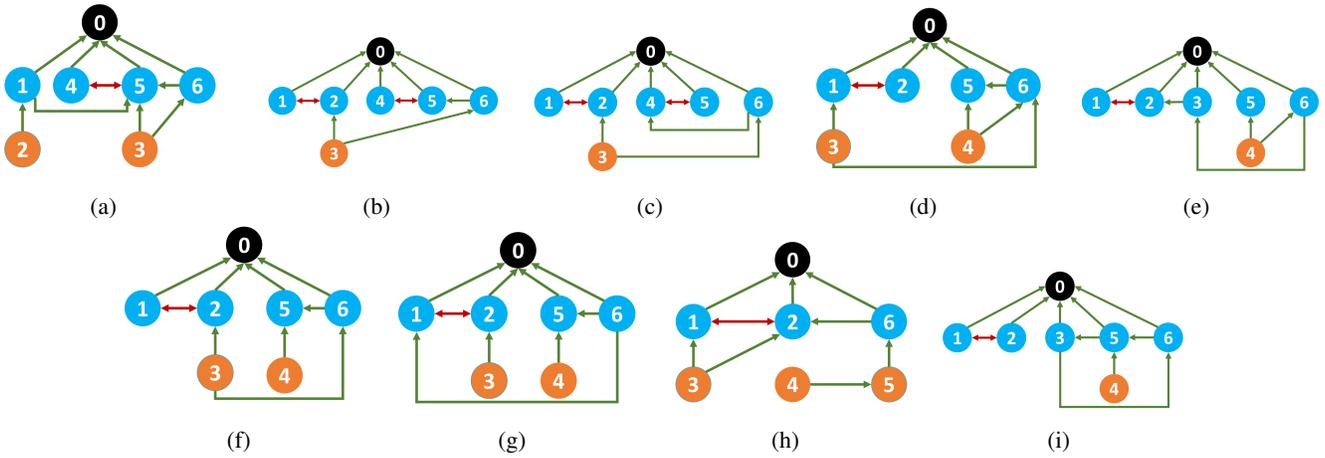


Figura 3: Topologias da WBAN. a) andando (carga baixa). b) correndo (carga baixa). c) deitando (carga baixa e alta). d) sentando (carga baixa e alta). e) andando (carga alta e típica). f) correndo (carga alta). g) correndo (carga típica). h) deitando (carga típica). i) sentando (carga típica).

representam o dispositivo coordenador da WBAN. Os círculos azuis representam os dispositivos que se comunicam diretamente com o coordenador e podem atuar como retransmissores de outros dispositivos. Os círculos laranja representam os dispositivos que precisam se comunicar com o coordenador por meio de um retransmissor. As setas verdes representam uma comunicação unidirecional e as setas vermelhas representam uma comunicação bidirecional. Nas figuras 3c, 3d e 3e, identifica-se que as mesmas topologias foram formadas para os mesmos movimentos do corpo, porém, em cenários de carga diferentes. As demais se formaram unicamente para um movimento do corpo em um cenário de carga específico.

Com as topologias definidas, foi realizada a implementação das estratégias de comunicação APAP-TA e APPP-TA, ambos utilizam como base as estratégias APAP e APPP, respectivamente. O sufixo TA (Topologia Adaptada) significa que elas foram aplicadas nas topologias definidas a partir de cada movimento do corpo.

IV. RESULTADOS

A. Perda de Mensagens Fim-a-Fim

Conforme apresenta a Figura 4, as estratégias de comunicação adaptadas de acordo com a topologia (i.e., APAP-TA e APPP-TA) perdem menos mensagens que as suas versões originais (i.e., APAP e APPP) que utilizam uma mesma topologia em todos os cenários. Em geral, é possível identificar que o algoritmo FloodToSink tem uma taxa de perda de mensagens mais alta do que o APPP e APAP em todos os movimentos e cenários. Isso ocorre porque esse tipo de algoritmo retransmite mais mensagens na rede dos que os outros. As estratégias APAP e APPP utilizam menos retransmissores, logo a quantidade de mensagens na rede diminui. As estratégias APAP-TA e APPP-TA utilizam os canais de comunicação com menor atenuação, dessa forma, reduz a perda de mensagens.

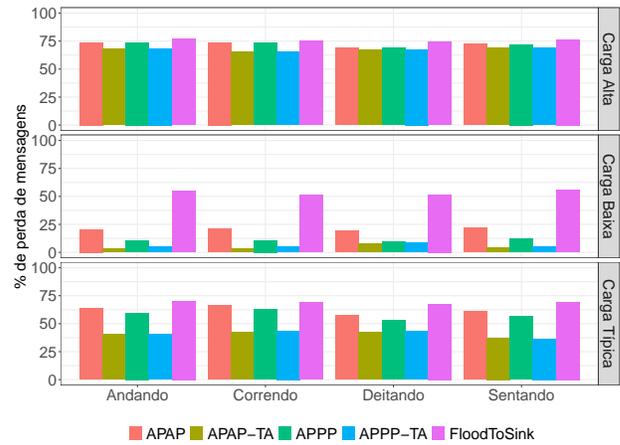


Figura 4: Perda de mensagens na rede em cada movimento e cenário de carga de aplicação.

No cenário com Carga alta de aplicação (ver Figura 4), a diferença de perda de mensagens é mais aparente no movimento correndo, enquanto que nos demais movimentos essa diferença é pequena. No cenário com baixa carga de aplicação e em todos os movimentos, a estratégia APAP-TA possui uma taxa de perda de mensagens igual ou menor que 8%, enquanto que APAP possui taxa de 20%. A estratégia APPP-TA também reduz a perda de mensagens de cerca de 12% para 5% quando comparada com a estratégia APPP nos movimentos andando, correndo e sentando. No cenário com carga típica de aplicação, a perda de mensagens nas estratégias APPP e APAP reduz de cerca de 60% para menos de 42% quando é utilizada a topologia adaptada das estratégias APAP-TA e APPP-TA. A estratégia de comunicação FloodToSink chega a perder cerca de 55% em cenário com baixa carga, 75% no cenário com alta carga e aproximadamente 70% no cenário com carga típica.

A partir dos movimentos do corpo e dos cenários de

carga de aplicação avaliados, é possível concluir que escolher uma topologia lógica adequada ao movimento do corpo e às interferências pode colaborar para o aumento da entrega das mensagens na rede.

B. Latência

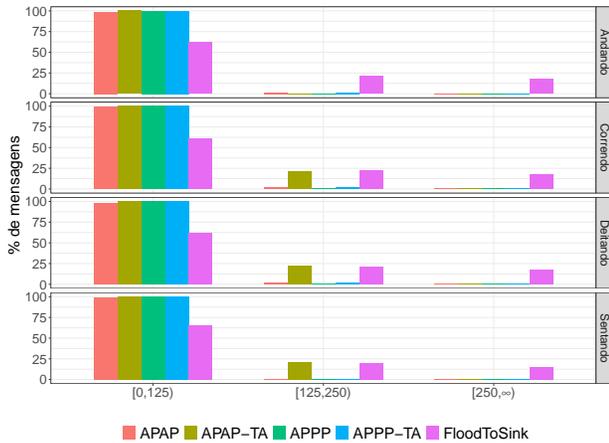


Figura 5: Latência de mensagens no cenário carga baixa

A WBAN é um tipo de rede que deve lidar com os limites temporais estabelecidos pelos requisitos das aplicações, podendo tolerar atrasos a depender do tipo de aplicação que podem ser médicas e não-médicas.

Nos cenários com baixa carga de aplicação (ver Figura 5), as estratégias de comunicação APAP-TA e APPP-TA entregam cerca de 98% das suas mensagens em até 125ms. As estratégias APAP e APPP também entregam cerca de 98% das mensagens, em até 125ms. No entanto, algumas mensagens da APAP-TA ainda podem chegar com até 125ms. A estratégia FloodToSink entrega cerca de 65% das mensagens em até 125ms, outros 10% com atrasos superiores a 250ms e 25% das mensagens restantes possuem atrasos superiores a 125ms e iguais ou inferiores a 250ms.

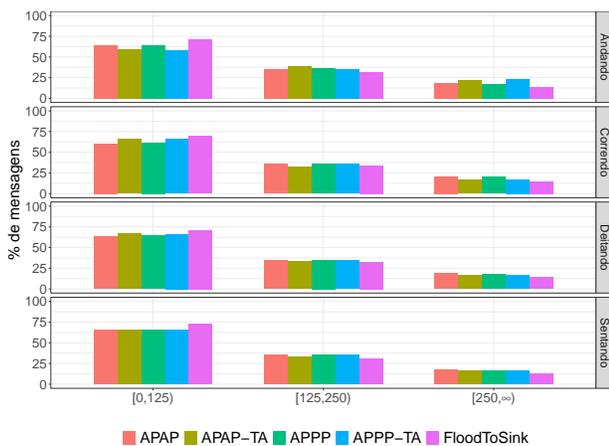


Figura 6: Latência de mensagens no cenário de carga alta

A latência das mensagens em cenários com alta carga de aplicação, ver Figura 6, é maior devido à quantidade de

mensagens que trafegam na rede. Todas as estratégias de comunicação possuem um desempenho similar, pois cerca de 70% das mensagens são entregues nos primeiros 125ms para todos os movimentos do corpo. Esse número reduz a cada janela de tempo, porém, é possível identificar que cerca de 25% das mensagens ainda chegam após 250ms. A estratégia FloodToSink consegue entregar mais mensagens que as outras estratégias em cada janela de tempo.

Nos cenários com carga típica de aplicação (ver Figura 7), é possível identificar algo similar ao que ocorre nos cenários de carga alta. As estratégias de comunicação APAP-TA e APPP-TA entregam cerca de 80% das suas mensagens até 125ms no movimento andando. Já no movimento sentando, o desempenho é similar ao das demais estratégias de comunicação: cerca de 75% das mensagens são entregues até 125ms e cerca de 15% são entregues após 250ms.

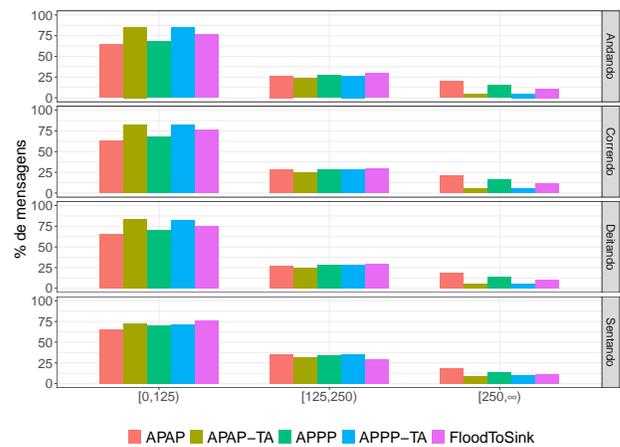


Figura 7: Latência de mensagens no cenário de carga típica

A partir dos movimentos do corpo e dos cenários de carga de aplicação avaliados, é possível concluir que escolher uma topologia lógica adequada ao movimento do corpo e as interferências pode colaborar também para reduzir a latência de entrega das mensagens.

C. Consumo de Energia

Conforme apresentado pela Figura 8, a estratégia FloodToSink gastou mais energia e entregou menos mensagens que as demais na maioria dos experimentos. Especificamente, no cenário com baixa carga de aplicação, essa estratégia gastou mais energia em todos os movimentos. Ela transmite mais mensagens que as outras na rede, logo também aumenta o custo energético dos dispositivos da rede. No cenário com alta carga de aplicação, a estratégia APAP-TA tem menor consumo de energia para todos os movimentos do corpo. Isso porque ela transmite mensagens apenas para os dispositivos que possuem canal de comunicação com menor perda de mensagens, assim, reduz a quantidade de mensagens retransmitidas. Nos cenários com carga típica de aplicação, a estratégia APAP-TA consome menos energia nos movimentos andando e correndo. Em geral, a estratégia APAP-TA consumiu menos energia por bit entregue que as demais.

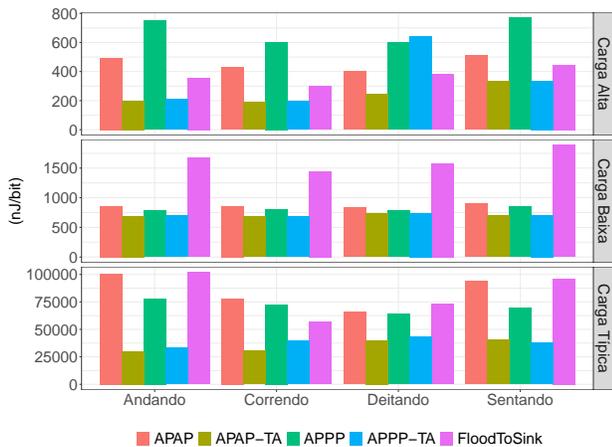


Figura 8: Consumo de energia da WBAN

A partir dos experimentos, é possível concluir que, na maioria dos casos, escolher uma topologia lógica adequada ao movimento do corpo e as interferências pode colaborar para melhoria da eficiência energética da rede.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mobilidade do corpo e interferência são elementos que comprometem a comunicação em WBANs. Todavia, para obter eficiência e confiabilidade nas WBANs, estratégias de comunicação *broadcast*, *multicast* e *convergecast*, baseadas em múltiplos saltos, têm sido avaliadas. Um problema básico de pesquisa, tratado no presente artigo, é investigar a eficiência dessas estratégias em cenários com interferência na comunicação, diferentes situações de mobilidade do corpo e de cargas de aplicação. Para tanto, foram implementadas as estratégias de comunicação FloodToSink (*broadcast*), APAP (*multicast*), APAP-TA (*multicast*), APPP (*convergecast*) e APPP-TA (*convergecast*) no simulador Castalia/OMNeT++. As estratégias APAP e APPP utilizaram uma topologia pré-definida enquanto que as estratégias APAP-TA e APPP-TA utilizaram topologias adaptadas ao movimento do corpo e a carga da aplicação. A simulação foi realizada utilizando os movimentos: andando, correndo, deitando e sentando.

A avaliação investigou a eficiência da WBAN, considerando perda de mensagens, latência e consumo de energia das estratégias de comunicação implementadas utilizando topologias fixa e adaptadas. Os resultados demonstraram que as estratégias que utilizaram topologias da WBAN adequadas ao movimento do corpo e a carga de dados reduziram a perda de mensagens, garantiram menor latência na entrega das mensagens e aumentaram a eficiência energética da rede nos cenários avaliados.

As topologias estudadas são estáticas e designadas offline para cada tipo de movimento. Dessa forma, conforme apresentado nos resultados, adaptar a topologia de forma dinâmica pode melhorar a eficiência da rede, principalmente nos diferentes movimentos realizados pelas pessoas durante suas atividades de rotina.

Apesar dos resultados, tráfegos de emergência, oriundos de condições fisiológicas específicas, não foram avaliados. O mesmo vale para estratégias de controle de topologia, nas quais os transceptores dos dispositivos utilizam diferentes potências de transmissão dependendo do cenário – implicando em topologias físicas similares as topologias lógicas adotadas nas estratégias de comunicação.

Além disso, nos cenários descritos, foi utilizado o protocolo CSMA/CA na subcamada MAC. No entanto, o IEEE 802.15.6, considerado padrão de fato em WBANs, sugere a utilização de protocolos híbridos como a junção do CSMA/CA com abordagens de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA) – aspecto esse que não está no escopo deste trabalho e que também não foi explorado de forma adequada na literatura.

Além dos desafios em abertos apresentados acima, outro trabalho futuro é a investigação da adaptação dinâmica da topologia da WBAN através de um protocolo de controle de topologia, observando mobilidade do corpo, interferência e diferentes cenários de carga.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, “A survey on wireless body area networks,” *Wireless Networks*, vol. 17, no. 1, pp. 1–18, jan 2011.
- [2] B. Abidi, A. Jilbab, and E. H. Mohamed, “Wireless body area networks: a comprehensive survey,” *Journal of Medical Engineering and Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 97–107, apr 2020.
- [3] M. Salayma, A. Al-Dubai, I. Romdhani, and Y. Nasser, “Wireless Body Area Network (WBAN) A Survey on Reliability, Fault Tolerance, and Technologies Coexistence,” *ACM Computing Surveys*, vol. 50, no. 1, pp. 1–38, jan 2018.
- [4] K. Hasan, K. Biswas, K. Ahmed, N. S. Nafi, and M. S. Islam, “A comprehensive review of wireless body area network,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 143, no. July, pp. 178–198, oct 2019.
- [5] S. Movassaghi, M. Abolhasan, and J. Lipman, “A Review of Routing Protocols in Wireless Body Area Networks,” *Journal of Networks*, vol. 8, no. 3, pp. 559–575, mar 2013.
- [6] W. Badreddine, C. Chaudet, F. Petrucci, and M. Potop-Butucaru, “Broadcast Strategies in Wireless Body Area Networks,” in *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, NY, USA: ACM, nov 2015, pp. 83–90.
- [7] W. Badreddine, N. Khernane, M. Potop-Butucaru, and C. Chaudet, “Convergecast in Wireless Body Area Networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 66, pp. 40–51, nov 2017.
- [8] G. Bu and M. Potop-Butucaru, “FIFO Order reliable convergecast in WBAN,” *Computer Networks*, vol. 146, pp. 200–216, dec 2018.
- [9] F. Ullah, M. Zahid Khan, M. Faisal, H. U. Rehman, S. Abbas, and F. S. Mubarek, “An Energy Efficient and Reliable Routing Scheme to enhance the stability period in Wireless Body Area Networks,” *Computer Communications*, vol. 165, no. July 2020, pp. 20–32, jan 2021.
- [10] E. Selem, M. Fatehy, and S. M. A. El-Kader, “mobTHE (Mobile Temperature Heterogeneity Energy) Aware Routing Protocol for WBAN IoT Health Application,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18 692–18 705, 2021.
- [11] A. Boulis, “Castalia: A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks,” NICTA, Tech. Rep. 408, 2013.

- [12] J.-i. Naganawa, K. Wangchuk, M. Kim, T. Aoyagi, and J.-i. Takada, "Simulation-Based Scenario-Specific Channel Modeling for WBAN Cooperative Transmission Schemes," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 19, no. 2, pp. 559–570, mar 2015.
- [13] E. Caballero, V. Ferreira, R. A. Lima, J. C. H. Soto, D. Muchaluat-Saade, and C. Albuquerque, "BNS: A Framework for Wireless Body Area Network Realistic Simulations," *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5504, aug 2021.
- [14] A. Varga and R. Hornig, "An overview of the omnet++ simulation environment," in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, 2008, pp. 1–10.
- [15] D. Pediaditakis, 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*. ICST, 2010.
- [16] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetheral, *Computer Networks*, 5th ed. Boston: Edward Elgar Publishing, 2011.