

THETA: Protocolo TDMA adaptativo para lidar com tráfego heterogêneo e dinâmico em WBAN

Jorge F. Herculano*, Luís O. S. Andrade*, Willians de P. Pereira* e Alirio S. de Sá*

*Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD), Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM)

Instituto de Computação (IC) e Escola Politécnica (EP), Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Abstract—Medium Access Control (MAC) sublayer solutions based on Adaptive Time Division Multiple Access (TDMA) have been proposed to satisfy temporal constraints and improve the reliability and efficiency of Wireless Body Area Networks (WBAN) subject to unexpected communication conditions, such as dynamic message traffic and communication interferences. However, many of these solutions do not efficiently use communication channels, allocating time slots to devices that do not have data to transmit. It can be a problem because wasting time slots reduce the ability of the WBAN to recover from message loss under unexpected communication conditions. This paper introduces the THETA, an adaptive TDMA policy for WBANs that meet time constraints and enhance the reliability and efficiency of WBANs under unexpected communication conditions, observing a better usage of the communication channels. To improve message delivery and not compromise temporal constraints, our approach allocates unused time slots from devices with low bandwidth demands to devices with high transmission demands. Compared to IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.6, and other adaptive approaches, it was observed that the proposed approach has higher reliability, reducing message loss and maintaining low power consumption and low latency in the evaluated scenarios.

Index Terms—WBAN, MAC, TDMA

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de dispositivos com baixo consumo de energia e facilidades de comunicação sem fio motivou o surgimento de Redes de Área Corporal sem Fio (WBAN, *Wireless Body Area Networks*) [1]. Nessas redes, os dispositivos eletrônicos, vestíveis, fixados ou implantados ao corpo transmitem dados fisiológicos (e.g., temperatura corporal, batimentos cardíacos, oxigenação sanguínea, etc.) e contextuais (e.g., localização, velocidade, postura corporal, etc.) de um indivíduo [2], [3]. Utilizando transmissão sem fio, as WBANs oportunizam maior mobilidade física do corpo, reduzindo custos de interconexão. Quando integradas a redes de longa distância, podem melhorar a qualidade e ampliar o alcance dos sistemas para cuidados da saúde, permitindo que profissionais da saúde monitorem remotamente as condições clínicas e iniciem o tratamento de um paciente [1], [4].

A natureza heterogênea dos dispositivos das WBANs e a regularidade nas transmissões variam de acordo com os parâmetros fisiológicos ou contextuais que esses dispositivos manipulam [2], [5]. Para não comprometer a mobilidade, o

poder computacional e a autonomia de energia são limitados em função do tamanho reduzido dos dispositivos. Para evitar queimaduras ou alterações na fisiologia do corpo, os dispositivos operam de forma limitada e transmitem sinais de radiofrequência em baixa potência e com curto alcance [1]. Esses fatores restringem as estratégias de comunicação entre os dispositivos, principalmente em aplicações com requisitos temporais e de confiabilidade mais restritos [6]. Assim, gerir eficientemente o acesso ao canal de comunicação sem comprometer o tempo de transmissão e de vida da rede, em cenários com interferências e tráfego de dados dinâmico, torna um desafio a construção de protocolos de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*) [7].

Com o objetivo de padronizar a comunicação de dados via radiofrequência de curto alcance, foram publicadas as especificações IEEE 802.15.4 [8] e IEEE 802.15.6 [9], que embasaram muitos protocolos MAC encontrados na literatura. Dentre esses protocolos, muitos utilizam políticas de acesso ao meio de comunicação baseadas em TDMA [10]. Nessa política, a cada intervalo de tempo (rodada de TDMA), as transmissões dos dispositivos são escalonadas em *slots* (fatias de tempo), obedecendo uma ordem preestabelecida. Este tipo de política é muito utilizada por evitar colisões, pois cada dispositivo possui *slots* dedicados para transmissão de suas mensagens. Uma limitação do TDMA é o número de *slots* disponíveis para alocação. O IEEE 802.15.4, por exemplo, possui apenas 16 *slots*, sendo o primeiro utilizado para envio do *beacon*¹ e o restante disponível para alocação. O 802.15.6, apesar de oferecer mais *slots* para alocação (até 255), exige alocação de um número mínimo de *slots* para acesso ao meio baseada em contenção [9], o que pode causar colisões, além de aumentar a latência na transmissão das mensagens, podendo comprometer restrições temporais e a confiabilidade da rede.

Sendo assim, evitar os desperdícios de recursos (*slots*) e diminuir o impacto no atraso da entrega de mensagens – além de garantir eficiência energética, pouca interferência, baixa perda de mensagens de controle, entre outros – são requisitos explorados nas políticas de acesso ao meio baseadas em TDMA, porém, ainda não tratados de forma satisfatória [5]. Para atender aos requisitos supracitados, neste trabalho é proposto o THETA (*TDMA for Heterogeneous and Dynamic*

Corresponding author: (jorge.herculano, luisandrade, willians.paula, aliriosa)@ufba.br.

¹Um *beacon* é uma mensagem de controle com informações de gerenciamento e de sincronização entre os dispositivos [9]

Traffic with Adaptive Time Slot Allocation), uma extensão do DSBS-HT (*Dynamic Scheduling Based on Sleeping Slots for Heterogeneous Traffic*) [2], capaz de melhorar a eficiência do tráfego com menor impacto no atraso para entrega das mensagens. No THeTA, os *slots* não utilizados por dispositivos com baixa taxa de transmissão são alocados para dispositivos que demandam mais *slots* para transmitir suas mensagens, seja porque transmitem em alta frequência, seja porque foram penalizados por interferências no canal de comunicação.

Para avaliação de desempenho, a abordagem proposta neste trabalho foi comparada com o DSBS-HT [2] e DSBS (*Dynamic Scheduling Based on Sleeping Slots*) [11], duas abordagens adaptativas, e com implementações do IEEE 802.15.4 [8] e do IEEE 802.15.6 [9]. Os experimentos consideraram diferentes dispositivos com taxas de transmissão heterogêneas, cenários com interferência e com número e tamanho variados de *slots*. O desempenho dos protocolos é avaliado em termos do percentual de perda de mensagens, da latência e do consumo de energia das transmissões. Os resultados mostram que, nos cenários avaliados, o protocolo proposto possui desempenho superior aos demais, com uso mais eficiente do canal de comunicação, menores taxas de perdas de mensagens, menores latências e consumo de energia similar ao DSBS-HT.

Nas demais seções deste artigo são apresentados: trabalhos relacionados (Seção II); o protocolo proposto (Seção III); as simulações e os resultados (Seção IV); e as considerações finais, incluindo conclusões e trabalhos futuros (Seção V).

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Para obter eficiência energética, lidar com falhas de comunicação e diferentes requisitos de tráfego em WBANs, diversos protocolos MAC têm sido propostos desde o surgimento das especificações IEEE 802.15.4 [8] e IEEE 802.15.6 [9]. Muitos protocolos, principalmente os que se baseiam nessas especificações, optam por utilizar políticas de acesso ao meio livres de contenção, pois fornecem mecanismos para redução do consumo de energia, evitando colisões ao atribuir *slots* de tempo ou de frequência dedicados aos dispositivos [5].

Em WBANs baseadas em TDMA, uma das políticas livre de contenção mais utilizadas, geralmente, um dispositivo coordenador, dentre outras funções, envia periodicamente *beacons* (ou outras mensagens de controle) para manter os dispositivos sincronizados e fornecer informações de gerenciamento [9] – e.g., o número de *slots* e ordem de transmissão de cada dispositivo. Apesar da previsibilidade temporal trazida pelas rodadas de TDMA, quando interferências oriundas de outras redes sem fio e restrições de energia precisam ser consideradas, as abordagens tradicionais de TDMA não acomodam adequadamente o tráfego heterogêneo, por conta da pouca flexibilidade da alocação estática de *slots*. Assim, várias soluções têm sido propostas para conferir ao TDMA maior flexibilidade.

Algumas abordagens MAC baseadas em TDMA utilizam múltiplos canais de comunicação ou rádios transceptores secundários (rádios *wake-up*) nos dispositivos da WBAN, de forma a escalonar *slots* adaptativamente, como pode ser encontrado em [12], [13]. Esses transceptores recebem *beacons*,

signalizando que os dispositivos devem ligar o transceptor principal para receber as mensagens contendo o escalonamento dos *slots*. Com isso, menos mensagens de controle trafegam na rede, reduzindo o consumo de energia. Todavia, adicionar transceptores secundários ou antenas que utilizam múltiplos canais pode aumentar a complexidade dos dispositivos e é inviável quando há limitações de espaço físico ou dispositivos implantados. Por isso, diferente dessas abordagens, o THeTA não utiliza de transceptores adicionais.

Outras abordagens de MAC em WBAN propõem TDMA adaptativo considerando as condições do canal de comunicação e o consumo de energia.

Em [14] é proposta uma abordagem adaptativa em duas etapas de alocação de *slots* baseada no 802.15.6. Na primeira etapa, após o coordenador distribuir *slots* para todos os dispositivos, o mesmo mantém um registro do recebimento das mensagens. Na segunda etapa, o coordenador aloca *slots* extras para os dispositivos que enviaram um número maior de mensagens na etapa anterior. Similar a essa abordagem, em [15], os *slots* também são alocados considerando o recebimento de mensagens. Ao receber mensagens de um dispositivo, o coordenador registra que o estado do canal para aquele dispositivo é “bom”, e quando não recebe mensagens, registra que o estado do canal é “ruim”. Sendo assim, na próxima rodada de TDMA, *slots* extras são alocados para os dispositivos com o estado do canal registrado como ruim. No entanto, ambas abordagens não consideram o impacto dos dispositivos com baixa taxa de transmissão. Em [14], pelas interferências no canal, esses dispositivos podem armazenar muitas mensagens no *buffer*, e quando enviar pode ser interpretado como um dispositivo com alta taxa de transmissão. E no [15], pode interpretar que a ausência de mensagens como falhas de transmissão, e mais *slots* extras serem disponibilizados para esses dispositivos, podendo gerar desperdícios de *slots*.

As abordagens em [16] e [17] propõem TDMA adaptativo considerando o tráfego heterogêneo dos dispositivos. Em [16] é proposto uma estrutura de superquadro², baseado no 802.15.4, em que, além do período utilizando TDMA, usa também uma janela de tempo na qual os dispositivos acessam o meio a partir de acesso múltiplo com detecção de portadora e prevenção de colisão (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* [10]) para atender o tráfego heterogêneo. Nessa abordagem, o número de *slots* no superquadro pode ser aumentado quando houver variação no tráfego. No entanto, o CSMA-CA não é adequado para lidar com interferências, já que é susceptível a colisões. Além disso, aumentar o número de *slots* pode acarretar maior latência e consumo de energia na rede. Em [17], além de utilizar um TDMA adaptativo baseado no tráfego heterogêneo, é proposto um mecanismo adicional de sincronização baseado em mensagens de confirmação (ACK) para diminuir o tráfego de *beacons* na rede. Contudo, por não considerar as condições do canal ao realizar o escalonamento das transmissões, pode aumentar a taxa de perdas de mensagens por efeito das

²Um superquadro é o período de tempo compreendido entre dois *beacons*.

interferências. Em [18] é proposto um protocolo baseado no IEEE 802.15.6 que, além de lidar com o tráfego periódico e de emergência, adiciona um tratamento para o tráfego dinâmico. Ao identificar uma variação do tráfego das mensagens (i.e. aumento ou diminuição das taxas de transmissão), o coordenador da rede ajusta a estrutura do superquadro para atender a essas novas demandas. Todavia, essa abordagem reserva sempre um período no superquadro para ser utilizado com uma estratégia baseada em contenção, ou seja, nesse período os dispositivos competem entre si pelo acesso ao canal de comunicação, podendo gerar colisões e perdas de mensagens.

O DSBS, proposto em [11], também utiliza TDMA adaptativo e lida de forma adequada com o desvanecimento do canal e interferências. Nessa abordagem, os dispositivos desativam o seu transceptor e dormem quando não recebem confirmações de que as mensagens enviadas ao coordenador foram recebidas, economizando energia em cenários com interferências no canal. Quando as condições do canal são reestabelecidas, dispositivos recebem *slots* extras proporcionais ao período no qual estiveram dormindo por conta de interferências. Por não considerar a heterogeneidade do tráfego na alocação dos *slots*, esse protocolo incide em maior atraso, perda de mensagens e consumo de energia em cenários com tráfego heterogêneo.

Portanto, as abordagens acima não lidam eficientemente com interferências e tráfego heterogêneo enquanto garantem baixo consumo de energia.

O DSBS-HT, proposto em [2], herda as facilidades do DSBS e permite lidar com tráfego heterogêneo. Para isso, aloca *slots* considerando também as demandas de banda de transmissão de cada dispositivo. No entanto, o DSBS-HT apresenta duas limitações: a pouca escalabilidade apresentada pelo protocolo, o qual requer um número de dispositivos menor ou igual ao número de *slots* disponíveis; e o desperdício de recursos, pois em cada rodada de TDMA, todos os dispositivos têm alocado pelo menos um *slot*, mesmo quando não há mensagens para transmitir, possibilitando a perda de mensagens em cenários em que o número de *slots* não é suficiente para atender a todos os dispositivos, sobretudo aqueles que possuem taxas de transmissão mais altas.

O THeTA, é uma extensão do DSBS-HT, na qual o número de dispositivos pode ser menor ou igual ao número de *slots*. Esta estratégia consiste na alocação dos *slots*, que não serão utilizados pelos dispositivos com baixa taxas de transmissão, para os demais dispositivos na rede. Com isso, o THeTA escala melhor e faz um uso mais eficiente do canal de comunicação.

III. THETA

Para facilitar o entendimento, a Seção III-A descreve brevemente o funcionamento do protocolo base DSBS-HT e, em seguida, a Seção III-B descreve a abordagem de escalonamento de *slots* proposta para o THeTA.

A. O Protocolo TDMA Básico: DSBS-HT

O DSBS-HT [2] se diferencia do DSBS [11] original pela forma como a qual o coordenador calcula o quantitativo de *slots* a ser atribuído para cada dispositivo. No início de cada

rodada TDMA, o coordenador gera uma lista onde indica um número mínimo e igual de *slots* para cada dispositivo. Na sequência, essa lista é ordenada de forma decrescente: primeiro de acordo com o número de mensagens residentes nos *buffers* de transmissão de cada dispositivo; e segundo pelas taxas de transmissão dos dispositivos. Seguindo a ordem de sua lista, o coordenador distribui *slots* extras para cada dispositivo, considerando a contribuição do dispositivo no total de tráfego.

Cada mensagem transmitida por um dispositivo carrega consigo a quantidade de mensagens remanescentes em seu *buffer* de transmissão, permitindo que o coordenador obtenha e utilize essa informação na próxima rodada de TDMA.

B. A Proposta de Escalonamento Adaptativo de Slots

O THeTA difere do DSBS-HT apenas quando o total de *slots* disponíveis (N_s) é inferior ao total de dispositivos (N_d) da WBAN. Se $N_s \geq N_d$, a estratégia utilizada é a do DSBS-HT. Caso contrário (i.e., $N_s < N_d$), o coordenador racionaliza o uso de *slots* e dispositivos com baixas taxas de transmissão podem ficar bloqueados uma ou mais rodadas de TDMA (superquadros), antes de obterem *slots* para transmitir suas mensagens. O coordenador calcula o período máximo de bloqueio (B_i) de cada dispositivo (D_i) usando: $B_i \leftarrow \lceil 1/(Tx_i \cdot framesize) \rceil$, em que Tx_i representa a taxa de transmissão em pacotes por segundo de um dispositivo D_i e $framesize$ representa o tamanho em segundos de um superquadro. Para cada dispositivo D_i , o coordenador mantém mais duas variáveis $blocks_i$ e $blocked_i$, representando quantas rodadas o dispositivo ainda deve aguardar antes de receber *slots* e o estado do dispositivo (bloqueado ou não). Inicialmente, $blocks_i \leftarrow B_i$ e $blocked_i \leftarrow false$.

Antes de enviar um *beacon* no início da rodada de TDMA, o coordenador verifica se $blocks_i > 1$ e se o número de mensagens no *buffer* do dispositivo é igual a zero. Se verdadeiro, o dispositivo é bloqueado ($blocked_i \leftarrow true$), o intervalo de bloqueio é decrementado ($blocks_i \leftarrow blocks_i - 1$) e o dispositivo não receberá *slots* na rodada de TDMA. Caso falso, o intervalo de bloqueio é reinicializado ($blocks_i \leftarrow B_i$), o dispositivo é desbloqueado ($blocked_i \leftarrow false$) e receberá *slots* na rodada de TDMA.

Na sequência, uma lista é criada para adicionar os dispositivos que não estão bloqueados ($D_{unblocked}$) para receber *slots* na rodada de TDMA. Em seguida, os dispositivos desta lista são ordenados de forma decrescente de acordo com o número de mensagens em seus *buffers* de transmissão, seguidos daqueles com maiores taxas de transmissão. Diferentemente do DSBS-HT, o coordenador garante um número mínimo (S_{min}) de *slots* apenas para os dispositivos na lista $D_{unblocked}$.

De posse dessa lista ordenada, o coordenador atribui $S_i = S_{min} + E_i$ *slots* a cada dispositivo D_i não bloqueado, em que E_i representa o quantitativo de *slots* extras a ser alocado para D_i . A cada atribuição, E_i é subtraída do total de *slots* extras disponíveis (E_d). Após essa primeira rodada de atribuições, caso haja *slots* extras disponíveis ($E_d > 0$), o coordenador atribui mais um *slot* ($S_i = S_i + 1$) para cada dispositivo, seguindo a ordem estabelecida anteriormente até que E_d seja

igual a 0 (zero). Ao final do algoritmo, o coordenador envia um *beacon* contendo a ordem e o número de *slots* de cada dispositivo. Se o dispositivo não receber o *beacon*, ele dormirá, aguardando a próxima rodada de TDMA.

A quantidade de *slots* extras E_i atribuída a um dispositivo depende do total de E_d e é proporcional à contribuição dos dispositivos não bloqueados no total de tráfego, i.e. $E_i = \left\lfloor \frac{T_{x_i}}{T_{x_{parcial}}} \cdot E_d \right\rfloor$, em que T_{x_i} e $T_{x_{parcial}}$ representam, respectivamente, a taxa de transmissão de um dispositivo D_i e o somatório das taxas de transmissão dos dispositivos que não estão bloqueados para receber *slots* na rodada de TDMA. Diferente do DSBS-HT, que considerava o somatório das taxas de transmissão de todos os dispositivos da WBAN.

O total de *slots* extras disponível E_d são os *slots* remanescentes, após S_{min} ter sido distribuída para cada dispositivo não bloqueado: $E_d = N_s - S_{min} \cdot N_{unblocked}$, em que N_s e $N_{unblocked}$ representam, respectivamente, o total de *slots* disponíveis para serem distribuídos aos dispositivos e o total de dispositivos não bloqueados na rodada de TDMA.

Para a definição da quantidade mínima de *slots* (S_{min}) a ser atribuída para cada dispositivo, considera-se a seguinte regra: se a quantidade total de *slots* disponíveis N_s for pelo menos três vezes o número total de dispositivos não bloqueado $N_{unblocked}$ (isto é, $N_s \geq 3 \cdot N_{unblocked}$), então cada dispositivo receberá no mínimo dois *slots* ($S_{min} = 2$); caso contrário, cada dispositivo receberá ao menos um *slot* ($S_{min} = 1$).

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As simulações foram executadas no Castalia/OMNET++ [19]. O THeTA foi comparado com o DSBS-HT, DSBS, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6, usando as seguintes métricas: confiabilidade, eficiência energética e eficiência no tráfego de mensagens. Os experimentos consideraram uma WBAN com topologia estrela, operando durante um período simulado de 500 segundos. A camada física possui taxa de transferência de 1024 *Kbps*. O tráfego simulado adota modelo *CBR* (*Constant Bits Rate*). As interferências nos canais de comunicação foram simuladas usando o modelo SINR (*Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*), que considera os efeitos combinados de fontes diversas de interferência – ver [20] para mais detalhes.

Para avaliar WBANs com quantidades diferentes de dispositivos e padrões de carga de aplicação, foram realizadas simulações com número de dispositivos variando entre 6 e 21 e com carga de aplicação variando de 75 a 1050 pacotes por segundo (*p/s*) – ver Tabelas I e II. Nos experimentos, os dispositivos da WBAN são nomeados de D_0 a D_{21} , em que D_0 sempre representa o coordenador, e as taxas de transmissão de cada dispositivo variam de 5 a 100 *p/s*, sendo que a taxa do dispositivo D_1 é 5 *p/s*, a taxa do dispositivo D_2 é 10 *p/s* e assim sucessivamente (ver Tabela I). Foram simulados um total de 16 cenários, nomeados de C_1 a C_{16} , em que o cenário C_1 contém 6 dispositivos (D_0 a D_5), o cenário C_2 contém 7 dispositivos (D_0 a D_6) e assim por diante (ver Tabela II). O total de carga de aplicação varia por cenário (ver Tabela II).

Os protocolos foram avaliados em relação às métricas considerando *slots* de transmissão de 1.875 e 3.75 ms, sendo valores

com os quais o DSBS obteve o melhor desempenho [11]. A quantidade de *slots* para escalonamento também foi variada, utilizando 15 *slots* seguindo o padrão do IEEE 802.15.4 e 30 *slots* seguindo o padrão do IEEE 802.15.6. Para os protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6, o número de *slots* alocado para cada dispositivo é configurado pelos parâmetros *GTS* (*Guaranteed Time slot*) e *SAL* (*Scheduled Access Length*), respectivamente. *GTS* e *SAL* são configurados com valores 2 e 5 para os experimentos com 15 e 30 *slots*, respectivamente.

Cada experimento foi replicado 10 vezes para avaliação de variabilidade dos resultados experimentais.

A. Confiabilidade

A confiabilidade foi medida considerando a taxa de perda de mensagens em cada cenário. Conforme é apresentado na Figura 1, as taxas de perdas de mensagens tanto no DSBS-HT quanto THeTA foram menores em relação aos demais protocolos para todos os cenários avaliados. Isto se deve ao fato do DSBS-HT e do THeTA fornecerem *slots* extras de forma adaptativa, considerando a heterogeneidade dos dispositivos, o que não ocorre nos demais protocolos estudados. Ao distribuir *slots* extras aos dispositivos com maiores taxas, estes acessam o canal de comunicação com maior frequência e tempo, diminuindo a perda de mensagens.

Além disso, quando o número de dispositivos é aumentado na rede, as taxas de perda são ainda menores do que o IEEE 802.15.6 e o DSBS, pois estes últimos não consideram as demandas de tráfegos dos dispositivos na distribuição de *slots*. Importante ressaltar que o DSBS falha quando o número de *slots* passa a ser menor do que o número de dispositivos na rede. Isso se deve ao fato do protocolo atribuir pelo menos um *slot* para cada dispositivo, ultrapassando o número de *slots* disponíveis, fazendo com que o protocolo tenha seu funcionamento interrompido.

Ainda, no DSBS-HT sempre se considera o número de *slots* igual ou maior ao número de dispositivos, apesar de não haver interrupção, como ocorre com o DSBS nesses cenários. Conforme a Figura 1, nos cenários em que há 15 *slots* e o número de dispositivos maior ou igual a 16, o THeTA possui desempenho melhor do que o DSBS-HT. Isso porque quando há mais dispositivos que *slots*, o coordenador no DSBS-HT poderá nunca alocar *slots* para um ou mais dispositivos com baixa taxa de transmissão de mensagens.

B. Eficiência Energética

A eficiência energética aqui é medida pelo consumo de energia da rede (em *Joules*). No IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6, os dispositivos mantêm ligados seus transceptores durante suas sessões ativas. No DSBS, DSBS-HT e THeTA, quando um dispositivo não recebe um ACK em resposta a uma mensagem, o transceptor do dispositivo é desativado na restante dos *slots* disponíveis, economizando energia.

Na Figura 2, observa-se que tanto no DSBS-HT, quanto no THeTA há maior equilíbrio no consumo de energia. Isto porque, mesmo diminuindo as taxas de perdas de mensagens e consequentemente aumentando o percentual de mensagens

Tabela I: Taxas de transmissão de cada dispositivo (p/s)

D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}
Coordenador	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Tabela II: Carga de aplicação em cada cenário

Cenário	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
Número de dispositivos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Carga total em cada cenário (p/s)	75	105	140	180	225	275	330	390	455	525	600	680	765	855	950	1050

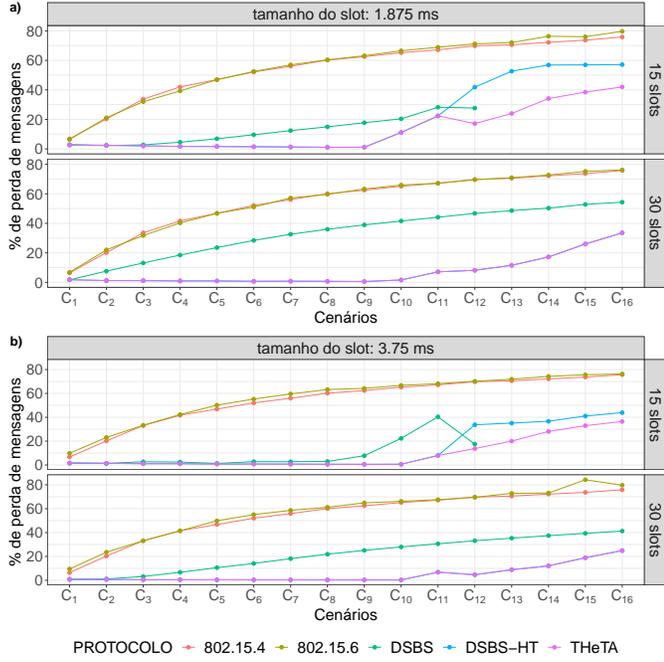


Figura 1: Taxa de perda de mensagens: a) tamanho de *slots* de 1.875 ms; e b) tamanho de *slots* de 3.75 ms

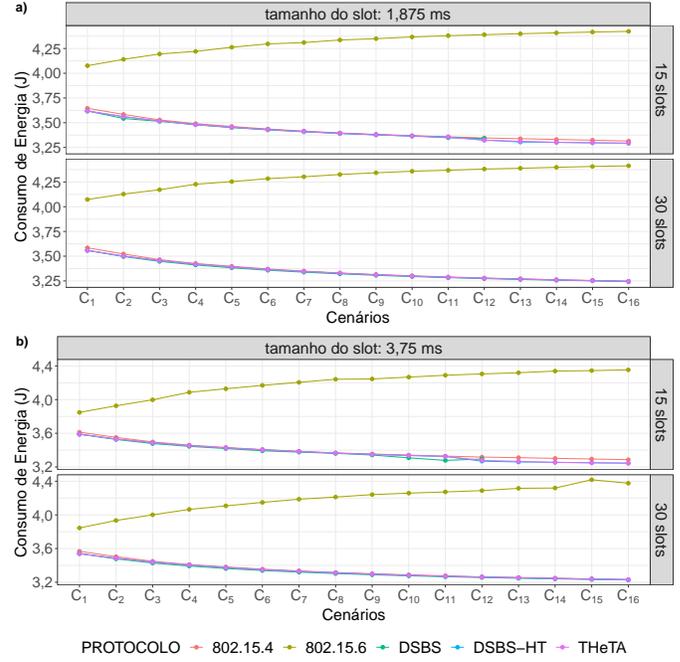


Figura 2: Consumo de energia: a) tamanho de *slots* de 1.875 ms; e b) tamanho de *slots* de 3.75 ms

entregues, em todos os cenários o consumo de energia não foi aumentado, quando comparado com os demais protocolos.

C. Eficiência no Tráfego de Mensagens

Para avaliação da eficiência no tráfego de mensagens foi observado o atraso na entrega de mensagens. Em um cenário com 6 dispositivos, o DSBS juntamente com o IEEE 802.15.6 apresentam pior desempenho quando comparados com o DSBS-HT e o THeTA, pois entregam menos mensagens (Figura 1) e apresentam um maior percentual de entrega de mensagens acima de 250 ms (Figura 3). No IEEE 802.15.6, na fase de acesso com contenção, os dispositivos disputam pelo canal de comunicação, o que pode acarretar colisões e exigir retransmissões, impactando no atraso das mensagens. No DSBS, devido ao fato de o coordenador sempre interpretar a ausência de mensagens como falhas de comunicação, *slots* extras são destinados com frequência para os dispositivos com menores taxas de transmissão, deixando os demais dispositivos com menos *slots* para enviar as mensagens.

Quando há um aumento no número de dispositivos na rede, apesar do THeTA possuir maior latência na entrega de mensagens em comparação aos demais protocolos (Figura 4), ele

consegue entregar mais mensagens (Figura 1), com o mesmo custo de energia (Figura 2). Em relação ao DSBS, pode-se observar que ao adicionar mais dispositivos com alta taxa de transmissão de dados, os *slots* para estes dispositivos são limitados, pois os dispositivos com baixa taxa de transmissão são priorizados nesse algoritmo. No IEEE 802.15.6 e no IEEE 802.15.4, o número de *slots* é igual para todos os dispositivos, isso faz com que haja pouca flexibilidade na alocação dos *slots*, demandando maior tempo de espera para os dispositivos com alta taxa de transmissão acessarem ao canal para envio de suas mensagens, aumentando as taxas de perdas.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentado o THeTA, um protocolo MAC livre de contenção que utiliza TDMA adaptativo para atribuir *slots* com base na demanda heterogênea de tráfego dos dispositivos e interferências no canal de comunicação, aumentando a confiabilidade e eficiência da WBAN.

O protocolo proposto foi comparado com as especificações MAC IEEE 802.15.4 e 802.15.6 e com o DSBS e o DSBS-HT, utilizando o simulador Castalia/OMNET++. Os resultados apontaram que realizar o escalonamento de *slots* de acordo

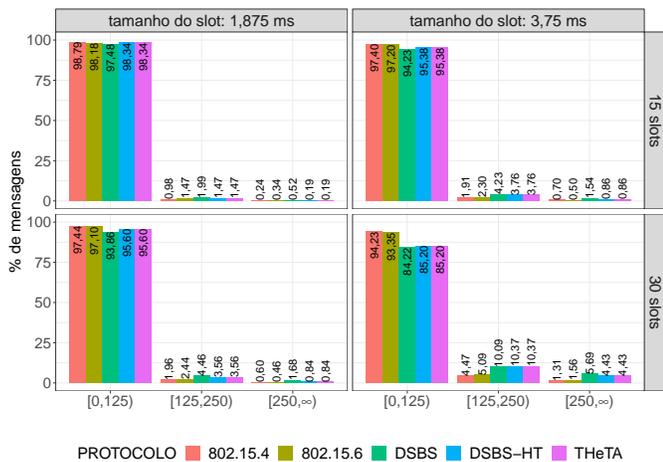


Figura 3: Atraso em WBAN no Cenário C_1 (6 dispositivos)

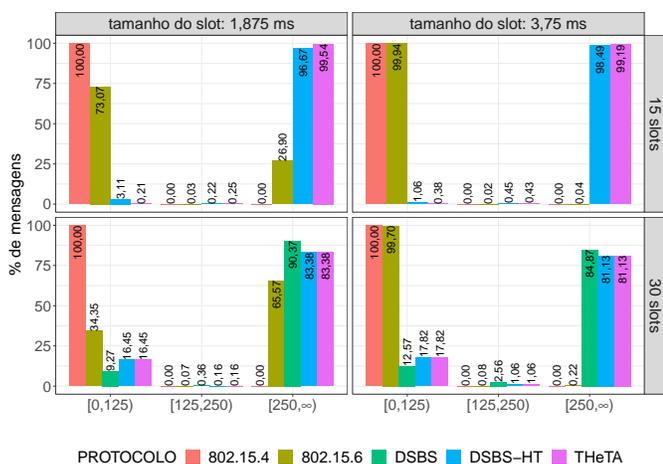


Figura 4: Atraso em WBAN no Cenário C_{16} (21 dispositivos)

com as demandas de tráfego de cada dispositivo e com a interferência, reduz significativamente a perda de mensagens, enquanto que garante baixa latência e baixo consumo de energia. Além disso, os resultados mostraram que, nos cenários avaliados, o THETA é capaz de fazer uso mais eficiente do canal de comunicação, uma vez que consegue entregar mais mensagens que os demais protocolos, mesmo quando o número de slots é menor que o número de dispositivos – isto é, em alguns cenários, é possível introduzir mais dispositivos na rede sem que seja necessário aumentar a duração da rodada de TDMA ou alterar o tamanho dos slots de tempo.

Alguns desafios ainda precisam ser investigados, pois, apesar da proposta abordar a heterogeneidade dos dispositivos, a variação do tráfego em situações de emergências não foi estudada. Alguns cenários, como os de mobilidade e mudanças de posturas, não foram diretamente abordados no THETA. Em trabalhos futuros serão explorados o tráfego de emergência, cenários de mobilidade e mudança de posturas do corpo.

VI. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e Coordenação

de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless Body Area Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, 2014.
- [2] J. F. Herculano, W. d. P. Pereira, and A. S. de Sa, "An Adaptive TDMA Approach for Improving Reliability and Performance in WBAN under Heterogeneous Traffic and Interference," in *2022 XII Brazilian Symp. on Comp. Systems Engineering (SBESC)*. IEEE, 11 2022, pp. 1–8.
- [3] V. Ferreira, E. Caballero, R. Lima, H. Balbi, F. Seixas, C. Albuquerque, and D. Muchalut-Saade, "Redes Corporais Sem Fio e Suas Aplicações em Saúde," in *Jornadas de Atual. em Informática*, 2018, pp. 149–198.
- [4] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti, and R. Verdone, "A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1635–1657, 2014.
- [5] J. F. Herculano, W. d. P. Pereira, M. A. Guimaraes, R. M. Cotrim, A. S. d. Sá, F. Assis, R. J. d. A. Macêdo, and S. Gorender, "Redes Corporais Sem Fio: Abordagens de MAC para Garantia de Eficiência e Confiabilidade na Comunicação sob Tráfego Dinâmico," in *Anais Estendidos do XI Simp. Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC Estendido 2021)*. SBC, 11 2021, pp. 92–97.
- [6] S. Ullah, B. Shen, S. M. Riazul Islam, P. Khan, S. Saleem, and K. S. Kwak, "A study of MAC protocols for WBANs," *Sensors*, vol. 10, no. 1, pp. 128–145, 2010.
- [7] F. Ullah, A. H. Abdullah, O. Kaiwartya, S. Kumar, and M. M. Arshad, "Medium Access Control (MAC) for Wireless Body Area Network (WBAN): Superframe structure, multiple access technique, taxonomy, and challenges," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 7, no. 1, 2017.
- [8] IEEE, "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," IEEE, Tech. Rep., 2016.
- [9] —, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks," IEEE, Tech. Rep. February, 2012.
- [10] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetheral, *Computer Networks*, 5th ed. Boston: Edward Elgar Publishing, 2011.
- [11] M. Salayma, A. Al-Dubai, I. Romdhani, and Y. Nasser, "Reliability and Energy Efficiency Enhancement for Emergency-Aware Wireless Body Area Networks (WBANs)," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 2, no. 3, pp. 804–816, 9 2018.
- [12] M. Al Ameen, N. Ullah, M. S. Chowdhury, S. M. R. Islam, and K. Kwak, "A power efficient MAC protocol for wireless body area networks," *Eurasip J. on Wireless Communications and Networking*, pp. 1–17, 2012.
- [13] H.-W. Tseng, Y.-B. Wang, and Y. Yang, "An Adaptive Channel Hopping and Dynamic Superframe Selection Scheme With QoS Considerations for Emergency Traffic Transmission in IEEE 802.15.6-Based Wireless Body Area Networks," *IEEE Sensors Journal*, 4 2020.
- [14] M. M. Alam, D. Ben Arbia, and E. Ben Hamida, "Joint throughput and channel aware (TCA) dynamic scheduling algorithm for emerging wearable applications," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, vol. 2016-Sept. IEEE, 4 2016, pp. 1–6.
- [15] B. Liu, Z. Yan, and C. W. Chen, "Medium Access Control for Wireless Body Area Networks with QoS Provisioning and Energy Efficient Design," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 16, pp. 422–434, 2017.
- [16] F. Rismanian Yazdi, M. Hosseinzadeh, and S. Jabbehdari, "DTEC-MAC: Diverse Traffic with Guarantee Energy Consumption for MAC in Wireless Body Area Networks," *Journal of AI and Data Mining*, vol. 9, no. 3, pp. 403–414, 2021.
- [17] Z. Yan and B. Liu, "A context aware MAC protocol for medical Wireless Body Area Network," in *7th Inter. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.* IEEE, 7 2011.
- [18] R. Negra, I. Jemili, and A. Belghith, "Novel MAC protocol for handling correlation and dynamics of medical traffic in WBANs," *Ad Hoc Networks*, 8 2023.
- [19] A. Boulis, "Castalia: A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks," NICTA, Tech. Rep. 408, 2013.
- [20] A. Boulis, D. Smith, D. Miniutti, L. Libman, and Y. Tselishchev, "Challenges in body area networks for healthcare: The MAC," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 100–116, 2012.