

# A Cross-Layer Approach for Wireless Body Area Networks

R. Pozza, A. Bastos, F. Oliveira, and D. da Silva Jr

**Abstract**—Research in wireless body area network (WBAN) has gained interest and has become an emerging health service application because of the potential for its use in continuous monitoring of human well-being. The natural human body movements and environmental interference impose difficulties on WBAN performance, such as operational lifetime and data delivery reliability. This work proposes a cross-layer approach, called CL, based on the IEEE 802.15.4 standard to guarantee quality of service in terms of packet delivery and network lifetime. The proposed protocol is compared to the original standard and results suggest that CL outperforms when interference is the cause of packet delivery failures.

**Index Terms**—Redes Corporais sem Fio, Cross-layer, WBAN, Castalia.

## I. INTRODUÇÃO

RECENTES avanços nas pesquisas em comunicação sem fio, sistemas embarcados, dispositivos computacionais com baixo consumo energético, acoplados a sensores de sinais biomédicos, impulsionaram o desenvolvimento das redes corporais sem fio (WBAN – *Wireless Body Area Networks*) como suporte à mobilidade para aplicações de *e-Health* (*electronic Health*) [1]. Uma WBAN é composta por pequenos dispositivos computacionais denominados nós sensores que coletam dados de sinais vitais de um usuário. Os nós sensores são caracterizados pela heterogeneidade, pois variam em capacidade de processamento, tipo de sinal monitorado, tamanho e transceptor de rádio, e são projetados para serem implantados ou acoplados na pele humana ou em roupas como forma de monitoramento dos sinais fisiológicos e transmissão de dados para outras redes para acompanhamento por profissionais ou centros de saúde distantes geograficamente [2]. Esses dados fornecem informações sobre o estado de um paciente tanto em repouso como durante suas atividades cotidianas.

Devido a importância das informações transmitidas, as WBANS possuem características críticas de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) que as diferenciam de outras redes sem fio, como o tempo de vida da rede (consumo de energia) e a confiabilidade (entrega de pacotes). Por exemplo, nas Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) o total da área monitorada é considerado como um requisito de QoS, mas em WBANs não. A confiabilidade é um requisito importante tanto

para RSSF quanto para WBANs, porém a estratégia adotada para consegui-la é diferente. Nas RSSF, realiza-se análise no roteamento para a entrega dos pacotes devido à alta densidade de nós; nas topologias das WBANs, que em geral têm apenas um salto entre o dispositivo central (nó *sink*) e os poucos nós sensores e o aumento na confiabilidade se dá pela entrega de pacotes [2]. Portanto, projetar arquiteturas ou protocolos considerando QoS é um elemento essencial para que uma WBAN funcione adequadamente. Atualmente as WBANs são estruturadas segundo algum dos padrões de protocolos para redes sem fio, como os padrões IEEE 802.15.1 [3], IEEE 802.15.4 [4] e IEEE 802.15.6 [5]. Algumas soluções com protocolos mais específicos são projetadas para WBANs, como a plataforma desenvolvida por [6] que utiliza o protocolo de hardware *ShockBurst*.

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

Segundo [7] uma rede com comunicação sem fio oferece novas formas de interconexão, que eventualmente não podem ser exploradas com a estrutura do modelo em camadas, como a adaptabilidade ao meio de acesso compartilhado. Especificamente, três razões justificam a comunicação entre camadas não adjacentes: 1) a possibilidade da comunicação oportunista; 2) novas modalidades de comunicação oferecidas pelo meio físico; e 3) problemas característicos das transmissões sem fio. Tal abordagem é denominada de *cross-layer* e é definida como uma maneira de melhorar a eficiência e a interação entre duas ou mais camadas não adjacentes da pilha de protocolos [8]. As WBANs apresentam dificuldades na garantia de entrega de pacote devido a reconfiguração do meio causada pela mobilidade do corpo humano, ruídos, interferências de outras redes e obstáculos, e a abordagem *cross-layer* pode atender esses problemas com a adaptação da rede.

Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma solução para garantir um alto nível de confiabilidade na entrega de pacotes em uma WBAN sem comprometer o tempo de vida da rede. Para isso será proposta uma abordagem *cross-layer* para o compartilhamento de variáveis entre as camadas

R. S. Pozza, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil, pozza@utfpr.edu.br.

A. V. Bastos, Universidade Federal de São João Del Rei, Minas Gerais, Brasil, alexvbh@gmail.com.

F. E. T. Oliveira, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil, felippe.eiji@gmail.com.

D. C. da Silva Jr, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, diogenes@ufmg.br.

TABELA I  
LISTA DE ACRÔNIMOS

WBAN	Wireless Body Area Network
PAN	Personal Area Network
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
e-Health	electronic Health
QoS	Quality of Service
OSI	Open System Interface
ITU	International Telecommunication Union
APP	Camada de Aplicação
MAC	Camada de Acesso ao Meio
PHY	Camada Física
MICS	Medical Implant Communications Service
WMTS	Wireless Medical Telemetry Services)
ISM	Industrial, Scientific, e Medical
TDMA	Time Division Multiple Access
M-QAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
PSK	Phase Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
PRR	Packet Received Rate
ACK	Acknowledgement packet
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
UWB	Ultra Wide Band
CL	Proposta de protocolo Cross Layer
PA	Protocolo com Potência Alta
PB	Protocolo com Potência Baixa
IPv6	Camada de Rede Internet Protocol versão 6

da pilha de protocolos, para adaptar a WBAN ao estado do meio e garantir um nível esperado de QoS sem diminuir seu período de atividade.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A seção II apresenta as abordagens *cross-layer* para redes sem fio e os aspectos de WBANs. Na seção III são apresentados os trabalhos relacionados e a seção IV o desenvolvimento deste trabalho. A seção V descreve os cenários para as simulações, a seção VI os resultados obtidos e a seção VII as conclusões e trabalhos futuros.

## II. WBANs E ABORDAGEM CROSS-LAYER

WBANs são redes de comunicação de dados sem fio formadas por sensores colocados sobre ou dentro do corpo humano [9] [10]. WBANs fazem parte da classe de redes PAN (Redes Pessoais), como as redes Bluetooth e Zigbee, mas se diferenciam das demais por se restringirem ao entorno do corpo. Geralmente coletam continuamente sinais vitais ou fisiológicos e permitem o monitoramento remoto para fins de acompanhamento de saúde, assistência a pessoas com deficiências ou *e-Health*. Por serem informações críticas e pessoais, os requisitos de qualidade de serviço exigem privacidade, alta taxa de comunicação, baixo consumo de energia e longo tempo de vida útil.

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

O Comitê de Padrões IEEE 802.15 criou, em dezembro de 2007, um grupo de trabalho designado como IEEE 802.15.6 para a definição de camadas físicas (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) para redes WBAN. A última versão é de 2012 e ainda não existe um rádio (PHY) disponível comercialmente. A camada PHY inclui rádios de banda estreita nas faixas MICS, WMTS, ISM e de banda ultra larga (UWB).

O resultado é uma tecnologia que permite de maneira não intrusiva, pervasiva e ubíqua o monitoramento do corpo humano.

Apesar de ter sido definido em 2012, até o momento não existe um chip comercial de sucesso para a camada PHY. Por isso as pesquisas na literatura mostram trabalhos usando as camadas PHY do IEEE 802.15.4 (ZigBee) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth) para o desenvolvimento de WBANs. Como o IEEE 802.15.4 é implementado no Castalia, o mesmo serviu de modelo para usá-lo neste trabalho.

A estratégia para solucionar os problemas descritos das WBANs, as restrições impostas por padrões como o Zigbee e garantir QoS foi o uso de técnicas *cross-layer* no desenvolvimento de novas pilhas de protocolos.

Segundo Srivastava e Motani [7], a técnica de *cross-layer* é utilizada para superar a estrutura do modelo em camadas e consiste na interação entre duas ou mais camadas da pilha de protocolos, em que a hierarquia de comunicação adjacente é quebrada. Como motivação para o uso de *cross-layer* tem-se que uma rede com comunicação sem fio oferece novas formas de interconexão e que não podem ser exploradas com a estrutura do modelo em camadas, como a adaptabilidade ao meio de acesso compartilhado [8]. Segundo Hefaida et al. [11], no modelo de arquitetura em camadas a impossibilidade da comunicação, compartilhamento ou troca de informações entre camadas não adjacentes dificultam possíveis soluções. Essas limitações impulsionaram pesquisas sobre as vantagens da violação das regras do modelo OSI para o desenvolvimento de novas abordagens e protocolos para a comunicação sem fio.

Uma pilha de protocolos para WBAN deve atender a algumas particularidades, como a variação do nível de interferências, o tempo de entrega dos pacotes (*delay*) e os ruídos no acesso ao meio, que afetam a QoS (em especial a confiabilidade e o tempo de vida da rede). Segundo o trabalho de Movassaghi et al. [12], o padrão IEEE 802.15.4 é muito referenciado na literatura como proposta de solução em WBANs. Esse padrão especifica a camada física e MAC com consumo limitado de energia para comunicação entre dispositivos fixos e móveis de baixo custo. Pode ser configurado em dois modos de acesso ao canal de rádio: com *beacon* e sem *beacon*. No modo com *beacon*, os nós sensores têm um ciclo de trabalho (*duty-cycle*) onde numa fração de tempo estão em atividade e na outra estão inativos e com o rádio desligado. Devido a isso, um nó deve coordenar o início e o fim da transmissão dos nós sensores em intervalos predeterminados, definidos por meio de *beacons* e denominados *superframes*. O *superframe* é dividido em pequenos espaços de tempo (*slots*) que são utilizados para o envio de dados. No modo sem *beacon* o nó sensor que deseja transmitir deve verificar se outro dispositivo está transmitindo no mesmo canal. O presente trabalho é baseado no modo de transmissão com *beacon* do IEEE 802.15.4.

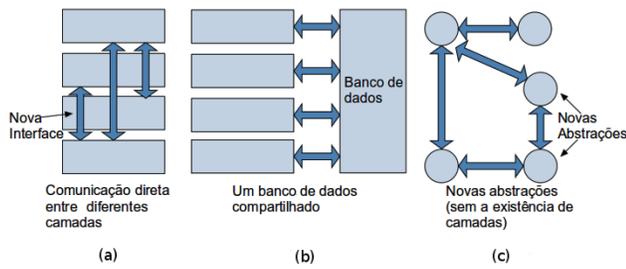


Fig. 1. Propostas para abordagens *cross-layer* [7].

Os protocolos desenvolvidos para as WBAN ainda são poucos quando comparados a outras redes sem fio. As dificuldades no seu desenvolvimento, impostas pelas limitações dos aspectos das WBAN e por ser uma recente área de pesquisa, ainda não consolidaram um ou mais protocolos como padrão. Portanto, o uso da abordagem *cross-layer* para WBANs oferece propostas a problemas como confiabilidade, compartilhamento de informações entre camadas e adaptações da rede a variações do meio de acesso.

Segundo Srivastava et al. [7], a interação entre camadas para abordagem *cross-layer* pode ser classificada em três tipos de propostas, conforme a Fig. 1. A comunicação direta entre camadas, apresentada na Fig. 1(a), ocorre com novas interfaces, mesmo entre camadas adjacentes. Nesse caso, essa interação permite a visibilidade entre variáveis com o objetivo de compartilhamento.

Na Fig. 1(b), um banco de dados é compartilhado por todas as camadas, disponibilizando o serviço de armazenamento e recuperação dos parâmetros. Os ajustes realizados com o compartilhamento do banco de dados podem particularizar esses parâmetros, conforme a variação do meio ou de outro fator relevante (taxa de dados ou prioridade de pacotes). O desafio nessa opção concentra-se no projeto do banco de dados integrado com as camadas de protocolos possibilitando a comunicação dentro da pilha de protocolos. A Fig. 1(c) propõe o uso de regras (abstrações) para novas comunicações entre a pilha de protocolos, em que funções as particularizem como módulos. Por isso, descaracteriza a arquitetura tradicional em camadas, mas dificulta a padronização de novos protocolos.

Por outro lado, Gajjar et al. [8] propõem que as propriedades da abordagem em camadas (flexibilidade na atualização de certas camadas, fácil depuração e diminuição da complexidade) devem ser preservadas na abordagem *cross-layer*. Isso garante que os ganhos de curto prazo no desempenho e na capacidade oferecidas pelo *cross-layer* possam também ser de longo prazo, considerando custo, facilidade de manutenção e padronização. Os projetos *cross-layer* que combinam camadas são eficientes quanto ao consumo de energia, mas tornam-se caros para desenvolvimento, manutenção e atualização de novos protocolos, pois todas as camadas são afetadas por esses processos. Já os projetos *cross-layer* que apenas compartilham informações tornam-se mais flexíveis e reutilizáveis em relação ao modelo de camadas, mas não no consumo de energia [8].

Com base nos resultados iniciais apresentados em Pozza e da Silva Jr. [13], o presente trabalho utiliza quatro aspectos

para sustentar a abordagem *cross-layer* para WBANs: máximo de dois saltos de distância ao nó *sink*; níveis diferentes de confiabilidade entre nós sensores; acesso a um meio com muita interferência e aplicações com taxas de dados diferentes.

### III. TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura existem diversas propostas para novas soluções para os desafios das WBANs. O protocolo H-MAC [14] propõe a sincronização entre os nós sensores da rede pelo batimento cardíaco e, com isso, diminuir o consumo de energia. O BAN-MAC [15], compatível com o IEEE 802.15.4 e projetado para topologia estrela, recebe os pacotes dos nós sensores e ajusta dinamicamente os parâmetros do seu protocolo para a economia de energia. A pesquisa em protocolos *cross-layer* para WBANs ainda é incipiente e baseada em soluções para redes *ad hoc*. A seguir são descritos trabalhos que relatam as vantagens, camadas utilizadas e estratégias adotadas pelo uso de *cross-layer*.

O protocolo CICADA-S [16], para RSSF, propõe um protocolo *cross-layer seguro e com baixo consumo de energia em uma WBAN*. Uma árvore de roteamento é gerada continuamente de forma distribuída e os intervalos de tempo fixos (*slots*) dos nós são agendados. Foi proposto um modelo para a camada Física e uma combinação entre as funções da MAC e Rede, customizando tais *slots* e a tabela de roteamento em função da energia.

No trabalho de [17] são descritos os requisitos para o desenvolvimento de protocolos da camada MAC para WBANs baseados na técnica de alocação TDMA. A alocação dos *slots* em TDMA pode representar uma desvantagem devido à mobilidade das WBANs, uma vez que o tempo garantido para acesso pode ser afetado por interferências de outras redes. Segundo Tselishchev a taxa de entrega de pacotes no canal das WBANs pode variar e definir um número fixo de retransmissões pode não ter impacto relevante para melhorar essa taxa. Foi proposta uma variação do TDMA em que a ordem de transmissão dos pacotes depende da variação do canal de comunicação.

Para diminuir o consumo de energia, alguns trabalhos propõem novas alternativas de hardware, como por exemplo chips para o transceptor de rádio específicos para WBANs e/ou padrão IEEE 802.15.6, o uso do corpo humano como canal de comunicação ou novas interfaces de rádio frequência e antenas dedicadas a WBANs. Dumanli et al. [18] projetaram uma antena supondo sua proximidade com a pele humana (distância de 2,5 mm até 10 mm) e propuseram um protocolo denominado ORPL (*Opportunistic foRwarding ProtoCoL*). Os autores afirmam que o *duty cycle* pode acarretar custos adicionais dependendo da qualidade do enlace que pode aumentar as retransmissões de pacotes. Esse trabalho usou um cenário com um enlace com probabilidade de sucesso de entrega protocolo de 70% e o número de saltos dos nós sensores ao nó *sink* entre 2 a 4. O ORPL estabelece uma cooperação entre a camada de Rede e MAC para gerenciar o reenvio de pacotes relacionando a qualidade do enlace com a diminuição na potência de transmissão através do roteamento dos pacotes.

Xu e Li [19] propõem relacionar os parâmetros das camadas Física e MAC para diminuir o consumo energético. Para o

canal de comunicação e o consumo de energia, o modelo empregado correlaciona os valores que definem a modulação utilizada na camada Física, M-QAM com o tempo de *duty-cycle* na camada MAC.

No trabalho de Su e Zhang [20] foram realizadas alterações nas camadas Física e MAC, utilizando TDMA com o objetivo de prolongar o tempo de vida da rede. Os *beacons* recebidos são usados para estimar o estado do meio e, conjuntamente com o tamanho do *buffer*, calculam qual a modulação a ser utilizada. Segundo os autores, o algoritmo TDMA da proposta é o mesmo utilizando tanto para o IEEE 802.15.4 quanto para o IEEE 802.15.1, os quais são comparados nos experimentos. Os resultados apresentam melhorias em relação ao consumo de energia desses dois padrões.

Awad et al. [21] analisaram parâmetros das camadas de Aplicação (limite do *delay* e variação do sinal), MAC (tempo dos *slots*) e Física (qualidade do enlace) para otimizar o consumo de energia e a confiabilidade na entrega de pacotes. Uma aplicação de eletrocardiograma foi proposta em o compartilhamento dessas variáveis com *cross-layer* permitiu determinar a melhor configuração da rede para minimizar seu consumo total de energia.

O PEAM (*Polymorphic Energy-Aware MAC*) [22] é um protocolo que utiliza *cross-layer* com IPv6 para comunicação direta entre a camada MAC e a camada de Aplicação, com o objetivo de adequar sua taxa de dados de acordo com as condições de saúde do paciente. Os dados são enviados por sensores de temperatura, batimentos cardíacos, acelerômetro, respiração, pressão sanguínea e glicose, e, conforme os respectivos valores, o estado do paciente é classificado em normal, anormal e crítico. Tal classificação, feita na camada de aplicação, é utilizada para a alteração dos parâmetros do CSMA/CA na camada MAC. Os resultados simulados, no Omnet++, foram comparados com o IEEE 802.15.4, e utilizando os mesmos cenários apresentou melhoria de desempenho em energia e entrega de pacotes.

O protocolo CLEAR (*Cross-Layer Energy-Aware Resource allocation*) [23] utiliza *cross-layer* nas camadas MAC e Física, baseado no IEEE 802.15.6. Esse protocolo utiliza pré-processamento e compressão dos dados para adaptação ao canal de transmissão com o objetivo de melhorar parâmetros de QoS, como o consumo de energia.

Com o objetivo de melhorar a QoS em dados de multimídia para tipos diferentes de sensores, Takabayashi et al. [24] utilizam *cross-layer* entre as camadas Física e de Enlace baseado no IEEE 802.15.6. Foi desenvolvido um modelo teórico em que o acesso agendado ao meio supera o aleatório e tem relação com a modulação definida na camada Física. A análise teórica entre o protocolo desenvolvido e o IEEE 802.15.6 demonstrou melhoria nas transmissões de dados, mas não no consumo de energia.

Nas WBANs a diminuição do número de enlaces não estimula ou intensifica a pesquisa no desenvolvimento de roteamentos mais elaborados, diferentemente do que ocorre nas RSSF, que possuem um aspecto mais colaborativo. O desempenho de uma WBAN está relacionado às variações no canal de comunicação sem fio, causadas principalmente pela movimentação do corpo humano.

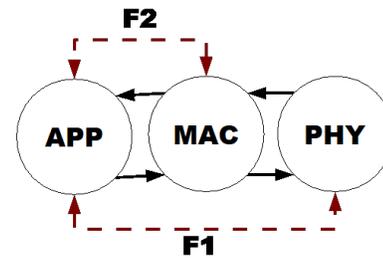


Fig. 2. Fluxo tradicional de comunicação (linhas contínuas) e dois fluxos adicionais propostos (linhas tracejadas).

#### IV. CL: UMA PROPOSTA CROSS-LAYER PARA WBAN

Esse trabalho apresenta a CL, uma nova abordagem *cross-layer* para comunicação em WBANs. A arquitetura é baseada na Fig. 1(a), criando novas interfaces de comunicação entre as camadas. A proposta tem por objetivo facilitar a adaptação da WBAN de acordo com o estado do meio de acesso, aumentando a confiabilidade na comunicação e sem comprometer o tempo de vida da rede. A abordagem proposta utiliza as camadas MAC e Física (PHY) do padrão IEEE 802.15.4 e implementa uma camada de Aplicação (APP).

A abordagem escolhida define dois fluxos de interação, F1 e F2, entre as camadas (Aplicação, MAC e Física) e ilustradas na Fig. 2. O fluxo F1 permite a comunicação entre as camadas APP e PHY, onde é possível alterar a potência de transmissão diretamente pela camada de Aplicação. O fluxo F2 permite que a quantidade de retransmissões possa ser alterada dinamicamente pela camada de Aplicação de acordo com a prioridade do pacote.

O fluxo F1, entre as camadas PHY e APP, altera a potência de transmissão do rádio na camada Física. O critério estabelecido é a taxa de pacotes recebidos (*Packet Received Rate – PRR*) pelo nó *sink*, informada pela camada MAC à camada de Aplicação. A PRR, calculada na camada MAC do nó sensor, é a razão entre os pacotes ACK (*Acknowledgement*) enviados pelo nó *sink* e os pacotes de dados enviados pelo nó sensor durante um dado intervalo, por exemplo, de 5 pacotes.

Se a PRR informada pela camada MAC for menor que o limiar estabelecido a potência do rádio deve ser aumentada, e caso contrário, diminuída. O limiar da PRR em WBANs pode variar dependendo da aplicação empregada e das condições do meio [25]. Como esse trabalho não se destina a uma aplicação específica, os valores da PRR foram baseados em limiares encontrados na literatura. Em [12], é descrito que a PRR deve ser maior que 90% para pacotes com carga de 256 octetos para 95% dos enlaces. Em [25] foi demonstrado que a interferência de outras redes, como por exemplo as redes IEEE 802.11, a PRR pode variar entre 67% e 98% e que existem algoritmos capazes de reconstruir os pacotes perdidos

Em [12], foi determinado que os nós sensores de uma WBAN devem transmitir com a potência entre -10 dBm e 0 dBm devido a proximidade do corpo. Em [25] os resultados mais significativos apontam valores entre -10 dBm e -20 dBm.

O fluxo F2, entre as camadas MAC e APP, tem por objetivo aumentar a probabilidade de entrega de pacotes com maior prioridade através da variação no número de tentativas de

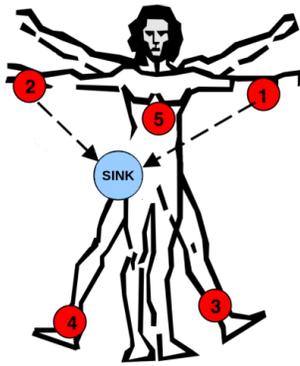


Fig. 3. Topologia utilizada na WBAN [27].

envio de pacotes. Em sistemas *e-Health*, a garantia de entrega de pacotes com informações críticas é um requisito importante. Nesse fluxo, a camada APP altera o número de retransmissões de cada pacote em caso de não recebimento do ACK. No padrão IEEE 802.15.4 esse valor é definido entre 7 (máximo) e 3 (padrão) [26], enquanto o padrão IEEE 802.15.6 define 7 níveis e relaciona com o valor do *backoff* em um intervalo do *superframe*. As retransmissões têm impacto tanto no meio de acesso quanto na QoS (entrega de pacotes e tempo de vida da rede), pois aumenta a confiabilidade e o consumo de energia.

Inicialmente, foram estabelecidos quatro níveis de prioridades (0, 1, 2 e 3) a serem associados aleatoriamente a cada pacote a ser enviado pela camada MAC. Cada nível foi relacionado a um número de tentativas de transmissão. Um pacote com prioridade nível 0 tem apenas uma tentativa de transmissão; o nível 1 tem duas tentativas de transmissões; o nível 2 tem 3 tentativas de transmissões; e o nível 3 tem 4 tentativas de transmissão.

## V. MATERIAIS E MÉTODOS

### A. Cenário para as Simulações

No presente trabalho foi definida uma WBAN usando uma topologia estrela com seis nós e com apenas um salto. Os nós são de dois tipos: um nó coordenador, aqui chamado de nó *sink*, e diversos nós sensores que regularmente enviam ao nó *sink* pacotes de dados. Não existe comunicação entre nós sensores, apenas entre nós sensores e o nó *sink*.

A Fig. 3 apresenta a topologia utilizada onde o nó *sink* está localizado à direita do quadril, e cinco nós sensores estão posicionados nas extremidades dos quatro membros e no torso.

Cada nó sensor tem uma aplicação que usa um ou mais sensores para a coleta de dados fisiológicos. Para melhor representar uma utilização real, os nós sensores possuem diferentes conjuntos de sensores e respectivas taxas de pacotes. A Tabela II apresenta as principais características dos nós sensores. A primeira linha mostra as taxas de pacotes enviados e a segunda a atenuação nos canais de comunicação com o nó *sink*. Foram utilizados dois tipos de canal de comunicação: com e sem interferência ou colisão.

Cada pacote gerado pela camada de Aplicação (APP) de um nó sensor é enviado para a camada APP do nó *sink*. Cada pacote APP gera um único pacote na camada MAC, e esse

TABELA II  
CONFIGURAÇÃO DOS NÓS SENSORES

Parâmetro	Nó Sensor				
	1	2	3	4	5
Pacotes/segundo	10	10	15	25	25
Atenuação do canal (nó <i>sink</i> ) (dB)	50	40	59	54	58

deve ser reconhecido pelo MAC destinatário com o envio de um pacote ACK.

### B. Pilha de Protocolos

Para a pilha de protocolos foi adotado o padrão de rede IEEE 802.15.4, que define as camadas física e enlace para redes sem fio do tipo PAN. As duas camadas foram disponibilizadas pela biblioteca do Castalia.

A camada MAC recebe um pacote de tamanho fixo de 130 Bytes (incluindo cabeçalhos), e cada pacote enviado é confirmado por um pacote ACK. Em caso de não confirmação, após um período de *time-out* de 1,2 ms, uma única retransmissão é executada.

O protocolo MAC utilizado usa o modo *beacon* e o acesso é baseado em contenção de colisões usando CSMA/CA. Os pacotes *beacons* são transmitidos pelo nó *sink* (coordenador) para indicar o início de cada *frame* que possui 16 *slots*. Cada *frame* tem um *duty-cycle* de 25%, que representa o período de tempo que os nós sensores enviarão seus pacotes usando os *slots*, e nos demais 75% a rede permanecerá inativa com os rádios desligados.

A camada PHY usa um rádio de banda estreita na faixa de 2,4GHz e com uma taxa de dados de 1.024 Kbps. Foi escolhido o modelo BANRadio disponível no Castalia, que modela um rádio teórico (não comercial) e que tem sido usado como *baseline* na literatura.

### C. Simulador Castalia

Para simulador de rede foi escolhido o Castalia versão 3.2 [27]. Castalia é um simulador de código aberto, voltado para redes sem fio e baseado na plataforma Omnet++ [28]. Castalia foi desenvolvido com o objetivo de simular redes de sensores sem fio de baixo consumo de energia, redes corporais e modelar canais de comunicação sem fio de maneira mais realística. Por sua vez, a plataforma Omnet++ permite o desenvolvimento de simuladores para redes de dados fornecendo um cerne de simulação do tipo *event-driven*, escrito em C++ e de código aberto para futuras contribuições, modelagem de mobilidade de nós, modelagem do consumo de energia e bibliotecas de protocolos.

A arquitetura do Castalia pode ser vista na Fig. 4, que é composta por três módulos que trocam mensagem entre si. Cada módulo é definido como uma unidade básica de execução que recebe mensagens de outros módulos [29]. Os módulos são configuráveis através de arquivos do tipo texto e seus códigos podem ser alterados pelos usuários. Importante destacar que os nós da rede não se comunicam diretamente mas somente através do módulo Wireless.

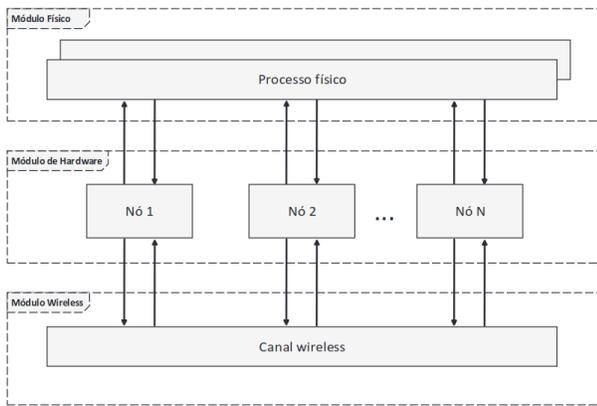


Fig. 4. Arquitetura do simulador Castalia [29].

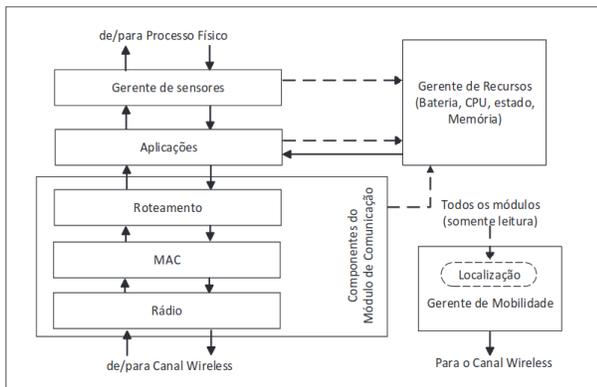


Fig. 5. Arquitetura do nó no Castalia [30].

O Módulo Físico modela os processos físicos que representam o ambiente monitorado pelos sensores.

O Módulo de Hardware é composto pelos modelos dos nós sensores da rede. A Fig. 5 mostra estrutura de cada nó que por sua vez é composta por diversos submódulos. No submódulo Gerência de Recursos é possível descrever as características de hardware, como CPU, memória e bateria. No submódulo Gerência de Mobilidade detalhes da mobilidade do nó pode ser descrita em termos de alteração da intensidade do sinal de rádio. O submódulo Aplicação, ou camada APP, modela o comportamento do aplicação alvo do nó. O submódulo Gerência de Sensores faz a interface entre o processo físico e o tipo de sensor a ser simulado. O submódulo de Comunicação implementa a pilha de protocolos utilizada, que pode ser obtida na biblioteca do Castalia, como o IEEE 802.15.4 e 802.15.6, ou desenvolvida pelo usuário. Diversas implementações de protocolos MAC estão disponíveis. Para tornar a simulação mais realista, o Castalia implementa modelos de camada física (PHY) baseada em chips comerciais, como o CC1000 e CC2420, e oferece ainda um modelo teórico, o BANRadio. O modelo de rádio tem estados internos como dormente, transmissão (TX) e recepção (RX), onde é possível associar níveis de consumo de energia e tempo de transição. Os rádios podem ter diferentes níveis de potência de transmissão. Finalmente, o rádio pode ser configurado com diferentes tipos de modulação.

TABELA III  
PARÂMETROS USADOS PELO BANRADIO

<b>Taxa de Dados</b>	1.024 Kbps	<b>Duty Cycle</b>	25%
<b>Modulação</b>	Diff BPSK	<b>Taxa Efetiva</b>	51,2 Kbps
<b>Sensibilidade Rx</b>	-91 dBm	<b>Potência TX</b>	-10 a -20 dBm
<b>Largura da Banda de Ruído</b>	1 MHz	<b>Tempo de CCA</b>	1 ms
<b>Ruído de Fundo</b>	-104 dBm	<b>Tempo de Transição Tx←→Rx</b>	20 μs

O Módulo Wireless simula o comportamento do canal de rádio, e tem por objetivo uma modelagem o mais realista possível. Para tal, os autores coletaram dados reais de comportamento da propagação do sinal de rádio em uma rede WBAN sob diferentes condições de uso [31]. A partir desses dados os modelos de atenuação por perdas de caminho, sombreamento e variação temporal foram implementados.

Suas principais características são sombreamento log-normal, que é mais apropriado para WBANs em ambientes internos e com alta mobilidade, e é implementado através de um mapa com as perdas pré-calculadas entre os nós. Para modelar a mobilidade dos nós sensores em uma WBAN, que impacta no valor das perdas dos caminhos, o espaço é definido com um campo bidimensional composto por células. Um mapa (matriz) é definido pelo seu tamanho total e pelo tamanho de cada célula, onde os valores da influência da mobilidade altera a perda de caminho, como mostrado nos valores de *Atenuação* na Tabela II.

Finalmente, o Castalia modela a variação temporal do canal de comunicação. Esse modelo é baseado por uma função de densidade de probabilidade obtida experimentalmente. Sem o efeito temporal, o canal é considerado ideal e seu comportamento é estático. Quando o efeito temporal é considerado, a atenuação do canal varia ao longo do tempo introduzindo um efeito de perda da potência dinâmica no sinal dos enlaces. Essa variação torna seus resultados mais realistas, uma vez que seres humanos estão sempre em movimento e sujeitos a mudança de ambientes físicos.

#### D. Configuração da Simulação

Para efeito de comparação as três propostas foram simuladas usando a mesma camada APP, com os nós 1 e 2 gerando no total 3.000 pacotes, o nó 3 gerando 4.500 pacotes e os nós 4 e 5 gerando 7.500 pacotes cada. Por utilizar apenas um salto, não há a necessidade de protocolo de roteamento. A camada MAC utilizou internamente um *buffer* de recepção para 32 pacotes. Cada nó começou com uma carga na bateria de 18.720 J, que equivale a duas pilhas alcalinas tipo AA. A Tabela IV apresenta os principais parâmetros usados nas camadas MAC para CL, PA e PB. Finalmente, a camada PHY utilizou o modelo BANRadio com os parâmetros da Tabela III.

A proposta CL usa a camada MAC do IEEE 802.15.4 com as seguintes alterações: implementação dos fluxos F1 e F2 e possibilidade de até 3 retransmissões.

A camada PHY foi alterada para implementar os fluxos F1 e F2 da Fig. 2, para que a potência de transmissão possa ser

TABELA IV  
CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS PARA CADA ABORDAGEM

Abordagem	Potência TX (dBm)	Protocolo MAC	No. Máximo de Retransmissões
CL	-10 ou -20	CROSS-LAYER	3
PA	-10	PADRÃO	1
PB	-20	PADRÃO	1

alterada. As propostas PA e PB usam a mesma camada MAC sem alteração, mas a camada PHY tem duas configurações com potência de transmissão fixa: PA (Potência Alta) com -10 dBm, e PB (Potência Baixa) com -20 dBm (Tabela IV).

Para realizar uma abordagem científica no planejamento experimental, os parâmetros da simulação e a coleta de dados foram definidos para posteriormente ser realizada a análise dos dados.

Foram realizadas 33 (trinta e três) simulações para cada cenário, onde cada cenário é o resultado da combinação das três abordagens (PA, PB e CL) e os dois tipos de canais de comunicação (com e sem interferência) produzindo um total de seis diferentes cenários. Cada uma das 33 simulações dos 6 cenários gastou um tempo médio de 327 segundos, aproximadamente 5,5 minutos. Foi utilizado um processador Intel i7 com 8 núcleos de 2.2 GHz, com 8 Gb de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 16.04 LTS (*Long Term Support*).

Cada simulação teve duração de 301 segundos, sendo o primeiro segundo para a configuração da rede, e demais 300 segundos restantes para a execução da simulação propriamente dita.

Todas as variáveis de resposta foram analisadas usando ANOVA para cada nó na rede obtendo um nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

## VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados das simulações foram compilados e são apresentados em gráficos onde para cada nó sensor as três abordagens são mostradas sem interferência, através de colunas cheias, e com interferência através de colunas hachuradas.

Para validar a proposta CL, foi analisada a eficiência de entrega de pacotes de dados entre os nós sensores e o nó *sink*. Para tal foram definidas duas métricas baseadas na taxa PRR mencionada anteriormente, ambas com janela de 5 pacotes da camada APP. A primeira, PRR\_APP é a razão entre pacotes ACK recebidos e os pacotes de dados enviados entre as camadas APP do nó sensor e o *sink* e é usada pelo fluxo F1.

A segunda, PRR\_MAC é a razão entre pacotes ACK recebidos e o total de pacotes enviados pela camada MAC, incluindo as retransmissões, e é calculada pós-simulação a partir dos relatórios do Castalia, sendo usada apenas para avaliação de desempenho da rede.

### A. Tráfego de Pacotes entre Camadas APP

A Fig. 6 mostra a taxa PRR\_APP, que é a taxa de pacotes entre as camadas APP. A ineficiência é resultado do número de pacotes perdidos entre os nós sensores e o *sink*.

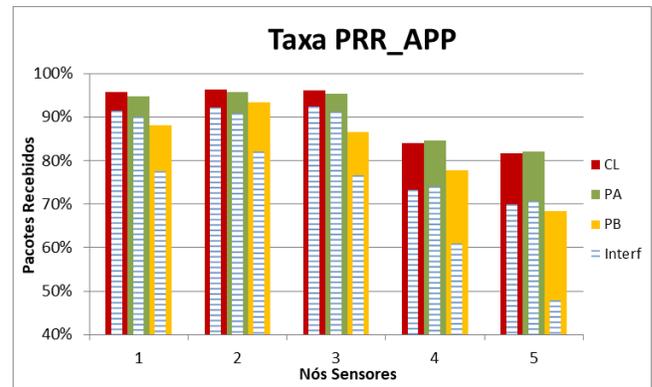


Fig. 6. Taxa PRR\_APP para pacotes entre camadas APP.

No cenário sem interferência (colunas cheias), em comparação com PA, CL obteve um ganho de 1% de entrega de pacotes ao nó *sink* pelos nós sensores 1, 2 e 3, e uma perda de 1% para os nó sensor 4 e o mesmo valor no nó sensor 5. No cenário com interferência (colunas hachuradas), os ganhos foram iguais para os nós 1, 2, 3 e 4, mas apresentou uma perda de 1% no nó sensor 5.

CL obteve melhores resultados em todos os cenários em relação com PB, com diferenças de 7%, 3%, 9%, 6% e 13%, respectivamente, no cenário sem interferência. As diferenças foram ainda maiores no cenário com interferência, com valores respectivos de 14%, 10%, 16%, 12% e 22%. Diferentemente do que ocorreu com PA, CL obteve resultados melhores quando comparados os seus cenários com interferência com os cenários sem interferência de PB, principalmente em relação ao nó sensor 5 (22%).

A comparação mostra que CL é sempre superior a PB, com e sem interferência. Entretanto, a comparação entre CL e PA apresenta resultados divergentes, onde CL é sempre superior a PA para os nós 1, 2 e 3, com valores de 2%, 1% e 1% respectivamente, e sempre inferior para os nós 4 e 5, ambos com 1%. Uma razão pode ser o fato de que os nós 4 e 5 operam com taxas de comunicação superiores aos nós 1, 2 e 3.

### B. Tráfego de Pacotes entre Camadas MAC

A Fig. 7 mostra a taxa PRR\_MAC, que é a taxa de pacotes recebidos entre as camadas MAC. A comparação se dá entre o número de pacotes enviados pela camada de aplicação e o número total de pacotes enviados e retransmitidos pelo MAC pelos nós sensores, ou seja, o número de pacotes efetivamente recebidos pela camada MAC do nó *sink*.

A eficiência de todas as abordagens são menores uma vez que agora são contabilizadas as retransmissões. Nessa métrica CL é ligeiramente inferior a PA para todos os casos, porém é muito mais eficiente que PB.

### C. Perda de Pacotes

A Fig. 8 apresenta as perdas totais de pacotes enviados pela camada APP. Para os cenários sem interferência as perdas correspondem a menos de 10% para os nós de menor taxa

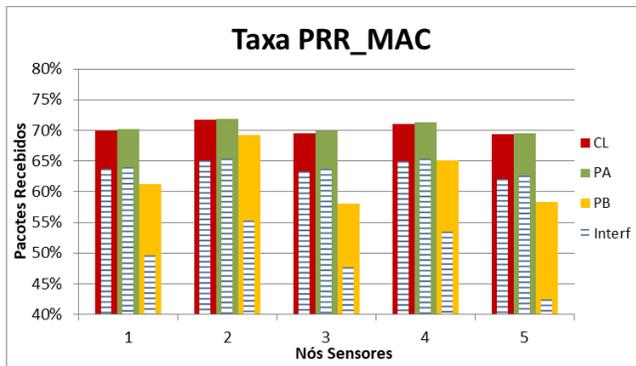


Fig. 7. Taxa PRR\_MAC para pacotes entre camadas MAC.

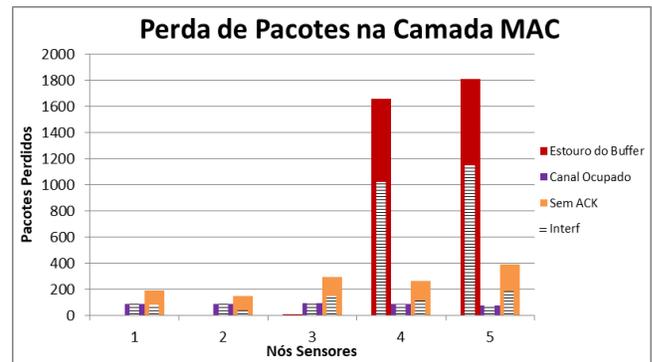


Fig. 9. Perdas de pacotes na camada MAC para CL.

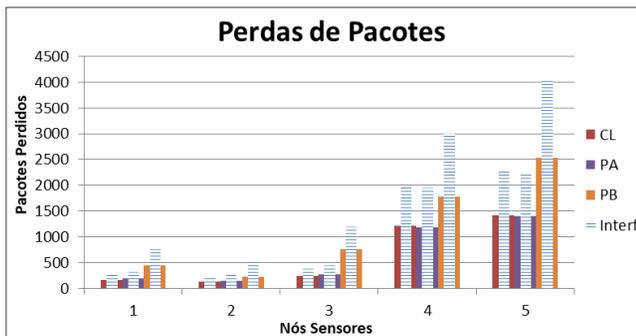


Fig. 8. Perdas totais de pacotes na camada APP.

de pacotes (1, 2 e 3) e quase 20% para os nós de maior taxa (4 e 5). Para todas as situações as perdas de PB são muito superiores às de PA e CL. Isso pode ser explicado pelo fato de usar baixa potência de TX e apenas uma única retransmissão. Nos cenários com interferência as perdas quase que dobram de valor, podendo chegar a 30% para CL e PA e 45% para PB. Interessante observar que para PB a presença de interferência tem um profundo impacto negativo.

Para melhor entendimento, as perdas foram separadas em três categorias, como disponibilizadas pelo Castalia. Como o comportamento dessas perdas são similares para as três abordagens, será destacada a seguir apenas a abordagem CL.

A Fig. 9 detalha as perdas de pacotes discriminando as condições de perdas definidas pela camada MAC, que são devidas ao estouro do *buffer* de entrada, ao canal ocupado e a ausência de reconhecimento de envio (ACK).

As perdas devido ao canal ocupado são constantes para todos os nós, ou seja, não depende da taxa de envio, e se devem a colisão no acesso ao meio, que por sua vez incorre em períodos de *backoff* e consequente retransmissão do pacote.

As perdas em função da ausência do ACK são proporcionais às taxas de envio, mas não oferecem um forte impacto no desempenho da rede. Essa ausência se deve a perda ou no envio do pacote de dados ou no recebimento do pacote ACK enviado pelo nó *sink*.

Entretanto, as perdas devido ao estouro do *buffer*, quando ocorrem, são extremamente danosas ao desempenho. Uma observação interessante é que essa perda só aparece para as taxas de envio altas dos nós 4 e 5. Outra observação interes-

sante é a sensibilidade dessa perda em relação à presença de interferência no canal, o que faz com que o número de pacotes perdidos seja aproximadamente 80% maior em comparação com o cenário sem interferência. O tamanho do *buffer* de 32 pacotes, pode ser o responsável pela perda dos nós 4 e 5, uma vez que o tamanho do *superframe*, o *duty-cycle* de 25% ou a quantidade de *slots*, pode não oferecer suficiente largura de banda, e consequentemente tempo, para o envio de todos pacotes gerados pela camada APP.

Para enfrentar essas perdas, diversas abordagens deverão ser utilizadas uma vez que elas são produzidas por diferentes fontes. A perda por ausência do ACK se deve principalmente a duas razões: baixa potência do sinal transmitido ou alto nível de ruído no canal de comunicação. A primeira solução possível é o aumento da potência de transmissão do rádio. Uma segunda solução é o aumento na sensibilidade do receptor de rádio. Em ambos os casos é necessária uma intervenção nos componentes eletrônicos que compõem o rádio.

Para enfrentar a perda devido ao estouro do *buffer* de entrada no MAC uma solução simples é o aumento no tamanho desse *buffer*. Entretanto, essa solução pode não resolver o problema se a taxa de geração de pacotes de dados por parte da camada APP for próxima ou superior ao limite máximo oferecido pelo canal.

A solução para as perdas devido a ocupação do canal é de maior complexidade. Diversas razões podem produzir essa condição, entre elas a alta ocupação da banda disponível do canal, excesso de colisões, aumento de retransmissões devido a *backoffs* e perdas de pacotes ACK.

Com exceção das perdas devido à ausência do ACK, todas as soluções implicam em ajustes nos parâmetros e no comportamento da camada MAC. Alterações no tamanho do *buffer*, tamanho dos pacotes de dados, fragmentação de pacotes, temporizações do protocolo CSMA/CA e políticas de *backoff* precisam ser exploradas.

#### D. Consumo de Energia

Na Fig. 10 é apresentado o consumo de energia por bit enviado (nJ/bit), calculado pelo Castalia, em todos os cenários. PB apresenta menor consumo de energia do que CL e PA, consequência da menor potência do seu rádio. CL obteve desempenho melhor que PA para os nós 4 e 5, mas perde

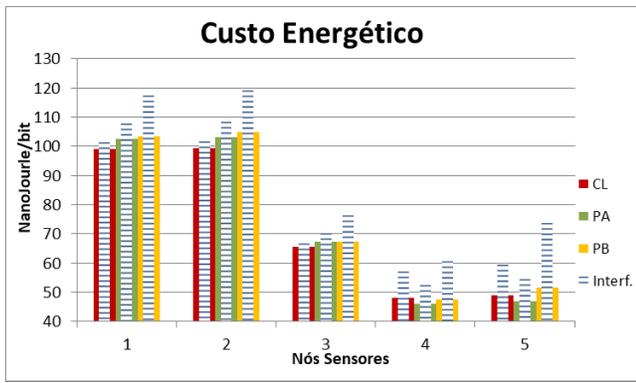


Fig. 10. Custo energético para todas as abordagens.

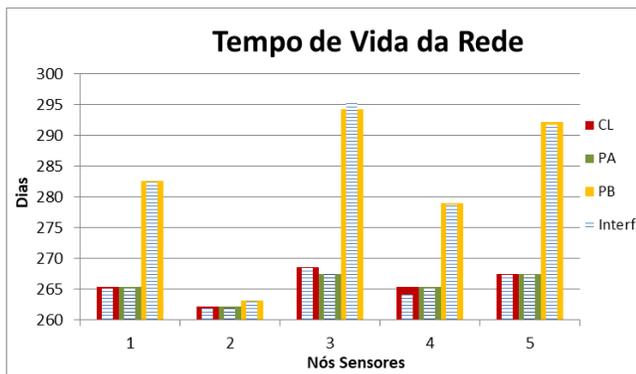


Fig. 11. Tempo de vida da rede.

para os nós 1, 2, e 3. O consumo de CL decorre dos ajustes para alterar a potência do rádio e a retransmissão de pacotes.

### E. Tempo de Vida da Rede

A Fig. 11 mostra o tempo de vida da rede para todos os cenários. Para isso a energia residual da bateria dos nós sensores ao final da simulação foi utilizada para calcular o tempo em dias de execução da rede.

Em decorrência do custo energético para enviar mais pacotes e aumentar a potência do rádio, o tempo de vida de CL não conseguiu superar o de PB.

A diferença média de 17 dias (6%) a mais entre PB e CL representa o custo da proposta CL com a estabilidade nas taxas de pacotes, no meio com e sem interferência. A QoS (confiabilidade e tempo de vida da rede) de uma WBAN justifica esse custo. A variação dos dias de atividades da rede entre CL e PA foi pequena, mas verifica-se que existem diferenças relevantes decorrentes da localização dos nós e da movimentação do corpo. Observa-se que o protocolo PB obteve mais dias de atividade, mas, de acordo com as outras figuras, alcançou taxas de recebimento de pacotes menores que os protocolos CL e PA. É possível verificar que a proposta *cross-layer* garantiu maior confiabilidade na entrega de pacotes sem impactar no tempo de atividade da rede, assim como PA.

## VII. CONCLUSÃO

A movimentação do corpo humano e a mudança do meio de comunicação são fatores que impactam na QoS das redes

corporais (WBAN), como a entrega de pacotes e seu tempo de atividade. Esse trabalho propôs o protocolo *cross-layer* CL, com características de imunidade à interferência no meio de comunicação, capaz de adaptar-se às mudanças do meio de comunicação. CL foi comparado com dois protocolos convencionais (não *cross-layer*), configurados de forma distinta: o PA com potência de transmissão alta e maior probabilidade de entrega de pacotes e o PB com potência de transmissão baixa e provável maior tempo de atividade da rede.

Os resultados mostram que o protocolo CL apresenta uma maior imunidade a ruídos e interferências no meio de acesso quando comparados aos dois protocolos convencionais. CL foi em média 5% superior ao PA no número de pacotes recebidos pelo nó *sink* em um meio com mais ruídos, e obteve uma média de 2% a mais no tempo de atividade da rede.

A abordagem *cross-layer* tem como consequência um custo energético alto, comparável ao PA, e cerca de 16% maior no meio com mais ruídos quando comparada ao protocolo PB. Em média, PB foi superior a CL em apenas 6% (17 dias) no tempo de atividade da rede.

Os resultados apontam que a abordagem *cross-layer* pode garantir maior QoS devido a maior adaptabilidade às condições resultantes tanto da mobilidade quanto da reconfiguração do meio, com um custo de energia que não impacta fortemente no tempo de vida da rede.

Como trabalhos futuros sugerem-se o desenvolvimento e comparação dessa proposta *cross-layer* com o padrão IEEE 8021.5.6; a análise do impacto da implementação *cross-layer* no nó *sink*, que possui atividades de gerenciamento da rede e dos nós sensores; e possíveis soluções a serem exploradas para os problemas de perdas de pacote devido ao estouro de *buffer*, canal ocupado ou a ausência de ACK.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro das seguintes agências financiadoras: CAPES, CNPq e FAPEMIG (Projeto PPM-00321-14).

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Bouazizi, G. Zaibi, M. Samet, and A. Kachouri, "Wireless body area network for e-health applications: Overview," in *2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C)*, Feb 2017, pp. 64–68.
- [2] 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 Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1635–1657, Third 2014.
- [3] S. I. 802.15.1, "IEEE Draft Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems— Local and Metropolitan Area Networks Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)," *IEEE Std P802.15.1/D6*, 2004.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] N. S. N. Santos and S. M. S. Motoyam, "A large scale platform using wban technology for patient monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 3, pp. 705–711, March 2018.

- [7] 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.
- [8] S. Gajjar, S. Pradhan, and K. Dasgupta, "Cross layer architectural approaches for wireless sensor networks," in *Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 2011 IEEE*, 2011, pp. 557–562.
- [9] G.-Z. Yang, Ed., *Body sensor networks*. Springer, 2006.
- [10] J. Wang and Q. Wang, *Body Area Communications: Channel Modeling, Communication Systems, and EMC*. John Wiley & Sons Singapore, 2013.
- [11] M. Hefaida, M. Shen, A. Kshemkalyani, and A. Khokhar, "Cross-layer protocols for wsns: A simple design and simulation paradigm," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, 2012, pp. 844–849.
- [12] 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.
- [13] R. S. Pozza and D. da Silva, "Uma abordagem cross-layer para comunicação em redes corporais sem fio," in *SBRC 2015 - WP2P+ (Workshop de Redes P2P, Dinâmicas, Sociais e Orientadas a Conteúdo)*, may 2015.
- [14] S. Ullah, H. Higgins, B. Braem, B. Latre, C. Blondia, I. Moerman, S. Saleem, Z. Rahman, and K. S. Kwak, "A comprehensive survey of wireless body area networks," *Journal of Medical Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 1065–1094, Jun 2012.
- [15] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, and V. C. Leung, "Body area networks: A survey," *Mob. Netw. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 171–193, Apr. 2011.
- [16] D. Singelée, B. Latré, B. Braem, M. Peeters, M. Soete, P. Cleyn, B. Preneel, I. Moerman, and C. Blondia, "A secure cross-layer protocol for multi-hop wireless body area networks," in *Proceedings of the 7th international conference on Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks*, ser. ADHOC-NOW '08, 2008, pp. 94–107.
- [17] Y. Tselishchev, "Designing a medium access control protocol for body area networks," in *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2011 IEEE International Symposium on a*, June, pp. 1–3.
- [18] S. Dumanli, S. Gormus, and I. Craddock, "Energy efficient body area networking for mhealth applications," in *Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2012 6th International Symposium on*, 2012, pp. 1–4.
- [19] Z. Xu and Y. Li, "A cross-layer optimization design for implanted ban communication system," in *Biomedical and Health Informatics (BHI), 2012 IEEE-EMBS International Conference on*, 2012, pp. 396–399.
- [20] H. Su and X. Zhang, "Battery-dynamics driven tdma mac protocols for wireless body-area monitoring networks in healthcare applications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 27, no. 4, pp. 424–434, 2009.
- [21] A. Awad and A. Mohamed, "Distributed cross-layer optimization for healthcare monitoring applications," in *2014 12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, May 2014, pp. 57–62.
- [22] O. Bouachir, A. B. Mnaouer, and F. Touati, "Peam: A polymorphic, energy-aware mac protocol for wlan," in *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, May 2016, pp. 1–6.
- [23] D. Chen and W. Chiu, "Collaborative link-aware protocols for energy-efficient and qos wireless body area networks using integrated sensors," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 132–149, Feb 2018.
- [24] K. Takabayashi, H. Tanaka, C. Sugimoto, K. Sakakibara, and R. Kohn, "Cross-layer design and performance analysis of quality of service control scheme for wireless body area networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 22 462–22 470, 2017.
- [25] Y. Wang, Q. Wang, G. Zheng, Z. Zeng, R. Zheng, and Q. Zhang, "Wicop: Engineering wifi temporal white-spaces for safe operations of wireless personal area networks in medical applications," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 5, pp. 1145–1158, May 2014.
- [26] M. Di Francesco, G. Anastasi, M. Conti, S. Das, and V. Neri, "Reliability and energy-efficiency in 802.15.4/zigbee sensor networks: an adaptive and cross-layer approach," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 29, no. 8, pp. 1508–1524, September 2011.
- [27] Y. Boulis, Athanassios; Tselishchev, *Castalia - A Simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Network. Version 3.2*, National ICT Australia, NICTA, Locked Bag 9013, Alexandria, NSW 1435, Australia, Mar. 2011.
- [28] 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 - Simutools '08*, 2008, pp. 60:1–60:10.
- [29] D. Peditaditakis, 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, 2010, pp. 53:1–53:6.
- [30] G. Fortino, R. Greco, and A. Guerrieri, "Modeling and evaluation of the building management framework based on the Castalia WSN simulator," in *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2013*, 2013.
- [31] A. Boulis, Y. Tselishchev, L. Libman, D. Smith, and L. Hanlen, "Impact of wireless channel temporal variation on mac design for body area networks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 11, no. S2, pp. 51:1–51:18, Aug. 2012.



**Rogério Santos Pozza** é graduado em Processamento de Dados pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Ourinhos, Brasil, em 1997, e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Maringá, Paraná, Brasil, em 2005, e é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Seus interesses são: redes corporais sem fio, computação ubíqua e sistemas distribuídos.



**Alex Vidigal Bastos** é graduado em Ciência da Computação, mestre em Ciência da Computação pela Universidade de Viçosa, Brasil em 2011. Atualmente é professor Assistente na Universidade Federal de São João Del Rei – MG – Brasil e aluno de doutorado de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais. Seus interesses são: rádio definido por software, redes de sensores e computação móvel.



**Felipe Eiji Tashiro de Oliveira** é graduado em Engenharia de Computação pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, em 2017. Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica e Computação na Universidade Presbiteriana Mackenzie - SP - Brasil, e trabalha com gerenciamento, processamento e análise de dados na Porto Seguro - SP - Brasil. Seus interesses são: Big Data, Sistemas Distribuídos, Redes Corporais Sem Fio e Mineração de Dados.



**Diógenes Cecílio da Silva Junior** é graduado em Engenharia Elétrica e Mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, em 1983 e 1987, respectivamente. Obteve o título de doutor em Engenharia de Computação pela University of Southern California, Los Angeles, em 2001. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Seus interesses de pesquisa incluem: projetos no nível de sistema, sistemas embutidos e redes de

sensores sem fio.