

# Uma Avaliação do Consumo Energético de Protocolos de Acesso ao Meio para Redes Corporais sem Fio

Adrielle D. Souza<sup>1</sup>, Kristtopher K. Coelho<sup>1</sup>, Alex B. Vieira<sup>2</sup>,  
Bruno M. Cremonezi<sup>3</sup>, Michele Nogueira<sup>3</sup>, José Augusto M. Nacif<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – Universidade Federal de Viçosa (UFV)

<sup>2</sup>Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

<sup>3</sup>Depto. de Informática – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

{adrielle.souza, kristtopher.coelho, jnacif}@ufv.br  
alex.borges@ufjf.edu.br, {michele.nogueira, cremonezi}@ufpr.br

**Abstract.** *Wireless Body Area Networks (WBANs) have been widely employed in medical environments to aid communication between devices and the transmission of collected data, such as vital signs of patients. As it serves to support medical applications, WBANs require reliability on the communication between sensor nodes and base stations. However, given the natural vulnerabilities of wireless communication, such as inferences and losses, solutions need to bypass issues faced in wireless communication. In this paper, we evaluate the power consumption of devices in a scenario similar to a hospital environment in order to compare the DCAA and PDAC protocols, both specifically designed for wireless body networks. The experiments demonstrate a slightly higher power consumption for PDAC compared to DCAA. However, because it has a more robust and efficient channel control and allocation, PDAC offers characteristics that benefit the quality of the communication, which accredits it as an adequate protocol to WBAN.*

**Resumo.** *As redes corporais sem fio (WBANs) são amplamente utilizadas em ambientes médicos no auxílio à comunicação entre dispositivos e à transmissão dos dados coletados, tais como os sinais vitais de pacientes. Como servem de suporte às aplicações médicas, as WBANs utilizadas neste ambiente requerem confiabilidade na comunicação entre os dispositivos sensores e as estações base. Entretanto, diante das vulnerabilidades natas da comunicação sem fio, tais como inferências e perdas, as soluções precisam contornar possíveis problemas enfrentados em uma comunicação sem fio. Neste trabalho, nós avaliamos o consumo energético de dispositivos em um cenário similar a um ambiente hospitalar para comparar os protocolos DCAA e PDAC, ambos projetados especificamente para redes corporais sem fio. Os experimentos apontam um consumo energético levemente superior para o PDAC em relação ao DCAA. Contudo, por ser dotado de um controle e alocação de canais mais robusto e eficiente, o PDAC apresenta características que favorecem a qualidade da comunicação, credenciando-o como um protocolo propício para WBANs.*

## 1. Introdução

Com o crescimento da população mundial, os sistemas de saúde públicos e privados apresentam uma necessidade constante por reformulações para se adaptarem a esta situação. Devido ao aumento de doenças crônicas e fatais, e também à falta de profissionais qualificados, as despesas relacionadas à saúde tendem a aumentar significativamente nos próximos anos [Movassaghi et al. 2014]. Diante de tal cenário, a tecnologia apresenta-se como uma alternativa promissora, uma vez que, se utilizada corretamente, além de fornecer diagnósticos e tratamentos mais assertivos, pode auxiliar na redução de custos. Tendo em vista a possibilidade de tornar o cuidado com a saúde algo viável em qualquer lugar e a qualquer momento, a computação ubíqua surge como uma solução [Lima 2010, Augustin et al. 2008], pois apresenta características favoráveis ao cenário. A proposição de sistemas de monitoramento extremamente confiáveis, de baixa potência e baixo consumo energético podem contribuir para que haja uma exigência menor da infraestrutura existente, além de apresentar avaliações mais precisas dos pacientes [de Carvalho et al. 2011].

As redes corporais sem fio (WBANs) consistem em um conjunto de sensores que atuam de forma cooperativa, cujo espaço de monitoramento é o corpo humano. Capazes de monitorar e processar diversos sinais vitais de um usuário, a aplicação de WBANs no cenário médico é direta. De maneira geral, tais dados são capturados, processados e posteriormente enviados para análise. Uma vez armazenados em repositórios médicos, essas informações podem alimentar diversas aplicações, oferecendo a verificação e o diagnóstico baseado nas condições do paciente. O padrão IEEE 802.15.6 fornece para tal cenário uma comunicação confiável, de curto alcance (utilizável dentro ou em torno do corpo humano) e baixa potência. Entretanto, estes sistemas apresentam diversas limitações advindas do próprio ambiente de comunicação em si [Movassaghi et al. 2014]. Devido à baixa disponibilidade de canais na faixa de frequência não-licenciada de 2,4GHz (industrial, científica e médica), o ambiente em questão apresenta condições vulneráveis, os quais torna a comunicação propensa a congestionamento e interferências. Além disso, a questão energética dos dispositivos é um ponto a ser tratado. Apesar da troca de bateria em sensores externos ser fácil, aqueles intra-corporais não possuem tal privilégio. Sendo assim, para estes dispositivos a vida útil deve ser prolongada.

Atualmente, muitas pesquisas estão sendo realizadas acerca dos problemas enfrentados por WBANs. Alguns modelos foram propostos para mensurar o consumo de energia [El Azhari et al. 2017] e garantir a eficiência energética de dispositivos em rede [Hiep and Hoang 2014]. No entanto, a maioria destes trabalhos consideram ambientes insaturados, protocolos que dispõem de menos funcionalidades, e que por vezes não garantem qualidade na comunicação e um bom desempenho por parte do sistema [Jung et al. 2012, Hiep and Hoang 2014].

Nesse sentido, este artigo contribui com uma investigação quantitativa do consumo energético nos dois principais protocolos de controle de acesso ao meio projetados para WBAN, os protocolos DCAA (*Dynamic Channel Adjustable Asynchronous*) [Lee et al. 2011] e PDAC (*Protocol for Dynamic Channel Allocation*) [Cremonezi et al. 2017]. O DCAA segue uma abordagem para alocação dinâmica de canais, além de expor as principais técnicas que garantem uma comunicação de qualidade entre os dispositivos sensores. O PDAC possui características similares ao DCAA

em relação à alocação dinâmica de canais, mas difere desse por permitir a atuação de múltiplas estações base em um mesmo ambiente. A abordagem do PDAC reduz o atraso e as perdas de pacotes em aplicações médicas. O PDAC oferece também uma solução capaz de reduzir fatores que possam comprometer a qualidade da comunicação. O principal objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise e comparação entre os protocolos.

A avaliação do consumo energético dos protocolos DCAA e PDAC foi realizada através dos simuladores Castália, versão 3.2, e *Network Simulator 3* (NS-3), versão 3.27. Os protocolos em questão foram expostos a simulações de redes sem fio utilizando, primeiramente, o padrão IEEE 802.11 (*WiFi*) e em seguida o padrão IEEE 802.15.4 (*ZigBee*). Os protocolos são analisados sob a métrica consumo médio de energia gasto pelos dispositivos sensores em um cenário similar a um ambiente hospitalar. Com uma diferença média de aproximadamente 0,87%, utilizando o simulador Castália, e 2,05% utilizando o NS-3, os resultados demonstram que sistemas seguindo o PDAC tendem a consumir mais energia do que aqueles que utilizam o DCAA. Entretanto, devido às funcionalidades adicionais apresentadas pelo PDAC, os quais o DCAA não dispõe, o PDAC ainda é considerado apto a ser aplicado em WBANs.

O artigo segue a organização descrita. A Seção 2 discute sobre os trabalhos relacionados. Na Seção 3, são detalhados os protocolos DCAA e PDAC, utilizados como base para realizar as simulações. A Seção 4 descreve as simulações realizadas para a avaliação dos protocolos, bem como os modelos referentes a cada simulador. Na Seção 5, são apresentados os resultados. A Seção 6 conclui o artigo e direciona os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Considerando um cenário médico, onde as informações trafegadas são referentes à dados clínicos de pacientes, é imprescindível que haja um controle minucioso sobre possíveis interferências na rede. Tal ambiente exige maior rigidez com alguns requisitos de comunicação, como por exemplo, baixa latência [Baker and Høglund 2008], eficiência energética e alta precisão na entrega [Yu et al. 2006]. Por vezes, estes requisitos estão relacionados ao padrão e infraestrutura utilizada [Movassaghi et al. 2014]. Tendo em vista os desafios enfrentados por WBANs, muitas pesquisas são realizadas acerca de técnicas já existentes na literatura, a fim de se obter soluções mais assertivas. Porém, na maioria das vezes trata-se de soluções genéricas que não atendem às exigências da área médica, como desejado.

Em [Lee et al. 2011], os autores apresentam o DCAA, um protocolo de alocação dinâmica de canais, que possui características comuns de rádio cognitivos. Utilizando técnicas como *handshaking* e saltos entre as frequências ao realizar a varredura da faixa, o DCAA garante certa confiabilidade na transmissão de dados e também um melhor aproveitamento do espectro de frequência. Com base no trabalho citado, [Cremonezi et al. 2017] implementa o DCAA utilizando o padrão IEEE 802.15.4 e propõe o PDAC, que é um protocolo que além de possuir as características do DCAA, atende cenários com múltiplas estações bases. O que de certa forma está mais próximo da realidade de um ambiente hospitalar, onde é possível haver várias estações bases em uma mesma região [Baker and Høglund 2008].

Alguns padrões fornecem mecanismos que garantem uma comunicação confiável e energeticamente eficiente [Salayma et al. 2016], porém ainda assim é necessário uma oti-

mização para que estes atendam a cenários e requisitos específicos. O presente trabalho aborda os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11. Ambos apresentam características favoráveis ao que se refere a WBANs, além de operarem na faixa não licenciada de 2,4GHz. O IEEE 802.15.4 utilizado nas especificações do *Zigbee*, se destaca pelo baixo consumo energético e baixo alcance, o que possibilita a utilização de baterias como fonte de alimentação [Gislason 2008]. Enquanto o *Wi-Fi*, estabelecido pela norma IEEE 802.11, apresenta maior capacidade de transmissão e conexão mais estável [Crow et al. 1997].

Em [Jung et al. 2012], os autores apresentam uma análise estabelecida em alguns requisitos exigidos por WBANs. Apesar de não ser o foco principal, um dos objetos explorados no estudo realizado, é o consumo e eficiência energética em um cenário similar a um ambiente hospitalar. Entretanto, tal análise é realizada sob condições favoráveis, sem a presença de fatores que possam interferir na comunicação. Por consequência, os resultados obtidos podem não ser tão condizentes com a realidade, uma vez que na maioria das vezes o cenário em questão está exposto a diversos fatores que contribuem para que haja problemas na comunicação. Diferente do estudo mencionado, o presente trabalho realiza uma avaliação com base em simulações de ambientes saturados, expostos a interferências e com múltiplos dispositivos ativos, deste modo, fornecendo resultados mais próximos da realidade.

À vista disso, este trabalho apresenta uma análise relativa ao consumo energético dos protocolos e padrões de comunicação supracitados. Esta análise segue fielmente as referências estabelecidas por [Lee et al. 2011] e [Cremonezi et al. 2017].

### **3. Os protocolos de controle de acesso ao meio para WBAN**

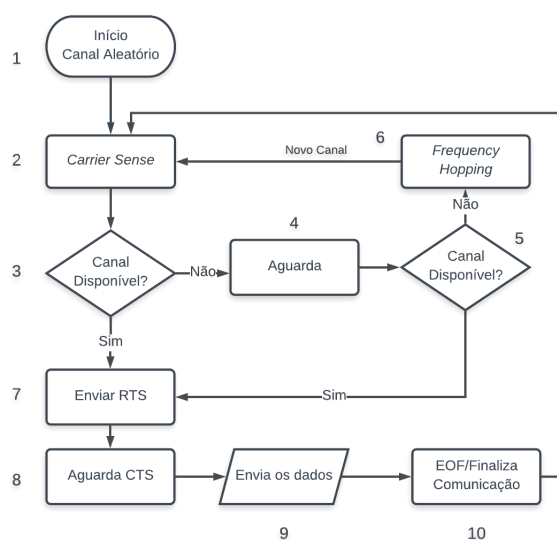
Esta seção apresenta as características dos protocolos DCAA e PDAC. Ambos foram implementados com objetivo de serem especificamente voltados para WBANs, com foco em aplicações para áreas médicas. Diante disso, é imprescindível que estes protocolos atendam aos requisitos exigidos pelo cenário médico, uma vez que as informações trafegadas são, em sua maioria, referentes a sinais vitais de pacientes.

Os protocolos em questão podem ser configurados para assumirem papéis distintos conforme as necessidades do cenário e aplicação. Sendo assim, os dispositivos presentes na rede podem atuar como estação base ou nó sensor, respeitando o que foi preestabelecido. Nas subseções posteriores, é apresentada uma descrição minuciosa dos protocolos e suas características desempenhando os papéis de estação base e nó sensor.

#### **3.1. DCAA: Dynamic Channel Adjustable Asynchronous**

O DCAA trata-se de um protocolo que permite um gerenciamento eficiente do espectro de frequência licenciado, utilizando técnicas de rádio cognitivo. Para isto, os nós examinam o ambiente e utilizam as frequências ociosas para a transmissão dos dados. Deste modo, é possível proteger os usuários preferenciais do canal. Tal protocolo ainda apresenta um modelo de interação assíncrono com intuito de prover baixa latência e reconfigurabilidade para as WBANs.

Quando o protocolo é atribuído ao nó sensor, seu comportamento segue o fluxograma apresentado na Figura 1. Ao despertar para transmissão de dados, o nó inicia em um dos canais disponíveis escolhido de modo aleatório (1). Em seguida, a disponibilidade e qualidade deste canal é avaliada (2) por meio de *Carrier Sense*. Caso este canal



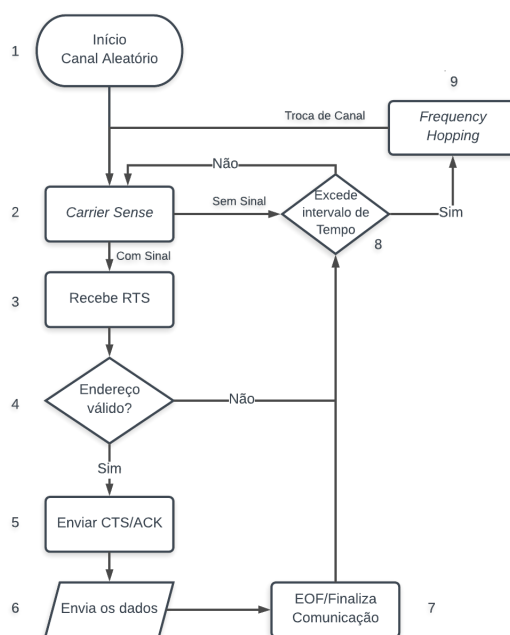
**Figura 1. Fluxograma do nó sensor - DCAA**

esteja sobrecarregado (3), o nó hiberna por um tempo estipulado pelo algoritmo de *backoff* exponencial (4), para então realizar uma nova verificação de disponibilidade (5). Na situação em que o canal permanece dedicado, o nó faz a comutação dos canais utilizando o método *Frequency Hopping* (6), seguindo um *Round Robin* crescente, em que a troca de canais segue uma fila circular no qual o ponto de partida é o canal escolhido anteriormente.

Quando um canal apresenta condições de comunicação e existem dados a serem transmitidos, o nó estabelece um canal de comunicação confiável, utilizando o método *Handshake* de três vias. Ao utilizar esta técnica, o nó sensor envia uma mensagem de requisição de comunicação (*RTS*) (7) endereçada à estação base. Quando a estação base encontra-se ocupada, ou caso não tenha recebido a mensagem a ela destinada, acontece a retransmissão do pacote contendo *RTS* com tempo gerenciado pelo algoritmo de *backoff* exponencial. Quando a estação base encontra-se disponível, esta sinaliza com o quadro de *CTS* (8). Em seguida, o nó passa a transmitir todos seus dados (9) sequencialmente à estação, e o término é sinalizado por meio do *EOF* (10). Neste ponto, o nó volta ao estado de hibernação inicial favorecendo a eficiência energética por parte do nó sensor.

Na situação em que o nó atua como estação base, o comportamento do protocolo é apresentado pelo fluxograma da Figura 2. A estação base também é inicializada em um canal escolhido aleatoriamente (1). Entretanto, a fase de avaliação do ambiente (*Carrier Sense*) (2) ocorre com intuito de identificar a requisição de estabelecimento de comunicação por parte dos nós sensores. Deste modo quando não há alteração no ambiente por um determinado período (8), ocorre uma troca entre os canais (9), assim como acontece com os nós sensores.

Quando algum pacote de comunicação é recebido (3), verifica-se se este possui um conteúdo válido e endereçado a tal estação base (4). Ao validar estas informações, inicia-se o processo de estabelecimento de comunicação com o envio de um quadro *CTS* (5). Neste momento a estação base está apta a receber os dados dos nós sensores (6) até



**Figura 2. Fluxograma da estação base - DCAA**

que o fim da transmissão é sinalizada por meio de uma mensagem contendo um quadro *EOF* (7) ou após um período de inatividade. Ao findar a transmissão dos dados, a estação base volta a verificar o ambiente, percorrendo todo espectro de frequência em busca de novas requisições.

### 3.2. PDAC: Protocol for Dynamic Channel Allocation

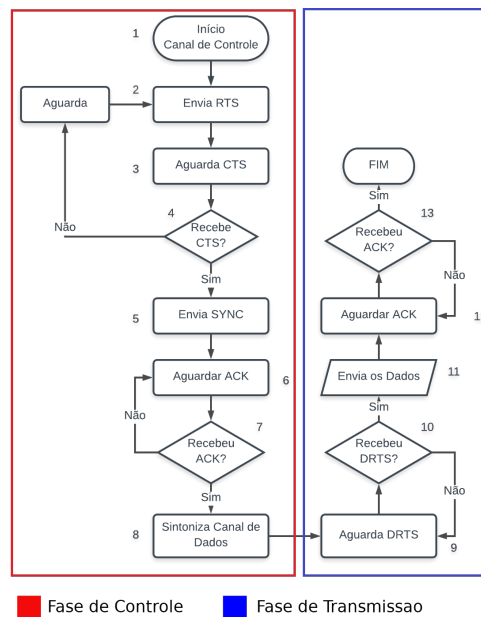
Assim como o DCAA, o PDAC é um protocolo que apresenta o conceito de alocação dinâmica de canais, além de abordar técnicas que tendem a reduzir problemas na comunicação. Considerando um ambiente hospitalar e seus requisitos, o PDAC, diferente de outros protocolos propostos, permite a atuação de diversas estações base, de forma colaborativa. Tal funcionalidade é interessante, uma vez que evita a possibilidade de sobrecarga, fator proeminente em ambientes que dispõe de apenas uma estação base.

Para a aplicação do protocolo em questão, a arquitetura considerada dispõe de nós sensores, nós centrais e estações base. Sendo assim, os nós sensores enviam os dados para um nó central (comunicação intra-WBAN), e este, por sua vez, fica encarregado de fazer a negociação com a estação base e, posteriormente, a transmissão dos dados para a mesma (comunicação inter-WBAN).

Em sistemas que utilizam o PDAC, a transmissão ocorre em duas fases. A primeira, denominada **fase de controle**, inicia-se quando o nó central envia uma requisição à estação base para a negociação de um canal de dados. Assim que a alocação do mesmo é efetuada, inicia-se a **fase de transmissão**. Nos fluxogramas apresentados pelas Figuras 3 e 4, estas fases foram destacadas, respectivamente, com as cores vermelha e azul.

Quando o protocolo é atribuído ao nó central, seu comportamento segue o fluxograma mostrado na Figura 3. O início da fase de controle (1), como dito anteriormente, ocorre assim que o dispositivo envia uma mensagem de requisição de comunicação (*RTS*)

(2) para a estação base. Após o envio da mensagem de requisição, o nó central aguarda (3) por um tempo até que a estação base retorne uma mensagem de confirmação (*CTS*). Caso não haja retorno (4), este espera por mais um tempo aleatório e faz a requisição novamente. Se a estação base enviar a confirmação, o dispositivo envia um pacote *SYNC* (5) confirmando o recebimento do canal. Em seguida, o nó central fica aguardando por uma confirmação (*ACK*) (6, 7) para posteriormente sintonizar o canal de dados (8) e encerrar a fase de controle.



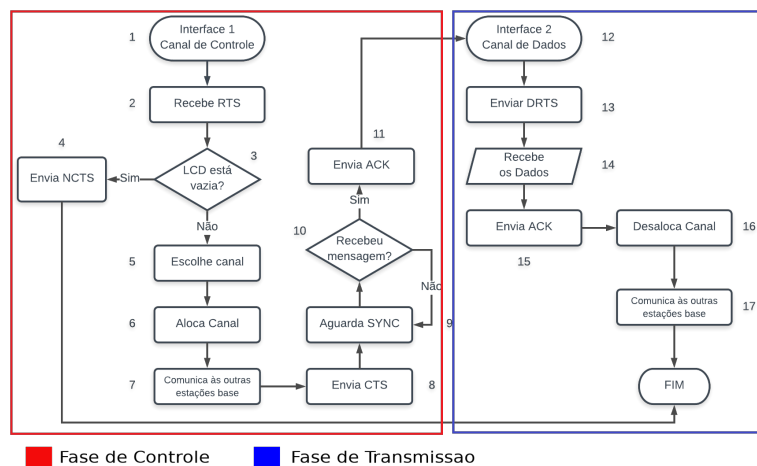
**Figura 3. Fluxograma do nó sensor - PDAC**

Ao sintonizar no novo canal, a fase de transmissão se inicia. Com isso, a estação base deve indicar ao nó central, que está pronta para receber os dados. Esta sinalização é feita a partir do envio do pacote *DRTS* (*Data Request to Send*)(9). Caso o dispositivo receba essa mensagem (10), a transmissão de dados é iniciada (11). Logo após receber os dados, a estação base envia um *ACK* para confirmar o recebimento e a comunicação é finalizada.

O fluxograma apresentado na Figura 4 descreve o comportamento do protocolo quando o mesmo é aplicado à uma estação base. Neste caso, o dispositivo dispõe de duas interfaces de comunicação sem fio, uma de controle e outra de dados. A interface de controle é inicializada em um canal fixo (1), que é conhecido por todos os dispositivos, enquanto a interface de dados sintoniza de acordo com as requisições e disponibilidade de canais. Ao receber uma requisição do nó central (*RTS*) (2), a estação base verifica se há canais disponíveis para serem utilizados (*LCD*). Se não houver nenhum canal disponível, a estação base envia um pacote de negação (*NCTS* - *Negative Clear to Send*) para o nó central e a comunicação é encerrada.

Caso a estação base encontre um canal (5), o mesmo deve ser retirado da *LCD* e adicionado à uma lista de canais em uso (*LCU*) (6). Em seguida a estação base em questão comunica às outras estações presentes que determinado canal foi alocado (7), e envia uma mensagem de confirmação ao nó central (*CTS*) (8). Após enviar o *CTS*, o nó central deve

confirmar o recebimento do canal (*SYNC*) (9). Caso a estação base receba este pacote, a mesma retorna um *ACK* (11) para o nó central, sinalizando que irá estabelecer uma conexão no canal alocado. Neste momento, a fase de controle se encerra.



**Figura 4. Fluxograma da estação base - PDAC**

A fase de transmissão é iniciada assim que um canal é alocado (12). Para indicar que está pronta para receber os dados provenientes do nó central, a estação base deve encaminhar um pacote *DRTS* (13) para este. Após receber todos os dados (14), a estação base envia um pacote de confirmação (*ACK*) (15), desaloca o canal (16) removendo-o da *LCU* e o inclui na *LCD*. Em seguida, comunica às outras estações base que determinado canal está disponível para uso (17) e por fim, encerra a comunicação.

#### 4. Análise

Para este trabalho foi necessário um estudo prévio sobre os protocolos DCAA e PDAC, bem como os padrões utilizados. Os experimentos foram realizados com os simuladores Castália e NS-3, ambos utilizando a linguagem C++. Os dados coletados referentes ao consumo energético dos nós sensores em seus respectivos ambientes, foram armazenados em arquivos do tipo *.csv* (*Comma-separated values*), o que posteriormente possibilitou a geração de gráficos utilizando o *software* livre *Gnuplot*.

Considerando ambientes com área de aproximadamente  $30 m^2$ , os experimentos deste trabalho foram feitos com base em quatro casos. Para dois primeiros casos, foram simulados utilizando o simulador Castália e o padrão IEEE 802.15.4, e para os dois outros, o simulador NS-3 e o padrão IEEE 802.11. Para obter um resultado mais preciso, foram realizadas 15 (quinze) execuções de cada um dos quatro cenários avaliados. Os dados obtidos são resultados de simulações as quais consideram o envio de 6400 pacotes de mensagem com conteúdo útil de 110 bytes de tamanho cada. Tais mensagens são transmitidas em intervalos de 150 milissegundos utilizando a faixa não licenciada de 2,4GHz. Durante a simulação, realizou-se a variação da quantidade de nós, para análise do comportamento de cada protocolo em condições distintas. Deste modo, foi estabelecido que a quantidade mínima por ambiente seria de 4 nós sensores, e o limite máximo seria 16. Gerando assim, 13 (treze) experimentos para cada caso avaliado.



A captura de estatísticas geradas em cada simulação foi realizada a partir de logs de mensagem, no Castália, e módulos nativos do próprio simulador, como o *Flow Monitor* do NS-3. Em ambos os casos, há métodos que fornecem informações sobre a conexão com base nas métricas que foram exigidas. Porém, informações sobre o consumo energético não são possíveis de serem extraídas por tais métodos, e para isso é necessário a utilização de outros componentes dos simuladores que serão apresentados adiante.

#### 4.1. Análise de Consumo Energético

No contexto de WBANs, a eficiência em relação ao consumo energético é considerado um dos fatores mais importantes a ser avaliado. Uma vez que, há sensores que podem ser expostos a locais de difícil acesso, o que de certa forma, acaba impossibilitando a troca de bateria [Motoyama ], se faz necessário um controle maior no que se diz respeito à vida útil dos dispositivos.

Muitos métodos são propostos a fim de promover uma otimização no quesito eficiência energética, como por exemplo reduzir o tamanho da bateria, adaptar o dispositivo para reduzir o consumo em determinados estados de funcionamento, estudar a possibilidade de um carregamento *on-body* [Gomes 2015], entre outros. Entretanto, a camada MAC que mais atua no processo de correção e controle de problemas, além de ser responsável por tratar diversos outros requisitos exigidos pelo cenário médico, acaba sendo uma influenciadora direta em relação ao consumo de energia dos dispositivos [dos Santos<sup>1</sup> and Motoyama ].

Para o presente trabalho, foram realizadas medições a fim de investigar o comportamento dos protocolos DCAA e PDAC em relação ao consumo energético em uma rede de dispositivos sem fio. Para tal, foram utilizados modelos fornecidos pelos próprios simuladores.

##### 4.1.1. Modelo fornecido pelo Castália

Tendo em vista a importância de tratar a questão da eficiência energética em uma rede de dispositivos sem fio, o simulador Castália dispõe de um gerenciador de recursos que é responsável, basicamente, por monitorar a energia consumida pelos dispositivos presentes na rede. A estrutura do gerenciador de recursos segue, de forma resumida, o fluxo apresentado na Figura 5. A fim de transmitir informações sobre o consumo energético e estado em dado momento, os dispositivos presentes enviam mensagens para o gerenciador de recursos sempre que ocorre alguma variação na comunicação ou periodicamente.

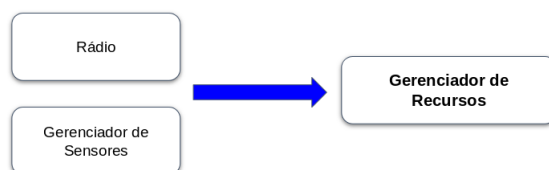


Figura 5. Estrutura do Gerenciador de Recursos no Castália.

O cálculo de consumo energético realizado pelo Castália segue o modelo mais simples presente na literatura, utilizando a carga atual ( $C_a$ ) do dispositivo e o tempo percorrido ( $T_p$ ). Para se obter o valor referente ao tempo percorrido ( $T_p$ ) é necessário ter conhecimento sobre o tempo anterior e o tempo atual. Já o valor da carga atual pode ser calculado com base nos valores referentes à carga antiga e à energia consumida ao enviar uma mensagem.

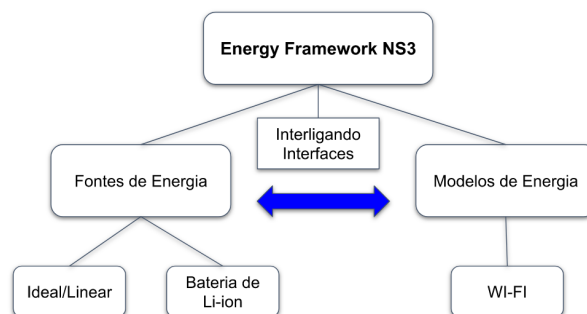
Com a possibilidade de possuir mais de dois dispositivos na rede, o resultado se dá à partir da média aritmética do consumo energético obtido por todos os nós presentes, sem levar em consideração o estado no qual este se encontra. Por padrão, os resultados são obtidos em *milijoules* (mJ), mas esta unidade pode ser facilmente alterada pelo usuário. Na Equação 1 o resultado é apresentado em *Watt*, que é equivalente a *Joules* por segundo, uma vez que a conversão já está sendo feita na própria equação.

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{ai} \cdot T_{pi}}{1000} \quad (1)$$

Além das funcionalidades citadas anteriormente, o gerenciador de recursos é capaz de fornecer dados mais específicos de cada dispositivo, como por exemplo, a taxa de desvio do relógio, que consiste na possível variação do tempo diante as condições apresentadas no ambiente em questão. E também a energia mínima que um nó é capaz de consumir. Embora o Castalia apresente uma base suficiente para realizar análise em relação ao consumo energético, muitas das funcionalidades que o simulador propõe ainda não estão totalmente operacionais [Boulis et al. 2011].

#### 4.1.2. Modelo fornecido pelo NS-3

De forma análoga ao Castália, o NS-3 apresenta um *framework* no qual são abordados alguns parâmetros e requisitos básicos para realizar análise e tratamento do consumo energético. O *Energy Framework* dispõe de módulos que permitem a investigação acerca da energia consumida pelo nó, além de ser capaz de mensurar, de forma criteriosa, o tempo de vida do mesmo sob condições específicas [Wu et al. 2011].



**Figura 6. Estrutura do módulo Energy Framework no Network Simulator 3. (Fonte: Adaptado de [Wu et al. 2011])**

Como pode ser visto na Figura 6, o *framework* é composto por um conjunto de fontes e modelos de energia que estão, de certa forma, conectados entre si. Basicamente,

do lado esquerdo tem-se a bateria do dispositivo, e do lado direito o componente em si, que irá consumir a carga da bateria. A partir da combinação destes módulos, é possível obter informações sobre o consumo energético de determinado dispositivo, a carga restante com base no valor da carga inicial da bateria, além de ser possível também obter informações sobre energia advinda de fatores externos.

Ao iniciar uma simulação utilizando o NS3, é atribuído um valor inicial para cada dispositivo. Durante o processo, um valor referente ao consumo é decrementado da carga inicial até que o mesmo se finalize ou até que a carga total seja totalmente consumida. Além da carga inicial ( $E_0$ ) o módulo responsável pelas fontes de energia, armazena também outras informações sobre o nó, como por exemplo, a corrente ( $I_i$ ), a tensão ( $V$ ) e o tempo ( $T_i$ ) associado a ele. Tais informações auxiliam no cálculo do consumo energético, como pode ser visto na Equação 2. O cálculo é realizado durante o período ( $T_i, T_{(i+1)}$ ). Para que os resultados extraídos sejam próximos aos de um ambiente real, os valores citados acima normalmente são especificados pelo usuário com base em informações obtidas a partir de baterias reais, por exemplo, ou de alguma referência já presente na literatura.

$$E_{(i+1)} = E_i + V \cdot (T_{(i+1)} - T_i) \cdot I_i \quad (2)$$

Considerando que em um ambiente real, os dispositivos disponíveis na rede podem operar com base em estados distintos, o NS-3 apresenta uma abordagem única para cada caso. Um rádio por exemplo, em dado momento pode estar atuando em modo receptor, transmissor, *idle* ou *sleep*. Portanto, se faz necessário estabelecer valores de consumo diferentes para cada estado, uma vez que alguns consomem mais energia que outros e isso pode impactar no resultado final.

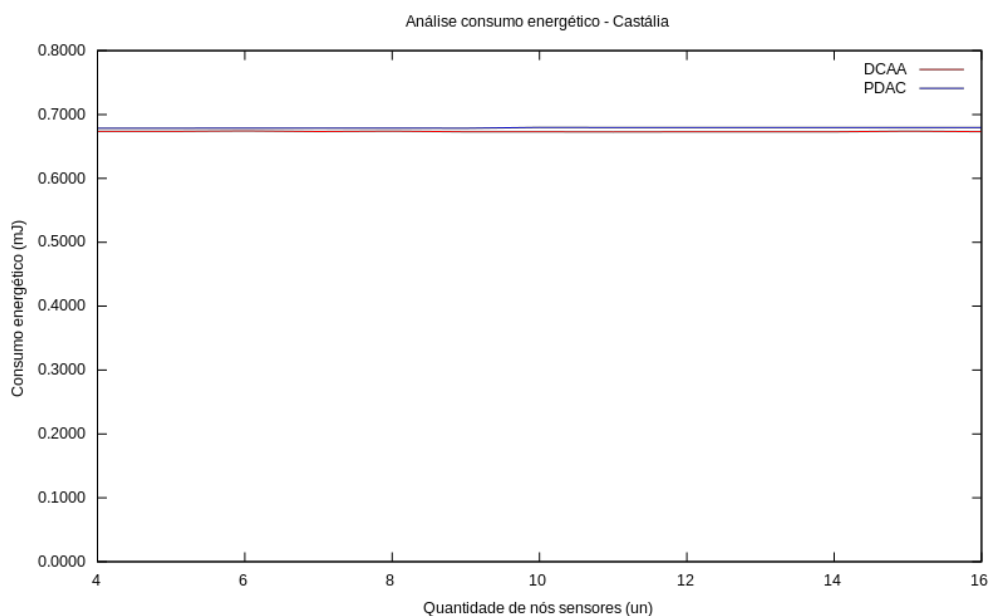
## 5. Resultados

Implementados os protocolos e modelos propostos, alguns experimentos foram configurados e executados conforme o que foi apresentado na Seção 4. Diante disso, a presente seção explora os resultados comparando os protocolos DCAA e PDAC entre si, tendo como essência o consumo energético em um cenário hospitalar.

Inicialmente, os experimentos foram realizados utilizando o simulador Castália. Para estas simulações, foram utilizados rádios *ZigBee* CC2420, que são disponibilizados pelo próprio simulador. Além disso, foi necessário a definição de valores padrões para alguns parâmetros exigidos pelo modelo. Ao iniciar a simulação, o valor da bateria completamente carregada equivale a 18720 *joules*, o que representa duas pilhas recarregáveis comuns. A taxa de consumo por período e o intervalo para realizar o cálculo foram configurados para 6 *milliwatts* e 1000 milissegundos respectivamente, bem como apresentado por [Boulis et al. 2011].

Nestas condições, o gráfico apresentado pela Figura 7 exibe o consumo médio de energia por número de nós presentes na rede. Ao analisar o gráfico nota-se uma evidente diferença, com média de aproximadamente 0.00583 *milliwatts* entre os protocolos. É possível constatar que o PDAC consome mais energia que o DCAA em todos os pontos presentes. Em contrapartida, analisando ambos os protocolos com base na taxa de entrega de dados, o PDAC prevalece. Tal resultado se dá pelo fato de que o PDAC acaba consumindo mais energia em sua fase inicial. Isto devido ao processo de escolha e alocação de canais entre as estações base. Além de dispor de uma quantidade maior de mensagens

de controle. Consequentemente, faz-se necessário a transmissão de 7 (sete) mensagens, enquanto o DCAA utiliza apenas 4 (quatro).

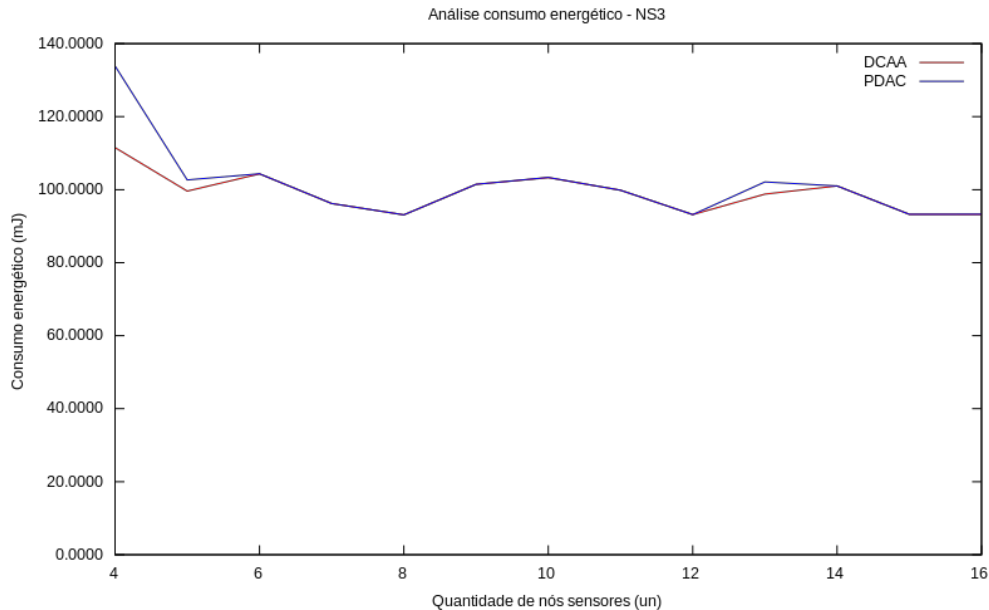


**Figura 7. Gráfico referente aos resultados obtidos pelo simulador Castália**

Com o objetivo de contribuir com a pesquisa e futuramente otimizar o protocolo proposto por [Cremonesi et al. 2017] em relação à eficiência energética, neste trabalho os protocolos e modelos apresentados foram adaptados para reproduzirem os mesmos cenários utilizando o simulador NS-3. Essa escolha foi feita considerando que a aplicação deste vem crescendo progressivamente no ambiente acadêmico. Assim como nas configurações do Castália, antes de realizar as simulações, foram necessários definir alguns valores padrões para o modelo. Seguindo [Henderson et al. 2008], os valores da carga inicial e corrente foram inicializados com 0.1 *joule* e 0.0174 amperes, respectivamente.

Diante tais configurações, o gráfico representado pela Figura 8, de forma análoga ao anterior, mostra o consumo médio de energia por número de nós presentes na rede. Entretanto, apesar de os resultados apontarem uma diferença média de aproximadamente 2.23 *milliwatts* entre os protocolos, e de o DCAA, na maioria dos pontos, apresentar um desempenho melhor que o PDAC no que se diz respeito à eficiência energética, nesta segunda abordagem, é observada uma proximidade no comportamento de ambos.

Para investigar o motivo de tal efeito, foi necessário realizar uma análise além do consumo energético. Após executar novamente os experimentos e examinar cuidadosamente o comportamento de ambos os protocolos durante o processo, foi possível observar que o DCAA, por vezes, apresentou um número maior de retransmissões, além de enfrentar uma certa ineficiência na fase de pareamento. Estes fatores acabam impactando significativamente no consumo energético total.



**Figura 8. Gráfico referente aos resultados obtidos pelo simulador NS3**

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma avaliação do consumo energético referente aos protocolos PDAC e DCAA, além da comparação entre eles. Ao explorar os resultados obtidos é possível concluir que, em geral, o primeiro apresenta um consumo de energia levemente superior. Entretanto, o PDAC é dotado de funcionalidades que são favoráveis no que se diz respeito a uma comunicação de melhor qualidade. Apresentando um controle e alocação de canais mais robusto e eficiente. O PDAC ainda garante melhor desempenho relativos à *error rate* e vazão de dados. O que o credencia como um protocolo propício para ser aplicado em WBANs.

Considerando a importância da expansão da vida útil dos dispositivos sem fio em cenário hospitalar, como trabalho futuro espera-se desenvolver modelos otimizados para análise do consumo energético de tais dispositivos dispendo como base o protocolo PDAC. Além disso, propomos ainda a avaliação do consumo em uma rede provida de múltiplas estações bases. Uma vez que tal cenário apresenta as condições extremas proporcionadas por um ambiente hospitalar, e os resultados obtidos, de certa forma, tendem a condizer com a realidade.

## Referências

- Augustin, I., Ferreira, G. P., and Yamin, A. C. (2008). Grade computacional como infraestrutura para a computação pervasiva/ubíqua. *ERAD-Santa Cruz do Sul*.
- Baker, S. D. and Hoglund, D. H. (2008). Medical-grade, mission-critical wireless networks [designing an enterprise mobility solution in the healthcare environment]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 27(2).
- Boulis, A. et al. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*, 83.

- Cremonesi, B. M., Vieira, A. B., Nogueira, M., and Nacif, J. A. (2017). Um protocolo de alocação dinâmica de canais para ambientes médicos sob múltiplas estações base. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, volume 35.
- Crow, B. P., Widjaja, I., Kim, J. G., and Sakai, P. T. (1997). Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications magazine*, 35(9):116–126.
- de Carvalho, S. T., Copetti, A., and Loques Filho, O. G. (2011). Sistema de computação ubíqua na assistência domiciliar à saúde. *Journal Of Health Informatics*, 3(2).
- dos Santos<sup>1</sup>, N. and Motoyama, S. Proposta de uma plataforma de larga escala para monitoração de pacientes.
- El Azhari, M., El Moussaid, N., Toumanari, A., and Latif, R. (2017). Equalized energy consumption in wireless body area networks for a prolonged network lifetime. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017.
- Gislason, D. (2008). *ZigBee wireless networking*. Newnes.
- Gomes, M. P. (2015). Controle de acesso ao meio (mac) baseado em polling flexível e ponderado para rede corporal de sensores sem fio.
- Henderson, T. R., Lacage, M., Riley, G. F., Dowell, C., and Kopena, J. (2008). Network simulations with the ns-3 simulator. *SIGCOMM demonstration*, 14(14):527.
- Hiep, P. T. and Hoang, N. H. (2014). Payload and power consumption analysis of ieee802.15.6 based wban with csma/ca. In *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2014 International Conference on*, pages 500–505. IEEE.
- Jung, B. H., Akbar, R. U., and Sung, D. K. (2012). Throughput, energy consumption, and energy efficiency of ieee 802.15.6 body area network (ban) mac protocol. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, pages 584–589. IEEE.
- Lee, B., Yun, J., and Han, K. (2011). Dynamic channel adjustable asynchronous cognitive radio mac protocol for wireless medical body area sensor networks. In *Communication and Networking*, pages 338–345. Springer.
- Lima, M. N. (2010). Saúde móvel-conceitos, iniciativas e aplicações. *Curitiba: Clube de Autores*.
- Motoyama, D. S. Controles de acesso ao meio para redes de área corporal sem fio (wban-wireless body area network).
- Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3):1658–1686.
- Salayma, M., Al-Dubai, A., and Romdhani, I. (2016). Reliability and energy efficiency enhancement in wireless body area networks for e-health. In *Open Innovations Association (FRUCT), 2016 19th Conference of*, pages 203–211. IEEE.
- Wu, H., Nabar, S., and Poovendran, R. (2011). An energy framework for the network simulator 3 (ns-3). In *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, pages 222–230. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).

Yu, J.-Y., Liao, W.-C., and Lee, C.-Y. (2006). A mt-cdma based wireless body area network for ubiquitous healthcare monitoring. In *Biomedical Circuits and Systems Conference, 2006. BioCAS 2006. IEEE*, pages 98–101. IEEE.