

Um Protocolo de Alocação Dinâmica de Canais para Ambientes Médicos sob Múltiplas Estações Base

Bruno M. Cremonezi¹, Alex B. Vieira¹, Michele Nogueira², José A. M. Nacif³

¹Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

²Depto. de Informática – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

³Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas – Universidade Federal de Viçosa (UFV)

brunomarques@ice.ufjf.br, alex.borges@ufjf.edu.br

michele@inf.ufpr.br, jnacif@ufv.br

Abstract. *With estimates predicting a growth up to 3 billion wearable sensors by 2025, health monitoring over wireless networks is at the same time increasingly popular and a challenging task. Prone to high error rates and interferences, wireless transmission is vulnerable to high latency and low throughput, being a serious risk to users. In general, existing solutions have addressed interferences in both wireless body and wireless local area networks. However, they rarely cope with the problem taking directly into account the minimum requirements for medical applications. This work presents PDAC, a medical application aware MAC-layer Protocol for Dynamic Channel AlloCation. PDAC offers a solution to reduce interferences and allows the cooperation of multiple base stations in dense medical-hospital environments. When using PDAC, base stations can work collaboratively to reach the requirements for medical applications. Simulation results indicate that, in a realistic medical environment, PDAC is able, in average, to increase throughput by 30% and reduce latency by 40%, when compared to state-of-the-art frequency allocation protocols.*

Resumo. *Com estimativas de crescimento de até 3 bilhões de sensores vestíveis até 2025, o monitoramento da saúde por redes sem fio tem se tornado cada vez mais popular e desafiador. Sujeitas a altas taxas de erros e interferências, as transmissões sem fio são vulneráveis a alta latência e baixa vazão, resultando em sérios riscos para os usuários. Em geral, as soluções existentes tratam de interferências em redes corporais e redes locais sem fio. Entretanto, raramente, focam neste problema considerando os requisitos mínimos exigidos pelas aplicações médicas. Este trabalho apresenta o PDAC, um protocolo da camada MAC ciente dos requisitos das aplicações médicas promovendo a alocação dinâmica de canais em cenários hospitalares densos. O PDAC oferece uma solução para reduzir interferências e permite a cooperação de múltiplas estações base no mesmo ambiente médico-hospitalar. Ao utilizar o PDAC, as estações base trabalham de forma colaborativa para atender aos requisitos necessários para as aplicações médicas. Os resultados de simulação indicam que, em um ambiente médico realista, o PDAC é capaz de, em média, aumentar a vazão em 30% e reduzir a latência em 40% quando comparado com protocolos de alocação de frequência do estado da arte.*

1. Introdução

Os sistemas de saúde vêm se beneficiando cada vez mais da evolução das tecnologias de comunicação sem fio [Omeni et al. 2008]. Estimativas preveem que a população mun-

dial utilizará até 2025 em torno de 3 bilhões de sensores vestíveis com capacidade de comunicação, como as redes corporais e as redes locais sem fio. As redes corporais e as redes locais sem fio oferecem a transmissão dos dados monitorados por sensores incorporados sob ou sobre a pele dos usuários [Movassaghi et al. 2014]. Tipicamente, as redes corporais transmitem os dados a um nó coordenador (ex. um *smartphone*) que, por sua vez, envia os dados para um repositório central ou nuvem, onde são finalmente armazenados e analisados. Tais análises podem resultar em alertas que auxiliam no atendimento emergencial de pacientes, ex. no caso de um ataque cardíaco ou uma parada respiratória.

As redes sem fio apresentam diversas limitações, em geral, causadas pelas características inerentes da comunicação sem fio e/ou por utilizarem a faixa não licenciada do espectro de radiofrequência. É comum, por exemplo, que duas ou mais redes corporais diferentes utilizem simultaneamente o mesmo canal de comunicação sem fio (ou canais parcialmente sobrepostos) [Fang et al. 2010]. Isto potencializa interferências, acarretando um maior número de retransmissões e perdas de pacote na rede. Como consequência, essas redes apresentam altas latências e queda da vazão [Fang et al. 2010]. Particularmente, em um ambiente médico-hospitalar, observa-se um aumento na densidade de redes corporais e redes locais sem fio [Baker and Hoglund 2008, Fang et al. 2010]. Diante do número reduzido de canais sem sobreposição na faixa de frequência não licenciada, quanto maior a densidade, maior a latência e menor a vazão. Este cenário é especialmente desafiador em aplicações médicas, nas quais os requisitos de latência e perda de pacotes são menores que, respectivamente, 200 ms [Baker and Hoglund 2008] e 1% [Yu et al. 2006].

Para reduzir este problema, diversos trabalhos propuseram técnicas de alocação de canais entre as redes corporais co-localizadas [Doost-Mohammady and Chowdhury 2012, Phunchongharn et al. 2010, Lee et al. 2011]. Estas técnicas permitem a utilização simultânea de diferentes canais pelas redes corporais para transmissão de dados, evitando interferências. Geralmente, tais mecanismos e técnicas de alocação de canal dependem de uma entidade centralizada. Entretanto, em um ambiente médico, as abordagens centralizadas podem comprometer o desempenho da rede por sobrecarregarem a entidade centralizadora devido à alta densidade de redes corporais. Além disso, raramente as técnicas de alocação de canais são projetadas levando em conta os requisitos de latência e vazão específicos para as aplicações médicas.

Este trabalho apresenta PDAC (*Protocol for Dynamic Channel Allocation*), um protocolo da camada MAC para alocação dinâmica de canais ciente dos requisitos de aplicações médicas. O PDAC oferece uma solução para reduzir interferências entre redes corporais sem fio e permite a existência de múltiplas estações base no mesmo ambiente médico-hospitalar. Ao utilizar o PDAC, as estações base trabalham de forma colaborativa para atender aos requisitos das aplicações médicas. O protocolo PDAC é inspirado em uma solução gulosa do problema de coloração de grafos. Desta forma, assume-se um grafo de interferências entre as estações base, no qual cada vértice representa uma estação base e cada aresta representa conflitos entre os canais utilizados pelas estações base. Cada canal disponível é mapeado nas cores de um problema de coloração de grafo. De modo geral, cada estação base busca uma solução local para a alocação de canais e comunica para as estações bases conflitante o seu atual estado. Essa informação é utilizada por outras estações para auxiliar na alocação de frequências, buscando reduzir interferências.

A avaliação de desempenho do protocolo foi realizada por simulações no Castalia [Boulis et al. 2011] sob cenários realistas de um ambiente médico. Os resultados demonstram que o PDAC é capaz, em média, de aumentar a vazão da rede em 30% e reduzir a latência em 40%, quando comparado com uma abordagem de alocação de canais representativa da literatura. O PDAC, quando utilizado com múltiplas estações base, atende aos requisitos de atraso e perdas de pacotes das aplicações médicas, apresentando latência média de 120 ms e perdas inferiores a 0,01%.

Este artigo está organizado como segue. A Seção 2 discute os trabalhos relacionados. Na Seção 3, descrevemos o modelo do sistema e detalhamos o novo protocolo. A Seção 4 apresenta a avaliação de desempenho do PDAC. Finalmente, a Seção 5 discute as conclusões e direções futuras deste trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Em geral, os protocolos da camada MAC têm o objetivo de reduzir interferências, proporcionando menor latência e maior vazão na transmissão dos dados. Uma abordagem comum consiste no uso de múltiplos canais de transmissão [Soua and Minet 2011]. Em [Kyasanur and Vaidya 2006], os autores estudaram o uso de múltiplos canais em redes *ad hoc* sem fio. Eles investigaram o impacto do número de interfaces na capacidade da rede e concluíram que mesmo em cenários nos quais o número de interfaces é menor que o número de canais disponíveis, a rede apresenta ganhos em vazão e latência. Apesar dos benefícios no uso de múltiplos canais, o processo de alocação ainda é desafiador.

Os protocolos multicanais, em geral, seguem o comportamento do protocolo DCAA de alocação dinâmica de canais [Lee et al. 2011]. Esse protocolo oferece uma abordagem de salto de frequências para alocação de canais a uma comunicação entre estação base e cliente. A estação base continuamente altera sua sintonização entre os canais, permanecendo em um canal por um curto intervalo de tempo. O cliente que deseja iniciar uma comunicação escolhe um canal aleatório e envia uma requisição. Caso o canal esteja ocupado ou a estação base não responda, o cliente salta para o próximo canal e reinicia o processo de solicitação de comunicação. Caso a estação base responda à requisição, a transmissão dos dados é iniciada. A abordagem de Lee et al. simplifica o processo de alocação e de gerência dos canais. No entanto, quanto maior o número de canais disponíveis, menor a probabilidade de o cliente sintonizar no mesmo canal da estação base. Este problema é chamado de *surdez*, ocorrendo quando o cliente tenta se comunicar em um canal diferente do que a estação base está sintonizada. Assim, o DCAA não atende os requisitos de latência para as aplicações médicas, além de um eventual desperdício de energia durante a tentativa de pareamento.

A fim de evitar o problema de *surdez*, alguns trabalhos utilizam uma abordagem híbrida de alocação de canais [Phunchongharn et al. 2010, Doost-Mohammady and Chowdhury 2012]. As estratégias híbridas assumem que cada estação base está equipada com múltiplas interfaces de comunicação sem fio. Por exemplo, [Phunchongharn et al. 2010] apresentaram um sistema multicanais no qual um canal é dedicado ao controle e outro à transferência dos dados. Nesse sistema, a transmissão dos dados ocorre em dois estágios. O canal de controle é utilizado para o *handshaking*, no qual a frequência e a potência de transmissão são negociadas e posteriormente o cliente sintoniza um canal dedicado para a transmissão dos dados.

Em [Doost-Mohammady and Chowdhury 2012], os autores também apresentaram um protocolo seguindo a divisão em canal de controle e canal de dados. Entretanto, ao invés de um único canal de dados, o protocolo utiliza múltiplos canais de dados. Além disso, os autores ofereceram formas de evitar interferências em aparelhos médicos presentes no ambiente hospitalar e apresentaram uma diferenciação de QoS entre os clientes.

Em nenhum desses trabalhos, cenários com múltiplas estações base são considerados. As etapas de controle e transmissão de dados são conduzidas por uma única estação base, sujeita à sobrecarga em um ponto único. Entretanto, em um ambiente médico, é observada a presença de múltiplas estações base compartilhando uma mesma região geográfica [Baker and Hogleund 2008]. As estações base próximas, operando no mesmo canal, levam a um aumento no número de interferências, implicando em um aumento da latência e uma degradação na vazão. Esse problema pode ser reduzido caso as estações possuam um mecanismo de comunicação entre elas, coordenando o uso das frequências na alocação de canais aos clientes. Porém, assegurar a sincronização entre as estações base adiciona um novo nível de complexidade ao problema de alocação de frequências.

Diferente desses trabalhos prévios, este trabalho foca na transmissão dos dados considerando os requisitos das aplicações médicas. Além disso, o protocolo proposto tem como base a coordenação entre múltiplas estações base.

3. Protocolo Dinâmico de Alocação de Canais

Esta seção detalha o protocolo PDAC. A Subseção 3.1 apresenta o modelo do sistema seguido neste trabalho. A Subseção 3.2 mostra uma visão geral do protocolo onde cada de suas fases é explicada.

3.1. Modelo do Sistema

A Figura 1 ilustra a arquitetura do ambiente hospitalar considerada nesta trabalho, ressaltando os dois principais tipos de comunicação entre os dispositivos: a comunicação dentro da rede corporal sem fio (intra-WBAN) e a comunicação entre as redes corporais (inter-WBAN). Cada paciente possui um conjunto de sensores sem fio distribuídos ou implantados no seu corpo. Esses sensores monitoram a saúde do paciente coletando, por exemplo, dados sobre seus sinais vitais. Os sensores transmitem os dados coletados para um nó central (ex. um *smartphone*), situado na proximidade do paciente (cerca de 2 metros). O nó central, em conjunto com os nós sensores, compõe a rede corporal sem fio, sendo a comunicação entre eles do tipo intra-WBAN. Esta comunicação dentro da WBAN ocorre por meio de transmissões de baixa potência/curto alcance (ex. Zigbee, Bluetooth). Assim, neste trabalho pode-se considerar, sem perda de generalidade, que a comunicação intra-WBAN não causa interferências nas WBANs dos demais pacientes.

O nó central transmite os dados recebidos para uma estação base (comunicação inter-WBAN). A estação dá vazão a esses dados até um repositório de dados localizado em um centro médico ou na nuvem. Os dados são então armazenados e/ou analisados. É importante notar que, neste trabalho, denominamos estação base qualquer dispositivo controlador de uma rede, como exemplo, um ponto de acesso. Assim como [Doost-Mohammady and Chowdhury 2012, Phunchongharn et al. 2010], considera-se um sistema no qual a estação base não possui restrições de processamento.

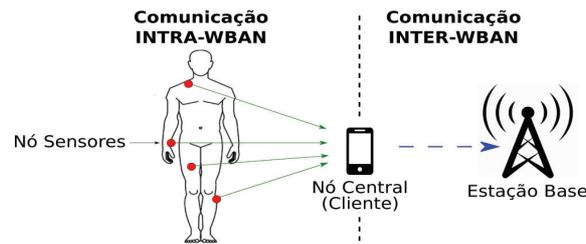


Figura 1. Visão geral do sistema.

Assume-se que a estação base tenha duas interfaces de rede sem fio: uma destinada à negociação de canais e outra à transmissão de dados. Essa característica permite a comunicação da estação base em dois canais simultaneamente, aumentando a taxa de transmissão e reduzindo o atraso na coleta dos dados [Soua and Minet 2011].

Assume-se ainda que, o nó central possui apenas uma interface de comunicação sem fio. Tanto as interfaces da estação base quanto as das WBANs podem sintonizar livremente em qualquer um dos canais disponíveis. Para uma maior economia de energia, todas as transmissões de dados ocorrem diretamente entre o nó central e a estação base, ou seja, em modo *single-hop* [Pešović et al. 2010]. Quando existirem múltiplas estações base no ambiente, assume-se que essas podem se comunicar por meio de um **canal confiável** (ex. uma conexão cabeada). Essa premissa é comum, uma vez que as estações podem se conectar por meio cabeado, com taxas de erro e latência muito inferiores às encontradas no meio sem fio. O PDAC foca na comunicação inter-WBAN, a qual é propensa a interferências. A comunicação intra-WBAN e a comunicação cabeada entre as estações base estão fora do escopo deste trabalho.

3.2. O Protocolo PDAC

No PDAC, os canais de comunicação são divididos em duas categorias: **canal de controle** e **canal de dados**. Ambos estão localizados em uma banda não licenciada do espectro de radiofrequência. As duas interfaces na estação base são denominadas de interface de controle e de dados. A interface de controle está sintonizada em um canal fixo conhecido por todos os nós centrais, enquanto a interface de dados sintoniza de forma adaptativa dentre os canais de dados disponíveis. Durante a comunicação inter-WBAN, a interface de controle é utilizada para negociar um canal de dados.

Um dos diferenciais do PDAC consiste na escolha apropriada e na alocação de canais de maneira distribuída e coordenada entre as estações base. A alocação de canais foi mapeada para um problema de coloração de grafos, onde dois vértices adjacentes não podem ser coloridos com a mesma cor. Suponha um grafo $G = (V, E)$, os vértices no conjunto V representam as estações base, e as arestas no conjunto E representam conflitos entre os canais utilizados pelas estações base. Cada cor representa um canal. Com base em uma solução gulosa, o PDAC evita de maneira distribuída as interferências e proporciona uma divisão de carga entre as estações base.

Cada estação base mantém um controle de quais canais estão ocupados e livres com base em um histórico de alocação. Dessa maneira, a estação tem pleno controle sob o atual estado do canal. Seguindo o PDAC, o acesso ao meio é composto por duas fases. A primeira é chamada de **fase de controle**. Nela, o nó central negocia com a estação base

um canal de dados. Ao receber a requisição do nó central, a estação base envia um pacote para as outras através do canal confiável existente entre as estações informando que possui a intenção de alocar um determinado canal de dados. Caso não haja impedimentos (ex. todos os canais de dados ocupados), a estação base aloca o canal, enviando um pacote para a WBAN requisitante com tal informação, encerrando assim a fase de controle.

A **fase de transmissão** ocorre após a alocação do canal. O nó central sintoniza no canal negociado e espera um pacote para iniciar a transmissão dos dados. Nesse momento, a interface de dados sintoniza no canal alocado e envia o pacote esperado pelo nó central. Recebidos os dados, a estação base envia o pacote de confirmação para o nó central e encerra a comunicação. A estação base anuncia para as outras estações que o canal de comunicação está livre e pode ser alocado para outras comunicações (detalhes são apresentados nas próximas subseções).

De modo geral, o protocolo traz uma abordagem de alocação híbrida de canais. Ele mantém uma interface da estação base em um canal estático e aloca um canal para a outra interface através de uma estratégia dinâmica. Essa abordagem tem o objetivo de iniciar uma comunicação entre a estação base e o nó central para evitar problemas de *surdez*, comuns em uma abordagem totalmente dinâmica. A partir desse contato inicial, o transmissor e receptor negociam qual canal de dados utilizar, evitando maiores atrasos quando comparado a um processo de tentativa e erro para encontrar qual canal a estação base está sintonizada [Lee et al. 2011]. Esta abordagem não necessita qualquer sincronização de tempo entre a estação base e o nó central.

Entretanto, a alocação híbrida de canais resulta em duas desvantagens. Primeiro, o canal de controle pode vir a tornar um gargalo quando o número de canais de dados disponíveis é muito grande. Segundo, um canal poderá ser subutilizado, uma vez que o canal de controle é utilizado apenas para controle. Como forma de contornar o problema de baixa utilização dos canais, um mecanismo de agregação de canais é proposto. De maneira geral, utilizando a agregação de canais, a estação base passa a alocar uma determinada quantidade de canais adjacentes, se disponível, para o nó central. Dessa forma, utilizamos uma técnica de agregação de canais para melhorar a largura de banda, minimizar atrasos e aumentar, de maneira geral, as taxas de transmissão [Rehmani et al. 2012].

3.2.1. Fases de controle e de transmissão

A Figura 2 apresenta a sequência de mensagens do protocolo PDAC. No PDAC, cada estação mantém três estruturas de dados. A primeira é a lista de canais disponíveis (LCD), contendo todos os canais disponíveis para uso pela estação base. A segunda estrutura é a lista de canais utilizados (LCU), que representa todos os canais já alocados naquela estação. E por fim, a estação base mantém uma lista de canais bloqueados (LCB) cujo objetivo é manter o controle de quais canais estão usados por outras estações base.

A fase de controle é caracterizada pelo contato inicial entre um nó central desejando transmitir os dados e uma estação base (mensagens 1, 2, 3 e 4 em vermelho na Figura 2). Esta fase é iniciada quando o nó central envia um pacote de requisição RTS (mensagem 1) para a estação base. O PDAC não considera nenhum tipo de diferenciação de serviço, logo todos os nós centrais acessam ao canal de controle com direitos iguais seguindo o protocolo de acesso ao meio CSMA/CA. A interface de controle da estação recebe esta requisição e busca em sua lista LCD um canal disponível. Caso a estação base

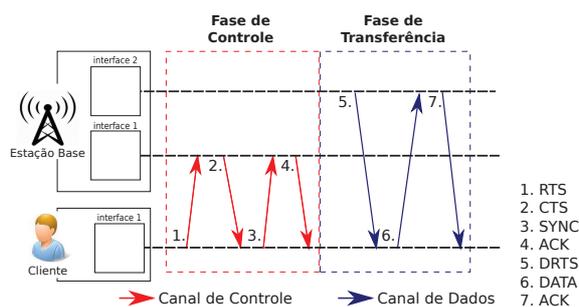


Figura 2. Diagrama de sequência do protocolo PDAC.

não encontre um canal disponível, ou seja, se a lista LCD estiver vazia, a estação envia um pacote de negação chamado de NCTS indicando impossibilidade de alocar um canal para a transmissão. Ao receber esse pacote de negação, o nó central espera um tempo aleatório para realizar uma nova requisição. Caso a estação base encontre um canal, esse canal é retirado da LCD e adicionado na LCU, indicando que o canal está sendo usado. A estação base então anuncia o canal alocado para as outras estações base, iniciando a fase de sincronização entre as estações (detalhes na Subseção 3.2.2).

Após o canal ser confirmado na fase de sincronização, o canal alocado (ou grupo de canais, detalhes na Seção 3.2.3) é enviado para o nó central via CTS. Após receber o CTS, o nó central envia um pacote SYNC (mensagem 3) confirmando o recebimento do canal. A estação base, ao receber esse pacote, envia um pacote de ACK (mensagem 4) confirmando que em breve irá se comunicar com o nó central no canal alocado. Ao receber o ACK, o nó central sintoniza no novo canal, encerrando assim a fase de controle.

É importante observar que essa fase é bastante similar a mecanismos clássicos de RTS/CTS já utilizados na literatura, onde é necessária a adição de um campo no cabeçalho do pacote CTS usado para o envio do canal alocado e outro campo representando a quantidade de canais adjacentes que foram alocados. O tamanho desses cabeçalhos varia de acordo com a quantidade de canais disponíveis para a alocação e quantos canais adjacentes podem ser alocados.

A fase de transmissão é iniciada quando um canal é adicionado na LCU e segue as mensagens 5, 6, 7 e 8 em azul na Figura 2. Todos os canais presentes na LCU possuem um nó central esperando por um pacote DRTS para iniciar a transmissão. A segunda interface utiliza a LCU como uma fila de sintonização. A cada canal sintonizado, a estação base envia um pacote DRTS (mensagem 5) anunciando que está pronta para a recepção dos dados. Após receber este pacote, o nó central inicia a transmissão dos dados (mensagem 6). Após receber os dados, a estação base envia um pacote de confirmação ACK (mensagem 7), retira o canal utilizado da LCU e inclui na LCD. A estação base então envia um pacote com o canal liberado para as outras estações base iniciando, novamente, a fase de sincronização entre estações (Subseção 3.2.2). Se ao fim desse processo a LCU estiver vazia, a interface de dados entra em um modo ocioso. Caso a LCU ainda possua elementos, a fase de transmissão é reiniciada.

3.2.2. Sincronização entre estações

A sincronização entre as estações ocorre após a estação base receber um RTS e após uma transmissão de dados bem sucedida, isto é, após um ACK ser enviado para o nó central. Como mencionado anteriormente, o PDAC segue uma solução para o problema

tradicional de coloração de grafos. No entanto, algumas alterações do problema clássico foram realizadas. A primeira alteração foi a adição de uma cor neutra. Consideramos a cor neutra sendo a única cor permitida a ser usada em dois nós adjacentes. No PDAC, um vértice com a cor neutra representa uma estação base com a interface de dados ociosa. Outra mudança é a possibilidade de um vértice estar colorido com mais de uma cor. Com essa alteração, assumimos a possibilidade da estação base alocar mais de um canal para a transmissão dos dados.

Ao início do protocolo, toda estação base está marcada somente com a cor neutra. Cores neutras adjacentes refletem contato entre estações base ociosas, que por definição, não apresentam conflitos. O protocolo apresentado, ao alocar um canal, substitui a cor neutra de uma estação por outra cor. Para realizar tal coloração, utilizamos um algoritmo guloso de coloração de grafos, composto de duas operações: a adição de cor a um vértice e remoção de uma cor. Quanto uma estação base perde todas as suas cores, atribuímos a ela novamente a cor neutra.

O protocolo PDAC segue com duas operações básicas nas estações base: a alocação de canais e a liberação de canais. A alocação de canais ocorre no momento em que a estação base recebe um RTS. Após receber uma requisição, a estação base busca um canal (ou um conjunto de canais, detalhes na Subseção 3.2.3) em sua LCD. Caso a busca retorne sucesso, a estação base envia uma mensagem de bloqueio BLOCK contendo os canais bloqueados para as estações base adjacentes.

A estação base receptora desse pacote de bloqueio adiciona esses canais na lista LCB. Esses canais serão retirados somente após receber um pacote de liberação da estação base de origem do pacote de bloqueio. Todo canal presente na LCB não pode ser utilizado na LCD. Uma estação base pode ter os mesmos canais bloqueados por mais de uma estação base. Neste caso, esse canal poderá ser utilizado somente após a liberação por todas as estações base. Após uma transmissão bem sucedida, a estação base envia um pacote de liberação FREE com os canais utilizados na transmissão. A estação base, após receber esse pacote, retira todos os canais bloqueados recebidos dessa estação base. Caso não haja nenhuma outra estação bloqueando esse canal, ele poderá ser utilizado na LCB.

O protocolo PDAC não garante a solução ótima. A estratégia gulosa previne que estações base adjacentes utilizem o mesmo canal de forma simultânea. Assim, com a comunicação entre as estações base, pode-se dizer que o PDAC evita que nós centrais causem interferência entre si na transmissão dos dados. Além disso, como o número de frequências disponíveis é relativamente baixo, um custo computacional baixo é esperado. Desta forma, pode-se dizer que o PDAC é capaz de prover uma transmissão livre de interferências, independente do número de estações base.

3.2.3. Agregação de Canais no PDAC

Neste trabalho, a estação base possui a função de gerenciar o estado atual do espectro de radiofrequência, além de servir como destino local para os dados das WBANs. No protocolo PDAC, durante o gestão do espectro, a estação base divide o estado dos canais em três categorias: (1) canais livres, (2) canais ocupados e (3) canais bloqueados. Os canais livres representam canais que podem ser alocados para a transmissão de dados, os canais ocupados representam canais que já estão alocados naquela estação base e os canais bloqueados são canais sendo utilizados por outras estações base. Divide-se a categoria de

canais livres em duas subcategorias: (1-1) canais de borda e (1-2) canais centrais. Os canais de borda são canais adjacentes de canais bloqueados ou ocupados (susceptíveis a interferências de sobreposição de canais), e os canais centrais são adjacentes de canais de borda ou de outros canais centrais. Ao receber uma requisição de canal pelo nó central, o objetivo da estação base é oferecer a maior banda possível, evitando ao máximo a alocação de canais de borda (evitando interferências de canais sobrepostos). O canal de borda mantém uma distância segura entre dois blocos de canais alocados.

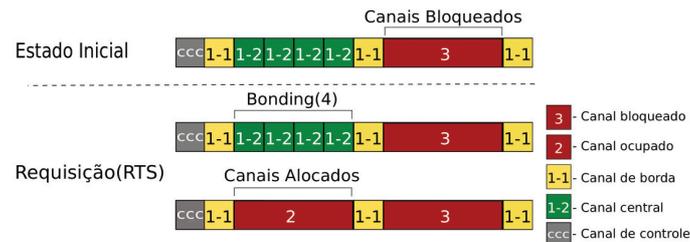


Figura 3. Exemplo do processo de gerenciamento, união e alocação de canais após uma requisição (RTS) de um nó central, sendo que no máximo 4 canais podem ser unidos por vez.

Consideramos elegíveis para as técnicas de agregação de canais apenas os canais centrais. A Figura 3 ilustra o processo de alocação e de bloqueio de canais. Após receber uma requisição do nó central, a estação base busca por k canais centrais disponíveis. Caso encontre, a estação aplica técnicas de agregação de canais e aloca esse canal agrupado para o nó central. Caso não encontre, a estação base realiza uma nova busca decrementando o k , sendo assim, desta vez buscando $k - 1$ canais centrais disponíveis. O processo se repete até que a estação base encontre uma parcela de canais disponíveis ou quando k for igual a 0, significando que não existe nenhum canal central disponível. Neste momento, a estação base inicia uma busca por um canal de borda para a alocação. Se encontrado, esse canal é alocado para a comunicação. Caso contrário, a estação base nega a comunicação com o nó central alegando que não existem canais disponíveis para a comunicação.

4. Avaliação do Sistema

O protocolo PDAC foi avaliado através de simulações de cenários de um ambiente hospitalar utilizando o Castalia [Boulis et al. 2011]. O Castalia é um simulador de redes baseado no OMNeT++ [Varga et al. 2001] e é utilizado por pesquisadores para testes de algoritmos e protocolos com base em modelos reais de canal sem fio e rádio. O protocolo PDAC, neste trabalho, foi implementado sobre o protocolo T-MAC [Van Dam and Langendoen 2003], porém o PDAC pode ser implementado sob qualquer protocolo que se utilize de RTS/CTS.

Neste trabalho, consideramos que cada nó central de uma WBAN se comunica com a estação base utilizando o rádio Zigbee CC2420 operando na faixa de 2,4 Ghz. Esse rádio é capaz de operar em até 16 canais diferentes com 20 MHz de largura, cada. Nas simulações, foi fixada a largura de banda de cada canal para até 250 kbps. Note que, durante as simulações, variamos o número de canais disponíveis (4, 8 e 16 canais disponíveis) para avaliar o desempenho do novo protocolo em função dos canais disponíveis. Variamos também o número de canais que podem ser agregados (2, 4 e 8 canais).

Devido a limitações no simulador, interferências entre os canais foram desconsideradas. Consideramos cada campo adicionado no pacote CTS com o tamanho de 4 bits, cada.

As simulações são conduzidas em dois ambientes médicos realistas: um departamento de emergência sobrecarregado e um ambiente calmo, como uma sala de radiologia. Os dois cenários contam com uma área de 30 m² e estações base fixas de forma que não ocorra problemas de terminal oculto. Os pacientes e seus nós centrais são distribuídos no ambiente seguindo uma distribuição uniforme e estão no raio de alcance das estações base. A Tabela 1 sumariza as principais características de cada aplicação médica. Como esperado, cada cenário possui suas próprias características e maiores detalhes podem ser encontrados em [Baker and Høglund 2008].

Tabela 1. Aplicações médicas e carga de dados.

Aplicação médica	Nós centrais Dpt. Emergência	Nós Centrais Radiologia	Pacotes /s	Tamanho Pacote (kb)
Diagnóstico	3	1	5	5,1
Telemetria	12	9	5	2,6
Bomba de Infusão	10	10	1	1,0

Durante as simulações, os dispositivos de todos os pacientes possuem a mesma prioridade no acesso ao canal. Cada dispositivo gera um fluxo de dados de acordo com sua aplicação (vide Tab. 1). Os nós centrais são iniciados de maneira sequencial de tal forma que a cada 2 segundos um novo nó central é adicionado ao ambiente simulado. Ao término da simulação, todos os nós centrais são encerrados ao mesmo tempo.

Cada simulação dura 16 minutos e o minuto inicial é descartado em função do período transiente da simulação. A não ser que mencionado de outra forma, os resultados apresentados são referentes a 30 execuções de cada ambiente simulado, com um nível de confiança de 95%. Para analisar os desempenhos dos protocolos simulados, as seguintes métricas foram utilizadas:

- **Latência:** o tempo médio gasto para um pacote ser enviado de uma WBAN para a estação base, incluindo tempos de propagação, transmissão, processamento e em filas.
- **Goodput:** a proporção média entre a quantidade de dados entregues e o tempo decorrido para sua entrega. Consideram-se neste sentido apenas dados úteis de fato, sendo desconsideradas as retransmissões e os cabeçalhos dos protocolos.
- **Taxa de perda de pacotes:** a proporção média de pacotes que foram recebidos incorretamente ou descartados por *timeout* entre todos os pacotes enviados. De acordo com [Baker and Høglund 2008], considera-se que aplicações médicas necessitam de taxa de perda de pacotes inferior a 0,01 e latência inferior a 200 ms.

4.1. Resultados

Inicialmente, comparamos o protocolo PDAC com o DCAA [Lee et al. 2011], um dos protocolos mais representativos da literatura quando se refere à alocação dinâmica de canais. Segundo, nós avaliamos o impacto do número de estações base disponíveis no desempenho do novo protocolo. Por último, avaliamos a melhora de desempenho do PDAC, quando utilizada a agregação de canais.

PDAC versus DCAA

Avaliamos o PDAC e o comparamos ao DCAA nos dois cenários médicos descritos anteriormente. De forma a realizar uma comparação justa, limitamos o PDAC a uma configuração equivalente à suportada pelo DCAA. Neste caso, o PDAC não faz uso de múltiplas estações e ambos os protocolos estão limitados ao uso de 4 canais de dados. Alteramos o número de canais disponíveis e as conclusões apresentadas se mantêm. Omitimos tais resultados por restrições de espaço.

A Figura 5 apresenta a função de distribuição de probabilidade acumulada da latência em dois cenários distintos, um departamento de emergência e uma sala de radiologia. Observe que, para um cenário de carga de dados baixa (sala de radiologia), o PDAC apresenta desempenho melhor que o DCAA. Neste caso, o novo protocolo tem uma latência média 1,4 vezes melhor que o DCAA. O PDAC apresentou uma taxa de entrega de 99,9% dos pacotes, enquanto o DCAA apresentou menos de 88% de taxa de entrega. Mais ainda, em mais de 45%, o *goodput* apresentado pelo PDAC foi de pelo menos 50 kbps, enquanto que em menos de 25% dos casos o DCAA atinge esta marca.

Em um cenário de carga de dados alta, como em um departamento de emergência médica, há uma degradação do desempenho em ambos os protocolos. Mais ainda, os pacotes entregues pelo DCAA têm latência média menor que a do novo protocolo. Porém, a taxa de perda que o PDAC apresenta é menor que o DCAA. Enquanto este apresentou cerca de 30% de perda, o PDAC teve em torno de 24%. Os valores de *goodput* encontrados seguem a mesma tendência da latência. Cerca de 25% dos casos no DCAA apresentam mais de 50 kbps, enquanto cerca de 18% do PDAC atingem a mesma marca.

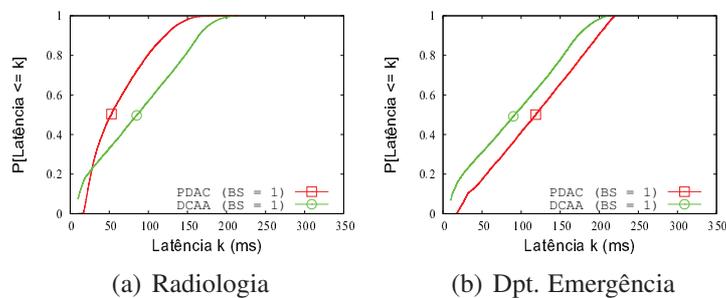


Figura 4. Distribuição de latência apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC.

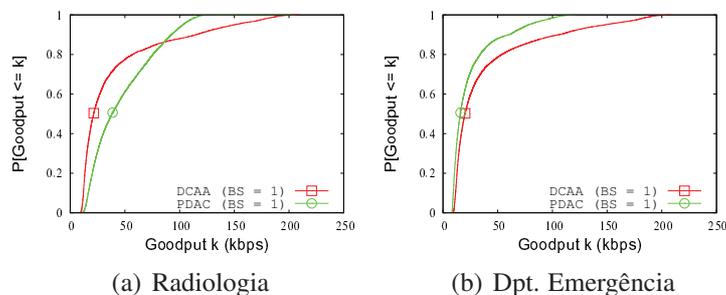


Figura 5. Distribuição de *goodput* apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC.

Em suma, apesar da melhoria da latência em um ambiente com baixa carga, os protocolos avaliados não conseguem atender às demandas de aplicações médicas em um

cenário com alta demanda de recursos. Neste sentido, há evidências que o uso de uma única estação base pode não ser apropriado em um ambiente médico-hospitalar.

Impacto de múltiplas estações e múltiplos canais

A principal característica do PDAC é o uso de múltiplas estações base, distribuindo a carga entre elas. Assim, nós avaliamos seu comportamento variando o número de estações base até 4, onde o grafo de interferências entre as estações base é completo, e o número de canais disponíveis para comunicação até 16. Nesta análise, o cenário de radiologia foi desconsiderado uma vez que uma única estação base foi capaz de atender seus requisitos. As Figuras 6 e 7 apresentam a função de distribuição de probabilidade acumulada da latência e do *goodput*, respectivamente. De forma geral, quanto maior o número de estações base utilizada, melhor é o desempenho do novo protocolo. Da mesma forma, o aumento no número de canais disponíveis para comunicação gera ganhos consideráveis. Por exemplo, a partir de duas estações base, com 8 canais disponíveis para transmissão de dados, o PDAC foi capaz de atender aos requisitos das aplicações médicas, apresentando uma taxa de entrega de pacotes de 99.9%. Neste caso, a latência média foi de 86,45 ms e o *goodput* foi de 33,36 kbps.

Apesar do ganho que ambos os fatores trazem, notamos que o crescimento do número de canais tem menor impacto no desempenho que o número de estações. Ao se aumentar o número de estações, esperava-se que ocorresse uma divisão de carga entre elas. Por outro lado, mesmo com a existência de múltiplos canais, a fase inicial do protocolo não é paralelizável, o que limita os ganhos dentro de uma mesma estação.

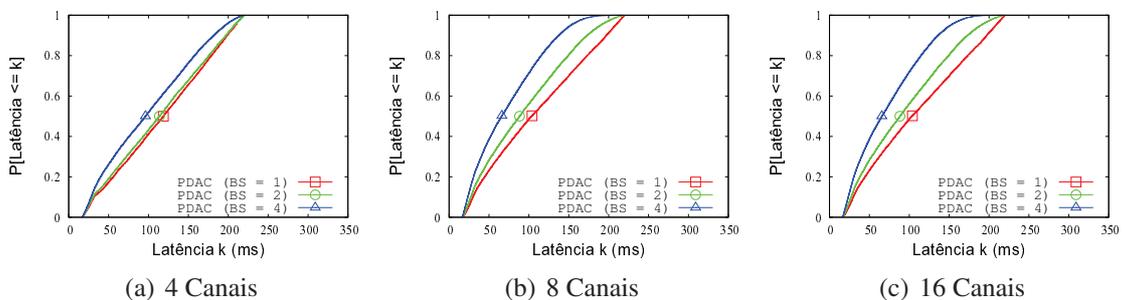


Figura 6. Latência em relação ao número de canais disponíveis.

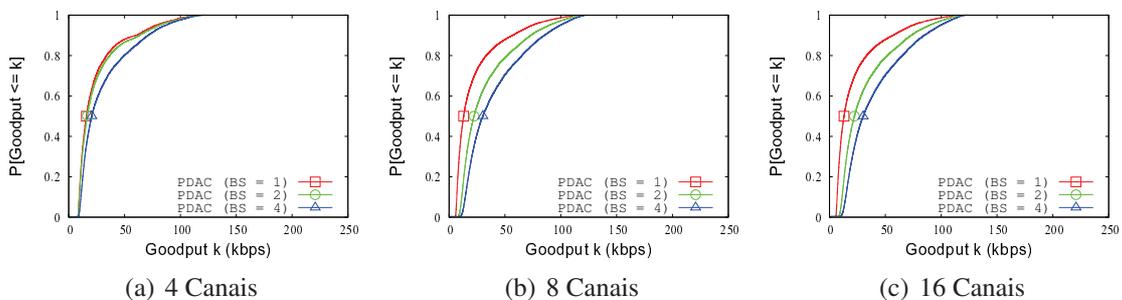


Figura 7. *Goodput* em relação ao número de canais disponíveis.

Impacto do uso da agregação de canais

Técnicas de agregação de canais podem melhorar a comunicação, quando utilizadas em um cenário de maior disponibilidade de canais de dados [Bukhari et al. 2016]. Para demonstrar o poder desta técnica, nós fixamos em 16 o número de canais de dados disponíveis e variamos o número máximo de canais que podem ser unidos na tentativa de melhorar o desempenho do protocolo. Outras configurações apresentam resultados qualitativamente semelhantes. Por restrições de espaço, omitimos estas outras análises.

As Figuras 8 (a-b) apresentam o intervalo de confiança, primeiro e terceiro quartis dos valores de latência e *goodput*, respectivamente. Tanto o comportamento da latência, quanto do *goodput* apresentam melhoras até um determinado número de canais que podem ser unidos, com posterior degradação. De fato, com um grande número de canais sendo unidos, pode ocorrer um fenômeno conhecido como inanição. O nó central que conseguir alocar e unir muitos canais terá seu desempenho melhorado, mas os demais nós centrais não conseguirão um conjunto de canais livres para suas transmissões. Estes nós centrais contribuirão de forma negativa para o desempenho geral do sistema.

O ganho na latência não é tão expressivo quanto o ganho de *goodput*. De fato, o ganho na latência é apenas marginal uma vez que um determinado pacote continua sendo transmitido por um dos canais disponíveis do conjunto utilizado na ligação. Por outro lado, vários pacotes são transmitidos em paralelo e, mesmo com uma porção serial no protocolo, o ganho pode ser superior a 33%.

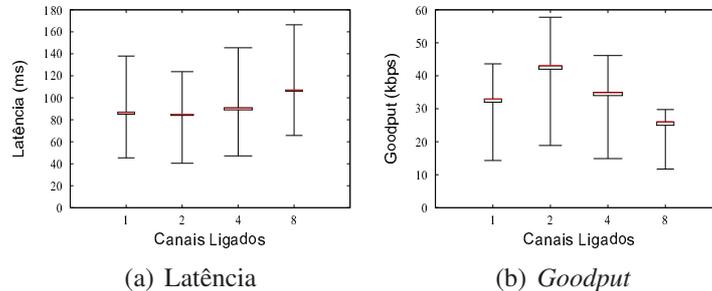


Figura 8. Avaliação do atraso e *goodput* em relação ao máximo de canais unidos.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o PDAC, um protocolo da camada MAC ciente dos requisitos das aplicações médicas para alocar dinamicamente canais em cenários hospitalares densos. O PDAC oferece uma solução para reduzir interferências. Ele permite a cooperação de múltiplas estações base no mesmo ambiente médico-hospitalar. O protocolo foi avaliado através de simulações de dois ambientes médicos realistas: uma sala de radiologia e um departamento de emergência. Sob a presença de uma única estação base, o PDAC é capaz de melhorar o desempenho da comunicação entre a estação base e os dispositivos em cenários com menor carga. Em um cenário de alta carga, as perdas de pacote são desprezíveis sob a utilização de múltiplas estações base. De fato, os resultados das simulações indicam que, em um ambiente médico realista, o PDAC é capaz de, em média, aumentar a vazão em 30% e reduzir a latência em 40%, quando comparado com outros protocolos de alocação de canais representativos existentes na literatura.

Como trabalhos futuros, espera-se desenvolver mecanismos cientes dos níveis de energia nos dispositivos médicos com o intuito de estender a vida útil destes dispositivos. Mais ainda, esperamos oferecer mecanismos de diferenciação de serviço a partir do nível de criticidade de eventos da aplicação médica e verificar a convivência do protocolo proposto com outras tecnologias operando nos mesmos canais.

Referências

- Baker, S. D. and Hoggland, D. H. (2008). Medical-grade, mission-critical wireless networks [designing an enterprise mobility solution in the healthcare environment]. *IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine*, 27(2):86–95.
- Boulis, A. et al. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*.
- Bukhari, S. H. R., Rehmani, M. H., and Siraj, S. (2016). A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 18(2):924–948.
- Doost-Mohammady, R. and Chowdhury, K. R. (2012). Transforming healthcare and medical telemetry through cognitive radio networks. *IEEE Wireless Commun.*, 19(4):67–73.
- Fang, G., Dutkiewicz, E., Yu, K., Vesilo, R., and Yu, Y. (2010). Distributed inter-network interference coordination for wireless body area networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 1–5.
- Kyasanur, P. and Vaidya, N. H. (2006). Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. *ACM SIGMOBILE Review*, 10(1):31–43.
- 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*, volume 266, pages 338–345. Springer.
- Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 16(3):1658–1686.
- Omeni, O., Wong, A. C. W., Burdett, A. J., and Toumazou, C. (2008). Energy efficient medium access protocol for wireless medical body area sensor networks. *IEEE Trans. on biomedical circuits and systems*, 2(4):251–259.
- Pešović, U. M., Mohorko, J. J., Benkič, K., and Čučej, Ž. F. (2010). Single-hop vs. multi-hop—energy efficiency analysis in wireless sensor networks. In *Telecommunications Forum*.
- Phunchongharn, P., Hossain, E., Niyato, D., and Camorlinga, S. (2010). A cognitive radio system for e-health applications in a hospital environment. *IEEE Wireless Commun.*, 17(1):20–28.
- Rehmani, M. H., Lohier, S., and Rachedi, A. (2012). Channel bonding in cognitive radio wireless sensor networks. In *International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST)*, pages 72–76. IEEE.
- Soua, R. and Minet, P. (2011). A survey on multichannel assignment protocols in wireless sensor networks. In *IFIP Wireless Days (WD)*, pages 1–3. IEEE.
- Van Dam, T. and Langendoen, K. (2003). An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 171–180. ACM.
- Varga, A. et al. (2001). The omnet++ discrete event simulation system. In *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*, volume 9, page 65. sn.
- Yu, J.-Y., Liao, W.-C., and Lee, C.-Y. (2006). A MT-CDMA based wireless body area network for ubiquitous healthcare monitoring. In *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pages 98–101. IEEE.