

PDAC: Um Protocolo de Alocação Dinâmica de Canais para Ambientes Médicos

Bruno Marques Cremonesi¹, Alex Borges Vieira¹, Michele Nogueira Lima²

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

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

brunomarques@ice.ufjf.br, alex.borges@ufjf.edu.br, michele@inf.ufpr.br

Resumo. *Com a recente popularização das redes corporais, é razoável considerar a existência de ambientes médicos muito densos, em que redes corporais próximas gerem interferências entre si ao utilizarem simultaneamente o mesmo canal de comunicação sem fio. Por se tratar do envio de dados vitais, as interferências resultam em sérios riscos para os usuários, uma vez que afetam diretamente a latência e perda de pacotes. Uma das soluções adotadas para reduzir essas interferências está na realização de uma alocação de canais. Nesta dissertação de mestrado, é proposto o PDAC, um protocolo da camada MAC ciente dos requisitos das aplicações médicas, que promove uma alocação dinâmica de canais em cenários hospitalares densos através do trabalho colaborativo de múltiplas estações base. A validação do PDAC ocorre em duas formas: (i) uma verificação formal que assegura a correção do protocolo em relação as suas propriedades e (ii) simulações que indicam, em um ambiente médico realista, a capacidade do PDAC em aumentar a vazão média em 30% e reduzir a latência em 40%, se comparado com os protocolos de alocação de frequência presentes na literatura.*

1. Introdução

Com a recente popularização das redes corporais sem fio, o número de usuários que utilizam este tipo de rede aumentou consideravelmente. Sua natureza móvel, em conjunto com a comunicação via radio frequência utilizada por essas redes, as torna vulneráveis aos problemas inerentes de uma comunicação sem fio. É comum, por exemplo, que duas ou mais redes corporais diferentes utilizem de maneira simultânea o mesmo canal de comunicação sem fio (ou canais parcialmente sobrepostos). Isto potencializa interferências e acarreta um maior número de retransmissões e perdas de pacote na rede. Como consequência, essas redes apresentam altas latências e baixa transmissão [Fang et al. 2010]. Para evitar que redes próximas utilizem o mesmo canal, diversos trabalhos propuseram técnicas de alocação de canais entre redes corporais co-localizadas [Doost-Mohammady and Chowdhury 2012, Phunchongharn et al. 2010, Lee et al. 2011]. Essas técnicas permitem a utilização simultânea de diferentes canais pelas redes corporais para transmissão de dados, o que evita que as transmissões sofram tais interferências.

Em um ambiente médico-hospitalar é observada uma alta densidade de redes corporais e redes locais sem fio [Baker and Hoglund 2008, Fang et al. 2010]. Por possuir uma reduzida faixa permitida para aplicações médicas, o baixo número de canais sem sobreposição torna o processo de alocação de canais para as muitas redes corporais um

problema desafiador. O processo de alocação deve ser rápido para atender aos fortes requisitos das aplicações médicas, em que a latência e entrega de pacotes máxima permitida deve ser, respectivamente, de 200 ms [Baker and Hoglund 2008] e 99% [Yu et al. 2006].

Os tradicionais mecanismos e técnicas de alocação de canais em ambientes médicos dependem de uma entidade centralizada. Essa entidade, caso seja sobrecarregada pela alta densidade das redes corporais, pode comprometer os requisitos de latência e perda de pacotes específicos para as aplicações médicas.

Neste trabalho desenvolvemos o protocolo PDAC (*Protocol for Dynamic Channel Allocation*). PDAC é um protocolo 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, diferentemente de trabalhos anteriores, apresenta em uma abordagem distribuída em que diversas estações base trabalham de forma colaborativa. O protocolo 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, cada aresta representa conflitos entre os canais utilizados pelas estações base e 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 o problema de alocação de canais e comunica para as estações bases conflitantes o seu atual estado. Essa informação é utilizada por outras estações para auxiliar na alocação de frequências e busca reduzir interferências.

A avaliação de desempenho do protocolo foi realizada através de avaliação formal e simulações. A verificação formal ocorreu por meio da ferramenta UPPAAL. Através dela foi possível confirmar que as propriedades chave do PDAC são respeitadas durante todo momento, consequentemente assegurando a correteza do protocolo em relação sua especificação. As simulações ocorreram através de 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.

Ao longo do mestrado, a relevância do PDAC foi reconhecida pela comunidade de redes de computadores através da publicação de dois artigos. O artigo “A Dynamic Channel Allocation Protocol for Medical Environment Under Multiple Base Stations” foi publicado e apresentado pelo autor dessa dissertação no WCNC2017 (Qualis B1) e o “Um Protocolo de Alocação Dinâmica de Canais para Ambientes Médicos sob Múltiplas Estações Base” também publicado e apresentado pelo autor no SBRC2017(Qualis B2), em que esse segundo artigo foi colocado entre os dez melhores do evento, consequentemente convidado para submissão em versão estendida no “Journal of Internet Services and Applications” que se encontra em processo de revisão. Em todos artigos foram apresentados os conceitos, revisão bibliográfica, especificação do PDAC e os resultados obtidos na avaliação de desempenho do protocolo.

2. Ambiente Considerado

No contexto de redes corporais, dois principais tipos de comunicação entre os dispositivos são encontradas: 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 em seu corpo e 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). Este nó central, em conjunto com os nós sensores, compõe a rede corporal sem fio, sendo a comunicação entre eles do tipo intra-WBAN. Essa 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.

Para este trabalho, foi assumido a presença de múltiplas estações base ao longo de todo ambiente médico, em que o paciente pode enviar dados para qualquer uma delas. O nó central, que serve como um ponto de acesso para a rede corporal, transmite os dados recebidos para uma estação base (comunicação inter-WBAN) via Zigbee. Após o recebimento dos dados, esta estação os encaminha até um repositório de dados localizado em um centro médico ou na nuvem, e então eles são armazenados e/ou analisados. É importante lembrar que, neste trabalho, denomina-se estação base qualquer dispositivo controlador de uma rede, como exemplo, um ponto de acesso. Assim como outros trabalhos [Doost-Mohammady and Chowdhury 2012, Phunchongharn et al. 2010], considera-se um sistema no qual a estação base não possui restrições de processamento. Assume-se que também 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 .

Assume-se ainda que o nó central possui apenas uma interface de comunicação sem fio. Tanto as interfaces da estação base quanto as das redes corporais 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].

A Figura 1 ilustra o sistema descrito. 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 foco deste trabalho é 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. PDAC: Visão geral

No PDAC, os canais de comunicação são divididos em duas categorias: **canal de controle** e **canal de dados**. Ambos localizados em uma banda não licenciada do espectro de radiofrequência. As várias estação base estão interligadas no ambiente, onde cada estação possui duas interfaces de comunicação descritas anteriormente. A interface de controle está sintonizada no canal de controle conhecido por todas redes corporais, enquanto a interface de dados sintoniza de forma adaptativa dentre os canais de dados disponíveis.

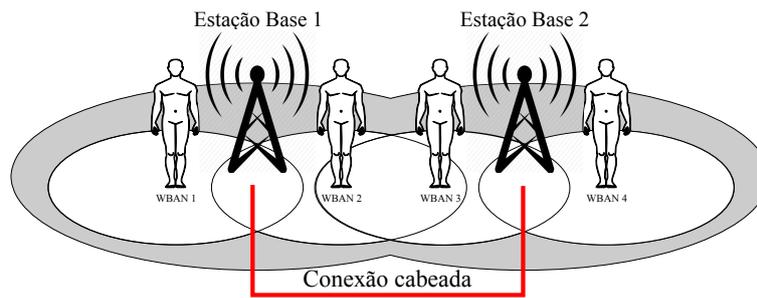


Figure 1. Visão geral do sistema.

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 de cada canal em sua região. Conforme apresentado na Figura 2 o PDAC, o acesso ao meio é composto por duas fases. A primeira é chamada de **fase de controle**. Nela, a rede corporal negocia com a estação base um canal de dados. Ao receber a requisição da rede corporal, a estação base envia um pacote para as outras através do canal confiável existente entre as estações e informa 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 e envia um pacote para a rede corporal requisitante com tal informação, o que determina o fim a fase de controle.

A **fase de transmissão** ocorre após a alocação do canal. A rede corporal 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 pela

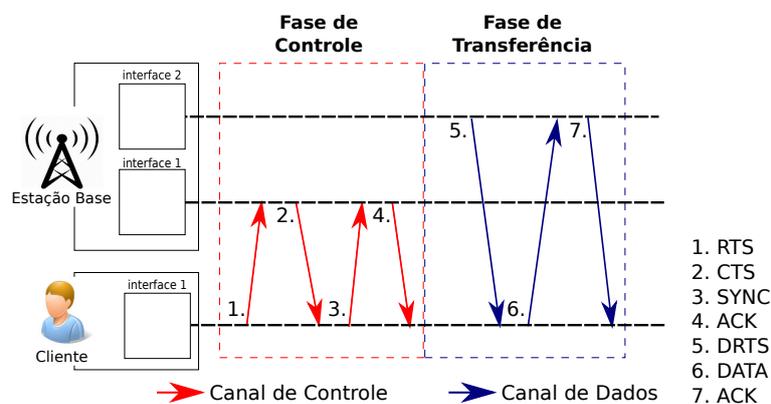


Figure 2. Diagrama de sequência do protocolo PDAC.

rede corporal. Recebidos os dados, a estação base envia o pacote de confirmação para a rede corporal 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 .

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 a rede corporal 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, o que evita maiores atrasos quando comparado a um processo de tentativa e erro para encontrar qual canal a estação base está sintonizada [Lee et al. 2011].

4. Avaliação do PDAC

A avaliação do PDAC foi realizada em duas etapas, em que em um primeiro momento, foi realizada uma verificação formal do protocolo. A ferramenta utilizada para analisar formalmente o protocolo PDAC foi o Uppaal. Esta ferramenta é utilizada na literatura para modelagem, simulação e verificação de sistemas através de autômatos temporizados. Todo sistema e funcionamento do PDAC foi implementado em autômatos temporizados e, através de formalismos matemáticos, usados para especificação e verificação do protocolo. Através da verificação formal foi-se possível cobrir todas as possibilidades de comportamento do sistema, desde comportamentos esperados até situações não tão aparentes de se acontecer em uma aplicação real. Através dela, foi possível observar propriedades do sistema foram entregues e o protocolo respeita os requisitos de sua especificação. Por exemplo, através da verificação formal é possível de concluir que o protocolo está livre de qualquer impasse. Uma outra conclusão que se pode chegar através da verificação formal foi que toda rede corporal que está realizando uma transmissão de dados possui um canal exclusivo e a duas estações base vizinhas nunca utilizam o mesmo canal simultaneamente.

Após a verificação da corretude do protocolo, a segunda etapa de avaliação do PDAC ocorreu através de simulações de cenários médicos-hospitalar através do 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. As simulações são conduzidas em dois ambientes médicos realistas: um departamento de emergência sobrecarregado e um ambiente calmo, como uma sala de radiologia. Ambos os cenários contam com uma área de 30 m^2 e estações base fixas de forma que não ocorra problemas de terminal oculto. Os pacientes e seus nós centrais são distribuídos no ambiente conforme uma distribuição uniforme e estão no raio de alcance das estações base.

Como principais resultados, 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.

5. Conclusões

Este trabalho resumiu a tese [Cremonezi et al. 2017], onde o PDAC foi proposto. O protocolo foi proposto para a camada MAC e está ciente dos requisitos das aplicações médicas para alocar dinamicamente canais em cenários hospitalares densos e consequentemente evita interferências entre as redes corporais. Esse protocolo permite a cooperação de múltiplas estações base no mesmo ambiente médico-hospitalar. Como forma de provar a lógica do protocolo desenvolvido, a dissertação apresenta uma verificação formal com base em autômatos temporizados. Ao utilizar a ferramenta Uppaal, diversas propriedades do protocolo foram avaliadas. De forma geral, os resultados observados na verificação formal apontam que as propriedades que definem o protocolo foram satisfeitas.

O protocolo foi também avaliado através de simulações de dois ambientes médicos realistas. Sob a presença de uma única estação base, o PDAC foi capaz de melhorar o desempenho da comunicação entre a estação base e os dispositivos em cenários com menor carga. De forma geral, os resultados das simulações indicam que o PDAC foi capaz de, em média, aumentar a vazão em 30% e reduzir a latência em 40%, quando comparado com outros protocolos de alocação de canais da literatura. Espera-se que este trabalho auxilie no desenvolvimento de outros protocolos MAC para ambientes médicos com o intuito de evitar interferências entre as redes corporais através da alocação de canais.

References

- Baker, S. D. and Hoggund, D. H. (2008). Medical-grade, mission-critical wireless networks [designing an enterprise mobility solution in the healthcare environment. *IEEE Eng Med Biol.*, 27(2):86–95.
- Boulis, A. et al. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*.
- Cremonezi, B. M. et al. (2017). Pdac: um protocolo de alocação dinâmica de canais para ambientes médicos.
- Doost-Mohammady, R. and Chowdhury, K. R. (2012). Transforming healthcare and medical telemetry through cognitive radio networks. *IEEE Wirel 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.
- 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.
- 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 *Telecommun. Forum*.
- Phunchongharn, P., Hossain, E., Niyato, D., and Camorlinga, S. (2010). A cognitive radio system for e-health applications in a hospital environment. *IEEE Wirel Commun.*, 17(1):20–28.
- 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.