

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Bruno Marques Cremonezi

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

Juiz de Fora
2017

Bruno Marques Cremonezi

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Redes de Computadores, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Alex Borges Vieira

Coorientadora: Michele Nogueira Lima

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cremonesi, Bruno.

PDAC: Um Protocolo de Alocação Dinâmica de Canais para Ambientes
Médicos / Bruno Marques Cremonesi. – 2017.

55 f. : il.

Orientador: Alex Borges Vieira

Coorientadora: Michele Nogueira Lima

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto
de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computa-
ção, 2017.

1. WBAN. 2. Alocação de Canais. 3. Interferência inter-WBAN. I.
Vieira, Alex, orient. II. Título.

Bruno Marques Cremonezi

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Redes de Computadores, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alex Borges Vieira - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professora Dra. Michele Nogueira Lima
Universidade Federal do Paraná

Professor Dr. José Augusto Nacif
Universidade Federal de Viçosa

Professor Dr. Eduardo Barrére
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus pais, Célio Cremonesi Filho e Marise Marques Cremonesi, que são meu exemplo de força, persistência, força de vontade, honestidade, perseverança, companheirismo e profissionalismo e, acima de tudo, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos de minha vida acadêmica e pessoal. Agradeço à minha namorada Flávia Reis, pelo apoio, compreensão e principalmente paciência. Companheira com quem tive o prazer de compartilhar, nesses anos, seu amor e que me incentive a seguir em frente. Obrigado. Ao meu orientador Professor Doutor Alex Borges Vieira e minha coorientadora Professora Doutora Michele Nogueira, pela orientação brilhante, pela dedicação e confiança em mim depositadas. Ao professor Dr. Alex Borges Vieira ainda agradeço os desafios a serem vencidos para o desenvolvimento deste trabalho com sucesso. Aos meus amigos Thiago Marques, Marcelo Marques, Victor Hugo Patrocínio e Igor Russo, pertencentes ao “Grupo dos loucos”, por toda conversa, risada, apoio e amizade. Amigos que carregarei para toda uma vida. Obrigado a todos do PGCC, em especial a Thiago Moratori, Laura Lima, Marco Aurélio Freez, Luiz Eduardo Mendes e Lucas Saar por suportarem meus desabafos, brincadeiras ao longo de todo mestrado e ainda assim permanecerem sempre ao meu lado. Vocês compartilharam os momentos de “dar um ar a mente”, como também momentos de assíduos trabalhos do mestrado. A UFJF, assim como aos docentes e aos profissionais que nela atuam, que me auxiliaram na construção desta dissertação e no objetivo de alcançar a titulação de mestre. A FAPEMIG pelo auxílio financeiro para realização do mestrado e desta pesquisa.

“We all make choices, but in the end, our choices make us.”
(Andrew Ryan)

RESUMO

O aumento do uso de redes sem fios e a constante miniaturização dos dispositivos permitiram o desenvolvimento das redes de sensores corporais sem fio (do inglês, *wireless body area networks* – WBANs). Nessas redes, diversos sensores são posicionados sobre ou sob a pele do usuário. Os sensores de uma WBAN coletam dados sobre batimentos cardíacos, temperatura corporal ou até mesmo um prolongado cardiograma. Através do uso de WBAN, os usuários terão um monitoramento não invasivo e que pouco afeta a sua mobilidade.

Essas características, no entanto, abrem portas para diversos problemas. Por transmitir informações críticas, a comunicação é sensível à latência e à perda de pacotes. De fato, alta latência e perda de dados vitais podem acarretar em sérias consequências na vida dos pacientes e, em casos extremos, levando ao óbito. As características inerentes em uma comunicação sem fio geram problemas para redes corporais. Com sua popularização e alta mobilidade, é razoável considerar a existência de ambientes médicos muito densos, em que duas ou mais redes corporais podem utilizar simultaneamente o mesmo canal de comunicação sem fio. Essa situação potencializa as interferências, acarretando um maior número de retransmissões e perdas de pacotes, e, conseqüentemente, levando a um aumento da latência.

Diante disso, este trabalho apresenta o PDAC (Protocol for Dynamic Channel Allocation), um protocolo para alocação dinâmica de canais, ciente dos requisitos de aplicações médicas. O PDAC oferece uma solução para reduzir interferências entre redes corporais sem fio tirando proveito da arquitetura de um ambiente hospitalar. No PDAC, diversas estações base trabalham de forma colaborativa para atender aos requisitos das aplicações médicas. Para uma alocação livre de interferências, o PDAC é inspirado por uma solução gulosa de um problema de coloração de grafos, oferecendo meios para evitar que estações base vizinhas utilizem o mesmo canal simultaneamente. Além disso, o PDAC oferece, através da agregação de canais, melhores vazões.

A avaliação de desempenho do PDAC foi realizada em duas fases: por meio de experimentos de simulação e análises formais. 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. A outra fase consiste na verificação formal que por sua vez mostrou a coerência do protocolo e que o mesmo satisfaz todas as propriedades de segurança verificadas.

Palavras-chave: WBAN. Alocação de Canais. Interferências inter-WBAN.

ABSTRACT

The increased use of wireless networks and the constant miniaturization of devices allowed the development of wireless body area networks (WBANs). In these networks, diverse sensors are positioned on the user's skin. The sensors in a WBAN gather data from heart rate, body temperature or even a cardiogram. Through the use of WBAN, patients will have a noninvasive monitoring system, which hardly affects their mobility.

These characteristics, however, create several problems. By transmitting critical information, these data are quite sensitive to high latency and packet loss. The loss of vital data can lead to serious consequences in the users' life and, in extreme cases, leading to death. The inherent characteristics of wireless communication are a major issue for WBANs. With their popularization and high mobility, it is reasonable to consider the existence of very dense medical environments, where two or more WBANs can simultaneously use the same wireless communication channel. This situation can produce interference, leading to a bigger number of retransmissions and packet losses, and consequently increasing latency.

Therefore, this master thesis presents the PDAC (**P**rotocol for **D**ynamic **C**hannel **A**llo**C**ation), a protocol for dynamic channel allocation, that is aware of the requirements of medical applications. PDAC offers a solution to reduce interference between WBANs by taking advantage of the architecture of a hospital environment. Using PDAC, several base stations work collaboratively to meet medical application requirements. For an interference-free allocation, PDAC is inspired by a greedy solution of a graph colouring problem, preventing neighbouring base stations of using the same channel simultaneously. In addition, PDAC offers through the channel bonding, a better goodput.

The evaluation PDAC was performed in two phases: by means of simulations and formal analysis. Simulation results indicate that PDAC is able to increase goodput by 30% (on average) and reduce latency by 40% (on average) when compared to the literature. The formal verification, in turn, shows that the protocol is consistent and also satisfies all verified security properties.

Key-words: WBAN, Channel allocation, inter-WBAN interference.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de uma rede corporal (WBAN)	15
Figura 2 – Interferências Inter-WBAN em redes corporais	18
Figura 3 – Interferências Inter-WBAN na presença de múltiplas estações base . . .	18
Figura 4 – Tipos de comunicação do sistema.	23
Figura 5 – Visão geral do sistema.	24
Figura 6 – Representação de uma ambiente típico hospitalar em um grafo de conflitos entre estações base.	25
Figura 7 – Diagrama de seqüência do protocolo PDAC.	27
Figura 8 – Exemplo de uma agregação de canais com $K=4$	30
Figura 9 – Distribuição de latência e <i>goodput</i> apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC em uma sala de Radiologia.	33
Figura 10 – Distribuição de latência e <i>goodput</i> apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC em um Dpt. Emergência.	33
Figura 11 – Latência em relação ao número de canais disponíveis.	35
Figura 12 – <i>Goodput</i> em relação ao número de canais disponíveis.	36
Figura 13 – Avaliação do atraso e <i>goodput</i> em relação ao máximo de canais unidos .	36
Figura 14 – Exemplo de um modelo de máquina de café no UPPAAL	40
Figura 15 – Modelo do tempo de envio.	42
Figura 16 – Autômato finito temporizado que modela o meio	46
Figura 17 – Autômato finito temporizado que modela a interface de controle	47
Figura 18 – Autômato finito temporizado que modela a interface de dados	47
Figura 19 – Autômato finito temporizado que modela uma aplicação gerando de dados	48
Figura 20 – Autômato finito temporizado que modela a interface do nó central . . .	48
Figura 21 – Exemplo de um simples grafo	54

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
1.2	Contribuições	11
1.3	Contribuições Acadêmicas	12
1.4	Estrutura do Texto	13
2	As Redes Corporais	14
2.1	Visão Geral	14
2.2	Arquiteturas de comunicação	16
2.3	Interferências Inter-WBAN	17
3	Trabalhos Relacionados	20
4	Solução Proposta	23
4.1	Ambiente Considerado	23
4.2	Protocolo PDAC	24
4.2.1	Fases de controle e de transmissão	26
4.2.2	Sincronização entre estações	28
4.2.3	Agregação de Canais no PDAC	29
5	Avaliação	31
5.1	Metodologia	31
5.2	Resultados	32
5.2.1	PDAC <i>versus</i> DCAA	32
5.2.2	Impacto de múltiplas estações e múltiplos canais	34
5.2.3	Impacto do uso da agregação de canais	34
6	Verificação Formal do PDAC	37
6.1	Autômatos temporizados	37
6.2	Verificação de modelos	37
6.3	Uppaal	38
6.3.1	Autômato temporizado no Uppaal	39
6.4	PDAC: Verificação formal	40
6.4.1	Limites e Suposições do Sistema	40
6.4.2	Modelagem do PDAC	41
6.5	Verificação	43
6.5.1	Modelo livre de deadlock	43

6.5.2	Livre de interferências	43
6.5.3	Capacidade de transmissão	44
6.6	Resumo da verificação formal	45
7	Conclusões	49
7.1	Trabalhos Futuros	49
	 REFERÊNCIAS	 51
	 ANEXO A – Problema de coloração de grafos	 54

1 Introdução

Uma rede de sensores sem fio (*wireless sensor networks* - WSN) é uma rede de pequenos sensores que podem ser inseridos em um determinado ambiente com o intuito de capturar condições físicas de maneira autônoma. WSNs são capazes de medir uma grande quantidade de condições físicas como som, pressão, temperatura, entre outros. Os nós sensores coletam informações do ambiente e as enviam para uma estação base. Atualmente, as WSNs também são utilizadas para diversas aplicações industriais como controle de processo industrial, controle da saúde de uma máquina, entre outras (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Uma WSN é composta por diversos nós sensores, podendo variar entre dezenas até milhares de sensores para uma determinada aplicação. Um sensor consiste de diversos componentes como um microprocessador para controlar o sensor, um transmissor de rádio, usado para comunicação e, finalmente, a bateria, utilizada para alimentar os outros componentes. O tamanho de um sensor varia bastante de acordo com a aplicação, indo do tamanho de uma caixa de sapato até o tamanho de um grão de areia (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

Entre as principais aplicações de WSNs encontra-se monitoramento da saúde. Uma rede corporal (WBAN) é composta por diversos sensores posicionados sobre o corpo ou até mesmo implantados. Esses pequenos sensores coletam dados sobre os sinais vitais do paciente, como pressão sanguínea, glicose, pulsação. Os valores coletados são enviados para um nó especial da rede. Esse nó então envia essa informação para um servidor que alimenta as aplicações médicas. Os sensores sem fio oferecem um monitoramento constante da condição de saúde do paciente de maneira remota. Devido à ausência de fios, os usuários desses dispositivos poderão ter grande mobilidade e em alguns casos, pode não ser mais necessária a sua permanência em um hospital (CHEN et al., 2011).

A grande mobilidade oferecida pelas redes corporais juntamente com a criticidade dos dados coletados trazem consigo grandes problemas. As informações coletadas pela WBAN possuem desafios ligados à latência e à perda de pacotes na transmissão dos dados médicos. Os atrasos ou a perda de dados emergenciais podem provocar sérias consequências no diagnóstico médico e em alguns casos, colocar em risco a vida dos pacientes.

As características inerentes da comunicação sem fio podem ser um grande problema para WBANs. 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) para se comunicar com uma estação base. Isso 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 uma grande

densidade de redes corporais e redes locais sem fio (BAKER; 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. Esse cenário é especialmente desafiador em aplicações médicas, uma vez que essas aplicações possuem fortes requisitos de latência e perda de pacotes (BAKER; HOGLUND, 2008; YU; LIAO; LEE, 2006).

Para reduzir esse problema, diversos trabalhos propuseram técnicas de alocação de canais entre as redes corporais co-localizadas (DOOST-MOHAMMADY; CHOWDHURY, 2012; PHUNCHONGHARN et al., 2010; LEE; YUN; HAN, 2011). Essas técnicas permitem a utilização simultânea de diferentes canais pelas redes corporais para a 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.

1.1 Objetivos

Este trabalho apresenta o 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 se aproveita da 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. Dessa 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. Além disso, o protocolo se utiliza de técnicas de agregação de canais para expandir a capacidade de transmissão das informações médicas, reduzindo latências e aumentando vazão.

1.2 Contribuições

Este trabalho apresenta um protocolo de alocação de frequências ciente dos requisitos médicos e suas particularidades. Em relação ao protocolo, sua principal contribuição é a definição de uma comunicação livre de interferências, baseada nos seguintes pontos:

1. **Comunicação com acesso exclusivo aos canais.** Nos trabalhos anteriores, o acesso a um canal de comunicação é dado de forma concorrente, retratando um ambiente com um grande número de interferências caso não haja um controle. No presente trabalho, para uma transmissão ocorrer, um processo de individualização dos canais é realizada. Dessa forma, as redes corporais que desejam transmitir seus dados, garantem uma comunicação sem interferências, consequentemente reduzindo perda de pacotes e a latência. O protocolo proposto também estipula métodos para agrupar canais de maneira a possuir uma vazão maior de dados. Além disso, foi apresentada para quais situações a agregação de canais proposta é mais atrativa.
2. **Comunicação ciente do ambiente médico.** Os trabalhos anteriores forneceram métodos de se controlar o uso de canais em arquiteturas fixas e com uma única entidade de controle; ambiente esse que não retrata bem a realidade. Já o presente trabalho reproduziu uma arquitetura, em que possuímos diversas entidades controladoras do uso das frequências trabalhando de maneira conjunta para cobrir uma grande área de cobertura e oferecer uma comunicação livre de interferências. Nesse sentido, o presente protocolo pode servir como inspiração de solução para ambientes cobertos por múltiplas estações base.
3. **Regiões de possível interferência são devidamente tratadas.** Os trabalhos anteriores apresentaram protocolos focados em uma arquitetura contemplando uma única estação base. Essa arquitetura limita o movimento natural de usuários de redes corporais e caso possua mais de uma estação base em um ambiente, elas não possuem uma coordenação entre si, podendo ocasionar interferências. Já no presente trabalho, as múltiplas estações base formam uma malha de comunicação entre elas, em que um usuário de uma rede corporal pode se mover livremente no ambiente, pois as estações base vão coordenando o uso de canal entre si de modo a não ocasionar em interferências. Com isso, o protocolo proposto pode ser aplicado em cenários reais, como por exemplo, em hospitais muito grandes onde diversos pacientes se movem livremente pelo ambiente.

1.3 Contribuições Acadêmicas

A fim de auxiliar novos trabalhos, foram publicados dois artigos sobre o estudo desta dissertação. O artigo “**A Dynamic Channel Allocation Protocol for Medical Environment Under Multiple Base Stations**” foi publicado e apresentado pelo autor desta dissertação no WCNC2017 e o “**Um Protocolo de Alocação Dinâmica de Canais para Ambientes Médicos sob Múltiplas Estações Base**” também publicado e apresentado pelo autor no SBRC2017.

1.4 Estrutura do Texto

Este documento está organizado em sete capítulos. O Capítulo 2 descreve os fundamentos relacionados a redes corporais necessários para a compreensão do problema tratado. O Capítulo 3 os trabalhos similares ao descrito nesse documento. O Capítulo 4 apresenta o ambiente considerado neste trabalho, descrevendo brevemente o funcionamento de um sistema de monitoramento e também descreve o protocolo proposto, suas etapas e funcionamento. Na sequência, o Capítulo 5 detalha a avaliação de desempenho juntamente com os resultados obtidos. O Capítulo 6 apresenta a verificação formal do protocolo proposto nesse trabalho. E por fim, o Capítulo 7 conclui o documento, apresentando as considerações finais e direções futuras.

2 As Redes Corporais

Todos os anos, milhões de pessoas vão ao óbito devido a doenças como câncer, doenças cardiovasculares, mal de Parkinson, obesidade, diabetes e muitas outras. O principal desafio para controle dessas doenças se deve ao fato de muitas pessoas vivenciarem os sintomas e serem diagnosticadas em estágios muito avançados. Pesquisas demonstram que a maioria das doenças crônicas podem ser prevenidas e tratadas se detectadas em estágios iniciais (LUBRIN; LAWRENCE; NAVARRO, 2005).

Pode-se dizer então que é necessário oferecer meios proativos de detectar doenças, focando-se na detecção inicial e prevenção dessas doenças. Uma solução chave para isso está nas redes de sensores corporais (wireless body area networks - WBAN). Define-se como uma rede corporal um conjunto de micro/nano-sensores inteligentes, de baixo consumo energético, que podem ser implantados sob ou sobre a pele do corpo humano (ou até mesmo na corrente sanguínea) coletando dados vitais do paciente em diversos intervalos de tempo. Note-se que, em muitos casos, o paciente pode viver uma vida normal, evitando que ele fique em observação em um hospital. Espera-se então, além de salvar vidas, uma diminuição nos custos com a saúde, uma vez que em determinados quadros, a permanência do paciente em um hospital não será mais necessária.

A mais recente padronização para redes corporais é a IEEE 802.15.6 (KWAK; ULLAH; ULLAH, 2010). Essa padronização visa prover um padrão internacional para uma comunicação de curto alcance, extremamente confiável e baixo consumo energético. Por esse padrão, as redes corporais devem suportar taxas de envio que vão de 75,9 kbps até 15,6 Mbps; buscando atender às diversas aplicações esperadas para esse tipo de rede. Capaz de interagir com a Internet e outras tecnologias sem fio, como Zigbee, Bluetooth e WLANs, entre muitas outras, presume-se que o uso de redes corporais mude o modo como as pessoas lidam com a saúde de maneira similar como a Internet mudou o modo como pessoas lidam com a comunicação.

2.1 Visão Geral

Como ilustrado na Figura 1, define-se como uma rede corporal um conjunto de sensores que se conectam a um nó central (CHEN et al., 2011). Os sensores devem estar em uma região próxima ao corpo do usuário e cada sensor deve se comunicar exclusivamente com o nó central de sua rede corporal. As redes corporais coletam e monitoram os dados relacionados à saúde de um determinado paciente como temperatura corporal, pressão, eletroencefalógrafos, eletrocardiógrafos e até mesmo movimento. Os dados coletados podem ser processados em tempo real pelo nó central da rede, um *smart phone* como exemplo, e encaminhados para um servidor médico, em que um histórico com detalhes clínicos do paciente é salvo para uma futura análise ou até mesmo notificando imediatamente os

responsáveis para casos de emergência médica (YI; WANG; LI, 2015; JING et al., 2015; MISRA et al., 2014).

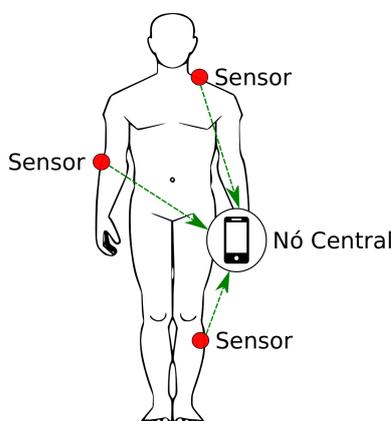


Figura 1 – Exemplo de uma rede corporal (WBAN)

Um nó em uma rede corporal é definido como um dispositivo de comunicação independente. A classificação desses nós pode ser baseada em três diferentes grupos: funcionalidade, implementação e papel na rede. Neste trabalho, vamos utilizar a definição baseada na funcionalidade, descrita como:

- **Nó central** - Esse dispositivo tem com função coletar todas as informações dos sensores e lidar com as interações com os outros usuários. Geralmente, o nó central informa a atual condição de saúde do paciente via um display/LED, ou até mesmo via uma comunicação sem fio com outros dispositivos, como por exemplo o uso de uma tecnologia Zigbee. Devido a essa característica, o nó central é considerado o portão de acesso às informações coletadas pelos sensores.
- **Sensor** - Define-se como sensor, um dispositivo capaz de coletar dados internos e externos ao corpo humano. Diversos tipos de sensores podem ser utilizados no pulso e pernas. Essa característica permite o monitoramento sem fio do indivíduo em qualquer lugar e momento. Atualmente, possuímos no mercado sensores como: temperatura, umidade, glicose, movimento, entre muitos outros.
- **Estação Base ou Ponto de Acesso** - Esse dispositivo tem com função coletar todas as informações das redes corporais em uma determinada região. Após coletadas as informações, a estação base realiza um pré-processamento desses dados, e em seguida, eles são enviados para um servidor médico, nutrindo diversas aplicações.

Antes da popularização dos *smart phones*, uma rede corporal era composta por um nó central de processamento e diversos sensores. Devido aos recentes avanços na tecnologia dos dispositivos móveis, o smart phone acaba por substituir o nó central, tornando padrão

nas aplicações de redes corporais. Como exemplo dessa tecnologia, possuímos hoje no mercado diversos dispositivos que possuem integrado diversos sensores sem fio. Dois grandes exemplos são o “Simband” da Samsung e o “Apple Watch” da Apple.

Podemos dizer que as redes corporais adicionaram três novas características comparado-se com uma rede de sensores sem fio convencional (CHENG; HUANG, 2013). Primeiro, os sensores sem fio implantados possuem bateria limitada que deve ser trocada o mais infreqüentemente possível. A troca de bateria causa uma pausa na coleta de dados e geralmente representam um grande inconveniente ao usuário e, em casos extremos, o sensor pode estar implantado sob a pele do usuário, impossibilitando a troca da bateria (HIEP; KOHNO, 2014). Podemos dizer que essa característica está associada ao tamanho dos sensores, muitas vezes menores que um centímetro cúbico, o que limita bastante o tamanho da bateria e, conseqüentemente, sua capacidade de armazenamento (MICHELI, 2015). Segundo, devido à natureza móvel de redes corporais, a topologia da rede é dinâmica e muda rapidamente. Como uma pessoa pode se movimentar livremente em uma grande área durante o dia, a rede corporal apresenta como característica uma grande mobilidade. Por fim, como os sensores estão implantados no corpo do usuário, sensores e nó central se movem juntos, garantindo uma característica de movimento em grupo em cada rede corporal. A comunicação de salto único da topologia estrela permanece inalterada em cada rede corporal, logo por questões de simplificação, pode-se considerar em alguns casos a rede corporal como uma única entidade.

Existem dois requisitos básicos para aplicações médicas em redes corporais: confiabilidade e economia de energia. Redes corporais são esperadas para serem utilizadas principalmente para aplicações médicas, sendo responsáveis por enviar dados e análises vitais do paciente, logo, temos a necessidade de uma comunicação altamente confiável. O segundo requisito é o baixo consumo de energia, diretamente relacionado as limitações de energia e troca de bateria dessas redes (JUNEJA; JAIN, 2015).

2.2 Arquiteturas de comunicação

A transmissão dos dados coletados pelas redes corporais se dá utilizando tecnologias de comunicação sem fio. Para facilitar o entendimento, a arquitetura de comunicação de redes corporais pode ser separada em diferentes camadas (CHEN et al., 2011):

- Camada 1 - Comunicação Intra-WBAN
- Camada 2 - Comunicação Inter-WBAN

A camada 1 representa a comunicação de baixo alcance entre sensores e nó central da rede corporal. Nessa camada, os sensores enviam seus dados para o nó central da rede. A camada 2 representa a comunicação entre o nó central de uma rede corporal para um

ponto de acesso (ou estação base). Os pontos de acesso podem ser considerados parte da infraestrutura, ou mesmo colocados dinamicamente em cenários de emergência. O objetivo dessa camada é interconectar a rede corporal com vários outros tipos de rede, que podem ser facilmente acessadas, como a Internet ou até mesmo uma rede celular.

O paradigma da comunicação inter-WBAN pode ser dividido em duas subcategorias, descritas a seguir:

Arquitetura baseada em Infraestrutura: considera-se uma entidade central para gestão e controle de segurança. Nessa subcategoria cada ponto de acesso age como um servidor de dados relacionado à aplicação.

Arquitetura baseada em Ad-hoc: nessa arquitetura, múltiplos pontos de acesso transmitem informação dentro de um centro médico. Os pontos de acesso nessa arquitetura formam uma malha, permitindo uma rápida expansão da rede e maior cobertura devido à disseminação dos dados entre os pontos de acesso. Essa arquitetura oferece mobilidade aos pacientes, facilitando o movimento em grandes áreas.

2.3 Interferências Inter-WBAN

Com a popularização das redes corporais e as aplicações médicas, espera-se que diversas redes corporais compartilhem o mesmo ambiente. Sendo assim, existe uma grande chance do alcance de duas ou mais redes corporais se sobreporem (CHEN et al., 2011). Dado que o espectro de frequências disponíveis para uso é limitado, caso WBANs diferentes utilizem o mesmo canal ou canais próximos simultaneamente, uma interferência ocorrerá (ZOU et al., 2014). A Figura 2 ilustra uma interferência Inter-WBAN na arquitetura baseada em ad-hoc. Duas redes corporais são representadas. Note-se a comunicação da WBAN 1 sobrepõe a WBAN 2, e assim, todo sinal enviado pela rede WBAN 1 é recebido na WBAN 2. Caso ambas estejam sintonizadas em um mesmo canal e a WBAN 2 enviar um sinal ao mesmo tempo em que a WBAN 1, teremos um caso de interferência. Classifica-se essa interferência como uma **interferência co-canal**. Outro tipo de interferência é as **interferências de canal adjacente**. Por motivos de imperfeições no filtro do receptor, caso a WBAN 1 e WBAN 2 estejam operando em canais adjacentes, pode ser que uma WBAN afete o sinal recebido da outra WBAN (KIRBAS et al., 2013).

Interferências Inter-WBAN podem ser muito perigosas para as aplicações médicas, causando falhas de transmissão, perda de pacotes, diminuição no *goodput*, aumento da latência, além de um grande desperdício de energia nos aparelhos móveis (SHEN et al., 2014b; SHEN et al., 2014a). As interferências violam exatamente os dois requisitos básicos para as aplicações médicas em redes, a confiabilidade e a economia de energia.

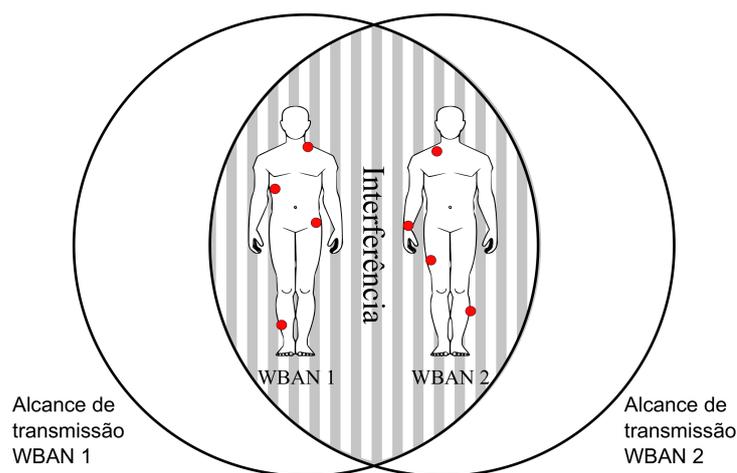


Figura 2 – Interferências Inter-WBAN em redes corporais

Uma das soluções para evitar as interferências Inter-WBAN seria alocar um canal diferente para cada usuário. Infelizmente, como dito anteriormente, o número de frequências disponíveis é um recurso limitado. Sendo assim a capacidade da rede seria extremamente baixa e inviável na prática. Dado esse contexto, existe uma necessidade de utilizar o mesmo canal para redes WBAN, desde que ela esteja distante suficiente para evitar, ou no pior dos casos, minimizar as interferências causadas. Temos então, o principal objetivo da alocação de canais em redes WBAN: oferecer um uso mais eficiente das frequências disponíveis e minimizar as interferências das redes corporais, de modo a oferecer a confiabilidade necessária para as aplicações médicas.

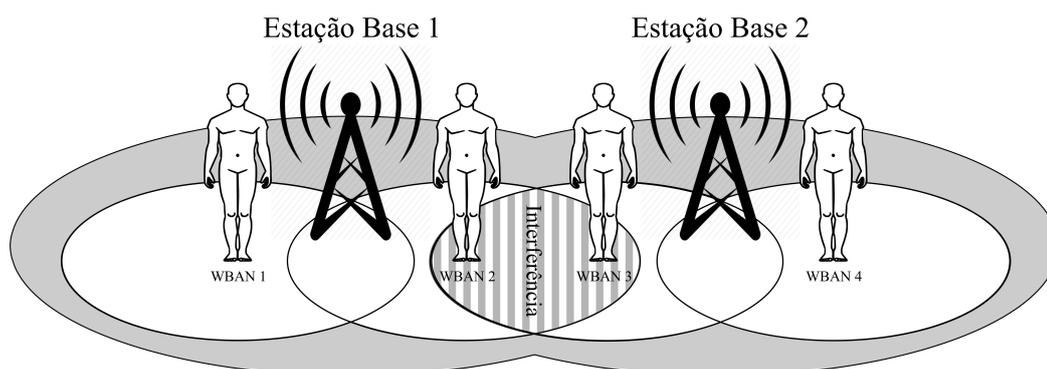


Figura 3 – Interferências Inter-WBAN na presença de múltiplas estações base

Em muitos trabalhos, a estação base realiza o papel de controlar o uso de frequências em uma região. Entretanto, em um ambiente médico, é observada a presença de múltiplas estações base compartilhando uma mesma região geográfica (BAKER; HOGLUND, 2008). Como ilustrado na Figura 3, 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.

3 Trabalhos Relacionados

A proposição de protocolos MAC para redes de sensores é um tópico já muito explorado na literatura. Podemos dividir tais protocolos em duas categorias (LIU; YAN; CHEN, 2013; HUANG et al., 2013): os protocolos baseados em agendamento (*scheduling*) e os protocolos baseados em contenção. Em protocolos baseados em agendamento, como TDMA, o canal é dividido em intervalos de tempo e cada intervalo é entregue para um dispositivo, sendo assim cada dispositivo só envia as informações no seu intervalo de tempo e permanece em um estado inativo em outros intervalos. Note-se que em protocolos baseados em TDMA, as colisões e o desperdício de energia são evitados, porém o desempenho é deteriorado pelo alto período inativo e o grande custo de manter os dispositivos sincronizados (LIU; YAN; CHEN, 2013). Nos protocolos baseados em contenção, como o CSMA/CA, os dispositivos devem competir pelo canal para a transmissão de seus dados. Tais protocolos apresentam uma escalabilidade e não necessitam de uma infraestrutura para seu funcionamento. Apesar da notória escalabilidade, é comum que ocorram colisões. Como principal implicação dessas colisões, há um aumento da latência observada e a diminuição da vazão (DEMIRKOL; ERSOY; ALAGOZ, 2006; HUANG et al., 2013).

Neste trabalho, focamos primeiramente na qualidade de serviço, como taxa de dados, latência e confiabilidade, sobre a conservação de energia. Grandes partes das aplicações médicas necessitam, devido a sua natureza emergencial, de transmitir os dados coletados pela rede para um servidor de aplicações médicas com uma latência máxima de 200 ms (BAKER; HOGLUND, 2008). Dada a natureza móvel das redes corporais, em que pacientes utilizando uma rede corporal podem mover-se livremente e o ambiente em que ele está inserido também pode mudar rapidamente, as abordagens baseadas em agendamento (e.g. TDMA) podem se tornar inviáveis. Isso ocorre pois o custo para manter os dispositivos sincronizados é muito grande e o cenário altamente dinâmico oferece um desafio para essa abordagem (LIU; YAN; CHEN, 2013). Sendo assim, todo protocolo considerado neste trabalho é baseado em contenção.

A maior parte dos trabalhos da literatura considera que as redes corporais enviam seus dados diretamente para uma estação base (LEE; YUN; HAN, 2011; PHUN-CHONGHARN et al., 2010; DOOST-MOHAMMADY; CHOWDHURY, 2012; BAKER; HOGLUND, 2008). Em outras palavras, há apenas um salto de rede entre o nó central da WBAN e a estação base. Essa estação base, então, nutre as aplicações médicas através de uma conexão confiável e de baixa latência.

Notoriamente, o número de canais existente para que aplicações médicas é limitado. Uma abordagem comum para oferecer um melhor uso desses canais está em abordagens de múltiplos canais, já que diversas transmissões podem ocorrer em paralelo.

O trabalho apresentado por Kyasanur e Vaidya (2006) teve como objetivo estudar o uso de múltiplos canais em redes *ad hoc* sem fio. Eles investigaram o impacto do número de interfaces de comunicação sem fio 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. Para que a comunicação ocorra, os dispositivos envolvidos na comunicação devem estar sintonizados no mesmo canal, logo manter os dispositivos coordenados em um mesmo canal para a transmissão pode ser um grande desafio.

Nessa linha, há protocolos que propõem um sistema não coordenado. Por exemplo, o protocolo DCCA de alocação dinâmica não sincronizada de canais (LEE; YUN; HAN, 2011) oferece uma abordagem de salto de frequências para a alocação de canais. Nesse protocolo o dispositivo receptor dos dados (estação base) altera em um determinado intervalo de tempo o seu canal, isto é, ele permanece em um canal durante um intervalo de tempo e após esse intervalo salta para a próxima frequência. Baseado em um mecanismo RTS/CTS, uma rede corporal que desejar enviar seus dados, ela deverá inicialmente sintonizar em um canal aleatório e enviar uma requisição. Caso a estação base não responda, isto é, assumindo que não ocorreram colisões no pacote RTS, isso significa que a estação base está em outro canal, logo não é capaz de receber essa requisição. Sendo assim, a rede corporal sintoniza na próxima frequência e repete o processo novamente até encontrar qual canal a estação base está sintonizada, para assim iniciar a transmissão dos dados. É bom observar que, à medida que o número de canais cresce, a chance de a rede corporal sintonizar em um canal diferente da estação base é maior. Pode-se dizer então que este trabalho não se foca em evitar problemas de surdez, isto é, problemas em que dois dispositivos tentam trocar informações em canais diferentes. Por se basear nesse processo de tentativa e erro até encontrar um canal, esse protocolo pode apresentar uma degradação forte na latência.

A fim de evitar o problema de *surdez*, alguns trabalhos utilizam uma abordagem híbrida de alocação de canais (PHUNCHONGHARN et al., 2010; DOOST-MOHAMMADY; CHOWDHURY, 2012). Nessas abordagens, assume-se a existência de um canal fixo, conhecido por todos os dispositivos onde é realizada a troca de mensagens de controle e após essa comunicação inicial, os dispositivos definem um canal para que a transmissão de dados ocorra. As estratégias híbridas assumem que cada estação base está equipada com múltiplas interfaces de comunicação sem fio. Por exemplo, os autores 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; 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. É importante frisar que, mesmo que evite problemas de surdez, o canal de controle pode ficar de difícil acesso caso o número de redes corporais competindo pelo mesmo for grande. Sendo assim, podemos encontrar uma grande degradação no desempenho da rede, em que o canal de controle vira um gargalo para o acesso aos demais canais.

Em nenhum desses trabalhos os 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; HOGLUND, 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. Sendo assim, o trabalho apresentado nesta dissertação 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.

4 Solução Proposta

Este capítulo apresenta o protocolo para alocação de canais para ambiente médicos, na presença de múltiplas estações base. Esse protocolo oferece meios de obter um canal exclusivo para a transmissão dos dados médicos para uma estação base, além de oferecer meios para prevenir que as estações base vizinhas aloquem o mesmo canal para redes corporais diferentes em uma região de possível interferência. Para o uso mais efetivo do espectro disponível, técnicas de agregação foram utilizadas com o intuito de se oferecer uma capacidade maior de transmissão de dados.

4.1 Ambiente Considerado

A Figura 4 ressalta 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. 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.

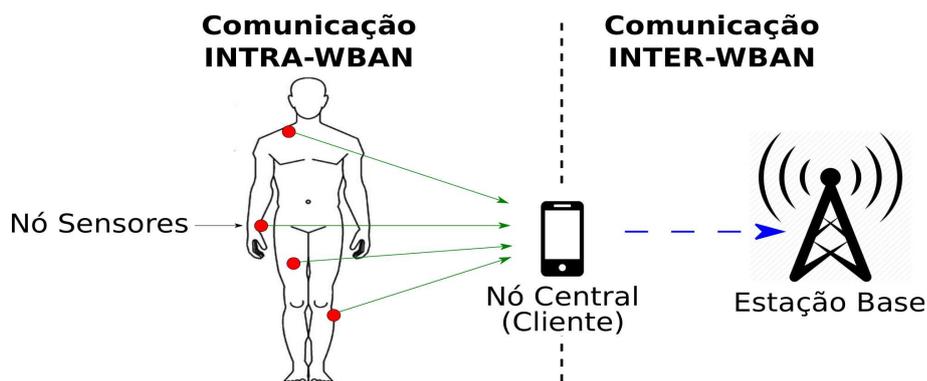


Figura 4 – Tipos de comunicação do sistema.

Assumimos 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 transmite os dados recebidos para uma estação base (comunicação inter-WBAN) via Zigbee. A estação dá vazão a esses dados até um repositório de dados localizado em um centro médico ou na nuvem, onde são então armazenados e/ou analisados. É importante lembrar que, neste trabalho, denominamos estação base qualquer dispositivo controlador de uma rede, como

exemplo, um ponto de acesso. Assim como (DOOST-MOHAMMADY; CHOWDHURY, 2012; PHUNCHONGHARN et al., 2010), considera-se um sistema no qual a estação base não possui restrições de processamento. 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 (SOUSA; 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. A Figura 5 ilustra esse sistema. 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.

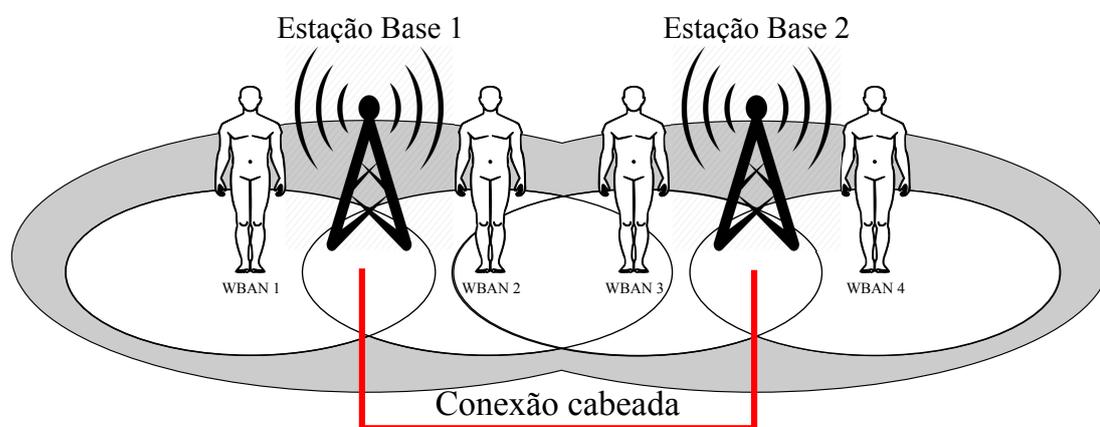


Figura 5 – Visão geral do sistema.

4.2 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. Como apresentado na Seção 4.1, a estação base possui duas interfaces de comunicação sem fio. Essas interfaces 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

entre 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, uma abordagem clássica na literatura para solução de problemas de alocação de canais, em que 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 regiões onde possam ocorrer 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 e, conseqüentemente, oferece menores latências e maior vazão para as aplicações médicas. A Figura 6 ilustra esse grafo de conflitos.

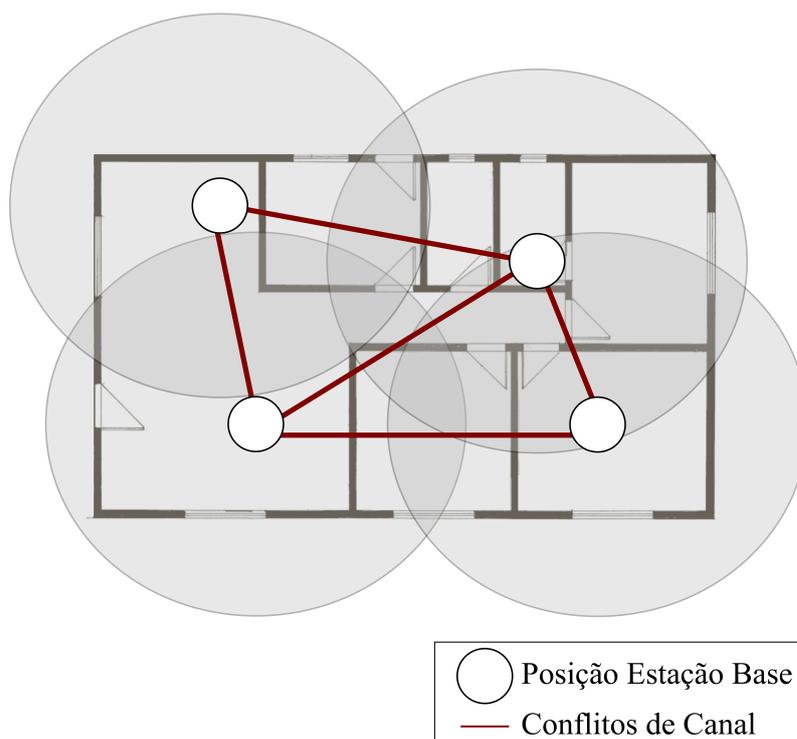


Figura 6 – Representação de uma ambiente típico hospitalar em um grafo de conflitos entre estações base.

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, 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* (o transmissor e o receptor estão em canais diferentes), comuns em uma abordagem totalmente dinâmica. A partir desse contato inicial, o transmissor e receptor negociam qual canal de dados utilizarão, evitando maiores atrasos quando comparado a um processo de tentativa e erro para encontrar qual canal a estação base está sintonizada (LEE; YUN; HAN, 2011). Essa 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 essa função. 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; LOHIER; RACHEDI, 2012).

4.2.1 Fases de controle e de transmissão

A Figura 7 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.

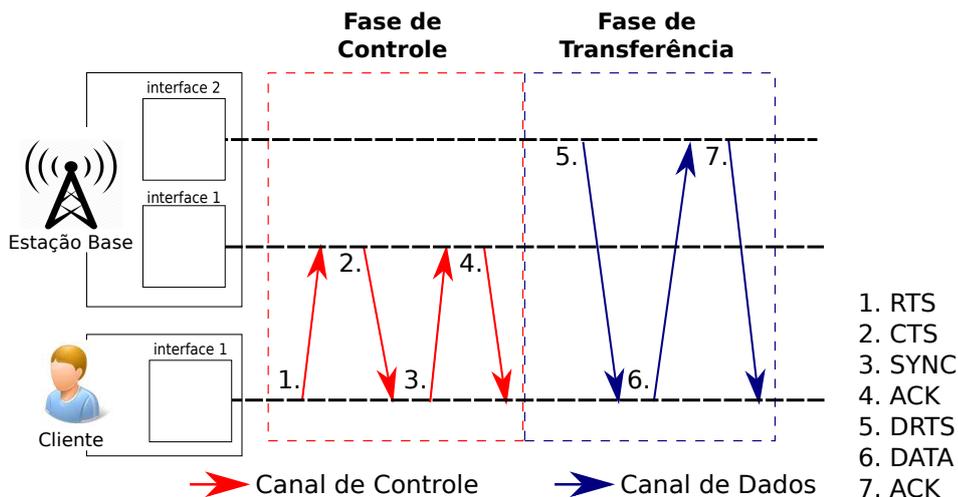


Figura 7 – Diagrama de sequência do protocolo PDAC.

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 7). Essa 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 não encontre um canal disponível, ou seja, se a lista LCD estiver vazia, a estação envia um pacote de negação chamado de NCTS (pacote análogo ao CTS, porém indica que nenhum canal foi alocado para transmissão de dados), 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 à 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 4.2.2).

Após o canal ser confirmado na fase de sincronização, o canal alocado (ou grupo de canais, detalhes na Seção 4.2.3) 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 de RTS/CTS já utilizados na literatura, em que 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 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 7. 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 esse 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 4.2.2). 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.

4.2.2 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 que pode ser usada por 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 4.2.3) 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. Nesse 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. Dessa forma, pode-se dizer que o PDAC é capaz de prover uma transmissão livre de interferências, independente do número de estações base.

4.2.3 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: canais livres, canais ocupados e 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: canais de borda e canais centrais. Os canais de borda são canais adjacentes de canais bloqueados ou ocupados (suscetíveis 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.

A agregação de canais consiste na combinação de dois ou mais canais adjacentes não sobrepostos, de forma a oferecer uma maior banda para a transmissão de dados. Sendo assim, consideramos elegíveis para as técnicas de agregação de canais apenas os canais centrais. A Figura 8 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

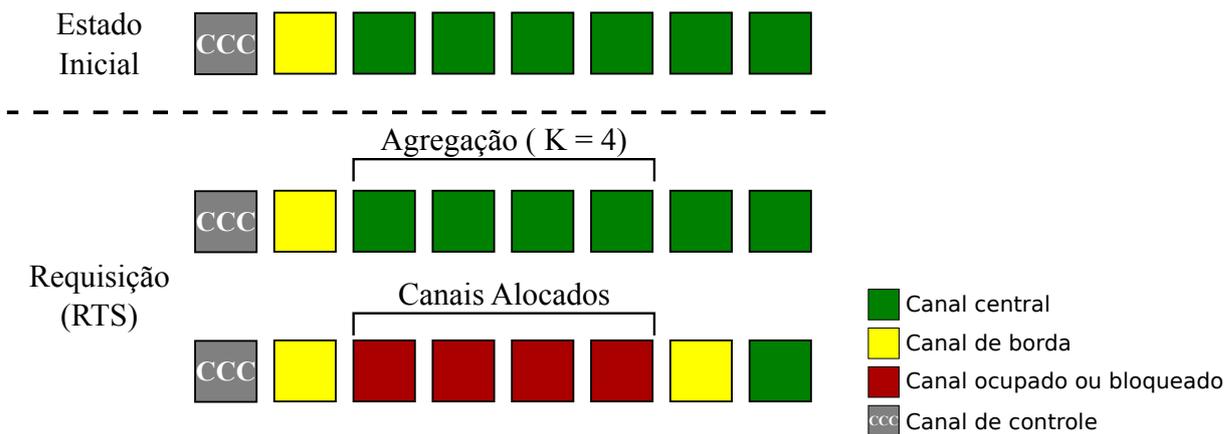


Figura 8 – Exemplo de uma agregação de canais com $K=4$.

o nó central. Caso não encontre, a estação base realiza uma nova busca decrementando o k , sendo assim, dessa 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. Nesse 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.

5 Avaliação

Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho do protocolo PDAC, visando analisar sua capacidade alocar canais exclusivos de modo a evitar interferências e consequentemente aumentar a vazão e diminuir a latência e perda de pacotes. Para tal fim, o estudo desempenhou análises de dispositivos utilizados em cenários médicos e experimentos de simulação em ambientes de redes, utilizando o protocolo PDAC.

5.1 Metodologia

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 (DAM; LANGENDOEN, 2003) pois é o protocolo padrão em diversos rádios Zigbee, porém o PDAC pode ser implementado sob qualquer protocolo que se utilize de RTS/CTS.

Consideramos que cada nó central de uma WBAN se comunica com a estação base utilizando o rádio CC2420 e operando na faixa de 2,4 Ghz. Esse rádio é capaz de operar em até 16 canais diferentes com 20 MHz de largura e taxa de transmissão de até 250 kbps. É preciso observar 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. Para o funcionamento do protocolo PDAC, dois novos campos foram adicionados ao cabeçalho do pacote CTS com o tamanho de 4 bits, indicando o canal recebido e a quantidade de canais que podem ser agregados.

As simulações são conduzidas em dois ambientes médicos realistas: um departamento de emergência, caracterizado pela alta carga de suas aplicações, e um ambiente calmo, possuindo aplicações de menor carga e um menor número de usuários dessas aplicações, 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; HOGLUND, 2008).

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

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

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. 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 nesse 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 e Høglund (2008), considera-se que aplicações médicas necessitam de taxa de perda de pacotes inferior a 0,01 e latência inferior a 200 ms.

5.2 Resultados

Inicialmente, comparamos o protocolo PDAC com o DCAA (LEE; YUN; HAN, 2011), um dos protocolos mais representativos da literatura quando se refere à alocação dinâmica de canais. Esse protocolo estabelece um acesso aleatório aos canais de tal forma que, em determinado momento tanto estação base quanto nó central estarão sintonizados no mesmo canal, em que, após o uso de mecanismo de RTS/CTS, a transmissão de dados ocorre. 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.

5.2.1 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 àquela suportada pelo DCAA. Nesse 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.

A Figura 10 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 baixa de dados (sala de radiologia), o PDAC apresenta desempenho melhor que o DCAA. Nesse 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 essa marca.

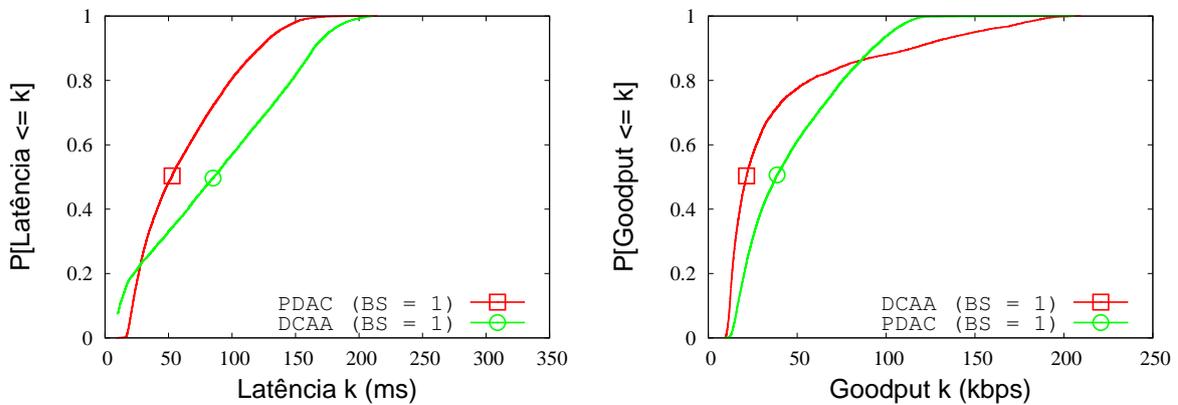


Figura 9 – Distribuição de latência e *goodput* apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC em uma sala de Radiologia.

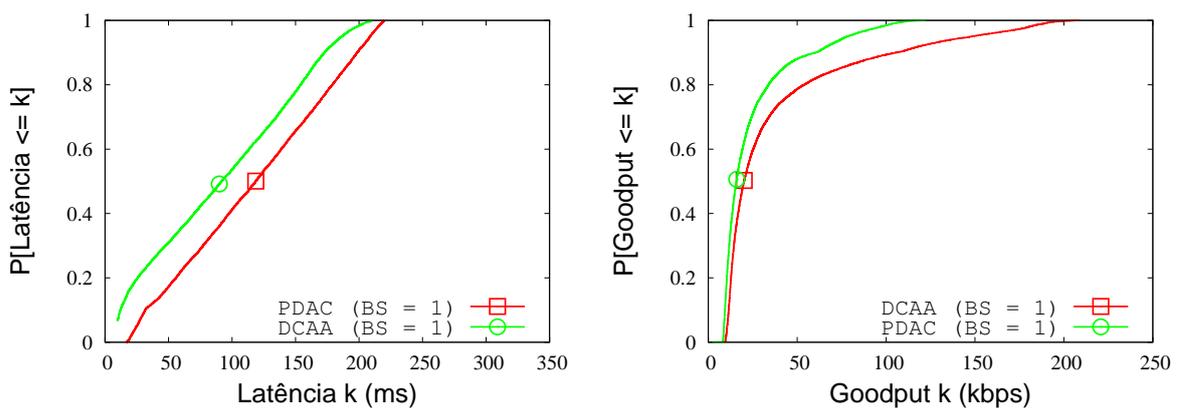


Figura 10 – Distribuição de latência e *goodput* apresentada pelos protocolos DCAA e PDAC em um Dpt. Emergência.

Em um cenário de carga alta de dados, 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.

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. Nesse sentido, há evidências que o uso de uma única estação base pode não ser apropriado em um ambiente médico-hospitalar (MOVASSAGHI et al., 2014).

5.2.2 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, em que o grafo de conflitos entre as estações base é completo, e o número de canais disponíveis para comunicação até 16. Nessa análise, o cenário de radiologia foi desconsiderado uma vez que uma única estação base foi capaz de atender a seus requisitos. As Figuras 11 e 12 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%. Nesse caso, a latência média foi de 86,45 ms e o *goodput* foi de 33,36 kbps.

Apesar do ganho de ambos os fatores, 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.

5.2.3 Impacto do uso da agregação de canais

As técnicas de agregação de canais podem melhorar a comunicação, quando utilizadas em um cenário de maior disponibilidade de canais de dados (BUKHARI; REHMANI; SIRAJ, 2016). Para demonstrar o poder dessa 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 semelhantes.

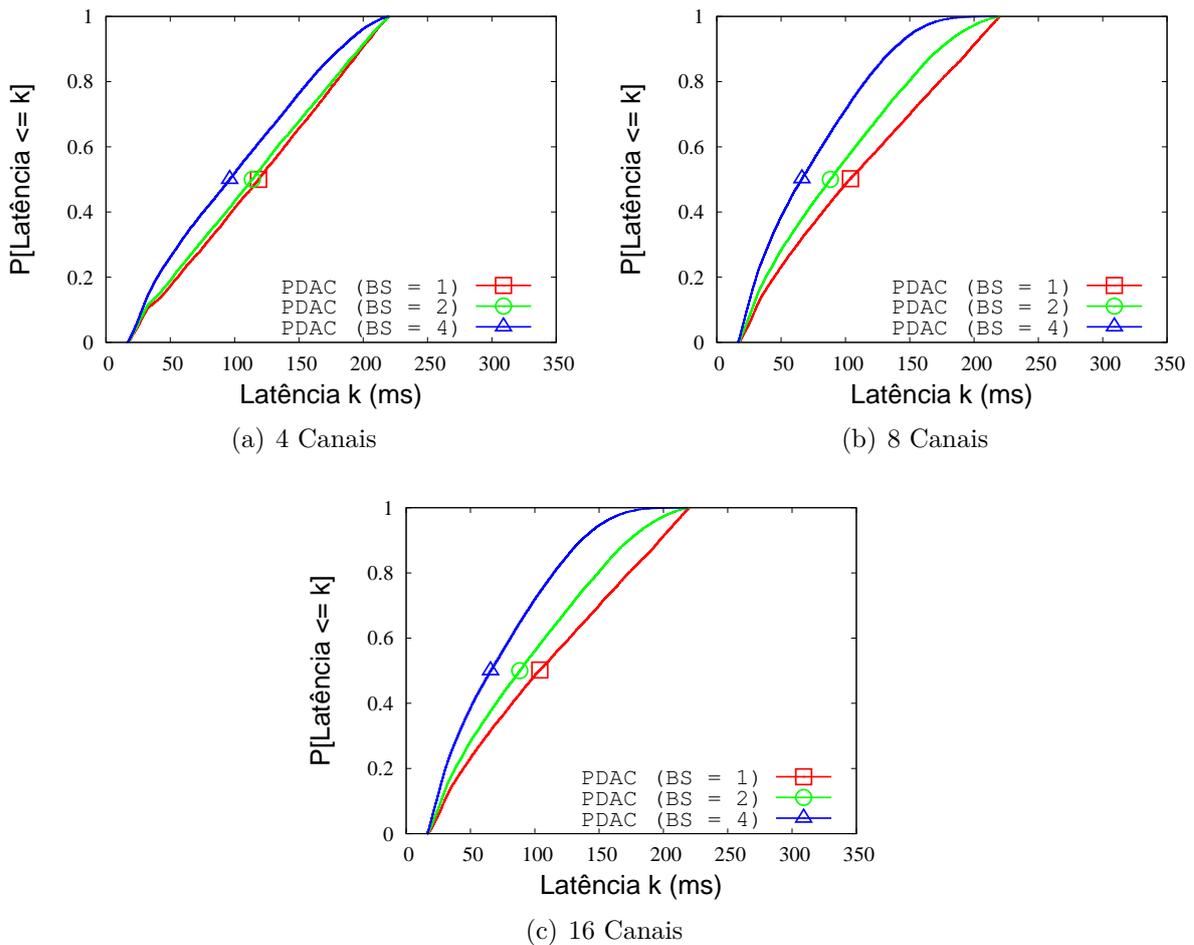


Figura 11 – Latência em relação ao número de canais disponíveis.

As Figuras 13 (a-b) apresentam o intervalo de confiança, o primeiro e o terceiro quartis dos valores de latência e *goodput*, respectivamente. Tanto o comportamento da latência, quanto do *goodput* apresentam melhorias até um determinado número de canais que podem ser unidos através de técnicas de agregação de canais. Porém, 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. Esses 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%.

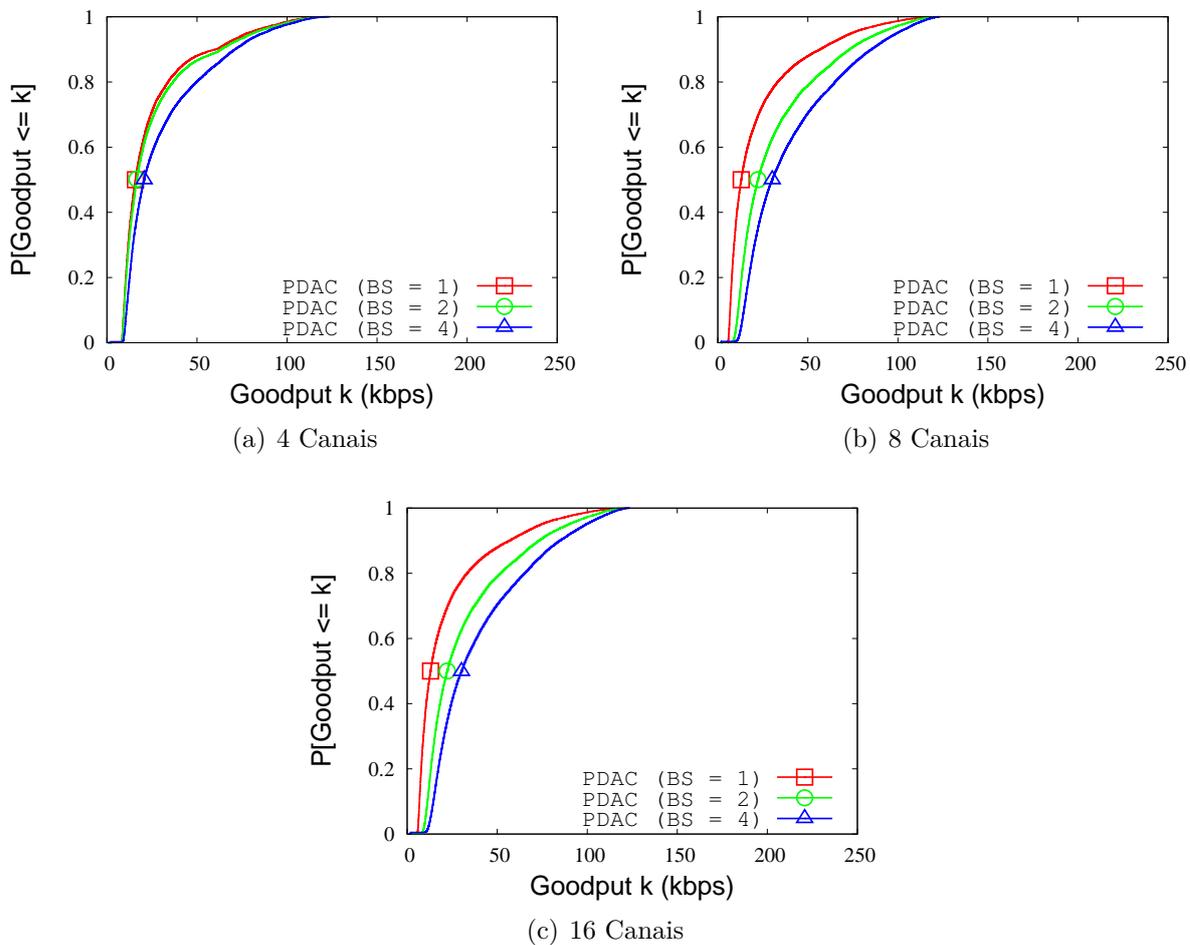


Figura 12 – Goodput em relação ao número de canais disponíveis.

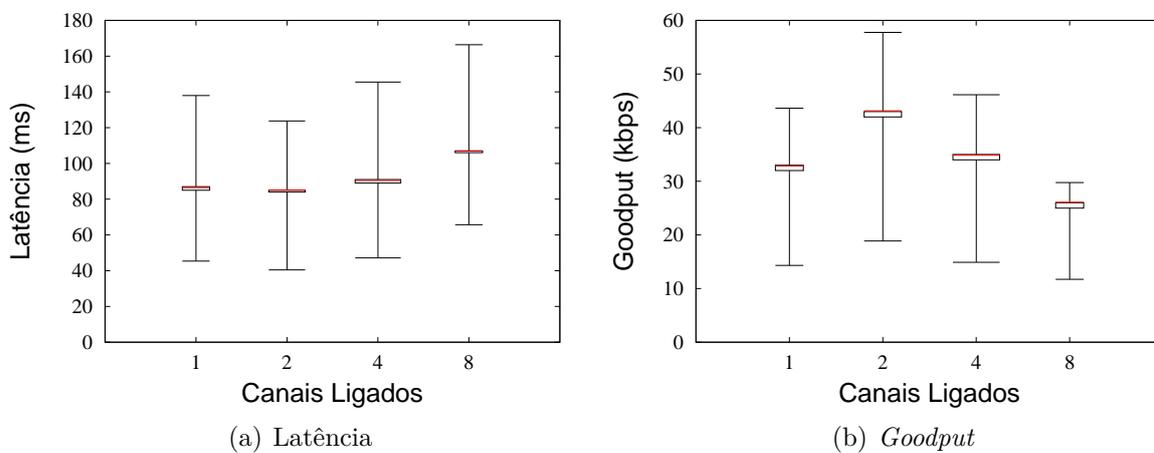


Figura 13 – Avaliação do atraso e goodput em relação ao máximo de canais unidos

6 Verificação Formal do PDAC

Os métodos formais são técnicas baseadas em formalismos matemáticos usados para especificação, desenvolvimento e verificação de sistemas e protocolos. Nessas técnicas, uma linguagem com sintaxe e semântica matematicamente definida é aplicada para criar uma especificação formal. A partir dessa especificação formal propriedades funcionais do sistema como comportamento, características de desempenho e até mesmo comportamento temporal podem ser verificadas (KERN; GREENSTREET, 1999).

Uma verificação formal deve cobrir todas as possibilidades de comportamento do sistema, ou seja, desde comportamentos esperados até situações não tão aparentes de se acontecer em uma aplicação real. Através dessa propriedade, até mesmo os eventos mais inesperados são analisados pela verificação formal. O principal benefício da verificação formal é deixar claro que as propriedades do sistema são entregues e produzem resultados esperados.

6.1 Autômatos temporizados

Os autômatos clássicos permitem raciocinar sobre a ordem no tempo dos eventos que nele ocorrem, porém não permitem raciocinar sobre a duração dos eventos ou sobre o intervalo de tempo entre os eventos. Os autômatos temporizados é uma teoria que analisa e verifica comportamentos temporais de um determinado sistema ou rede (YOVINE, 1998). Por definição, um autômato temporizado constitui de um grafo finito com conjuntos finitos de estados e transições. O que diferencia um autômato temporizado de um autômato comum é a presença de um conjunto finitos de relógios com valores reais (ALUR; DILL, 1994).

Um autômato temporizado é uma tupla dos seguintes elementos (L, l_0, C, A, E, I) . O conjunto L é o conjunto de estados, $l_0 \in L$ é o estado inicial do autômato; C é um conjunto de relógios com valor real cujo crescimento é o mesmo em todos relógios; A é um conjunto de ações, coações e ações internas; $E \subseteq L \times A \times B(C) \times 2^c \times L$ é o conjunto de transições entre os estados com uma ação(A), guarda($B(C)$) e um conjunto de relógios a serem zerados (2^c) e I representa as invariantes em um determinado estado. De maneira simplificada, pode-se dizer que as invariantes são restrições de tempos associados a estados e tem por objetivo determinar o tempo máximo que o autômato pode permanecer nesses estados (ALUR; DILL, 1994).

6.2 Verificação de modelos

A verificação formal de modelos fornece uma maneira de determinar se um modelo abstrato, como por exemplo, o projeto de um protocolo, satisfaz uma expressão formal

expressado como um formula de lógica temporal. Caso a propriedade não seja satisfeita, um contraexemplo é apresentado como fonte do problema. O objetivo da verificação é identificar problemas rapidamente para uma análise e correção (CLARKE; WING, 1996).

A lógica temporal pode ser dividida em duas categorias: a lógica temporal linear (LTL) e a lógica de árvore computacional (CTL). Além das conectivas de lógicas clássicas (*and*, *or*, *imply*), a CLT utiliza de conectivas temporais de estado e conectivas temporais de caminho (HAFFER; THOMAS, 1987).

Considerando o tempo do ponto de vista linear, utilizamos as conectivas temporais de estado: **X**, **F**, **G**, **U**. Dada uma proposição Ψ , em uma execução $X\Psi$, o estado imediatamente a seguir verifica Ψ ; em uma execução $F\Psi$, um estado qualquer a seguir verifica Ψ ; em uma execução $G\Psi$, todos os estados seguintes verificam Ψ e por fim em uma execução $\theta U\Psi$, se algum estado o θ se verificar, verifica-se Ψ ;

Considerando o tempo como uma árvore, além das conectivas apresentadas acima, ela permite ainda dois novos conectivos: **A** e **E**. Se utilizado $A\Psi$, toda execução deve satisfazer Ψ , se utilizado $E\Psi$, pelo menos uma execução deve satisfazer Ψ . Na lógica CTL, uma conectiva temporal deve sempre ser prosseguida por uma conectiva de caminho.

Além de apresentar um contraexemplo, podemos dizer que a verificação de modelos apresentam muitos outros benefícios. A modelagem é feita de forma automática, isto é, uma vez que o modelo está devidamente pronto, a análise é feita por um computador, sem interferência humana. Com isso, pode-se dizer que a parte mais complexa pode ser a modelagem correta do sistema.

6.3 Uppaal

A ferramenta que utilizamos para analisar formalmente o protocolo PDAC desenvolvido neste trabalho foi o Uppaal (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004). Uppaal é uma ferramenta de modelagem, simulação e verificação de sistemas. Desenvolvido em conjunto pelas universidades de Uppsala e Aalborg, essa ferramenta visa sistemas que podem ser modelados segundo um autômato temporizado. Possuindo uma licença gratuita para acadêmicos, o Uppaal pode ser usado para análise de vários sistemas, variando de protocolos de comunicação até aplicações multimídias.

A verificação no Uppaal ocorre em três passos. O primeiro passo é a criação de um modelo do sistema, em que o comportamento de um sistema é traduzido em um conjunto de autômatos temporizados, incluindo guardas, transições e estados. O segundo passo é as simulações, em que é possível verificar se o comportamento do sistema age como esperado. Importante observar que essa fase não é a verificação, podemos considerar esse passo como um passo de verificação e correção de erros. Finalmente o terceiro passo em que as propriedades do sistema são verificadas (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004).

Para verificar as propriedades do sistema, O Uppaal recorre a uma fração da lógica CTL, usando as conectivas temporais F e G (representada respectivamente por $\langle\langle$ e \square no verificador) e as conectivas de caminho E e A .

6.3.1 Autômato temporizado no Uppaal

A ferramenta Uppaal é baseada na teoria de autômatos temporizados e oferece recursos adicionais como uso de variáveis de diversos tipos e transições de urgência. Todo autômato modelado nessa ferramenta é um grafo com estados e transições entre os estados. Cada transição pode possuir um guarda, uma sincronização e uma ação de variáveis. Os guardas de transições são usados para manter um controle no comportamento do autômato, restringindo o uso de transições segundo alguma condição. A sincronização ocorre via canais de sincronização; todo canal é identificado por um rótulo a , em que cada rótulo possui um sub-rótulo $a!$, que sinaliza um envio do sinal de sincronização a pelo autômato, e um sub-rótulo $a?$, que indica que o autômato aguarda o sinal a . Transições sem sincronização ocorrem livremente (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004).

Dentro do grupo das sincronizações, dois tipos de sincronização podem ocorrer: sincronização binária e a sincronização *broadcast*. Na sincronização binária, um autômato possui uma transição com o rótulo $!$ e sincroniza com outro autômato que possui uma transição com rótulo $?$. Essa sincronização ocorre apenas se a condição de transmissão do guarda for verdadeira. Após ser feita a sincronização, ambos autômatos mudam seus estados e atualizam as variáveis se necessário. É importante notar que a ação das variáveis segue a ordem: primeiro a ação ocorre no autômato com rótulo $!$ e sequencialmente ocorre no autômato com o rótulo $?$. Caso exista mais de um par de autômatos para possível sincronização, a escolha é feita de forma não determinística (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004).

Em uma sincronização *broadcast* o autômato com rótulo $!$ sincroniza com diversos autômatos que possuam transições com rótulo $?$. Nessa sincronização o autômato inicial realiza sua mudança de estado, isso é se a condição do guarda para utilização da transição permitir, atualiza suas variáveis e logo em seguida todos os autômatos com rótulo $?$ atualizam seus estados seguindo uma ordem lexicográfica. Quando mais de um autômato é capaz de iniciar uma transição com rótulo $!$, a escolha ocorre de forma não determinística (BEHRMANN; DAVID; LARSEN, 2004).

Como forma de ilustrar um autômato, a Figura 14 apresenta um simples exemplo de uma máquina de café modelada como uma rede de dois autômatos temporizados no UPPAAL: o cliente e a máquina de café. Nela, um determinado cliente insere uma quantidade de moedas, modelada como a transição em que a variável moeda é incrementada. O ato de apertar o botão da máquina de café está modelada na mensagem de sincronização APERTAR, em que o autômato da máquina de café recebe essa mensagem de sincronização

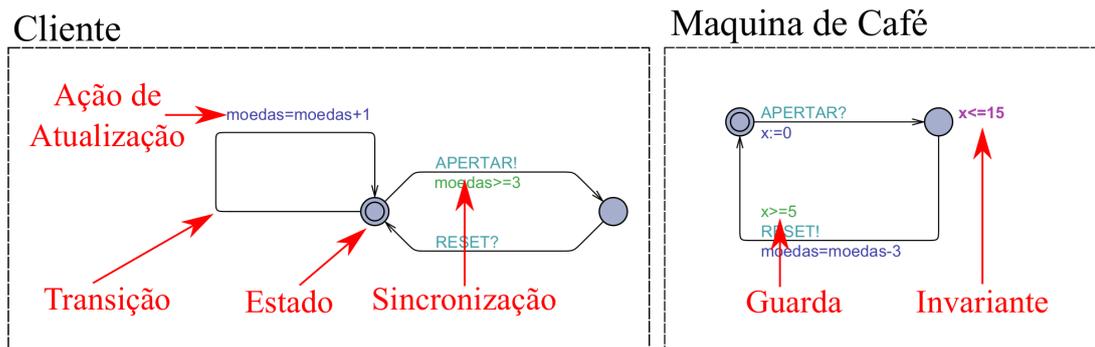


Figura 14 – Exemplo de um modelo de máquina de café no UPPAAL

com o rótulo ?. É bom observar que o ato de apertar o botão possui um guarda, em que a transição é liberada somente após o número de moedas ser 3. Nesse momento a máquina de café altera seu estado e permanecerá por um intervalo de tempo entre 5 e 15 unidades de tempo do relógio x . Após esse intervalo de tempo, o autômato da máquina de café envia uma mensagem de sincronização através do canal de sincronização RESET.

6.4 PDAC: Verificação formal

6.4.1 Limites e Suposições do Sistema

Um modelo é uma abstração de um sistema real. Sendo assim um modelo pode assumir simplificações se comparado com um sistema real. Quando criamos o modelo do protocolo proposto neste trabalho, algumas considerações foram necessárias para o modelo. Na formalização do PDAC, buscamos de maneira mais acurada possível modelar o protocolo proposto neste artigo.

Nossa principal abstração foi limitar o número máximo de nós centrais para onze, o número máximo de estações base para quatro e número máximo de canais para nove. Essa restrição tem como objetivo evitar um grande problema de modelagem: a explosão de estados. Essa explosão de estados fez com que alguns detalhes do protocolo fossem omitidos e sua topologia limitada. Experiências em modelagens em redes de sensores sem fio no entanto, limitam a topologia para 10 nós. Em uma aplicação real, o número de redes corporais em um mesmo ambiente pode passar de centenas facilmente. Em um primeiro momento pode-se esperar que a análise de pequenos conjuntos de redes não seja o suficiente e que problemas de rede só ocorram em ambientes de grande escala. No entanto, diversos trabalhos de modelagem mostraram que esse não é o caso. Erros fundamentais de conceito em sistemas, em geral, podem ser encontrados em pequenos cenários (CHEN et al., 2013).

Nossa segunda abstração foi limitar falhas de comunicação. Assumimos aqui que todas os envolvidos na comunicação possuem rádios perfeitos, isto é, conseguem identificar

se um canal está ocupado ou livre de forma utópica, visto que o objetivo dessa análise formal é mostrar a viabilidade do protocolo, a falha acrescentaria somente uma complexidade extra no modelo do PDAC. No entanto, um modelo no qual falhas podem ocorrer foi deixado para trabalhos futuros.

Por fim, as técnicas de agregação de canais também foram ignoradas no modelo, uma vez que a agregação de canal é uma otimização e não interfere no funcionamento do protocolo base. Além disso, seu uso ocasionava em uma grande explosão de estados, tornando inviável a verificação do protocolo.

6.4.2 Modelagem do PDAC

O protocolo PDAC tem como objetivo alocar diferentes canais para as transmissões de dados entre o nó central e a estação base. Com o intuito de evitar interferências, as estações base possuem o conhecimento sobre as estações base vizinhas, na qual é possível que ocorra interferência. Em nosso modelo do PDAC, desenvolvemos uma tabela sobre as quais as estações base são vizinhas (leia-se quais estações podem ocasionar interferências mutuamente) e cada uma delas possui uma lista de canais disponíveis para alocação. Após receber uma requisição de conexão, a estação base procura em sua lista por um canal disponível e o aloca para um determinado cliente. As estações base vizinhas atualizam sua lista de canais disponíveis de maneira instantânea após uma alocação de dados.

Antes de começar a descrição do nó central e da estação base em si, é importante observar como modelamos a passagem do tempo em nosso modelo. Como dito anteriormente, as mensagens de sincronização são instantâneas no UPPAAL. Para modelar a passagem do tempo no envio de informações, as mensagens de sincronização explícitas no protocolo (RTS,CTS,SYNC,ACK,DATA) possuem um prefixo `BEGIN_SEND_` ou `END_SEND_`. A Figura 15 exemplifica o tempo passando em um envio de pacote RTS. Como ilustrado, um modelo do meio foi criado para esse protocolo, com o intuito de esperar um determinado intervalo de tempo para a sincronização. O tempo de espera para entregar o pacote é dado pela seguinte fórmula: $tempo\ de\ espera = tamanho\ do\ pacote / taxa\ de\ envio$

A Figura 16 apresenta o modelo do meio e todas as mensagens descritas no protocolo estão nesse modelo. Caso o meio receba um sinal `CARRIER_SENSE`, ele responde se o canal está ocupado ou disponível (Mensagens de sincronização `OCUP` e `FREE`, respectivamente).

Como mencionado anteriormente, uma estação base possui duas interfaces de comunicação sem fio trabalhando de forma paralela. Logo em nosso modelo cada estação base é representada por uma combinação de dois autômatos:

- Estação Base Interface 1 - Usada para modelar a interface de controle, em que o canal de controle é o único sintonizado por essa interface

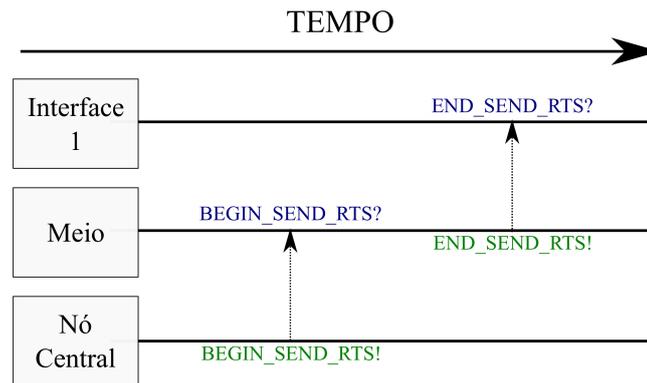


Figura 15 – Modelo do tempo de envio.

- Estação Base Interface 2 -Usada para modelar a interface de dados, e esta interface deve sintonizar-se em diferentes canais ao longo do tempo.

As Figuras 17 e 18 apresentam os modelos que representam a estação base em nossa verificação. Como podemos perceber pelas figuras, a interface de controle ao receber um sinal de RTS inicia a busca por um canal disponível. Caso não possua nenhum canal de dados para alocação, o canal envia um sinal de NCTS indicando a ausência de canais disponíveis. Caso encontre um canal de dados vago, esse canal é alocado e esse canal é colocado em uma fila para a sintonização da interface de dados. A mensagem de CTS encaminha o canal alocado e após a confirmação de recebimento desse canal pelo cliente (mensagens SYNC e ACK), a estação base envia um sinal para a interface de dados sintonizar no canal selecionado, caso ela esteja ociosa.

A interface de dados então, ao receber um sinal para acordar (`WAKEUP_INTERFACE`), sintoniza no primeiro canal da fila de transmissão e envia um sinal para o cliente sinalizando que está disponível para o envio dos dados. O cliente então envia os dados e a interface de dados confirma a transmissão com um sinal de ACK. Caso possua o buffer de transmissão e ainda possua elementos, a interface de dados sintoniza em outros canais, caso contrário ela volta ao estado ocioso.

Por fim, o nó central foi modelado através da combinação de dois autômatos:

- Gerador de dados - Usado para gerar pacotes de dados em uma determinada taxa por segundo
- Interface Nó central - Usada para transmitir os dados do nó central para uma estação base, capaz de sintonizar em diferentes canais ao longo do tempo.

As Figuras 19 e 20 apresentam os modelos que representam um nó central em nossa verificação. O gerador de dados são iniciados com um determinado valor de pacotes

por segundo, nesse caso, 5 pacotes por segundo. Enquanto o buffer não estiver cheio, um novo pacote é adicionado no buffer. Caso o buffer esteja cheio, um contador de descarte é incrementado. Caso o buffer esteja completamente vazio, esse autômato envia uma mensagem de sincronização para a interface do nó central iniciar a transmissão de dados. Caso o número de pacotes chegue a um limite estipulado, o autômato para de gerar dados.

O nó central, ao receber esse sinal de sincronização, realiza um sensoramento do meio (sincronização `CARRIER_SENSE`), caso esteja disponível o meio (sincronização `FREE`), o nó central o processo de `RTS/CTS`. Caso receba um canal, o processo de envio de dados se inicia como esperado. Caso receba um sinal de `NCTS` ou o canal se encontre ocupado (sincronização `OCUP`), o nó central vai a um estado ocioso, em que em um intervalo entre 0 e *backoff*, ele irá tentar novamente transmitir seus dados. É necessário notar que esse backoff dobra a cada tentativa má sucedida.

6.5 Verificação

O principal propósito de se usar o verificador UPPAAL é assegurar que o modelo do protocolo PDAC respeita os requisitos de sua especificação. Dessa forma, o requisito a ser verificado foi representado de maneira formal como descrito na seção 6.2.

6.5.1 Modelo livre de deadlock

A primeira propriedade a ser verificada é a de ausência de deadlock. Buscamos especificar que o sistema não entra numa situação da qual não consiga sair. Em Uppal, expressamos essa propriedade como:

1. $\mathbf{A}[](\text{deadlock} \text{ imply } \text{GLOBAL_TIMER.FIM})$.

Se todo deadlock implicar que `GLOBAL_TIMER` está no estado `FIM`, isso significa que o sistema não entra numa situação da qual não consiga sair. Como a verificação dessa propriedade retornou positivo, uma vez que o verificador testa todos possíveis estados, está provado que nosso modelo não possui deadlock.

6.5.2 Livre de interferências

Em nosso modelo, toda topologia entre as estações base foram descritas utilizando uma matriz, chamada de *map_basestation*. Caso *map_basestation*[*i*][*j*], sendo *i* e *j* identificadores de estações base, retorne positivo, implica que as estações *i* e *j* apresentam regiões sobrepostas que podem gerar interferências.

No PDAC é muito importante que estações base vizinhas não operem utilizando o mesmo canal e que dois nós centrais não transmita seus dados com uma mesma estação base utilizando o mesmo canal de dados.

Sendo assim essas situações podem ser expressas nas seguintes expressões:

2. $\mathbf{E} \langle \rangle ((BaseStation_interface2(0).CANAL_SELECIONADO == BaseStation_interface2(1).CANAL_SELECIONADO) \mathbf{and} BaseStation_interface2(0).CANAL_SELECIONADO! = -1 \mathbf{and} map_basestation[0][1])$
3. $\mathbf{E} \langle \rangle ((central_node(0).DESTINO == central_node(1).DESTINO) \mathbf{and} central_node(0).CANAL_DADOS == central_node(1).CANAL_DADOS) \mathbf{and} (central_node(1).CANAL_DADOS! = -1))$

O `CANAL_SELECIONADO` e `CANAL_DADOS == -1` representam interfaces de comunicação sem fio ociosas. Podemos dizer então que a expressão 2 busca a existência de duas interfaces de dados não ociosas, de estações base diferentes e vizinhas, utilizando o mesmo canal. Como essa expressão foi verificada e não satisfeita, é demonstrado que não ocorre estações base vizinhas operando no mesmo canal.

A expressão 3 busca por nós centrais não ociosos se comunicando com a mesma estação base e utilizando o mesmo canal. Novamente essa expressão foi verificada e não satisfeita, implicando em um modelo sem a ocorrência de clientes utilizando o mesmo canal de dados, logo uma vez recebido o canal de dados, seu acesso é exclusivo para um determinado nó central.

6.5.3 Capacidade de transmissão

Por fim, a última propriedade a ser verificada tem como objetivo identificar o número máximo de nós centrais enviando dados para a estação base sem perdas de pacote. Verificamos essa propriedade de modo que mantemos o controle de todos pacotes gerados (variável `pacotes_enviados`) e analisamos com todos os pacotes entregues para as estações base (variável `pacotes_entregues`). Em nosso modelo, limitamos o buffer de pacotes para apenas 1, sendo assim se um pacote não for enviado em 200 ms (tempo que outro pacote é gerado), ele é descartado. É importante notar que, para que não haja descarte, o número de pacotes enviados deve ser o mesmo que os entregues ao fim da simulação.

A expressão que determina essa propriedade é descrita como:

4. $\mathbf{A} [] (GLOBAL_TIMER.FIM \mathbf{imply} pacotes_enviados == pacotes_recebidos)$

A propriedade foi verificada aumentando o número de nós centrais em cada execução. Quando o número de nós centrais é superior há 9, essa propriedade é não é satisfeita. Observa-se que o verificador testa todas topologias, logo existe um caminho testado em que todos os nós centrais pretendem enviar seus dados a uma mesma estação base, ocasionando

em sobrecarga dessa, levando ao aumento da latência e conseqüentemente ocasionando em descartes de pacotes. Esse comportamento é bastante similar ao apresentado em nossas simulações com cenários sobrecarregados.

6.6 Resumo da verificação formal

Uma especificação formal do protocolo PDAC foi realizada, com o principal objetivo de alocar canais de maneira exclusiva visando evitar interferências. O modelo do protocolo foi validado de forma a confirmar sua ausência de deadlocks. Uma vez confirmada sua ausência de deadlocks, duas principais propriedades de segurança foram validadas: O canal exclusivo de um nó central e a ausência de duas estações base vizinhas utilizando o mesmo canal. Verificamos também a capacidade da estação base, injetando no ambiente de maneira incremental os nós centrais, resultando em 9 nós centrais em uma única estação, em que foi comparado o número de pacotes gerados e o número de pacotes transferidos com sucesso.

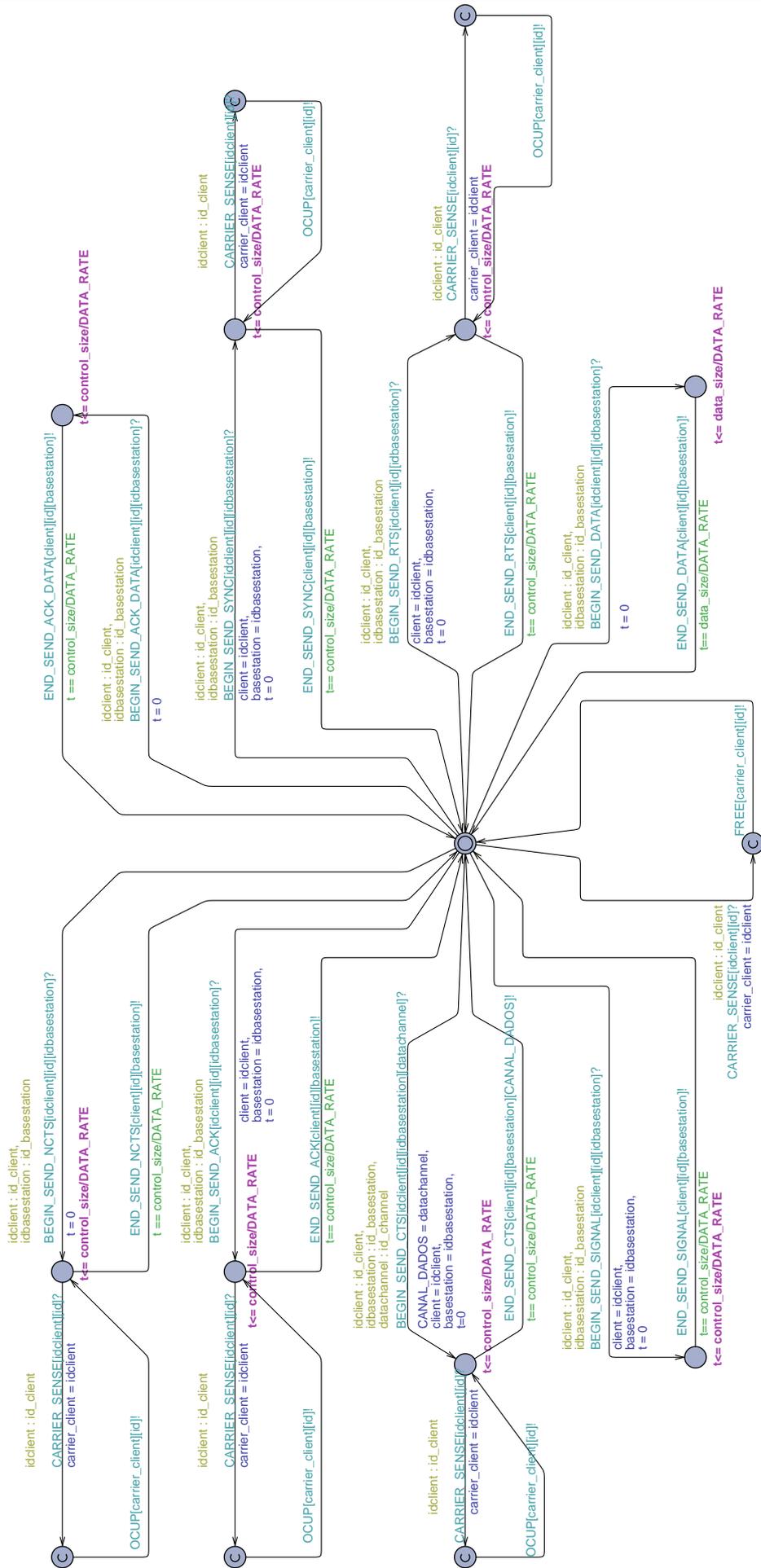


Figura 16 – Autômato finito temporizado que modela o meio

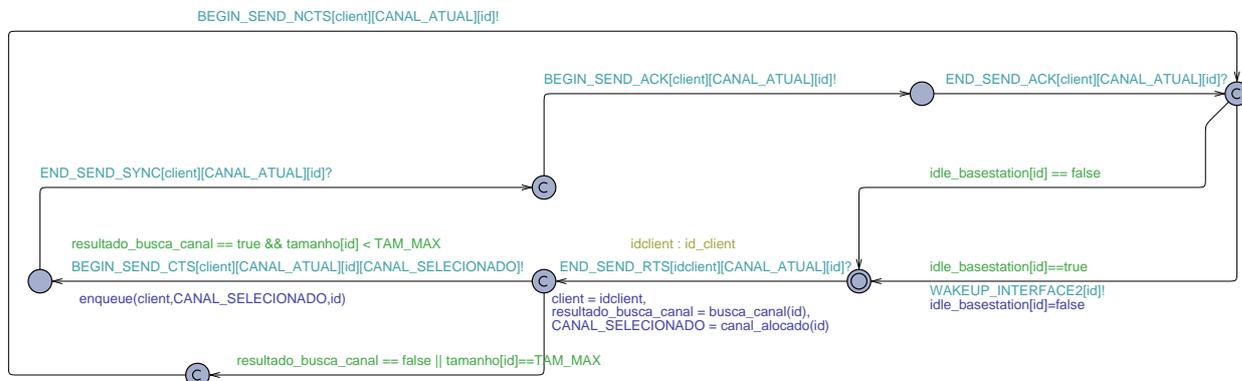


Figura 17 – Autômato finito temporizado que modela a interface de controle

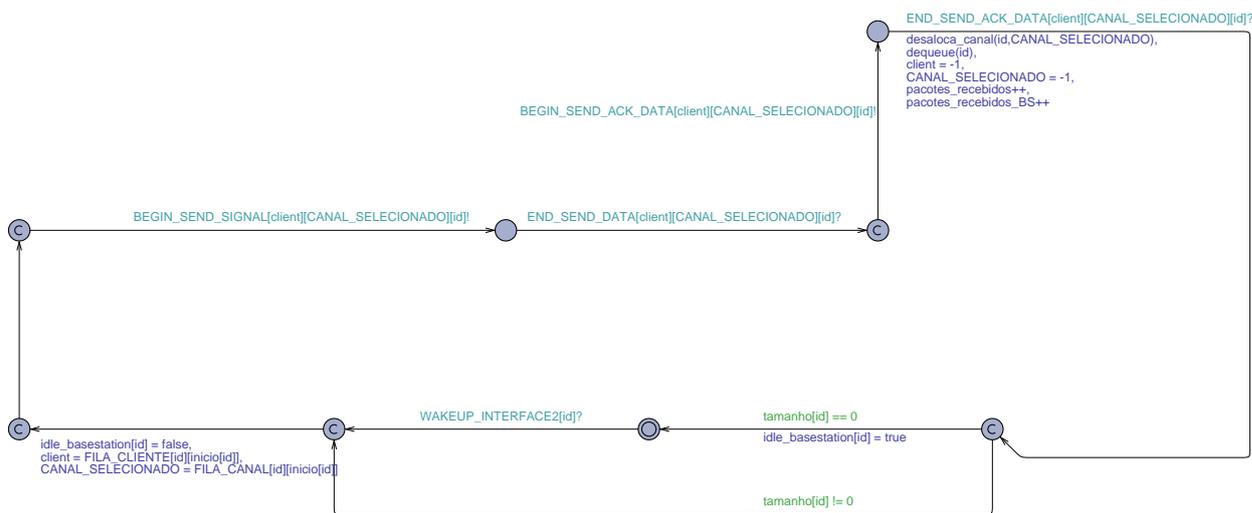


Figura 18 – Autômato finito temporizado que modela a interface de dados

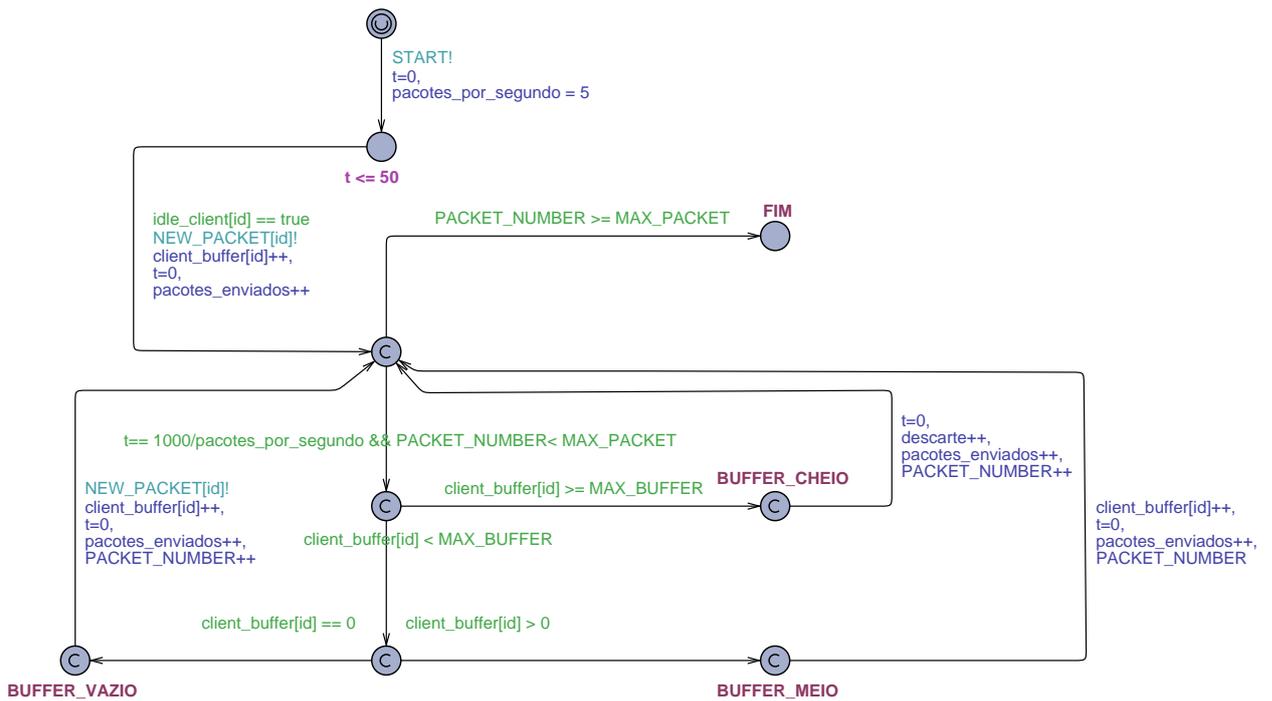


Figura 19 – Autômato finito temporizado que modela uma aplicação gerando de dados

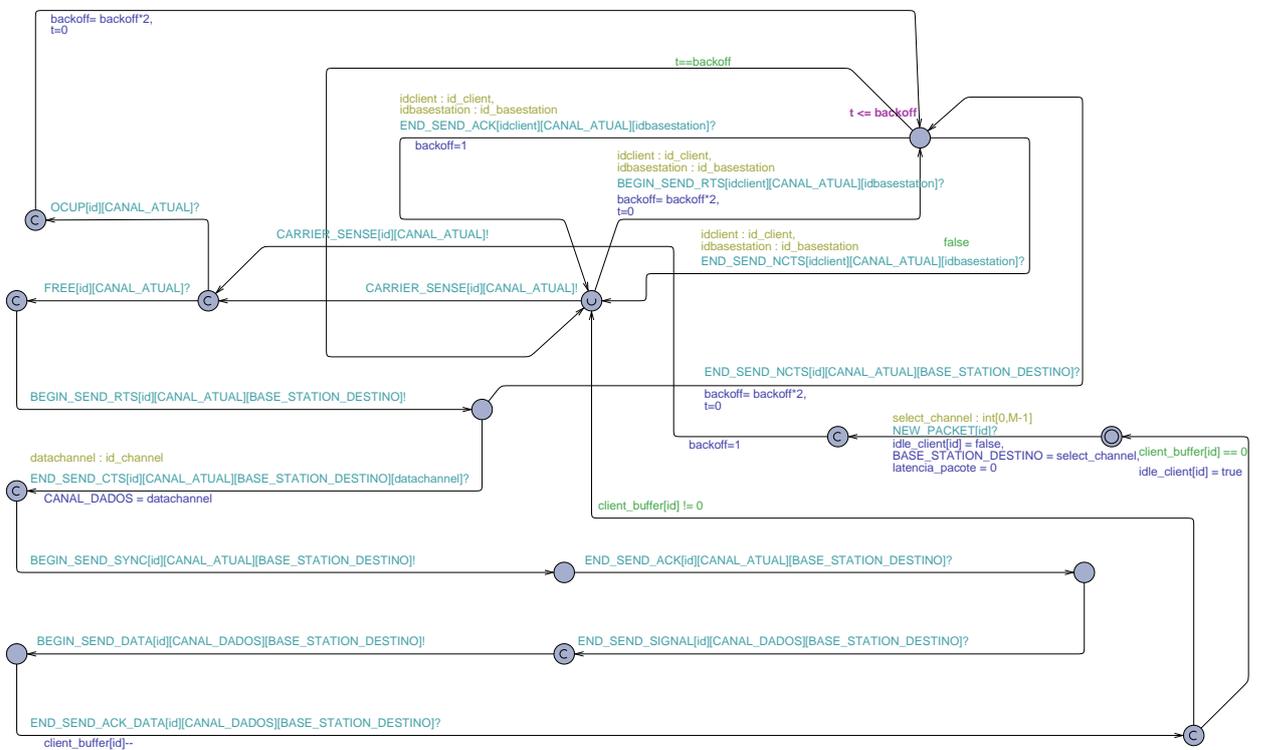


Figura 20 – Autômato finito temporizado que modela a interface do nó central

7 Conclusões

Este trabalho apresentou o PDAC, um protocolo da camada MAC ciente dos requisitos das aplicações médicas para alocar dinamicamente canais em cenários hospitalares densos e conseqüentemente evitar interferências Inter-WBAN. Esse protocolo 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 forma de provar a lógica do protocolo desenvolvido, uma verificação formal foi realizada utilizando autômatos temporizados. Um ambiente médico foi modelado, onde possuímos diversos nós centrais enviando dados para uma estação base. Utilizando a ferramenta Uppaal, diversas propriedades do protocolo foram avaliadas. Por exemplo, duas estações vizinhas utilizando mesmo canal, dois nós centrais em uma mesma região utilizando o mesmo canal, entre outras. De forma geral, os resultados observados na verificação formal apontam que as propriedades que definem o protocolo foram satisfeitas, confirmando sua eficiência. Espera-se que este trabalho auxilie no desenvolvimento de outros protocolos MAC para ambientes médicos com o intuito de evitar interferências inter-WBAN através da alocação dinâmica de canais.

7.1 Trabalhos Futuros

O protocolo PDAC apresentou uma melhora significativa em relação à latência e goodput, no entanto, sua solução se baseia na presença de um canal de controle para a alocação de frequências, o que limita seu desempenho em cenários altamente densos. Assim, sugere-se como trabalho futuro mecanismos para evitar a saturação desse canal, ou até mesmo sua eliminação do protocolo.

Além disso, o ambiente médico é caracterizado por diversos tipos de aplicações que podem variar sua criticidade. Sendo assim, esperamos que trabalhos futuros possam 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 em mesmos canais.

Por fim, este trabalho não possui o foco em economia de energia. Espera-se que novas pesquisas sejam conduzidas para determinar a quantidade de bateria consumida ao se utilizar o PDAC e propor métodos de se economizar bateria.

REFERÊNCIAS

- ALUR, R.; DILL, D. L. A theory of timed automata. *Theoretical computer science*, Elsevier, v. 126, n. 2, p. 183–235, 1994.
- BAKER, S. D.; HOGLUND, D. H. Medical-grade, mission-critical wireless networks [designing an enterprise mobility solution in the healthcare environment. *IEEE Eng. in Medicine and Biology Magazine*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 86–95, 2008.
- BEHRMANN, G.; DAVID, A.; LARSEN, K. G. A tutorial on uppaal. In: *Formal methods for the design of real-time systems*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 200–236.
- BOULIS, A. et al. Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*, 2011.
- BUKHARI, S. H. R.; REHMANI, M. H.; SIRAJ, S. A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 924–948, 2016.
- CHEN, M. et al. Body area networks: A survey. *Mobile networks and applications*, Springer, v. 16, n. 2, p. 171–193, 2011.
- CHEN, Z. et al. A review of automated formal verification of ad hoc routing protocols for wireless sensor networks. *Sensor Letters*, American Scientific Publishers, v. 11, n. 5, p. 752–764, 2013.
- CHENG, S. H.; HUANG, C. Y. Coloring-based inter-wban scheduling for mobile wireless body area networks. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 250–259, 2013.
- CLARKE, E. M.; WING, J. M. Formal methods: State of the art and future directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM, v. 28, n. 4, p. 626–643, 1996.
- DAM, T. V.; LANGENDOEN, K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.], 2003. p. 171–180.
- DEMIRKOL, I.; ERSOY, C.; ALAGOZ, F. Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 44, n. 4, p. 115–121, 2006.
- DOOST-MOHAMMADY, R.; CHOWDHURY, K. R. Transforming healthcare and medical telemetry through cognitive radio networks. *IEEE Wireless Commun.*, IEEE, v. 19, n. 4, p. 67–73, 2012.
- FANG, G. et al. Distributed inter-network interference coordination for wireless body area networks. In: *IEEE GLOBECOM*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.
- GRIMALDI, R. P. *Discrete and Combinatorial Mathematics, 5/e*. [S.l.]: Pearson Education India, 2006.
- HAFER, T.; THOMAS, W. Computation tree logic ctl^* and path quantifiers in the monadic theory of the binary tree. *Automata, Languages and Programming*, Springer, p. 269–279, 1987.

- HIEP, P. T.; KOHNO, R. Control superframe for high throughput of cluster-based wban with csma/ca. In: IEEE. *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on*. [S.l.], 2014. p. 1125–1130.
- HUANG, P. et al. The evolution of mac protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 101–120, 2013.
- JING, L. et al. A novel energy efficient mac protocol for wireless body area network. *China Communications*, IEEE, v. 12, n. 2, p. 11–20, 2015.
- JUNEJA, P.; JAIN, S. Tree based energy efficient routing scheme for body area network. In: IEEE. *Computer Engineering and Applications (ICACEA), 2015 International Conference on Advances in*. [S.l.], 2015. p. 940–947.
- KERN, C.; GREENSTREET, M. R. Formal verification in hardware design: a survey. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES)*, ACM, v. 4, n. 2, p. 123–193, 1999.
- KIRBAS, I. et al. ismac: An adaptive and energy-efficient mac protocol based on multi-channel communication for wireless body area networks. *TIIS*, v. 7, n. 8, p. 1805–1824, 2013.
- KWAK, K. S.; ULLAH, S.; ULLAH, N. An overview of ieee 802.15. 6 standard. In: IEEE. *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on*. [S.l.], 2010. p. 1–6.
- KYASANUR, P.; VAIDYA, N. H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. *ACM SIGMOBILE Review*, v. 10, n. 1, p. 31–43, 2006.
- LEE, B.; YUN, J.; HAN, K. Dynamic channel adjustable asynchronous cognitive radio mac protocol for wireless medical body area sensor networks. In: *Communication and Networking*. [S.l.]: Springer, 2011. v. 266, p. 338–345.
- LIU, B.; YAN, Z.; CHEN, C. W. Mac protocol in wireless body area networks for e-health: Challenges and a context-aware design. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 64–72, 2013.
- LUBRIN, E.; LAWRENCE, E.; NAVARRO, K. F. Wireless remote healthcare monitoring with motes. In: IEEE. *Mobile Business, 2005. ICMB 2005. International Conference on*. [S.l.], 2005. p. 235–241.
- MICHELI, G. D. E-health: From sensors to systems. In: IEEE. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2015 Transducers-2015 18th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 3–6.
- MISRA, S. et al. Random room mobility model and extra-wireless body area network communication in hospital buildings. *IET Networks*, IET, v. 4, n. 1, p. 54–64, 2014.
- MOVASSAGHI, S. et al. Wireless body area networks: A survey. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1658–1686, 2014.
- PEŠOVIĆ, U. M. et al. Single-hop vs. multi-hop–energy efficiency analysis in wireless sensor networks. In: *Telecommunications Forum*. [S.l.: s.n.], 2010.

- PHUNCHONGHARN, P. et al. A cognitive radio system for e-health applications in a hospital environment. *IEEE Wireless Commun.*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 20–28, 2010.
- REHMANI, M. H.; LOHIER, S.; RACHEDI, A. Channel bonding in cognitive radio wireless sensor networks. In: IEEE. *International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST)*. [S.l.], 2012. p. 72–76.
- SHEN, Q. et al. Exploiting geo-distributed clouds for a e-health monitoring system with minimum service delay and privacy preservation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 430–439, 2014.
- SHEN, Q. et al. Mac layer resource allocation for wireless body area networks. *ZTE Communications*, v. 3, p. 13–21, 2014.
- SOUA, R.; MINET, P. A survey on multichannel assignment protocols in wireless sensor networks. In: IEEE. *IFIP Wireless Days (WD)*. [S.l.], 2011. p. 1–3.
- VARGA, A. et al. The omnet++ discrete event simulation system. In: SN. *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*. [S.l.], 2001. v. 9, n. S 185, p. 65.
- YI, C.; WANG, L.; LI, Y. Energy efficient transmission approach for wban based on threshold distance. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 9, p. 5133–5141, 2015.
- YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.
- YOVINE, S. Model checking timed automata. *Lectures on Embedded Systems*, Springer, p. 114–152, 1998.
- YU, J.-Y.; LIAO, W.-C.; LEE, C.-Y. A MT-CDMA based wireless body area network for ubiquitous healthcare monitoring. In: IEEE. *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*. [S.l.], 2006. p. 98–101.
- ZOU, L. et al. Bayesian game based power control scheme for inter-wban interference mitigation. In: IEEE. *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*. [S.l.], 2014. p. 240–245.

ANEXO A – Problema de coloração de grafos

Um grafo é uma estrutura matemática que consiste em um conjunto de vértices e arestas. Uma analogia muito comum para grafos é um mapa de estradas com um conjunto de cidades (os vértices) e um conjunto de estradas que conectam as cidades (as arestas). Outro grande exemplo é uma rede com os nós (os vértices) e as conexões entre os nós (as arestas). Assim como as estradas, os grafos também podem representar sentido de direção. Um grafo pode ser direcionado, em que as arestas apresentam o conceito de direção e não direcionado, em que a direção da aresta não importa. Uma aresta então é definida como um par de vértices em que, em um grafo direcionado, a ordem dos vértices reflete a direção. Uma forma conveniente de se representar um grafo é apresentado na Figura 21, nela podemos ver a representação de um grafo com seis vértices e oito arestas.

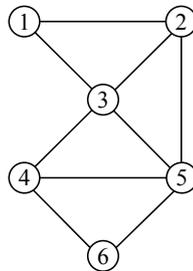


Figura 21 – Exemplo de um simples grafo

A seguinte definição é baseada na definição de grafo de Grimaldi (GRIMALDI, 2006).

Definição: Um grafo G é um par de (V, E) onde V é um conjunto de vértices e $E \subseteq V \times V$ as arestas. Escreve-se $G = (V, E)$ para denotar tal grafo. G é chamado de grafo direcionado se E é um conjunto ordenado de V . Caso E seja um conjunto desordenado, G é chamado de grafo não direcional.

O problema de coloração é um problema clássico na literatura. De forma geral, tem-se a seguinte situação: dado um grafo não direcionado $G = (V, E)$, deseja-se colorir cada vértice de forma que vértices adjacentes tenham cores diferentes. Neste trabalho, propõe-se um modelo de coloração para o problema de alocação de canais.

Definição: Dado um grafo $G = (V, E)$, uma coloração de grafos de F é uma aplicação no conjunto de vértices V em um conjunto de cores $C = c_1, c_2, \dots, c_k, K \in \mathbb{N}$. Uma coloração de vértices com k cores é chamada de k -coloração de grafos. Uma coloração de grafos própria é uma coloração tal que nenhum par de vértices adjacentes tem associada a mesma cor.

Por definição, o problema de coloração de grafos é NP-completo. Sendo assim ainda não foi descoberto um algoritmo rápido que resolva o problema de coloração para

qualquer grafo não dirigido. Sendo assim, para este trabalho, utilizamos de heurísticas para a resolução do problema.

Uma heurística simples, porém eficiente em determinados casos, é a heurística gulosa. Conhecido como algoritmo de coloração sequencial, no início de cada iteração temos uma coloração parcial dos vértices do grafo usando as cores que pertencem ao conjunto C . Cada interação consiste no seguinte:

Algorithm 1 Heurística de Coloração Gulosa

```
1: while ( do houver vértice  $v$  incolor )
2:   if ( then existir uma cor  $c$  não utilizada por nenhum vizinho de  $v$  )
3:     Atribuir a cor  $c$  para  $v$ .
4:   else
5:     Adicionar cor  $k$  no conjunto de cores  $C$ .
6:     Atribuir cor  $k$  no vértice  $v$ .
```

Como podemos notar, o algoritmo escolhe a primeira cor disponível, sem medir as consequências de longo prazo dessa escolha e sem a possibilidade de alterar vértices já coloridos e rever a escolha feita. O algoritmo produz uma coloração válida, porém o número de cores pode ser bem maior que o disponível.