



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FRANCISCO RODRIGO PARENTE DA PONTE

MECANISMOS DE ATRIBUIÇÃO DE CANAIS DE COMUNICAÇÃO PARA
DISPOSITIVOS HETEROGÊNEOS EM SMART HOMES

FORTALEZA – CEARÁ

2018

FRANCISCO RODRIGO PARENTE DA PONTE

MECANISMOS DE ATRIBUIÇÃO DE CANAIS DE COMUNICAÇÃO PARA
DISPOSITIVOS HETEROGÊNEOS EM SMART HOMES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Rafael Lopes Gomes

Co-Orientador: Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior

FORTALEZA – CEARÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Ponte, Francisco Rodrigo Parente da.
Mecanismos de Atribuição de Canais de Comunicação
para Dispositivos Heterogêneos em Smart Homes
[recurso eletrônico] / Francisco Rodrigo Parente da
Ponte. - 2018.
1 CD-ROM: il.; 4 ¾ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do
trabalho acadêmico com 60 folhas, acondicionado em
caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade
Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia,
Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação,
Fortaleza, 2018.

Área de concentração: Ciência da Computação.

Orientação: Prof. Dr. Rafael Lopes Gomes.

Coorientação: Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior.

1. Internet das Coisas. 2. Casas Inteligentes. 3.
Canais Sem Fio. 4. Interferência entre diferentes
tecnologias. I. Título.

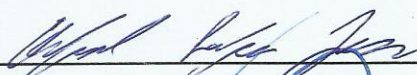
FRANCISCO RODRIGO PARENTE DA PONTE

MECANISMOS DE ATRIBUIÇÃO DE CANAIS DE COMUNICAÇÃO PARA
DISPOSITIVOS HETEROGÊNEOS EM SMART HOMES

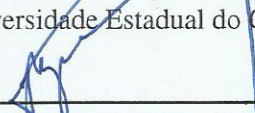
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Aprovada em: 10 de Dezembro de 2018

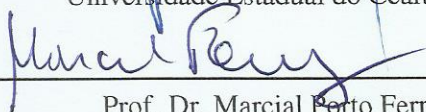
BANCA EXAMINADORA



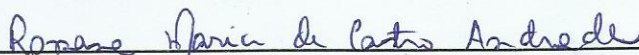
Prof. Dr. Rafael Lopes Gomes (Orientador)
Universidade Estadual do Ceará – UECE



Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior (Co-Orientador)
Universidade Estadual do Ceará - UECE



Prof. Dr. Marcial Porto Fernandez
Universidade Estadual do Ceará - UECE



Prof.ª Dra. Rossana Maria de Castro Andrade
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos meus amigos pela ajuda e paciência.

Aos meus professores não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

“É melhor lançar-se à luta em busca do triunfo mesmo expondo-se ao insucesso, que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito; E vivem nessa penumbra cinzenta sem conhecer nem vitória nem derrota.”

(Franklin Roosevelt)

RESUMO

A popularização da Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT) incentivou um rápido crescimento na utilização de dispositivos sem fio, principalmente em ambientes domésticos. Nesses ambientes, os dispositivos de IoT são comumente utilizados para automatizar atividades do dia-a-dia (como por exemplo, o acionamento de luzes e alarmes). Assim, surgiu o paradigma das Casas Inteligentes (do inglês, *Smart Homes* - SH), que são residências equipadas com dispositivos heterogêneos inteligentes, que se comunicam entre si para alcançar um objetivo em comum, facilitando assim a vida dos usuários. Em uma SH, os dispositivos sem fio se comunicam por meio de uma rede doméstica sem fio (do inglês, *Wireless Home Network* - WHN). As redes sem fio sofrem de sérios problemas de coexistência devido à interferência causada pelos dispositivos que, apesar de utilizarem diferentes tecnologias de comunicação (por exemplo, *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*), usam a mesma frequência (i.e. 2,4 GHz). Esse problema se torna mais grave quando o ambiente possui muitos dispositivos sem fio próximos uns dos outros, como é o caso nas SH. Normalmente, nenhuma estratégia adequada é aplicada para impedir que os dispositivos sem fio utilizem o mesmo canal (fato que pode gerar uma maior interferência no ambiente) e, conseqüentemente, ocorra uma redução da interferência nas WHNs. Dentro deste contexto, esta dissertação propõe dois mecanismos para atribuição de canais em *Smart Homes*, que são: (1) um modelo de programação linear inteira mista; e, (2) um algoritmo guloso determinístico. Os mecanismos propostos têm como objetivo minimizar a interferência sofrida pelos dispositivos heterogêneos nas WHNs. Assim, as propostas visam mitigar o problema de coexistência em um ambiente doméstico inteligente, levando em consideração diferentes tecnologias de comunicação (como *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*). Experimentos realizados sugerem que os mecanismos propostos são capazes de reduzir a interferência em WHNs em mais de 50% quando comparado com as abordagens existentes.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Casas Inteligentes. Canais Sem Fio. Interferência entre diferentes tecnologias.

ABSTRACT

The popularization of the Internet of Things (IoT) encouraged a rapid growth in the use of wireless devices, especially in home environments. In these environments, IoT devices are commonly used to automate daily activities (such as triggering lights and alarms). Thus, emerged the Smart Homes (SH) paradigm, which are homes equipped with heterogeneous intelligent devices, that communicate with each other to achieve a common goal, facilitating users lives. In a SH, the wireless devices communicate through a Wireless Home Network (WHN). Wireless networks suffer from serious coexistence problems due to interference from devices that, despite using different communication technologies (e.g. Wi-Fi, Zigbee, and Bluetooth) use the same frequency (i.e. 2.4 GHz). This problem becomes more serious when the environment has many wireless devices next to each other, as is the case in SH. Usually, no proper strategy is applied to prevent wireless devices from using the same channel, which may lead to an increase in the interference on the WHNs. In this context, this dissertation proposes two mechanisms for assigning channels in Smart Homes, which are: (1) a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model; and, (2) a deterministic greedy algorithm. The proposed mechanisms aim to minimize the interference suffered by the heterogeneous devices in the WHNs. Thus, the proposals aim to mitigate the problem of coexistence in an intelligent home environment, taking into account different communication technologies (such as Wi-Fi, Zigbee, and Bluetooth). Experiments carried out suggest that the proposed mechanisms are able to reduce interference in WHNs by more than 50% when compared to existing approaches.

Keywords: Internet of Things. Smart Homes. Wireless Channel. Cross-technology Interference.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – As três visões que compõem a IoT.	20
Figura 2 – Exemplo de um dispositivo IoT.	21
Figura 3 – Uma SH com dispositivos heterogêneos comunicando através da WHN.	22
Figura 4 – Distribuição dos canais <i>Wi-Fi</i>	24
Figura 5 – Distribuição dos canais <i>Zigbee</i>	26
Figura 6 – Distribuição dos canais <i>Bluetooth LE</i>	27
Figura 7 – Faixa de 2.4 GHz: canais <i>Wi-Fi</i> , <i>Zigbee</i> e <i>Bluetooth</i>	28
Figura 8 – Região onde se encontram as soluções viáveis para um determinado problema de PL.	30
Figura 9 – Região de interferência entre dois dispositivos que utilizam o canal 1 do <i>Wi-Fi</i>	38
Figura 10 – Região de interferência entre dois dispositivos que utilizam os canais 1 e 3 do <i>Wi-Fi</i>	39
Figura 11 – Algoritmo <i>CASH</i>	45
Figura 12 – Algoritmo <i>channelChooser</i>	46
Figura 13 – Cenário com 2 APs e 7 dispositivos, no simulador <i>OMNeT++</i>	49
Figura 14 – Interferência para um cenário com 2 APs.	51
Figura 15 – Interferência para um cenário com 4 APs.	51
Figura 16 – Número de pacotes entregues em um cenário de 2 AP.	53
Figura 17 – Número de pacotes entregues em um cenário de 4 AP.	53
Figura 18 – Porcentagem de pacotes perdidos em um cenário de 2 AP.	54
Figura 19 – Porcentagem de pacotes perdidos em um cenário de 4 AP.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Diferentes versões do <i>Wi-Fi</i>		23
Tabela 2	–	Classes dos dispositivos <i>Bluetooth</i>		26
Tabela 3	–	Trabalhos Relacionados		34
Tabela 4	–	Características das tecnologias utilizadas		50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Notação utilizada no algoritmo <i>CASH</i>	44
Quadro 2 – Tempo de execução do algoritmo <i>CASH</i>	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACA	Adaptative Channel Access
AFH	Adaptive Frequency Hopping
AP	Access Point
BB	Branch and Bound
BLE	Bluetooth Low Energy
CASH	Channel Assigner for Smart Homes
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
IoT	Internet of Things
ISP	Internet Service Providers
LCCS	Less Congested Channel
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
PAN	Personal Area Network
PDR	Packet Delivery Ratio
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RFI	Radio-Frequency Interference
RFID	Radio-Frequency IDentification
SDN	Software Defined Network
SH	Smart Homes
WHN	Wireless Home Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
ZDO	Zigbee Device Objects

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathcal{A}$	Conjunto de AP e suas configurações
$\mathcal{D}$	Conjunto de dispositivos e suas configurações
$\mathcal{B}$	Armazena uma cópia da melhor configuração para os dispositivos
C_j	O conjunto de canais que o AP j pode usar
I_{best}	Melhor medida global de interferência
I_{curr}	Medida atual de interferência
I_{local}^{best}	Melhor interferência local

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	SMART HOMES E INTERNET DAS COISAS	19
2.2	TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	22
2.2.1	Wi-Fi	22
2.2.2	Zigbee	24
2.2.3	Bluetooth	25
2.2.4	Interferência entre canais	27
2.3	PROGRAMAÇÃO LINEAR	29
3	TRABALHOS RELACIONADOS	32
4	METODOLOGIA	35
5	PROPOSTA	37
5.1	CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA	37
5.1.1	Fator de interferência entre canais sobrepostos	37
5.1.2	Modelo de atenuação de sinal	39
5.1.3	Modelo de interferência	39
5.2	MECANISMOS DE ATRIBUIÇÃO DE CANAIS	41
5.2.1	Modelo de Programação Linear Inteira Mista	41
5.2.2	Algoritmo CASH	43
6	AVALIAÇÃO DA PROPOSTA	48
6.1	CENÁRIO	48
6.2	RESULTADOS	50
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A miniaturização dos dispositivos eletrônicos e a redução dos custos de produção tornaram fácil a implantação de dispositivos inteligentes pelos usuários finais em suas casas. Esses dispositivos são capazes de controlar e automatizar várias tarefas do dia-a-dia, permitindo às casas convencionais darem lugar às chamadas casas inteligentes (do inglês, *Smart Homes - SH*) (STOJKOSKA; TRIVODALIEV, 2017). Casas inteligentes são residências compostas por dispositivos tradicionais (por exemplo, PCs, *tablets*, *smartphones*, etc.) e vários dispositivos inteligentes (por exemplo, sensores, atuadores, *wearables*, *smart appliances*, etc), que se comunicam entre si por meio de uma rede doméstica sem fio (do inglês, *Wireless Home Network - WHN*).

Os dispositivos inteligentes fazem parte de um paradigma chamado de Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things - IoT*), que vem ganhando destaque no cenário de telecomunicações sem fio. Esses dispositivos possuem um conjunto mínimo de funcionalidades de comunicação (como por exemplo a capacidade de receber mensagens e gerar respostas a elas), um baixo poder de processamento e restrições de armazenamento e energia (HUMMEN *et al.*, 2013). Segundo Atzori et al. (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010), IoT se tornará uma rede mundial de objetos inteligentes, exclusivamente endereçáveis, interligados através de protocolos de comunicação e que são capazes de trocar informações entre si de forma a criar um ambiente heterogêneo.

Como o objetivo dos dispositivos IoT é interagir entre si e cooperar com seus vizinhos para alcançar objetivos comuns (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Esses dispositivos adotam a rede de sensores sem fio (do inglês, *Wireless Sensor Network - WSN*) como tecnologia de comunicação, uma vez que ela tem baixo custo de implantação e baixo consumo de energia. Em geral, esses dispositivos são sensores e atuadores que usam o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) para trocar mensagens. A implementação mais conhecida do padrão IEEE 802.15.4 é o *Zigbee* (IEEE, 2006).

Além do Zigbee, é comum a utilização de outras tecnologias de comunicação como *Wi-Fi* (implementação do padrão IEEE 802.11 (IEEE, 2012)) e/ou *Bluetooth* (implementação do padrão IEEE 802.15.1 (IEEE, 2005)) nas redes domésticas. Essas três tecnologias utilizam a mesma frequência de comunicação de 2.4 GHz ISM (do inglês, *Industrial, Scientific and Medical*).

Dada a grande quantidade de dispositivos sem fio presentes nas SH, os quais utilizam a mesma frequência, é comum que as WHN sofram de sérios problemas de coexistência causados

pela interferência gerada pelos dispositivos. Esse problema de coexistência afeta a Qualidade de Serviço (do inglês, *Quality of Service* - QoS) e, especialmente, a confiabilidade e a latência da rede, o que pode levar a problemas críticos em aplicativos de usuários (NATARAJAN; ZAND; NABI, 2016).

O problema de coexistência pode ser mitigado entre dispositivos que empregam a mesma tecnologia de comunicação através do uso de um protocolo MAC, como CSMA/CA (do inglês, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que garante que os dispositivos verifiquem o meio antes de iniciar a comunicação (o chamado, *Clear Channel Assessment* - CCA). Uma abordagem alternativa é o uso da técnica AFH (do inglês, *Adaptive Frequency Hopping*), que permite que um dispositivo mude seu canal de transmissão quando detecta que o canal está sendo usado.

No entanto, tais soluções são impraticáveis quando os dispositivos usam diferentes tecnologias de comunicação, uma vez que essas técnicas são específicas para uma determinada tecnologia (por exemplo, AFH só encontra-se presente em dispositivos *Bluetooth*). Além disso, dispositivos com alta potência de transmissão (como é o caso de dispositivos que utilizam o *Wi-Fi*) não detectam dispositivos com baixa potência de transmissão (como por exemplo, os dispositivos que utilizam *Zigbee*) (JIANG; LIU; CHEN, 2017). Assim, se um dispositivo *Wi-Fi* começar a transmitir enquanto um dispositivo *Zigbee* estiver utilizando o meio, isso causará uma grande quantidade de interferência, que acarretará nos pacotes *Zigbee* serem perdidos.

Portanto, a coexistência de dispositivos heterogêneos, que utilizam a mesma frequência, mas que possuem diferentes tecnologias de comunicação, ainda é um problema em aberto nas WHNs, principalmente devido a proximidade dos dispositivos, fato que aumenta a probabilidade de interferência entre eles.

Dentro desse contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de uma solução que seja capaz de mitigar o problema de coexistência entre as tecnologias de comunicação *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*, bastante empregadas no ambiente de SH. Diminuindo assim o número de colisões e de retransmissões causados pela interferência. Com isso, espera-se melhorar a latência e a confiabilidade das redes WHNs, o que impactará diretamente no QoS e na Qualidade de Experiência (do inglês, *Quality of Experience* - QoE) dos usuários.

1.1 MOTIVAÇÃO

Dada a praticidade de utilização e a difusão das tecnologias de comunicação sem fio, é comum encontrar nas SH uma quantidade cada vez maior de dispositivos conectados às WHNs. Esses dispositivos comunicam-se através de diferentes tecnologias sem fio (como por exemplo, *Wi-Fi*, *Zigbee* e/ou *Bluetooth*), onde estas tecnologias utilizam a mesma frequência (2.4GHz ISM).

A presença desses dispositivos em ambiente doméstico gera uma quantidade grande de interferência, que prejudica o correto funcionamento da rede. Visto que, quanto maior for a interferência no ambiente, maior a probabilidade de haver colisões e, com isso, retransmissões. Esse fato diminui a confiabilidade e aumenta a latência da rede.

Dessa forma, é necessário o uso de algum mecanismo que leve em consideração as particularidades das diferentes tecnologias de comunicação empregadas nas SH e que ofereça uma solução para o problema de coexistência. Essa solução deve ser capaz de diminuir a interferência causada pelos dispositivos ao utilizarem a mesma faixa de frequência para se comunicar. Assim, será possível melhorar o funcionamento das WHNs e consequentemente garantir o QoS e QoE, melhorando a experiência para os usuários.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos gerais e específicos deste trabalho estão descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver mecanismos para a atribuição de canais que leve em consideração as diferentes características presentes nas tecnologias de comunicação *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*, com o propósito de diminuir a interferência sofrida pelos dispositivos ao se comunicarem utilizando a mesma faixa de frequência em WHN.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Realizar uma extensa pesquisa bibliográfica acerca do uso das tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth* no contexto de SH;
- b) Desenvolver uma proposta de atribuição de canais, que leve em consideração as

- características particulares de cada umas dessas tecnologias;
- c) Projetar e implementar dois mecanismos de atribuição de canais, um baseado em um modelo de programação linear inteira e outro em uma meta-heurística gulosa;
 - d) Montar um cenário de testes para avaliar a eficácia das propostas em relação à diminuição da interferência no ambiente de SH;
 - e) Evoluir os modelos de interferência de tecnologias sem fio, considerando as características dos dispositivos heterogêneos presentes nas SH.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda o embasamento teórico necessário para uma melhor compreensão do assunto, descrevendo conceitos de SH e Internet das Coisas, as tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth* e programação linear. No Capítulo 3, estão descritos os principais trabalhos relacionados que abordam a técnica de atribuição de canais. O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 5 apresenta os mecanismos de atribuição de canais propostos, que são: (1) um modelo de programação linear inteira; e, (2) um algoritmo guloso determinístico. O Capítulo 6 discute os resultados obtidos nos experimentos realizados. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos necessários para o entendimento deste trabalho, descrevendo o paradigma de IoT e Smart Homes (SH), as principais características das tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth* e o modelo de programação linear, consideradas na elaboração da proposta.

2.1 SMART HOMES E INTERNET DAS COISAS

Internet das Coisas é um conceito que está mudando a Internet como nós conhecemos. A IoT é formada por uma nova classe de dispositivos inteligentes (no geral, sensores e atuadores) que comunicam-se entre si e/ou entre outros dispositivos sem a necessidade de intervenção humana, com o objetivo de realizar tarefas específicas (LI; XU; ZHAO, 2015). O termo foi cunhado em 1999 pelo pesquisador britânico Kevin Ashton, que propunha a interligação de uma cadeia de suprimentos de uma empresa utilizando identificadores de rádio frequência (do inglês, *Radio-Frequency IDentification* - RFID) (ASHTON, 2009).

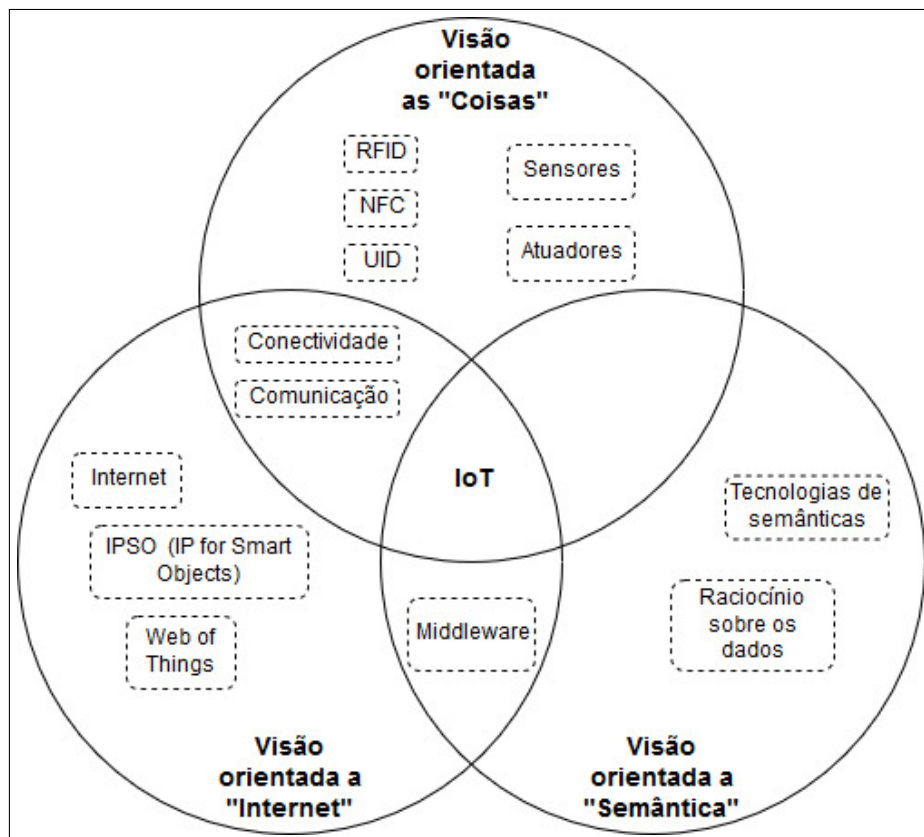
Singh et al. (SINGH; TRIPATHI; JARA, 2014) definem IoT como a interseção de três diferentes visões, que são: (i) a orientada as "Coisas", que remete aos objetos físicos presentes no ambiente; (ii) a orientada à "Internet", que diz respeito a conexão à rede mundial de computadores; e (iii) uma visão orientada a semântica, que significa uma rede de objetos inteligentes, exclusivamente endereçáveis, interligados através de protocolos de comunicação e que são capazes de trocar informações entre si de forma a criar um ambiente heterogêneo. A Figura 1 mostra as visões que compõem a IoT segundo os autores Singh et al.

Na prática, um dispositivo inteligente é composto por um microcontrolador (pequeno computador em um único circuito integrado) responsável por conceder um certo grau de inteligência ao dispositivo, um sensor/atuador e um módulo de *hardware* de rede que lhe possibilite trocar informações com outros dispositivos e/ou com a Internet. A Figura 2 mostra um exemplo de um dispositivo IoT composto por um sensor de temperatura, um microcontrolador Arduíno e um módulo de comunicação *Zigbee*.

Atualmente, é possível encontrar dispositivos de *IoT* em praticamente qualquer ambiente onde existam tarefas que possam ser automatizadas. Segundo Nalbandian (NALBANDIAN, 2015) podemos dividir as aplicações de IoT em cinco domínios diferentes, que são:

- **Transporte e Logística:** utilizando IoT para oferecer informações pertinentes ao condutor do veículo ou como um meio de se monitorar o transporte de cargas e o processo de

Figura 1 – As três visões que compõem a IoT.



Fonte: Elaborado pelo autor

fabricação de produtos;

- **Saúde:** fazendo uso de sensores para realizar a coleta de informações e o monitoramento de pacientes, pessoas e medicamentos em hospitais;
- **Ambientes Inteligentes:** melhorando a qualidade de vida dos usuários, através da automação de diversas tarefas do cotidiano, seja no trabalho ou nas residências;
- **Social:** utilizando dispositivos IoT, para solucionar certos problemas, como por exemplo, no caso de perda ou roubo de um aparelho eletrônico;
- e **Futurísticas:** dizem respeito àquelas que não podem ser desenvolvidas no momento, visto que elas necessitam de uma tecnologia que não existe ou que é complexa demais para ser implementada (como é o caso do conceito das *smart cities*).

Nas residências, os dispositivos de IoT são comumente utilizados para automação de atividades diárias (por exemplo, o acionamento de luzes, alarmes e eletrodomésticos inteligentes). Desse modo, deu-se o surgimento de um novo paradigma, chamado de Smart Homes (SH), que são casas equipadas com dispositivos de IoT, que utilizam diferentes tecnologias de comunicação sem fio para se comunicar e que ajustam seu funcionamento às necessidades dos moradores de

Figura 2 – Exemplo de um dispositivo IoT.



Fonte: Elaborado pelo autor

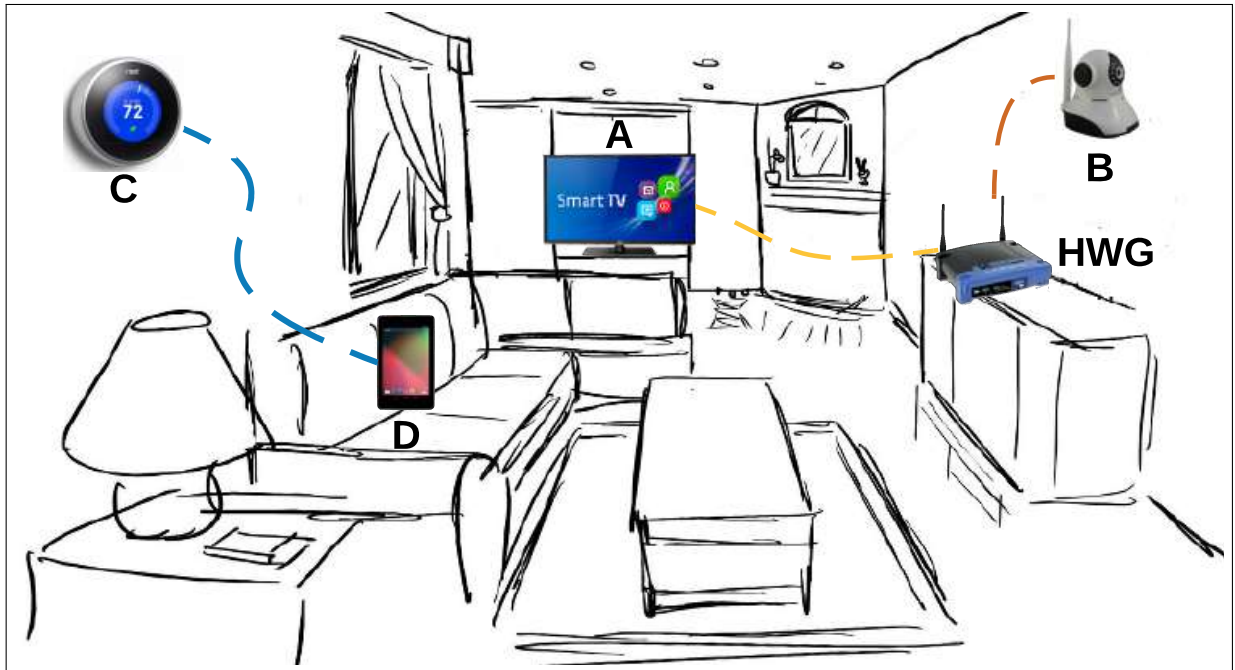
acordo com as informações coletadas (PERUMAL *et al.*, 2008).

Nas SH, costuma-se utilizar as chamadas redes sem fio residenciais (ou WHNs) como principal meio de comunicação e é comum encontrar dispositivos (como computadores, telefones, eletrodomésticos inteligentes, sensores, atuadores, dentre outros) que comunicam-se através de diferentes tecnologias sem fio. As tecnologias mais utilizadas no contexto de SH são o *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*, e, apesar de suas particularidades, elas utilizam a mesma frequência (2.4GHz ISM) para operar. A Figura 3 mostra uma SH com uma *Smart TV* e uma câmera de segurança se comunicando através da tecnologia *Wi-Fi* (dispositivos A e B) e um termostato inteligente enviando informações de temperatura para o celular do usuário, através da tecnologia *Bluetooth* (dispositivos C e D).

Em termos de aplicação, as WHNs convivem com aplicações de entretenimento multimídia (áudio e vídeo) que possuem restrições como alta largura de banda, baixa latência e/ou perda. Estas aplicações compartilham o mesmo ambiente dos demais dispositivos inteligentes de automação, segurança, conforto, etc. Portanto, em uma SH, além do fato dos dispositivos utilizarem a mesma faixa de frequência para se comunicar (o que gera interferência), este tráfego adicional pode comprometer os requisitos de QoS e QoE das aplicações dos usuários.

As SH e as redes WHN são o foco dessa dissertação, pois são ambientes onde dispositivos heterogêneos, que utilizam diferentes tecnologias de comunicação, coexistem. Assim, uma SH é o cenário ideal para testar a aplicabilidade e a funcionalidade dos atribuidores de canais propostos. Uma vez que elas permitem que a interferência total seja medida, analisada e que conclusões sejam realizadas acerca de como melhorar o tráfego da rede.

Figura 3 – Uma SH com dispositivos heterogêneos comunicando através da WHN.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

O crescente número de dispositivos sem fio gera um aumento no congestionamento do espectro de rádio, principalmente na faixa de 2.4 GHz. Esta faixa de rádio é a escolha mais popular para as Redes Locais Sem Fio (do inglês, *Wireless Local Area Network* - WLANs), devido à sua disponibilidade mundial. Assim, nesta seção, descreveremos as características de três tecnologias de comunicação que utilizam a faixa de 2.4 GHz (isto é, *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*) e que são utilizadas no contexto de SH.

2.2.1 Wi-Fi

O *Wi-Fi*, marca comercial da *Wi-Fi Alliance* (WI-FI, 2018), é uma tecnologia de comunicação de rádio para redes locais sem fio baseada no padrão IEEE 802.11 (IEEE, 2012). Dispositivos que utilizam essa tecnologia se conectam a Internet através de um AP e compõem as chamadas WLANs. A cobertura do sinal de um AP (ou *hotspot*) pode alcançar um valor entre 20m, em ambientes domésticos com paredes que bloqueiam as ondas de rádio, e muitos quilômetros quadrados, no caso de ambientes ao ar livre. Essa diferença de alcance ocorre devido as diferenças entre versões e as bandas empregadas, que são duas: 2.4 GHz e 5 GHz.

Para se comunicar, os dispositivos devem utilizar uma versão do *Wi-Fi* suportada

pelo AP. Dentre as diferentes versões do padrão 802.11, as versões 802.11 a/b/g/n são as mais utilizadas. Elas diferem entre si pela frequência em que operam, a largura de banda dos canais de rádio, as taxas máximas de transmissão de dados que suportam e etc. A seguir, as principais características de cada uma das versões é apresentada. A Tabela 1 apresenta em resumo as características de cada uma das versões.

- **802.11a:** alcança velocidades de até 54 Mbps. Opera na frequência de 5 GHz, suportando até 64 clientes (dispositivos) por AP. Possui um alcance maior que a versão 802.11b, no entanto, os dispositivos costumam ser mais caros e menos utilizados. É compatível com dispositivos que utilizam as versões 802.11b e 802.11g.
- **802.11b:** é capaz de alcançar taxas de transmissão de até 11 Mbps. Opera na frequência de 2.4GHz, suportando até 32 clientes por AP. Os aparelhos costumam ser baratos e são os mais utilizados atualmente pelos provedores de Internet (do inglês, *Internet Service Providers* - ISP).
- **802.11g:** possui características similares a versão 802.11b, no entanto, é capaz de alcançar velocidades de até 54 Mbps.
- **802.11n:** adiciona o método de transmissão MIMO (do inglês, *multiple-input multiple-output*), tornando-se assim capaz de utilizar múltiplas antenas. Com isso, pode operar nas frequências de 2.4 GHz e/ou de 5 GHz, alcançando taxas de transmissão entre 54 Mbps e 600 Mbps.

Tabela 1 – Diferentes versões do Wi-Fi

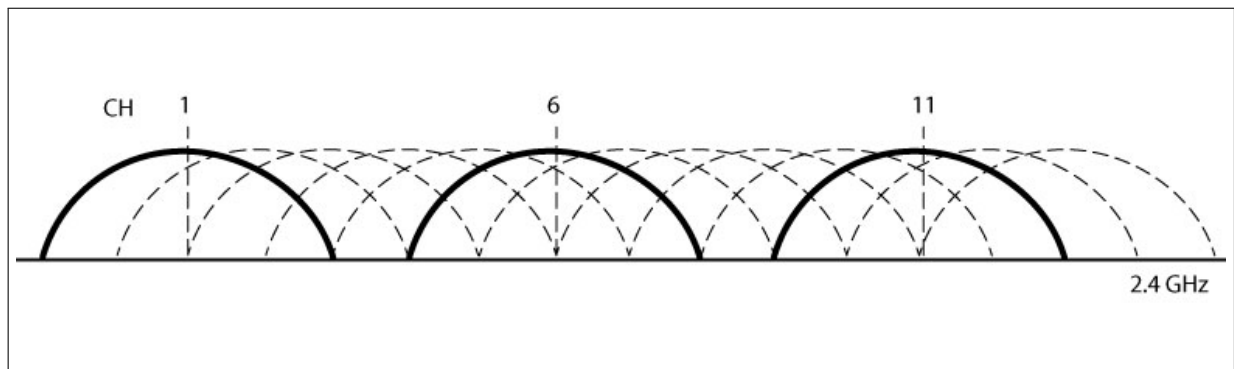
Versão	Frequência	Taxa de transmissão
802.11	2.4 GHz	2 Mbps
802.11a	5 GHz	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
802.11n	2.4 GHz e/ou 5 GHz	54 Mbps a 600 Mbps

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como dito anteriormente, a faixa de 5 GHz é pouco utilizada, já que a maioria dos equipamentos existentes não suportam essa frequência e são mais caros. Além disso, o seu sinal é facilmente absorvido por obstáculos, o que faz dela uma péssima opção para ambientes domésticos (NATARAJAN; ZAND; NABI, 2016). Assim, dentre as duas bandas disponíveis para uso (i.e. 2.4 GHz e 5 GHz), a frequência de 2.4 GHz (em particular, a versão 802.11b) é a mais utilizada nas residências e é portanto, a banda utilizada nesse trabalho.

A versão 802.11b é bastante utilizada nas SH por dispositivos que exigem altas taxas de transmissão, como *streaming* de áudio e vídeo. Possui um alto poder de transmissão e pode atingir um longo alcance. Dispositivos que operam nessa frequência costumam sofrer interferência de outros dispositivos, como por exemplo: fornos de micro-ondas, dispositivos *Zigbee* e *Bluetooth*, babás eletrônicas e telefones sem fio. A versão 802.11b é constituída por 13 canais sobrepostos, com uma largura de banda de 22 MHz (IEEE, 2012). Dentre os 13 canais, três deles não se sobrepõem, que são: os canais 1, 6 e 11. A Figura 4 mostra a distribuição dos canais *Wi-Fi*.

Figura 4 – Distribuição dos canais *Wi-Fi*.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.2 Zigbee

Zigbee é um protocolo de comunicação, baseado no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2006), utilizado para a criação de redes sem fio. Essas redes são usadas por dispositivos que possuem restrições de energia, para realizar funções de controle e monitoramento. *Zigbee* é uma tecnologia desenvolvida para ser mais simples e barata que outras tecnologias de redes de área pessoal sem fio (do inglês, *Wireless Personal Area Network* - WPANs), como o *Wi-Fi* ou *Bluetooth*.

Sua especificação é mantida por um grupo de empresas chamado de *Zigbee Alliance* (ALLIANCE, 2018). O *Zigbee* fornece um meio de baixa latência, pelo qual dispositivos podem se comunicar e é usado em pequena escala em projetos de automação residencial, coleta de dados médicos ou em qualquer rede sem fio que possua dispositivos que apresentem características como baixa potência e recursos limitados.

Zigbee baseia-se no padrão IEEE 802.15.4 para implementar a camada física e de

controle de acesso. A especificação inclui ainda quatro componentes principais, que são: a camada de rede, a camada de aplicação, os objetos de dispositivo *Zigbee* (do inglês, *Zigbee Device Objects* - ZDOs) e objetos de aplicativo definidos pelos fabricantes (IEEE, 2006). Os ZDOs são responsáveis por diversas tarefas que incluem o controle das funções dos dispositivos, o gerenciamento de solicitações para ingressar em uma rede, bem como a descoberta e segurança dos dispositivos.

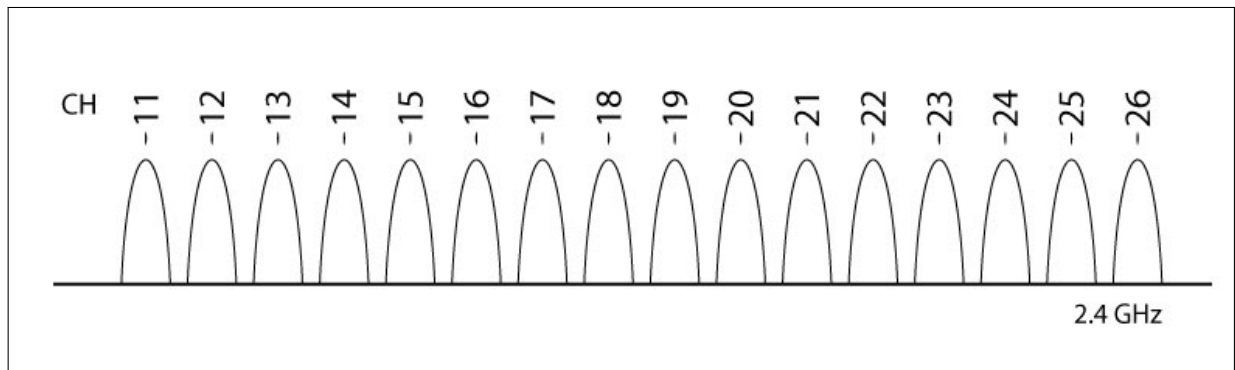
A camada de rede suporta nativamente redes do tipo estrela, árvore e redes *mesh* genéricas. Toda rede deve possuir: (i) um dispositivo coordenador, responsável por iniciar a criação da rede e armazenar informações sobre ela; (ii) um dispositivo roteador, capaz de executar uma aplicação e retransmitir dados vindos de outros dispositivos *Zigbee*; e (iii) um dispositivo final, que é capaz de executar uma aplicação e conversar com o coordenador e/ou dispositivo roteador, mas que não possui capacidade de retransmissão.

Seu baixo consumo de energia limita as distâncias de transmissão a linha de visão e a um alcance entre 10 e 100 metros, dependendo da potência do dispositivo e das características do ambiente. O *Zigbee* é normalmente usado por aplicativos com baixa taxa de transmissão de dados que exigem longa vida útil da bateria e um meio seguro. O *Zigbee* tem uma taxa máxima de transmissão de 250 kbit/s, adequada para transmissões de dados intermitentes de um sensor ou de um dispositivo de entrada.

O padrão 802.15.4 especifica a operação dos dispositivos na bandas de 2.4 GHz (mundial), 902 a 928 MHz (Américas e Austrália) e 868 a 868,6 MHz (Europa) ISM. Nessa dissertação considerou-se a utilização da banda de 2.4 GHz, que é utilizada mundialmente e que interfere na comunicação dos dispositivos *Wi-Fi* e *Bluetooth*. O *Zigbee* possui dezesseis canais não sobrepostos, cada canal tem 2 MHz de largura de banda e dois canais consecutivos têm uma distância de 5 MHz (IEEE, 2006). A Figura 5 ilustra a distribuição dos canais *Zigbee*.

2.2.3 Bluetooth

Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio, utilizada principalmente por dispositivos móveis para a troca de dados entre curtas distâncias. Ele utiliza a banda de 2.4 GHz ISM para a construção de redes de área pessoal (do inglês, *Personal Area Network* - PANs). O *Bluetooth* é gerenciado pelo *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) (SIG, 2018), que tem mais de 30.000 empresas associadas nas áreas de telecomunicações, computação, redes e eletroeletrônicos. O IEEE padronizou o *Bluetooth* como IEEE 802.15.1 (IEEE, 2005), mas

Figura 5 – Distribuição dos canais Zigbee.

Fonte: Elaborado pelo autor

atualmente não mantém mais o padrão.

Bluetooth é um protocolo baseado na transmissão de pacotes e possui uma arquitetura do tipo *master/slave*, onde um dispositivo *master* pode se comunicar com no máximo sete dispositivos em uma *piconet* (uma rede ad-hoc que utiliza a tecnologia *Bluetooth*). Além disso, os dispositivos podem alternar funções, ou seja, um dispositivo *slave* pode se tornar *master* (por exemplo, um fone de ouvido iniciando uma conexão a um telefone necessariamente começa como *master* - como o iniciador da conexão - mas pode passar a funcionar como *slave*).

O alcance dos dispositivos depende de sua classe e de sua potência de transmissão, mas na prática, os valores podem variar devido a fatores externos (por exemplo, a presença de obstáculos no ambiente). A maioria dos dispositivos *Bluetooth* são alimentados por bateria e pertence a Classe 2. Ao todo, existem 4 classes com diferentes valores para a potência máxima permitida e alcance máximo de transmissão. A Tabela 2 resume as 4 classes do *Bluetooth*.

Tabela 2 – Classes dos dispositivos *Bluetooth*.

Classe	Potência Máxima	Alcance Máximo
1	20 dBm	100 m
2	4 dBm	10 m
3	0 dBm	1 m
4	-3 dBm	0.5 m

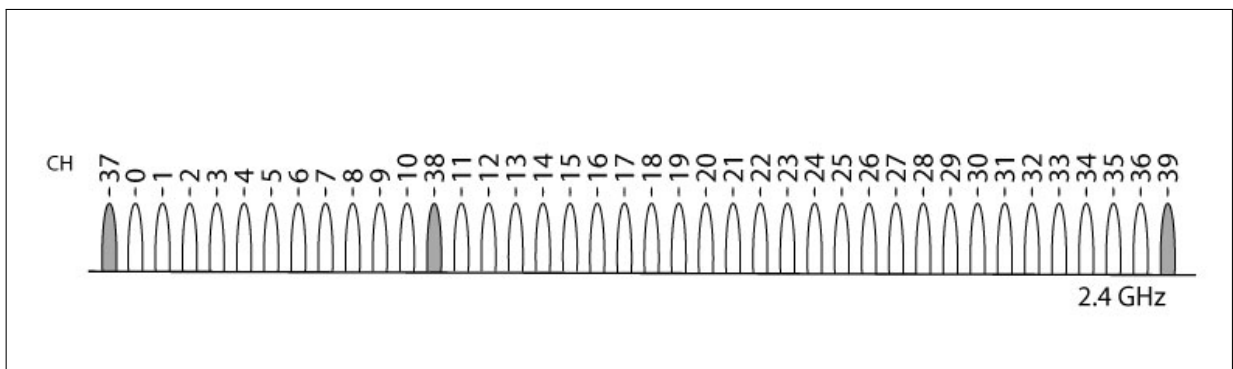
Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, o *Bluetooth* clássico foi substituído pelo *Bluetooth Low Energy* (*Bluetooth LE* ou BLE). O BLE foi desenvolvido para ser usado por dispositivos nos setores da saúde, *fitness*, *beacons*, na segurança e no entretenimento doméstico. Em comparação com o *Bluetooth*

clássico, o BLE fornece um alcance semelhante, mas com um menor consumo de energia e preço (RAZA *et al.*, 2015). O *Bluetooth LE* por ser a mais nova versão do *Bluetooth*, é a tecnologia considerada nesse trabalho.

O *Bluetooth LE* possui 39 canais não sobrepostos, dos quais, os canais 37, 38 e 39 são utilizados para descoberta, estabelecimento de conexão e transmissão de *broadcasts* (IEEE, 2005). Os canais possuem uma largura de banda de 1 MHz. A Figura 6 apresenta a distribuição dos canais *Bluetooth LE*.

Figura 6 – Distribuição dos canais *Bluetooth LE*.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.4 Interferência entre canais

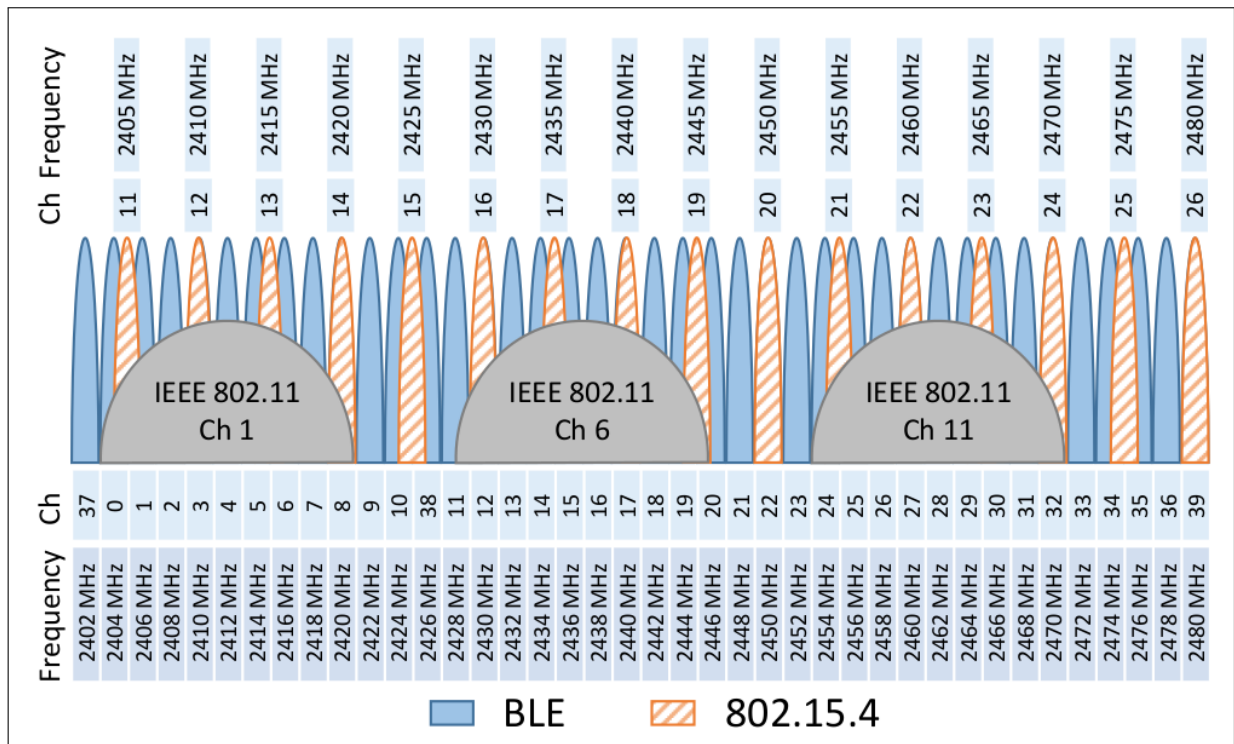
Problemas de recepção de rádio são normalmente causados por um sinal fraco (devido a atenuação do sinal ao longo de sua trajetória) e/ou por causa de ruídos. Ruídos de rádio são sinais elétricos aleatórios e indesejados, percebidos pelo receptor do dispositivo, junto com o sinal desejado. O ruído de rádio é uma combinação de ruídos atmosféricos (estática criada por efeitos naturais na atmosfera como raios), ruídos térmicos e interferência causada por radio-frequência (do inglês, *Radio-Frequency Interference* - RFI) (RAPPAPORT *et al.*, 1996). RFI, no espectro de radio-frequência, é uma perturbação externa causada por dispositivos elétricos e captada pela antena do receptor. Isso ocorre quando há dispositivos na vizinhança transmitindo na mesma frequência ou em uma frequência similar àquela do receptor.

Para mitigar a interferência entre dispositivos que utilizam a mesma frequência para se comunicar, é comum dividir a banda em canais com diferentes larguras (a depender da tecnologia utilizada). No entanto, quando dois dispositivos iniciam uma transmissão utilizando canais sobrepostos (ou parcialmente sobrepostos), ocorre a interferência entre canais (do inglês,

Co-Channel Interference). Quando isso acontece, é comum os dispositivos experimentarem uma grande interferência, em decorrência, os pacotes transmitidos colidem e são perdidos. Assim, a utilização de canais que não se sobrepõem é uma forma de evitar a interferência entre dispositivos que usam a mesma banda

As tecnologias mencionadas anteriormente compartilham a mesma frequência. Este fato implica em uma grande quantidade de canais sobrepostos no mesmo ambiente. A Figura 7 mostra a distribuição dos canais *Wi-Fi* não sobrepostos, assim como todos os canais das tecnologias *Zigbee* e *Bluetooth*.

Figura 7 – Faixa de 2.4 GHz: canais *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*.



Fonte: Natarajan et al. (NATARAJAN; ZAND; NABI, 2016)

Apesar das tecnologias apresentadas na Figura 7 utilizarem a mesma frequência de comunicação, a interferência pode ser evitada utilizando-se apenas canais não sobrepostos (devido às diferenças nas larguras de banda). Assim, se tivermos em um ambiente um dispositivo *Wi-Fi* “A”, um dispositivo *Zigbee* “B” e um dispositivo *Bluetooth* “C”, podemos conectar o dispositivo “A” no canal *Wi-Fi* 1, o dispositivo “B” no canal *Zigbee* 15 e o dispositivo “C” no canal *Bluetooth* 20. Dessa forma, não haverá interferência entre esses dispositivos.

No entanto, à medida que a quantidade de dispositivos vai aumentando, essa abordagem torna-se impraticável, visto que ela limita a quantidade de soluções para o problema de

atribuição de canais. Portanto, a utilização apenas de canais não sobrepostos não é uma boa solução, assim, outras características (como a potência de transmissão e a atenuação do sinal) devem ser levadas em consideração ao tentar resolver o problema de atribuição de canais em SHs.

2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR

Pesquisa operacional (PO) é um ramo da matemática que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na tomada de decisões. É usado na análise de sistemas complexos do mundo real, sobretudo com o intuito de melhorar ou otimizar a performance dos mesmos. Um dos vários modelos utilizados pela PO para resolução de problemas é a Programação Linear (PL).

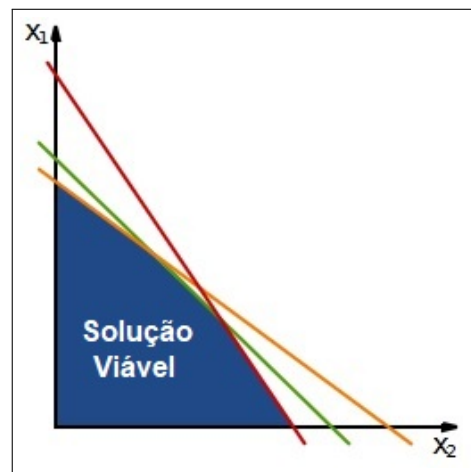
A PL é uma técnica utilizada para se otimizar uma função objetiva linear, sujeita a restrições de igualdade e/ou desigualdade linear. Esse tipo de problema pode ser expresso na forma canônica como mostrado na Equação (2.1), onde x representa um conjunto de variáveis (a serem determinadas) pertencentes a função objetiva z e as inequações $Ax \leq b$ e $x \geq 0$ são as restrições que vão especificar a região sobre a qual a função objetiva deve ser otimizada (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar (maximizar)} & z = cx \\ \text{sujeito a} & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{array} \quad (2.1)$$

Assim, a interseção dessas desigualdades definem um polígono convexo, que representa a região no espaço onde as soluções viáveis para o problema analisado se encontram. O problema pode ser de minimização (onde as variáveis devem minimizar o valor da função objetiva) ou de maximização (na qual as variáveis devem maximizar o valor da função objetiva). A Figura 8 mostra o espaço de soluções viáveis formado pelo polígono convexo (em azul), que foi gerado pela interseção de três desigualdades (representadas pelas retas em vermelho, verde e amarelo).

Dentre os modelos de PL, o modelo de programação inteira é um problema de otimização na qual todas as variáveis são restritas a inteiros. Em muitos cenários, o termo refere-se a Programação Linear Inteira (PLI), no qual a função objetivo e as restrições são lineares. Esse tipo de modelo é muito utilizado quando não se admite a presença de soluções

Figura 8 – Região onde se encontram as soluções viáveis para um determinado problema de PL.



Fonte: Elaborado pelo autor

fracionárias, como por exemplo, na fabricação de veículos onde não é aceito a produção de metade de um automóvel. A PLI é um problema do tipo NP-completo.

Existe ainda um modelo chamado de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que permite a existência de variáveis discretas (que podem assumir um número finito ou infinito contável de valores, ou seja, valores inteiros) e de variáveis contínuas (que podem assumir valores fracionais). A PLIM é um problema do tipo NP-difícil. Tanto a PLI, como a PLIM podem ser aplicados em diversos cenários como no planejamento de produção, no *scheduling* de atividades, em redes de telecomunicações e etc.

Existem duas formas de se resolver os modelos de programação linear, que são: (1) a forma gráfica, encontrando-se os pontos de interseção das inequações (como mostrado na Figura 8; ou, (2) através do uso do *SIMPLEX*, método iterativo que procura melhorar uma solução inicial viável, até que se obtenha a solução ótima para o problema (isto é, quando não for possível obter uma solução melhor).

Uma forma de se otimizar a execução do método *SIMPLEX* e evitar a análise de todo o espaço viável de soluções, é o uso do algoritmo *Branch and Bound* (BB). O algoritmo recursivamente divide o espaço de busca em espaços menores, minimizando/maximizando a função objetiva $f(x)$ nesses espaços menores. A divisão é chamada de ramificação e por si só, significaria a enumeração por força bruta de todas as soluções candidatas. Por isso, para melhorar o seu desempenho, o algoritmo BB encontra os limites das variáveis que minimizam/maximizam $f(x)$ e usa esses valores para "podar" o espaço de pesquisa, eliminando espaços que não conterá

uma ótima solução.

Portanto, a PLI se torna uma possível abordagem para o problema de atribuição de canais. Ela possibilita a criação de um modelo matemático (sujeito a restrições como, um dispositivo deve-se conectar a um AP através de um canal), que represente um cenário de *Smart Home*. Assim, é possível encontrar o conjunto de canais que minimiza a interferência entre os dispositivos no ambiente. Esse modelo faz parte da proposta dessa dissertação e é descrito em detalhes na Subseção 5.2.1.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são descritos os principais trabalhos relacionados à alocação de canais em redes sem fio. A Tabela 3 resume o foco dos trabalhos encontrados na literatura, destacando as diferenças entre eles e a proposta deste trabalho.

Murali Achanta (ACHANTA, 2004) desenvolveu um método capaz de escolher o canal menos congestionado (do inglês, *Less Congested Channel* - LCCS) em redes *Wi-Fi*. Cada Ponto de Acesso (AP) procura o canal menos utilizado (isto é, o canal com o menor número de clientes conectados), então ele começa a operar neste canal até a próxima iteração (quando busca por um canal menos congestionado, passando a operar nele, e assim por diante). O AP examina o meio procurando por *beacon frames*, que são quadros de gerenciamento do padrão IEEE 802.11 e que contêm todas as informações acerca das WLANs. Depois de examinar todos os canais, o AP determina o número de dispositivos por canal e o canal que está sendo menos utilizado. Essa solução força a rede a ser analisada constantemente e é uma solução proprietária *Cisco*. Além disso, ela só funciona com a tecnologia *Wi-Fi*.

Coronado et al. (CORONADO *et al.*, 2018) apresentam o *Wi-Balance*, um algoritmo projetado para diminuir domínios de colisão entre os APs de uma rede e oferecer um esquema de associação, capaz de detectar situações nas quais o tráfego não é eficiente, para os dispositivos dos usuários. O algoritmo parte de um AP aleatório da rede, analisa os canais utilizados por seus vizinhos e atribui o canal que estiver sendo menos utilizado ou, se vários canais se encaixarem nessa condição, o canal com a menor taxa de ocupação. O algoritmo conclui sua execução, quando encontra uma configuração que minimiza o número de APs no mesmo domínio de colisão. Além disso, o algoritmo é responsável por um processo de re-associação de dispositivos de usuários a APs, quando detecta um canal que possui um valor de ocupação mais baixo e que irá diminuir a interferência no ambiente. Essa abordagem necessita a utilização de um controlador SDN (do inglês, *Software Defined Network*) e só leva em consideração dispositivos *Wi-Fi*.

Mishra et al. (MISHRA; BANERJEE; ARBAUGH, 2005) modelam a atribuição de canais como um problema de coloração de grafos, no qual diferentes pesos são dados a diferentes arestas (que representam a interferência entre dois dispositivos). Essa abordagem procura minimizar a interferência máxima experimentada pelo dispositivo, levando em consideração todas as regiões de interferência. Matematicamente, a intenção é minimizar o produto máximo do fator de interferência e a função de peso. O modelo desenvolvido pelos autores não considera

a coexistência de diferentes tecnologias na solução do problema, bem como a interferência causada pela sobreposição dos canais.

Diferentemente dos trabalhos anteriores que tratavam a interferência do ponto de vista dos dispositivos, Akl et al. (AKL; AREPALLY, 2007) buscam minimizar a interferência do ponto de vista dos APs. A interferência é medida como um fator de sobreposição entre os canais, a potência de transmissão dos APs e a redução da densidade de potência das ondas eletromagnéticas. Cada AP executa de forma periódica e independente o algoritmo que minimiza a interferência, baseado na quantidade total de interferência medida no ambiente. Apesar do trabalho focar na minimização da interferência, a solução proposta não leva em consideração a existência de dispositivos heterogêneos, por isso, ela não consegue lidar com a interferência entre diferentes tecnologias de comunicação.

Mishra et al. (MISHRA *et al.*, 2006) apresentam um algoritmo de distribuição de canais, baseado no conceito de salto entre canais (do inglês, *Channel Hopping*). Cada AP é inicializado com uma sequência única de canais. Os APs alternam periodicamente entre esses canais, de modo que, a longo prazo, todos os APs atingem uma taxa de transmissão média. O principal limitante desta abordagem é a sincronização dos relógios de todos os AP, para garantir que a mudança entre os canais ocorram no mesmo instante. Além disso, o algoritmo não considera o problema de coexistência entre diferentes tecnologias em redes sem fio.

Cheng et al. (CHENG; HO, 2016) propõem um algoritmo cujo objetivo é aumentar a taxa de entrega de pacotes (do inglês, *Packet Delivery Ratio* - PDR). O algoritmo, chamado de *Adaptive Channel Access* (ACA), foca no domínio de tempo e desenvolve um método de prevenção de interferência para facilitar a coexistência da tecnologia *Zigbee* em WLANs. O algoritmo ACA funciona da seguinte forma: (1) cada nó da rede, analisa consecutivamente todos os 16 canais do *Zigbee*, realizando medições para determinar o valor do PDR; (2) o algoritmo executa os cálculos necessários para a seleção dos melhores canais (aqueles que minimizam a interferência e aumentam o PDR); e, (3) os canais são atribuídos aos dispositivos, de acordo com seu nível de prioridade dentro da rede. Esse trabalho força que a rede seja constantemente analisada, uma vez que o valor do PDR tende a variar de acordo com o tempo. Além disso, o algoritmo só sugere canais para dispositivos *Zigbee*. Sendo assim, limita a aplicabilidade nos cenários de SH.

Como pode ser visto, há uma quantidade significativa de técnicas que abordam a alocação de canal no IEEE 802.11 e, assim, procuram minimizar a interferência gerada em uma rede sem fio. No entanto, existem poucos trabalhos que levam em consideração outras

tecnologias (além do *Wi-Fi*) que operam na mesma frequência e consideram características como potência de transmissão e atenuação de sinal.

A pesquisa bibliográfica não mostrou nenhum trabalho que trate da coexistência de tecnologias heterogêneas nas WHNs, bem como na mitigação da interferência nas SH. Dessa forma, este trabalho propõe dois mecanismos de atribuição de canais que levam em consideração os seguintes aspectos: a sobreposição dos canais, a potência de transmissão e a atenuação do sinal. Os mecanismos de atribuição determinam a configuração mais adequada para a configuração dos dispositivos (isto é, o canal que deve ser utilizado), para que a interferência seja a menor possível, considerando as tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*.

Tabela 3 – Trabalhos Relacionados

Referência	Tecnologia	Focus
(ACHANTA, 2004)	<i>Wi-Fi</i>	Canal menos congestionado
(CORONADO <i>et al.</i> , 2018)	<i>Wi-Fi</i>	Canal menos congestionado
(MISHRA; BANERJEE; ARBAUGH, 2005)	<i>Wi-Fi</i>	Minimização da interferência
(AKL; AREPALLY, 2007)	<i>Wi-Fi</i>	Minimização da interferência
(MISHRA <i>et al.</i> , 2006)	<i>Wi-Fi</i>	Salto entre canais
(CHENG; HO, 2016)	<i>Zigbee</i>	Aumento da taxa de entrega de pacotes
Este trabalho	<i>Wi-Fi, Zigbee e Bluetooth</i>	<i>Cross-Technology Interference</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da proposta foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica sobre as tecnologias de comunicação mais utilizadas nas SH (*Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*) e das técnicas utilizadas para diminuir a interferência causada pela coexistência dessas tecnologias no mesmo ambiente. Dessa forma, adquiriu-se o conhecimento necessário para a elaboração de mecanismos para a atribuição de canais que levam em consideração as particularidades de cada uma das tecnologias.

Foram elaborados cenários de testes, que possuem os principais elementos de uma SH relevantes para a proposta, que são: pontos de acesso (do inglês, *Access Point* - AP), *hardwares* de rede que permitem que os dispositivos sem fio se conectem a WHN; e os dispositivos sem fio, que podem ser do tipo *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*. Os dispositivos de um determinado tipo só se conectam aos APs do mesmo tipo.

Como proposta, foram desenvolvidos dois mecanismos de atribuição de canais, que são: um modelo De Programação Linear Inteira Mista (do inglês, *Mixed Integer Linear Programming* - MILP) e um algoritmo guloso determinístico, chamado de CASH (do inglês, *Channel Assigner for Smart Homes*). A MILP foi utilizada para encontrar uma solução próxima da ótima para o problema de atribuição de canais em SH. Uma vez que, dado a complexidade do problema e a quantidade de variáveis envolvidas, foi necessário impor um tempo limite de execução para o modelo, caso contrário, sua execução poderia demorar dias até encontrar a solução ótima.

O algoritmo CASH foi desenvolvido como uma alternativa para a MILP, que apesar de oferecer a melhor solução para o problema, não o faz em um tempo hábil. Assim, o algoritmo CASH também é capaz de encontrar uma solução para o problema de atribuição de canais, mas diferente da MILP, consome uma quantidade pequena de recursos computacionais e obtém uma resposta em um tempo baixo (milissegundos para o caso de 2 APs), características importantes para utilização em cenários mais dinâmicos de SH.

Nos testes, para solucionar o MILP, utilizou-se o *solver CPLEX*¹ da IBM. O *solver* é um *software* capaz de resolver problemas complexos de otimização e possui uma extensa documentação. Além disso, ele oferece suporte a *multithreading* e uma API para programação em várias linguagens, fazendo dele a escolha ideal para ser usado na implementação e solução do modelo de programação linear. Nas simulações, utilizou-se o simulador OMNeT++² por ser

¹ <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

² <https://omnetpp.org/>

uma ferramenta robusta, capaz de modelar todos os elementos presentes em uma SH e devido ao conhecimento prévio do autor sobre sua utilização.

Por fim, os resultados obtidos a partir da execução do modelo de programação linear e do algoritmo CASH foram comparados com duas abordagens existentes de atribuição de canais. A análise dos resultados mostraram que a utilização das técnicas propostas nesta dissertação trouxeram ganhos significativos, uma vez que foram alcançados os menores valores para interferência quando utilizados os canais propostos pela MILP e pelo algoritmo CASH.

5 PROPOSTA

A seguir será apresentada a proposta dessa dissertação, que constitui de dois mecanismos de atribuição de canais para dispositivos heterogêneos em SH, que são: um mecanismo baseado em um modelo de programação linear (demonstrado na Subseção 5.2.1) e um algoritmo guloso determinístico (detalhado na Subseção 5.2.2). Ambos os mecanismos são capazes de encontrar a configuração de canais que minimiza a interferência total no ambiente, para isso, eles usam um modelo de interferência (explicado na Seção 5.1) para calcular a interferência entre dois dispositivos. O modelo de interferência, assim como os mecanismos de atribuição de canais, faz parte da proposta e utiliza a sobreposição entre os canais, a potência de transmissão dos dispositivos e a atenuação do sinal para realizar o cálculo da interferência.

5.1 CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA

Essa seção descreve o modelo de interferência utilizado neste trabalho. O modelo leva em consideração o fator de sobreposição entre dois canais, a potência de transmissão dos dispositivos e a atenuação do sinal no ambiente, para calcular a quantidade de interferência gerada entre dois dispositivos.

5.1.1 Fator de interferência entre canais sobrepostos

A interferência entre dois canais foi modelada com base na sobreposição das frequências. Akl et al. (AKL; AREPALLY, 2007) apresentaram uma fórmula básica para calcular o fator de interferência entre dois canais. No entanto, a fórmula apresentada leva em consideração apenas a tecnologia *Wi-Fi* (em particular, a versão 802.11b). Esse fato torna a utilização dessa fórmula impraticável no contexto das SH, uma vez que as WHNs costumam ser compostas por três diferentes tecnologias sem fio, que coexistem no mesmo ambiente.

Portanto, para que a fórmula faça sentido no contexto de SH, faz-se necessário evoluir a modelagem de interferência proposta por Akl et al. para que o fator de interferência leve em consideração não só os canais *Wi-Fi*, mas também os canais *Zigbee* e *Bluetooth*. Assim, o fator de interferência¹ foi modelado de acordo com o estudo realizado por Natarajan et al. (NATARAJAN; ZAND; NABI, 2016), que mede a interferência e o impacto dessa interferência na transmissão entre as tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth*. Em resumo, por causa da potência

¹ <https://github.com/rodrigoparente/interference-factor-w/>

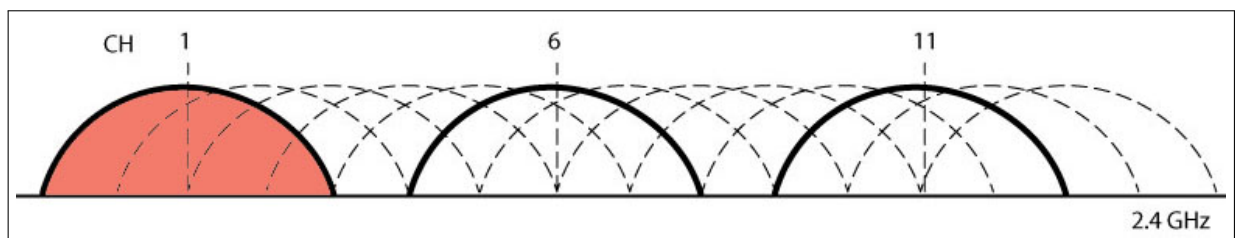
de transmissão e do tempo de ocupação do meio durante a transmissão, determinadas tecnologias acabam sofrendo mais por causa da interferência que outras. A seguir, as conclusões obtidas por Natarajan et al. (NATARAJAN; ZAND; NABI, 2016):

- O *Wi-Fi* causa interferência no *Zigbee* e no *Bluetooth*, mas só sofre interferência de outro dispositivo *Wi-Fi*;
- O *Zigbee* sofre interferência de dispositivos *Wi-Fi* e causa interferência em dispositivos *Bluetooth*;
- O *Bluetooth* sofre interferência de dispositivos *Wi-Fi* e *Zigbee*, mas não causa interferência em outros dispositivos.

Na prática, o fator de interferência significa uma probabilidade de colisão caso dois dispositivos iniciem a transmissão simultaneamente. Assim, se um mesmo canal for atribuído a dois dispositivos vizinhos, o fator de interferência entre eles é 1.0 ou 100%. Visto que, 100% do canal estará ocupado, como pode ser visto na Figura 9 que mostra em vermelho a região de interferência entre os dispositivos. Da mesma forma, se o canal 1 do *Wi-Fi* for atribuído a um dispositivo e o canal 3 for atribuído a um segundo dispositivo, o fator de interferência entre eles será de 0,6 ou 60%. Uma vez que, 60% do canal 1 estará sobreposto pelo canal 3, como pode ser visto em amarelo na Figura 10.

Consequentemente, se algum canal *Wi-Fi* maior que 5 for atribuído ao segundo dispositivo, o fator de interferência será zero ou 0% (já que os canais não estão sobrepostos). Seguindo o mesmo raciocínio, como não existem canais sobrepostos nas tecnologias *Zigbee* e *Bluetooth*, a interferência entre dois dispositivos, sejam eles *Zigbee-Zigbee* ou *Bluetooth-Bluetooth*, é de 100% se eles usarem o mesmo canal ou 0%, caso contrário.

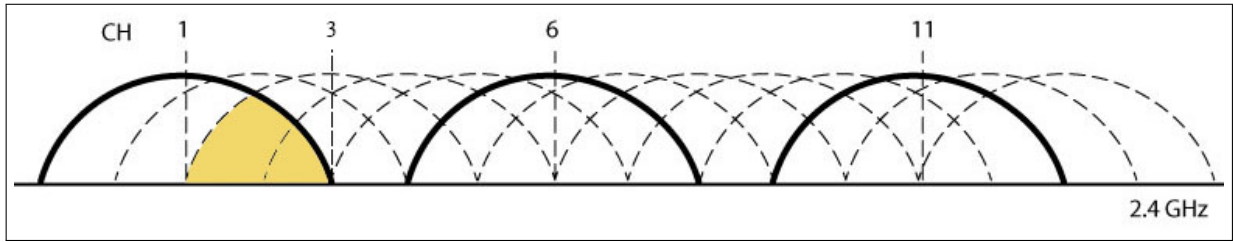
Figura 9 – Região de interferência entre dois dispositivos que utilizam o canal 1 do *Wi-Fi*.



Fonte: Elaborado pelo autor

A interferência causada por dispositivos *Wi-Fi* em dispositivos *Zigbee* ou *Bluetooth* é de 100% para canais sobrepostos e 0% caso contrário. Por exemplo, o canal 1 do *Wi-Fi* varia

Figura 10 – Região de interferência entre dois dispositivos que utilizam os canais 1 e 3 do Wi-Fi.



Fonte: Elaborado pelo autor

entre 2401 MHz e 2423 MHz e interfere 100% nos canais 11 a 14 do *Zigbee* (que variam entre 2404 MHz e 2421 MHz) e também nos canais 0 a 8 do *Bluetooth* (que variam entre 2404 MHz e 2420 MHz). Isso acontece porque os canais mencionados de ambas tecnologias (*Zigbee* e *Bluetooth*) estão completamente dentro do espectro do canal 1 do *Wi-Fi*, conforme ilustrado na Figura 7.

5.1.2 Modelo de atenuação de sinal

A distância entre dois dispositivos é utilizada para calcular a perda da potência do sinal de transmissão (isto é, a atenuação do sinal) através do modelo descrito na referência (IEEE, 2003) e mostrado na Equação (5.1). Na equação a seguir, PL é o valor da atenuação do sinal e d é a distância entre dois dispositivos.

$$PL(d) = \begin{cases} 40.2 + 20 \cdot \log_{10}^{(d)}, & 0.5m < d \leq 8m \\ 58.5 + 33 \cdot \log_{10}^{(d/8)}, & d > 8m \end{cases} \quad (5.1)$$

Quando a distância (d) for menor ou igual a 0.5 metros, consideramos que não existe atenuação do sinal (ou seja, $PL = 1$). A utilização da Equação (5.1) é recomendada pelo IEEE para dispositivos que operam na frequência de 2.4 GHz em ambiente internos, como é o caso das SH (IEEE, 2003).

5.1.3 Modelo de interferência

A fórmula apresentada por Ark et al. (AKL; AREPALLY, 2007) foi adaptada levando-se em consideração as características dos dispositivos heterogêneos presentes nas SH. Assim, um novo modelo para se calcular a interferência entre dispositivos que utilizam a banda de

2.4 GHz foi proposto. O modelo leva em consideração a sobreposição dos canais das principais tecnologias de comunicações utilizadas nas SH e como o sinal de rádio dessas tecnologias se propaga e atenua no ambiente doméstico.

O modelo de interferência proposto nessa dissertação é parte essencial para o funcionamento dos mecanismos de atribuição de canais. A partir dele, os mecanismos propostos são capazes de escolher a configuração de canais que minimiza a interferência total no ambiente. Para calcular a interferência entre dois dispositivos é necessário saber os canais dos dispositivos, a potência de transmissão do sinal interferente e as posições dos dispositivos. A Equação (5.2) representa o modelo proposto e a seguir encontra-se a notação utilizada:

- $I_{i,j}^{z,m}$ é a interferência que o dispositivo i usando o canal z sofre de um dispositivo j usando o canal m , quando ambos os dispositivos transmitem simultaneamente.
- P_j^m é a potência nominal (dBm) pela qual um dispositivo j emite seu sinal sem fio, através do canal m .
- $w^{z,m}$ é a quantidade da interferência que o canal m causa no canal z . Esse valor é a razão entre a sobreposição dos canais z e m . Os valores de w foram calculados de acordo com as regras apresentadas na Subseção 5.1.1.
- $PL(d)$ é a atenuação do sinal de um dispositivo que opera na frequência de 2.4 GHz, para uma distância d (como apresentado na Subseção 5.1.2).

$$I_{i,j}^{z,m} = \frac{w^{z,m} \times P_j^m}{PL(d)} \quad (5.2)$$

É importante destacar, que o valor da potência de transmissão dos dispositivos deve ser normalizado, uma vez que, dispositivos *Zigbee*, de acordo com as especificações (explicadas na Subseção 2.2.2), possuem uma potência de 0 dBm, o que inviabilizaria os cálculos. Assim, de posse de todas as informações acerca dos dispositivos, é possível calcular de forma bastante direta a interferência entre eles. Portanto, se tivermos dois dispositivos *Wi-Fi* denominados “A” e “B”, utilizando os canais 1 (correspondente a z) e 3 (correspondente a m), respectivamente, transmitindo com a potência de 20 dBm e a uma distância de 0.6 m um do outro: o fator de interferência ($w^{z,m}$) será de 0.6; A potência normalizada (P_j^m) será de 0.8696 e a atenuação do sinal ($PL(d)$) será de 52.2. Aplicando esses valores na Equação (5.2), temos que a interferência normalizada sentida pelo dispositivo “A” será de 0.009995402, valor que corresponde a -78.85 dBm.

5.2 MECANISMOS DE ATRIBUIÇÃO DE CANAIS

Essa dissertação propõe dois mecanismos de atribuição de canais para o contexto de SH e WHNs. O primeiro mecanismo é um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP), capaz de encontrar a solução ótima para o problema. Durante a execução, a MILP consome uma quantidade considerável de recursos computacionais e pode levar dias para encontrar a solução. O segundo mecanismo proposto foi um algoritmo guloso determinístico, que apesar de ser mais eficiente computacionalmente que a MILP, não garante que a solução ótima seja encontrada. No entanto, de posse dos resultados obtidos pela MILP, foi possível ajustar o funcionamento do algoritmo e garantir que a solução encontrada fosse aplicável para o cenário das SH.

5.2.1 Modelo de Programação Linear Inteira Mista

O modelo de programação linear é uma técnica matemática bastante utilizada na otimização de processos. Sua utilização garante que sejam encontrados os valores das variáveis que minimizam ou maximizam uma função objetiva, levando-se em consideração um conjunto de restrições. Assim, é possível modelar o problema de atribuição de canais usando um MILP. A função objetiva que deseja-se minimizar calcula a interferência no ambiente de SH e as variáveis são os canais de cada um dos dispositivos. É necessário usar uma MILP pois uma das restrições (a que garante que os canais utilizados pelos dispositivos gera a menor interferência) pode assumir valores fracionários.

O cenário é descrito por um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$. O conjunto de vértices $\mathcal{V}$ representa os dispositivos e as antenas dos APs. O conjunto de arestas $\mathcal{E}$ representa todas as conexões de comunicação possíveis entre um dispositivo e uma antena de um AP. Assim, o modelo é capaz de representar dispositivos e APs com uma ou mais antenas.

- $\mathcal{D}$ é o conjunto de dispositivos ($\mathcal{D} \subset \mathcal{V}$).
- $\mathcal{A}$ é o conjunto de antenas de um AP ($\mathcal{A} \subset \mathcal{V}$).
- $\mathcal{A}_i$ é o conjunto de antenas de um AP que o dispositivo i pode-se conectar ($i \in \mathcal{V}, \mathcal{A}_i \subset \mathcal{A}$).
- $\mathcal{D}_j$ é o conjunto de dispositivos que pode-se conectar a antena j do AP ($j \in \mathcal{A}, \mathcal{D}_j \subset \mathcal{D}$).
- $\mathcal{C}$ é o conjunto de todos os canais considerados pelo modelo.
- $\mathcal{C}_i$ é o conjunto de todos os canais que o dispositivo i suporta ($i \in \mathcal{V}, \mathcal{C}_i \subset \mathcal{C}$).
- $e_{i,j}^z$ é uma aresta do gráfico $\mathcal{G}$, que representa se é possível que o dispositivo i conecte-se a antena j do AP usando o canal z ($e_{i,j}^z \in \mathcal{E}, i \in \mathcal{D}, j \in \mathcal{A}, z \in \mathcal{C}$).

- $I_{i,j}^{z,m}$ é a função que retorna a interferência que o nó i usando o canal z sofre quando o nó j transmite usando o canal m ($i, j \in \mathcal{V}$, $z, m \in \mathcal{C}$, $I_{i,j}^{z,m} \in \mathbb{R}_+$).
- $x_{i,j}^z$ é uma variável binária que assume valor 1 quando o dispositivo i se conecta a antena j do AP pelo canal z ou valor 0, caso contrário.
- $y_{i,g}$ é uma variável do tipo decimal que representa o valor normalizado da interferência sofrida pelo dispositivo i dado a configuração do dispositivo g .

A equação (5.3) descreve a função objetiva da MILP, que é minimizar a quantidade de interferência sofrida pelos dispositivos no ambiente de uma SH, devido a presença de outros elementos da rede sem fio.

$$\text{minimize } \sum_{i \in \mathcal{D}} \sum_{g \in \mathcal{D}} y_{i,g} \quad (5.3)$$

As restrições a seguir, representadas pelas equações de (5.4) a (5.9), são utilizadas pela MILP para garantir que a função objetiva seja alcançada.

$$\sum_{j \in \mathcal{A}_i} \sum_{z \in \mathcal{C}} x_{i,j}^z = 1, \quad (5.4)$$

$$\forall i \in \mathcal{D}$$

$$x_{i,j}^z = 0, \quad (5.5)$$

$$\forall i \in \mathcal{D}, \forall j \in \mathcal{A}, \forall z \in \mathcal{C} | e_{i,j}^z \notin \mathcal{E}$$

$$x_{i,j}^z \times \left(\sum_{g \in \mathcal{D}} \sum_{\substack{m \in \mathcal{C} \\ m \neq z}} x_{g,j}^m \right) \leq 0, \quad (5.6)$$

$$\forall i \in \mathcal{D}, \forall j \in \mathcal{A}, \forall z \in \mathcal{C}$$

$$y_{i,g} \geq \sum_{j \in \mathcal{A}_i} \sum_{z \in \mathcal{C}_i} \sum_{h \in \mathcal{A}_g} \sum_{m \in \mathcal{C}_g} (x_{i,j}^z \times x_{g,h}^m \times I_{i,g}^{z,m}), \quad (5.7)$$

$$\forall i, g \in \mathcal{D} | i \neq g$$

$$x_{i,j}^z = \{0, 1\}, \quad (5.8)$$

$$\forall z \in \mathcal{C}, \forall i \in \mathcal{D}, \forall j \in \mathcal{A}$$

$$\begin{aligned}
y_{i,g} &\in \mathbb{R}_+, \\
\forall i, g &\in \mathcal{D}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

A restrição (5.4) garante que todos os dispositivos se conectem a uma antena de um AP, enquanto que a restrição (5.5) assegura que as conexões ocorrerão exclusivamente entre dispositivos e antenas. Da mesma forma, a restrição (5.6) garante que cada antena use apenas um canal de comunicação. A restrição (5.7) é utilizada para calcular a interferência que um dispositivo sofre devido a configuração de um outro dispositivo. Finalmente, as restrições (5.8) e (5.9) definem os domínios das variáveis.

Em resumo, as restrições de (5.4) a (5.6) dizem respeito às regras de conexão entre um dispositivo e a antena de um AP. A restrição (5.7) calcula a interferência entre dois dispositivos. Dessa forma, o objetivo é alcançado pesquisando canais que minimizam a quantidade de interferência que um dispositivo sofre.

5.2.2 Algoritmo *CASH*

Apesar de a MILP encontrar a solução ótima para o problema, devido a quantidade de variáveis presentes no modelo, sua execução poderia demorar dias até encontrar o conjunto de canais que garantam a menor interferência possível. Além disso, a quantidade de recursos computacionais utilizados no processo é alta. Como o ambiente das SH é dinâmico e a saída e entrada de novos nós é algo frequente, o mecanismo de atribuição de canais deve ser capaz de encontrar uma solução em um tempo hábil e consumindo poucos recursos computacionais. Pensando nisso, desenvolveu-se um

Pensando nisso, desenvolveu-se o algoritmo *CASH* (do inglês, *Channel Assigner for Smart Homes*), que é utilizado para escolher o conjunto de canais que minimizam a quantidade de interferência sofrida pelos dispositivos sem fio em uma WHN. *CASH* é um algoritmo guloso determinístico, que começa sua execução a partir de uma configuração aleatória e escolhe iterativamente os canais que minimizam a quantidade total de interferência. Uma visão geral do algoritmo é apresentada nas Figuras 11 e 12 e a notação utilizada é resumida no Quadro 1.

Dividimos o algoritmo proposto em duas partes para melhorar a sua explicação. O algoritmo mostrado na Figura 11 é responsável por executar um pré-processamento dos dispositivos que compõem o cenário (isto é, a SH) e invocar o algoritmo representado na Figura 12, que por sua vez, é responsável por escolher a configuração de canais que minimiza a

Quadro 1 – Notação utilizada no algoritmo CASH

Símbolos	Descrição
$\mathcal{A}$	Conjunto de AP e suas configurações
$\mathcal{D}$	Conjunto de dispositivos e suas configurações
$\mathcal{B}$	Armazena uma cópia da melhor configuração para os dispositivos
$\mathcal{C}_j$	O conjunto de canais que o AP j pode usar
I_{best}	Melhor medida global de interferência
I_{curr}	Medida atual de interferência
I_{local}^{best}	Melhor interferência local

Fonte: Elaborado pelo autor

quantidade total de interferência na WHN.

Na Figura 11, da linha 2 a 5, inicializamos a configuração de antenas dos APs escolhendo aleatoriamente um canal para cada uma delas. Posteriormente, entre as linhas 6 e 9, os dispositivos são atribuídos a uma antena de um AP, levando em consideração o congestionamento de cada AP. Em cada iteração, o AP que possui o menor número de dispositivos conectados é o escolhido. Isso garante que o número de dispositivos conectados a qualquer ponto de acesso seja uniforme, o que impede que uma área sofra mais interferência do que outra (uma abordagem de balanceamento de carga). O estágio de inicialização é concluído com $\mathcal{B}$, na linha 10, recebendo a configuração gerada e a quantidade de interferência sofrida pelos dispositivos sendo calculados e salvos em I_{best} e I_{curr} , na linha 11. A função *calcInter* usa o modelo apresentado na subseção 5.1.3 para calcular a interferência entre o conjunto de dispositivos ou entre os APs.

Da linha 12 a 19, o algoritmo itera duas vezes o número de dispositivos no cenário. Foi observado, através de uma série de experimentos, que após um certo número de iterações o valor de I_{best} não estava mais sendo atualizado. Portanto, definimos o loop na linha 12 para iterar por $2 \times |\mathcal{D}|$.

Na linha 13, a função *channelChooser* (explicada no Algoritmo 12) é executada e retorna a melhor configuração de canais encontrada para o conjunto $\mathcal{A}$. Na linha 14, a interferência entre todos os dispositivos é calculada e atribuída a I_{curr} . Na linha 15, o algoritmo compara se o valor de I_{curr} é menor que I_{best} , caso verdadeiro, $\mathcal{B}$ é atualizado com a nova configuração para $\mathcal{A}$ e $\mathcal{D}$, e I_{best} recebem o valor de I_{curr} . Finalmente, na linha 20, retornasse $\mathcal{B}$ que neste ponto possui a melhor configuração encontrada para os APs e dispositivos.

Em relação a busca pelos canais que minimizam a interferência no ambiente, o algoritmo mostrado na Figura 12 utiliza o modelo de interferência (explicado na Subseção 5.1.3) para encontrar o conjunto de canais mais adequado para os APs. Primeiro, ele atribui um conjunto de canais aleatórios as antenas dos APs, depois calcula e salva em I_{local}^{best} a quantidade

Figura 11 – Algoritmo CASH.

```

Input:  $\mathcal{A}, \mathcal{D}$ 
Output:  $\mathcal{B}$ 
1 begin
2   foreach  $j \in \mathcal{A}$  do
3      $z \leftarrow$  a random channel from  $\mathcal{C}_j$ ;
4     set channel  $z$  to AP  $j$ ;
5   end
6   foreach  $i \in \mathcal{D}$  do
7      $j \leftarrow$  get the least congested AP;
8     connect the device  $i$  to the AP  $j$ ;
9   end
10   $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{A} + \mathcal{D}$ ;
11   $I_{best} \leftarrow I_{curr} \leftarrow \text{calcInter}(\mathcal{D})$ ;
12  for  $count \leftarrow 1$  to  $(2 \times |\mathcal{D}|)$  do
13     $\mathcal{A} \leftarrow \text{channelChooser}(\mathcal{A})$ ;
14     $I_{curr} \leftarrow \text{calcInter}(\mathcal{D})$ ;
15    if  $I_{curr} < I_{best}$  then
16       $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{A} + \mathcal{D}$ ;
17       $I_{best} \leftarrow I_{curr}$ ;
18    end
19  end
20  return  $\mathcal{B}$ ;
21 end

```

Fonte: Elaborado pelo autor

de interferência sofrida pelos APs. A seguir, o algoritmo compara cada par de canais e teste se a nova configuração reduz a quantidade total de interferência. Finalmente, o algoritmo retorna a melhor configuração que encontrar.

De forma mais aprofundada, o algoritmo mostrado na Figura 12, na linha 2, atribui um conjunto de canais aleatórios aos APs. Na linha 3, o valor da interferência sofrida pelos APs é atribuído a variável I_{local}^{best} . Da linha 4 a linha 20, temos dois *for*s aninhados, nos quais percorremos $\mathcal{A}$ comparando cada AP. Na linha 6, o algoritmo verifica se os APs j e g são do mesmo tipo (ou seja, se usam a mesma tecnologia de comunicação) e se são diferentes. Na linha 7, o algoritmo faz uma cópia do canal utilizado pelo AP g para a variável *bestChannel*.

Da linha 8 a 17, o algoritmo percorre os canais que podem ser atribuídos ao AP g ($\mathcal{C}_g$). Na linha 9, atribuímos o canal z ao AP g ($z \in \mathcal{C}_g$). Na linha 10, calculamos e atribuímos o novo valor de interferência a variável I_{curr} . Na linha 11, verificamos se o valor de I_{curr} é menor que o valor de I_{local}^{best} . Na linha 12, I_{local}^{best} recebe o valor de I_{local} . Na linha 13, *bestChannel* recebe

Figura 12 – Algoritmo *channelChooser*.

```

Input:  $\mathcal{A}$ 
Output:  $\mathcal{A}$ 
1 begin
2   Assign random channels to APs  $\in \mathcal{A}$ ;
3    $I_{local}^{best} \leftarrow \text{calcInter}(\mathcal{A})$ ;
4   foreach  $j \in \mathcal{A}$  do
5     foreach  $g \in \mathcal{A}$  do
6       if AP  $j$  type = AP  $g$  type and  $j \neq g$  then
7          $bestChannel \leftarrow$  channel used by AP  $g$ ;
8         foreach  $z \in \mathcal{C}_g$  do
9           set channel  $z$  to AP  $g$ ;
10           $I_{curr} \leftarrow \text{calcInter}(\mathcal{A})$ ;
11          if  $I_{curr} < I_{local}^{best}$  then
12             $I_{local}^{best} \leftarrow I_{curr}$ ;
13             $bestChannel \leftarrow z$ ;
14          else
15            set channel  $bestChannel$  to AP  $g$ ;
16          end
17        end
18      end
19    end
20  end
21  return  $\mathcal{A}$ ;
22 end

```

Fonte: Elaborado pelo autor

o valor de z . Se a condição for avaliada como falsa, na linha 15, atribuímos o canal inicial de g a $bestChannel$.

O algoritmo *CASH* possui uma abordagem diferente da adotada pela MILP (explicada com detalhes na Subseção 5.2.1), que minimiza a interferência da perspectiva dos dispositivos. O algoritmo *CASH* primeiro minimiza a interferência do ponto de vista dos APs, então ele verifica se a interferência experimentada pelos dispositivos (pelo uso dessa configuração) é menor do que o valor registrado previamente. Caso verdadeiro, essa passa a ser a nova configuração. Caso contrário, o processo continua até encontrar uma nova solução que seja melhor que a anterior ou quando o critério de parada for atingido. Dessa forma, garante-se que o número de comparações feitas no processo seja menor, o que reflete diretamente no tempo de execução do algoritmo.

A complexidade do algoritmo pode ser representada por $\mathcal{O}(|\mathcal{D}| \times |\mathcal{A}|^2 \times |z|)$, onde $\mathcal{D}$ é o conjunto de dispositivos, $\mathcal{A}$ é o conjunto de APs e z são os canais. Considerando que o

número de canais é constante, podemos dizer que a complexidade do algoritmo é $\mathcal{O}(|\mathcal{D}| \times |\mathcal{A}|^2)$. Apesar de ter uma alta complexidade, o algoritmo é viável, pois o número de comparações realizadas (a parte quadrática) é pequena. Visto que a quantidade de APs em uma SH é bastante inferior ao número de dispositivos (diversos dispositivos podem se conectar a um único AP), além do que, o número de dispositivos em uma SH não chega a valores extremos (por exemplo, mais de 100 dispositivos) (MOCRII; CHEN; MUSILEK, 2018).

6 AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

Para avaliar o desempenho da MILP e do algoritmo *CASH*, foram realizados diversos experimentos. As seções a seguir descreverão o cenário e a configuração de cada experimento, bem como uma discussão sobre os resultados obtidos nos testes realizados.

6.1 CENÁRIO

A MILP utiliza o *solver CPLEX*¹ para obter uma solução para o modelo matemático apresentado na Subseção 5.2.1. O *CPLEX* foi configurado com uma restrição de tempo de execução de 30 minutos. Dado a quantidade de variáveis presentes no modelo, constatou-se que executar o *CPLEX* sem restrição de tempo leva semanas para encontrar a solução ótima do problema.

O desempenho da MILP e do algoritmo *CASH* foram comparados com duas abordagens existentes: (1) a atribuição do primeiro canal de cada tecnologia para cada antena de um ponto de acesso, isto é, dispositivos de um mesmo tipo utilizam o mesmo canal para se comunicar; e, (2) a utilização de um canal aleatório para cada antena de um ponto de acesso. A abordagem (1) é bastante utilizada por fabricantes de *hardwares* de rede, que costumam atribuir um canal padrão de fábrica para os dispositivos. Já a abordagem (2) é uma técnica simples e que pode apresentar melhores resultados que a abordagem (1).

Experimentos foram realizados no simulador OMNeT++ (do inglês, *Objective Modular Network Testbed in C++*) (VARGA; HORNIG, 2008), utilizando o *framework* INET (VARGA; RUDOLF, 2018) para simular uma rede sem fio de dispositivos heterogêneos. Em cada dispositivo, um aplicativo UDP foi executado para enviar pacotes, a uma taxa de transmissão pré-definida, para o AP em que se conecta. Esse tipo de tráfego foi escolhido por ser comumente utilizado por dispositivos inteligentes em SH (MOCRII; CHEN; MUSILEK, 2018).

Diversas simulações, com duração de 1s, foram executadas no simulador OMNeT++. Nas simulações realizadas, cada dispositivo envia um pacote UDP, de tamanho igual a 500 bytes, a cada 1ms (STOJKOSKA; TRIVODALIEV, 2017). Dessa forma, temos uma rede saturada de transmissões, onde a diferença registrada na quantidade de pacotes entregues e perdidos é reflexo direto da quantidade de interferência no ambiente e dos canais utilizados, e não de algum mecanismo de CSMA/CA utilizado.

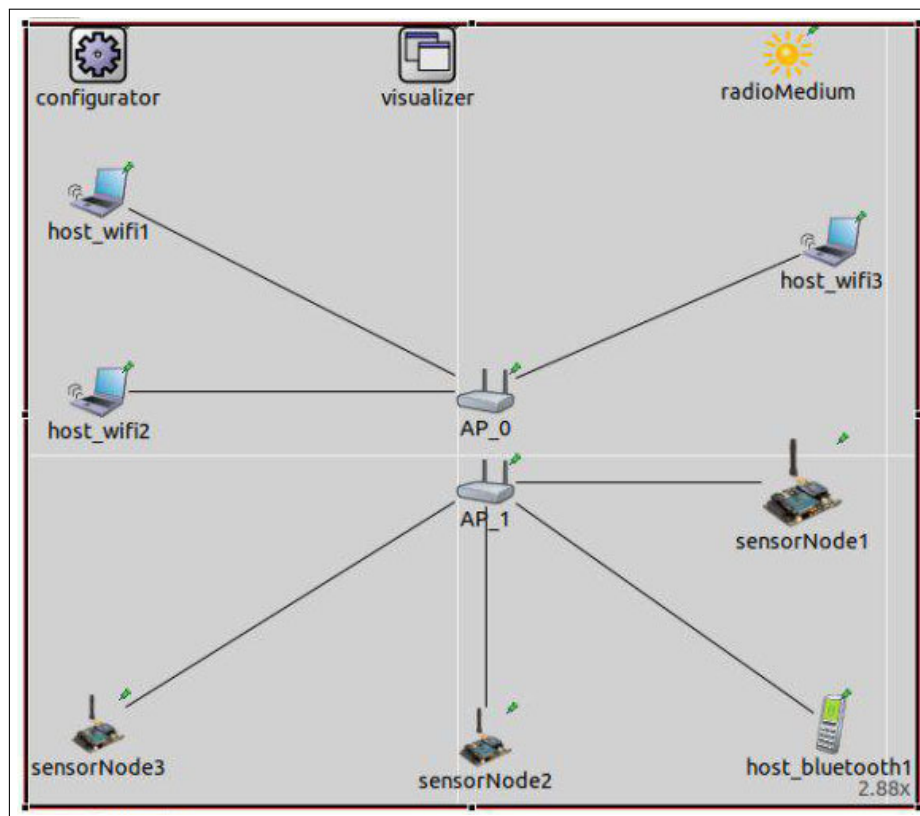
O OMNeT++ é um simulador de eventos, assim, uma simulação com duração de

¹ <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

1s, na prática, durou em média 15 min. Aumentar o tempo de simulação implicaria em uma quantidade maior de eventos a serem simulados. Os resultados obtidos seriam proporcionais e as conclusões obtidas seriam as mesmas. Como a quantidade de experimentos realizados foi grande, optou-se por simulações com um tempo menor de duração.

Ao todo, oito cenários foram definidos. Os cenários possuem 7, 10, 12 e 15 dispositivos, com 2 e 4 APs. O tamanho do cenário é uma área quadrada de 100×100 metros. A posição dos dispositivos e pontos de acesso foram distribuídos aleatoriamente em cada simulação realizada (nenhum tipo de mobilidade foi configurada). A Figura 13 mostra um cenário com 2 APs e 7 dispositivos, sendo 3 deles do tipo *Wi-Fi*, 3 do tipo *Zigbee* e 1 do tipo *Bluetooth*. As simulações foram realizadas 33 vezes para cada cenário e os resultados são apresentados com um intervalo de confiança de 95%.

Figura 13 – Cenário com 2 APs e 7 dispositivos, no simulador OMNeT++.



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada dispositivo possui apenas uma tecnologia sem fio, e suas quantidades foram distribuídas da seguinte forma: 40% deles usam *Wi-Fi*, 50% dos dispositivos usam *Zigbee* e 10% dos dispositivos usam *Bluetooth*. Esta proporção foi utilizada devido as características habituais

das SH (STOJKOSKA; TRIVODALIEV, 2017). A Tabela 4 descreve informações adicionais que foram usadas para configurar os dispositivos de cada uma das tecnologia, baseados nos padrões da IEEE descritos na Subseção 2.2.

Tabela 4 – Características das tecnologias utilizadas

Tecnologia	Potência de transmissão	Largura do canal
Wi-Fi	20 dBm	20 MHz
Zigbee	0 dBm	2 MHz
Bluetooth	4 dBm	1 MHz

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2 RESULTADOS

Esta subseção irá mostrar os resultados obtidos a partir da análise dos experimentos realizados. Foram avaliadas as seguintes métricas de desempenho:

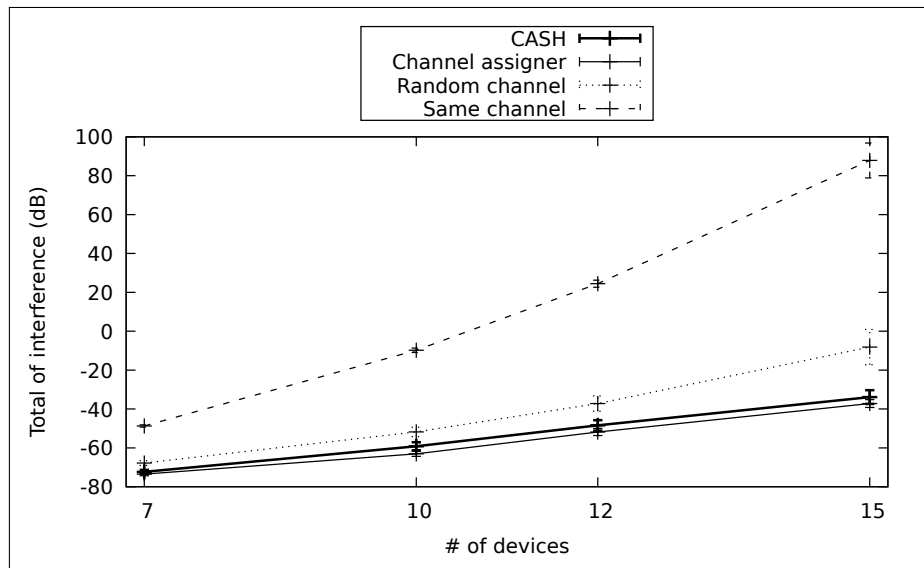
- Interferência (Figura 14 e 15): a quantidade total de interferência sofrida pelos dispositivos no ambiente;
- Tempo de execução (Quadro 2): o tempo médio gasto para encontrar uma solução;
- Pacotes entregues (Figura 16 e 17): o número médio de pacotes entregues ao destino;
- Percentual de perda (Figura 18 e 19): a porcentagem média de pacotes transmitidos que não foram entregues ao destino.

Nos gráficos a seguir, o MILP proposto está representado pela legenda “*Channel assigner*”. Da mesma forma, a legenda “*Random channel*” representa o cenário onde foram escolhidos os canais de forma aleatória para os dispositivos e a legenda “*Same channel*” corresponde ao cenário onde utilizou-se o mesmo canal para todas as tecnologias.

As Figuras 14 e 15 mostram a interferência observada ao utilizar os canais propostos pelas diferentes técnicas de atribuição de canais. Como pode ser visto, o MILP obteve os melhores resultados para ambos os cenários, seguido de perto pelo algoritmo *CASH*. O uso de canais aleatórios provou ser bom para cenários com poucos dispositivos, mas com o aumento do número de dispositivos, a interferência aumentou consideravelmente. A utilização dos mesmos canais por todos os dispositivos mostrou-se impraticável.

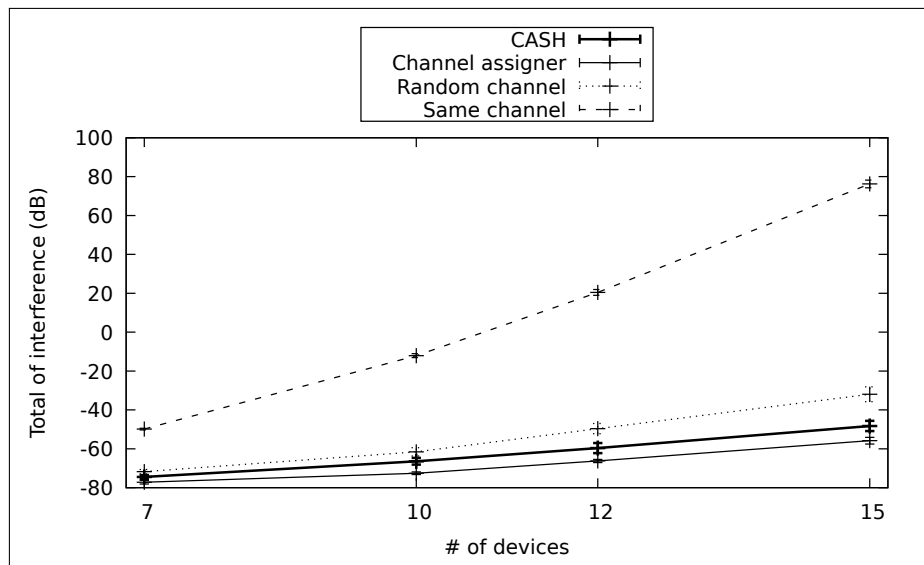
O uso do algoritmo *CASH* trouxe uma melhoria em média de 30% em relação ao uso de canais aleatórios e 70% para o uso dos mesmos canais, no cenário com dois APs. Em

Figura 14 – Interferência para um cenário com 2 APs.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Interferência para um cenário com 4 APs.



Fonte: Elaborado pelo autor

comparação a MILP, observou-se um aumento em média de 3dB na interferência total. Para o cenário composto por 4 APs, o algoritmo foi, em média, 30% melhor em relação ao uso de canais aleatórios e 80% melhor que o uso dos mesmos canais. Similarmente, ao cenário de 2 APs, o algoritmo *CASH* mostrou-se pior que a MILP, com um aumento em média de 5dB na quantidade total de interferência.

Isso ocorre porque os mecanismos propostos utilizam o modelo de interferência

(explicado na Subseção 5.1.3) para encontrar o conjunto de canais que minimiza a interferência sofrida pelos dispositivos no ambiente. Assim, conforme esperado, tanto o MILP, quanto o algoritmo *CASH* apresentam os menores valores de interferência. Diferentemente das outras abordagens, que utilizam uma configuração aleatória (que pode vir a ser uma solução boa) e a que utiliza os mesmos canais (que vai sempre apresentar os piores valores).

Quadro 2 – Tempo de execução do algoritmo *CASH*

Dispositivos	2 AP	4 AP
7	0.008s	0.168s
10	0.008s	0.234s
12	0.009s	0.279s
15	0.012s	0.351s
Média	0.009s	0.25s

Fonte: Elaborado pelo autor

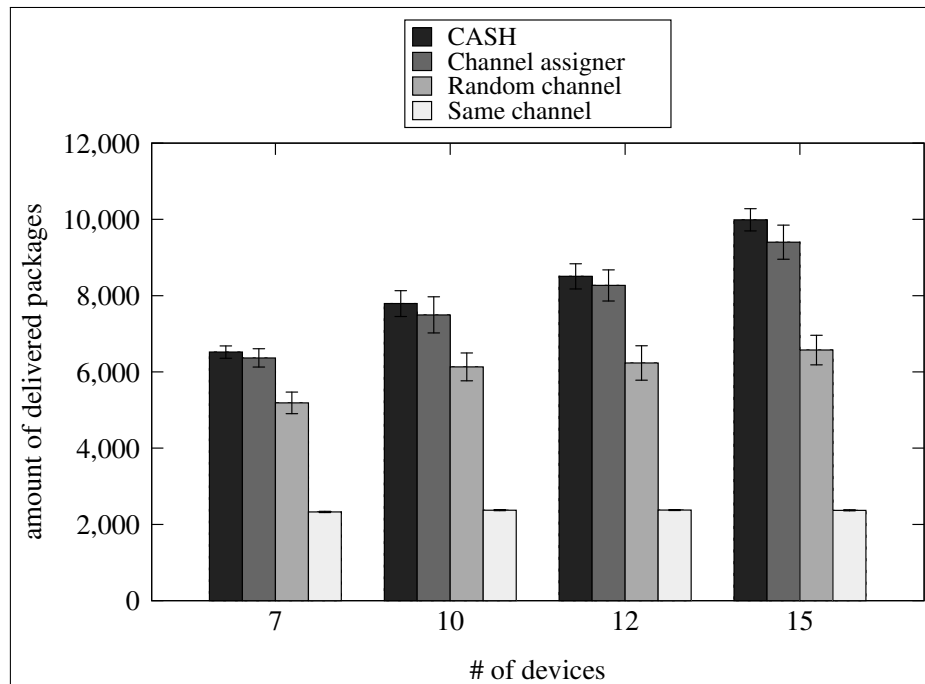
A Quadro 2 mostra o tempo de execução do algoritmo *CASH*. Pode-se notar que o algoritmo gastou milissegundos em média para encontrar uma solução para um cenário composto por 2 APs e segundos para um cenário com 4 APs, um ganho considerável já que a MILP demorou 30 minutos para encontrar uma solução. O tempo de execução é curto e a interferência observada é quase tão boa quanto o resultado obtido pelo modelo de programação matemática.

As Figuras 16 e 17 apresentam o número de pacotes entregues com sucesso no cenário com 2 APs e 4 APs, respectivamente. Os resultados mostraram que as simulações que usaram os métodos com as menores taxas de interferência (isto é, a MILP e o algoritmo *CASH*) foram capazes de entregar uma quantidade maior de pacotes. O algoritmo *CASH* e a MILP tiveram um desempenho semelhante em relação à entrega de pacotes. Por outro lado, a utilização de canais aleatórios e do mesmo canal obtiveram os piores resultados.

Para os dois cenários, o algoritmo *CASH* entregou com sucesso mais pacotes do que todas as outras abordagens. Em resumo, para o cenário com 2 APs, o algoritmo *CASH* entregou em média 4%, 35% e 240% mais pacotes do que a MILP (descrito na Subseção 5.2.1), do que a utilização de canais aleatórios e do mesmo canal, respectivamente.

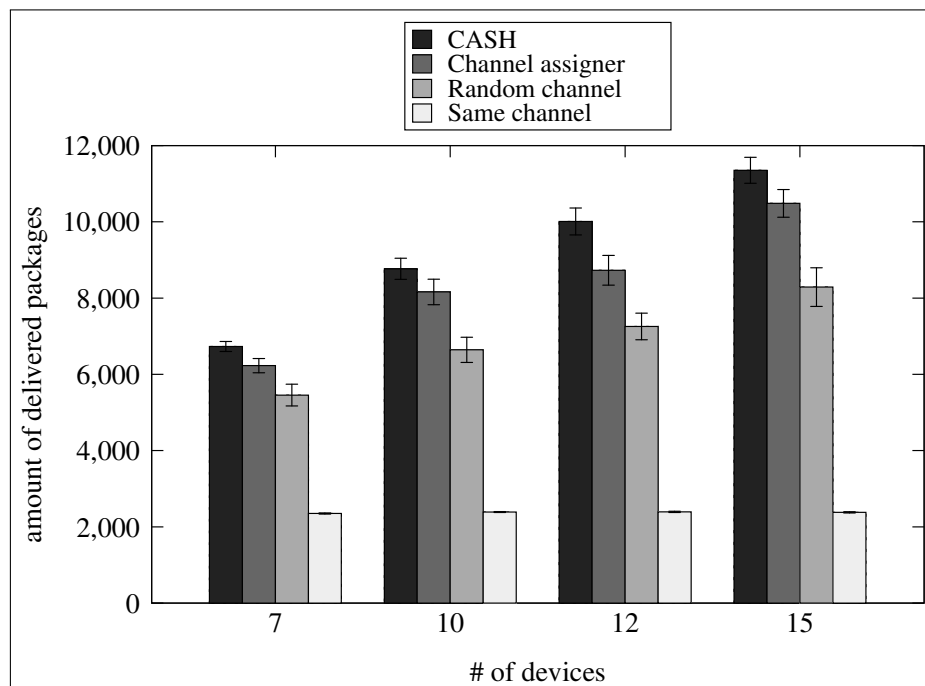
Da mesma forma, para o cenário com 4 APs o algoritmo proposto entregou em média 10% mais pacotes que o MILP, 32% mais pacotes que a utilização de canais aleatórios e 287% mais pacotes em relação ao uso do mesmo canal. A maior quantidade de pacotes entregues ocorre devido a natureza da implementação do algoritmo *CASH*, que balanceia uniformemente os dispositivos entre os APs (conforme descrito na Subseção 5.2.2).

Figura 16 – Número de pacotes entregues em um cenário de 2 AP.



Fonte: Elaborado pelo autor

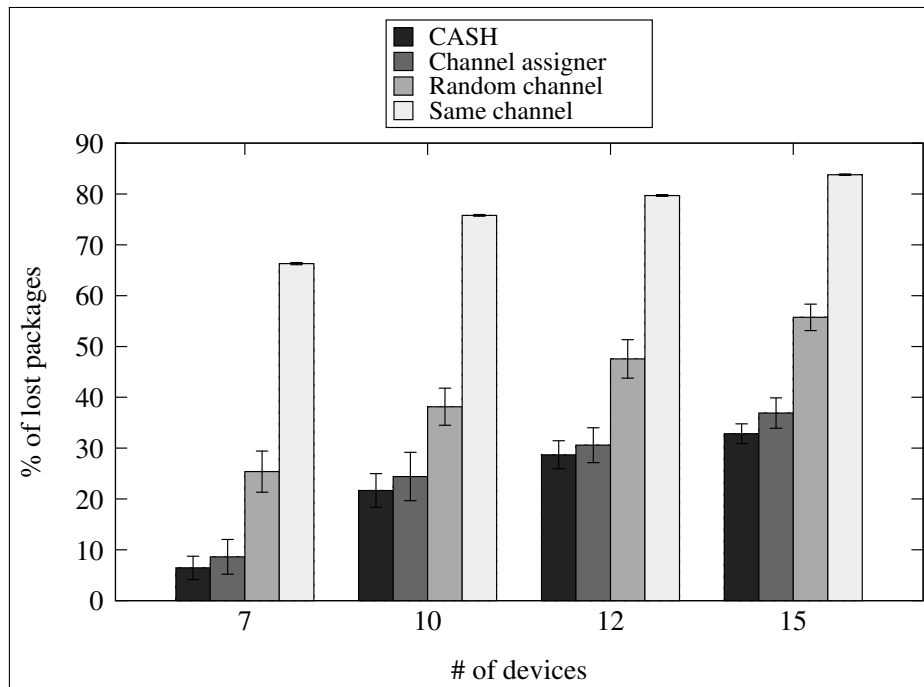
Figura 17 – Número de pacotes entregues em um cenário de 4 AP.



Fonte: Elaborado pelo autor

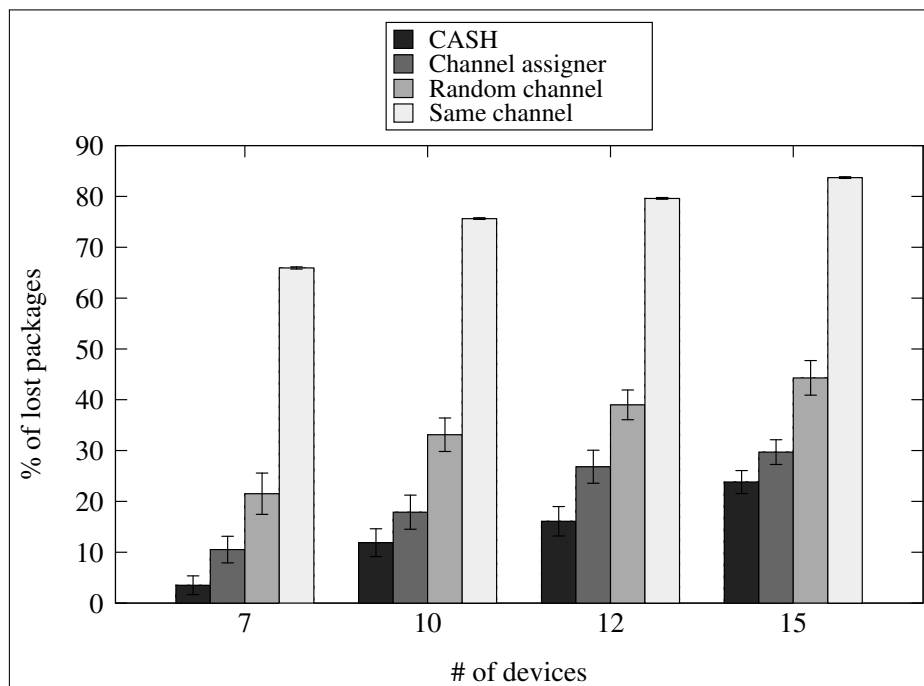
As Figuras 18 e 19 mostram a porcentagem de pacotes perdidos nos cenários com 2 APs e 4 APs. Analisou-se o número de pacotes enviados pelos dispositivos e os recebidos

Figura 18 – Porcentagem de pacotes perdidos em um cenário de 2 AP.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Porcentagem de pacotes perdidos em um cenário de 4 AP.



Fonte: Elaborado pelo autor

nos APs, para calcular o percentual de pacotes perdidos. Isso foi necessário, pois algumas abordagens (devido ao protocolo *MAC*) acabam transmitindo menos pacotes que outros, assim, a

apenas a quantidade de pacotes perdidos não representaria o cenário em si.

Como esperado, o algoritmo *CASH* e a MILP apresentaram o menor número de pacotes perdidos. O algoritmo *CASH* para o cenário com 2 APs perdeu em média 2% menos pacotes que a MILP, 15% menos que o uso de canais aleatórios e 45% menos ao usar os mesmos canais. Para o cenário com 4 APs, os valores foram 4% em relação a MILP, 12% para o uso de canais aleatórios e 50% para o uso do mesmo canal.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta dessa dissertação foi desenvolver dois mecanismos de atribuição de canais para ambientes com dispositivos heterogêneos que utilizam a banda de 2.4 GHz para se comunicar. O primeiro mecanismo foi um modelo de Programação Linear Inteira Mista. Esse mecanismo é capaz de encontrar a configuração que minimiza ao máximo a interferência sofrida pelos dispositivos, no entanto, ela é uma solução custosa do ponto de vista computacional e possui um alto tempo de execução. A MILP leva 30 min para encontrar uma solução para o problema.

O segundo mecanismo proposto foi um algoritmo guloso determinístico, chamado de *CASH*. Esse algoritmo é uma alternativa ao MILP e foi proposto pois, devido a natureza dinâmica dos cenários de SH, é necessário que a solução para o problema de atribuição de canais seja dada em um tempo rápido. O algoritmo *CASH* é capaz de encontrar uma solução para o problema em milissegundos (para o cenário com 2 APs). Além disso, o algoritmo *CASH* consome poucos recursos computacionais e pode ser executado até mesmo em dispositivos embarcados.

A partir da análise dos resultados, é possível notar que a interferência total experimentada pelos dispositivos foi menor quando utilizado a configuração sugerida pela MILP, o que é esperado, visto que o algoritmo *CASH* não analisa todo o espaço de soluções. No entanto, como o algoritmo *CASH* é guloso e a cada iteração guarda a configuração que proporciona o menor valor de interferência, ele consegue encontrar soluções que se assemelham as do MILP. O algoritmo *CASH* foi em média 30% melhor quando comparado com a configuração aleatória e 75% melhor quando comparado com a utilização dos mesmos canais. Em relação ao MILP, o algoritmo *CASH* apresentou um aumento na interferência em média de apenas 4 dbm.

A seguir, foi analisado a quantidade de pacotes entregues. Mais uma vez, como era esperado, os experimentos que utilizaram os canais que geravam a menor quantidade de interferência, foram capaz de entregar uma quantidade maior de canais. O algoritmo *CASH*

entregou em média 33% mais pacotes quando comparado com a configuração aleatória e 260% mais pacotes quando comparado com a utilização dos mesmos canais. O algoritmo *CASH* conseguiu entregar em média 7% mais pacotes que o MILP, isso se deve ao fato do pré-processamento realizado pelo algoritmo, que garante que os dispositivos sejam distribuídos uniformemente entre os APs. Garantindo que nenhuma região sofra mais com interferência que outra.

Por fim, foram analisados a quantidade de pacotes perdidos. Mais uma vez, o algoritmo *CASH* conseguiu os melhores resultados, apresentando as menores porcentagens de perda. O algoritmo *CASH* perdeu em média 13% menos pacotes em relação a utilização de canais aleatórios e 47% menos pacotes que a utilização do mesmo canal. Quando comparado com o MILP, o algoritmo perdeu em média apenas 3% menos pacotes. É possível notar que o número perdas é menor nos mecanismos que oferecem as menores interferência. Isso ocorre porque a quantidade de colisões também é menor.

Assim, os resultados mostraram que o algoritmo *CASH* minimizou com sucesso a interferência no ambiente, aumentando significativamente o número de pacotes entregues. O algoritmo *CASH*, pode portanto ser utilizado em cenários dinâmicos, como os de SH, para configurar os dispositivos de forma rápida, aumentando a confiabilidade da rede e diminuindo a sua latência. Fazendo dele um mecanismo viável para solucionar o problema de atribuição de canais no contexto de SH.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A grande quantidade de dispositivos heterogêneos que utilizam a banda de 2.4 GHz pode causar sérios problemas de interferência, especialmente nas redes WHN, das SH. Esta dissertação propõe um modelo de interferência, que pode ser usado para medir a interferência entre dois dispositivos que utilizam a frequência de 2.4GHz. O modelo proposto leva em consideração o fator de interferência entre os canais, a potência de transmissão dos dispositivos e a atenuação do sinal, para calcular a interferência entre os dispositivos.

Com base no modelo proposto, foram desenvolvidos dois mecanismos de atribuição de canais, que são: um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) e o algoritmo *CASH*. Tanto a MILP, como o algoritmo *CASH* são capazes de selecionar um conjunto de canais que minimizam a interferência total no contexto das SH (isto é, em um ambiente que possua dispositivos que utilizam as tecnologias *Wi-Fi*, *Zigbee* e *Bluetooth* para se comunicar). No entanto, computacionalmente falando, a execução da MILP é mais dispendiosa, que a do algoritmo *CASH*.

A solução proposta pela MILP e pelo algoritmo *CASH*, foram comparadas com outras abordagens existentes, como é o caso da utilização do mesmo canal para todos os dispositivos ou a utilização de canais aleatórios. Os testes mostraram que o algoritmo *CASH* alcançou resultados semelhantes, no que diz respeito a interferência total, aos encontrados pela MILP.

O algoritmo *CASH* foi capaz de minimizar a interferência em todos os cenários, garantindo a entrega de uma quantidade maior de pacotes, com uma porcentagem menor de pacotes perdidos, do que as outras abordagens. Uma melhoria de pelo menos 50% foi obtida quando comparada com outras técnicas de atribuição de canal. Assim, conclui-se que é possível utilizar o algoritmo *CASH* em cenário dinâmicos, como é o caso das SH.

Como trabalho futuro, pretende-se fazer com que o algoritmo reaja dinamicamente a entrada e saída de dispositivos na rede, de forma que o calculo dos melhores canais seja feito sempre que uma alteração for detectada. Permitindo assim, que a rede possua a melhor configuração a qualquer momento e possa se adaptar aos casos de mobilidade.

REFERÊNCIAS

ACHANTA, M. **Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points**. [S.l.]: Google Patents, 2004.

AKL, R.; AREPALLY, A. Dynamic channel assignment in ieee 802.11 networks. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Portable Information Devices, 2007: PORTABLE07**. IEEE International Conference on. [S.l.:s.n.], 2007. p. 1–5.

ALLIANCE, Z. **Zigbee Alliance**. 2018. Disponível em: <<https://www.zigbee.org/>>, Acesso em: 06 nov. 2018.

ASHTON, K. That ‘internet of things’ thing. **RFiD Journal**, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. **Computer networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

CHENG, C.-H.; HO, C.-C. Implementation of multi-channel technology in zigbee wireless sensor networks. **Computers & Electrical Engineering**, v. 56, p. 498–508, 2016.

CORONADO, E.; RIGGIO, R.; VILLALÓN, J.; GARRIDO, A. Wi-balance: Channel-aware user association in software-defined wi-fi networks. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium**. [S.l.:s.n.], 2018. p. 1–9.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013.

HUMMEN, R.; ZIEGELDORF, J. H.; SHAFAGH, H.; RAZA, S.; WEHRLE, K. Towards viable certificate-based authentication for the internet of things. In: ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY. **Proceedings of the 2nd ACM workshop on Hot topics on wireless network security and privacy**. [S.l.:s.n.], 2013. p. 37–42.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for Information technology – Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands: 802.15.2-2003**. United States, 2003. 150 p. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1237540>>. Acesso em: 5 maio 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN): Ieee std 802.15.1-2005**. United States: [s.n.], 2005. 700 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems–**

Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): Ieee 802.15.4-2006. United States:[s.n.], 2006. 320 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4:** Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): 802.15.4-2011. United States:[s.n.], 2011. 314 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications:** 802.11-2012. United States, 2012. 2793 p. Acessado em: <<http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>>. Acesso em: 5 maio 2018.

JIANG, H.; LIU, B.; CHEN, C. W. Performance analysis for zigbee under wifi interference in smart home. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on.** [S.l.:s.n.], 2017. p. 1–6.

LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. The internet of things: a survey. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 243–259, 2015.

MISHRA, A.; BANERJEE, S.; ARBAUGH, W. Weighted coloring based channel assignment for wlans. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, v. 9, n. 3, p. 19–31, 2005.

MISHRA, A.; SHRIVASTAVA, V.; AGRAWAL, D.; BANERJEE, S.; GANGULY, S. Distribu- ted channel management in uncoordinated wireless environments. In: ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY. **Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking.** [S.l.:s.n.], 2006. p. 170–181.

MOCRIL, D.; CHEN, Y.; MUSILEK, P. Iot-based smart homes: A review of system architecture, software, communications, privacy and security. **Internet of Things**, v. 1, p. 81–98, 2018.

NALBANDIAN, S. A survey on internet of things: Applications and challenges. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Technology, Communication and Knowledge (ICTCK), 2015 International Congress on.** [S.l.:s.n.], 2015. p. 165–169.

NATARAJAN, R.; ZAND, P.; NABI, M. Analysis of coexistence between ieee 802.15. 4, ble and ieee 802.11 in the 2.4 ghz ism band. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE.** [S.l.:s.n.], 2016. p. 6025–6032.

PERUMAL, T.; RAMLI, A. R.; LEONG, C. Y.; MANSOR, S.; SAMSUDIN, K. Interoperability among heterogeneous systems in smart home environment. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL

AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Signal Image Technology and Internet Based Systems, 2008. SITIS'08. IEEE International Conference on.** [S.l.:s.n], 2008. p. 177–186.

RAPPAPORT, T. S. *et al.* **Wireless communications: principles and practice.** [S.l.]: prentice hall PTR New Jersey, 1996. v. 2.

RAZA, S.; MISRA, P.; HE, Z.; VOIGT, T. Bluetooth smart: An enabling technology for the internet of things. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2015 IEEE 11th International Conference on.** [S.l.:s.n.], 2015. p. 155–162.

BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP. **Bluetooth.** 2018. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/>>, Acesso em: 15 ago. 2018.

SINGH, D.; TRIPATHI, G.; JARA, A. J. A survey of internet-of-things: Future vision, architecture, challenges and services. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Internet of things (WF-IoT), 2014 IEEE world forum on.** [S.l.:s.n.], 2014. p. 287–292.

STOJKOSKA, B. L. R.; TRIVODALIEV, K. V. A review of internet of things for smart home: Challenges and solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1454–1464, 2017.

VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In: INSTITUTE FOR COMPUTER SCIENCES, SOCIAL-INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING. **Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops.** [S.l.:s.n.], 2008. p. 60.

VARGA, A.; RUDOLF, H. **INET Framework for the OMNeT++ discrete event simulator.** 2018. Disponível em: <<https://github.com/inet-framework/inet>>, Acesso em: 20 set. 2018.

WI-FI, A. **Wi-Fi Alliance.** 2018. Disponível em: <<https://www.wi-fi.org/>>, Acesso em: 09 jun. 2018.