



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SLOTTED ALOHA PARA REDES SEM FIO COM RECURSOS  
ESCASSOS E ENERGIZADAS VIA SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA**

**CLEYSON DE VASCONCELOS SILVA**

Brasília, dezembro de 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SLOTTED ALOHA PARA REDES SEM FIO COM RECURSOS  
ESCASSOS E ENERGIZADAS VIA SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA**

**CLEYSON DE VASCONCELOS SILVA**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Elétrica*

Banca Examinadora

Prof. Marcelo Menezes de Carvalho, ENE/UnB \_\_\_\_\_  
*Orientador*

Prof. Renato Mariz de Moraes, CIn/UFPE \_\_\_\_\_  
*Examinador externo*

Prof. Paulo Roberto de Lira Gondim, \_\_\_\_\_  
ENE/UnB  
*Examinador interno*

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, CLEYSON DE VASCONCELOS

SLOTTED ALOHA PARA REDES SEM FIO COM RECURSOS ESCASSOS E ENERGIZADAS VIA SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA [Distrito Federal] 2021.

xvii, 134p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1.Transferência de energia sem fio

2.Slotted ALOHA

3.Modelagem analítica

4.Internet das Coisas

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C.V. (2021). Slotted ALOHA para redes sem fio com recursos escassos e energizadas via sinais de radiofrequência. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-779/22, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Cleyson de Vasconcelos Silva.

TÍTULO: SLOTTED ALOHA PARA REDES SEM FIO COM RECURSOS ESCASSOS E ENERGIZADAS VIA SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA

GRAU: Mestre em Engenharia Elétrica

ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Cleyson de Vasconcelos Silva  
Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT  
Universidade de Brasília (UnB)  
Campus Darcy Ribeiro  
CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos que contribuíram para a realização desse Mestrado*

*CLEYSON DE VASCONCELOS SILVA*

## Agradecimentos

*Agradeço a meus pais, Raimundo e Rosidete, pelo apoio incondicional dedicado a mim durante todos esses anos. Agradeço à minha companheira Alessandra pelo incentivo diário, por cuidar de nossa filha para que eu pudesse alcançar meu objetivo. Agradeço a meu sogro Carlos e minha sogra Daisy por todo suporte ao longo dessa jornada. Agradeço à minha filha Luísa, pelos abraços que tornam a tormenta em calmaria, e me dão força para seguir em frente. Agradeço ao professor Marcelo Menezes de Carvalho pela orientação, paciência, e apoio em todos os momentos desafiadores da pesquisa. Agradeço a Deus por tudo.*

CLEYSON DE VASCONCELOS SILVA

---

## RESUMO

O crescente interesse da indústria no novo paradigma de redes conhecido como Internet das Coisas alavancou a demanda por dispositivos sem fio com capacidade de operação prolongada e para utilização em larga escala. Porém, a substituição manual das baterias, em redes com milhões ou até bilhões de dispositivos, gera um grande problema. Nesse contexto, a transferência de energia via sinais de radiofrequência emergiu como uma solução promissora tanto à problemática relacionada ao tempo de vida dos dispositivos quanto à substituição de suas baterias, dando origem às redes sem fio energizadas via sinais de radiofrequência. Nesse âmbito, propomos uma modificação do protocolo Slotted ALOHA para operar com transferência de energia via sinais de radiofrequência enviados por um ponto de acesso “híbrido” em uma rede formada por dispositivos sem fio com recursos escassos.

Neste protocolo, o ponto de acesso híbrido utiliza um número específico e exclusivo de *slots* para transferir energia suficiente apenas para geração e tentativa de transmissão de um único pacote de dados por estação, que após a transmissão, entra em modo de dormência. Para isto, o ponto de acesso híbrido monitora o número de tentativas de transmissão no canal desde o último período de carregamento. Esse monitoramento é realizado estimando o número acumulado de estações que realizaram uma tentativa de transmissão. Devido à restrição de energia das estações, um limiar de tentativas de transmissão é estipulado para que ocorra o carregamento da rede via sinais de radiofrequência emitidos pelo ponto de acesso híbrido. Quando a contagem do número acumulado de tentativas de transmissão atinge ou ultrapassa o limiar estipulado, o ponto de acesso híbrido envia um sinal de despertar indicando o início do período de carregamento no *slot* seguinte. As estações alternam para o modo de coleta de energia assim que recebem o sinal de despertar.

O sistema contempla dois modos de operação: *Hold-Before-Charge* (HBC) e *Drop-Before-Charge* (DBC). No modo de operação HBC, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser mantido no *buffer* do dispositivo e transmitido no início do *slot* imediatamente seguinte ao período de carregamento. Porém, no modo de operação DBC, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser descartado antes do período de carregamento.

Este trabalho apresenta modelos analíticos baseados em cadeias de Markov para avaliar o desempenho de ambos os modos de operação considerando condições de canal ideais. Os modelos analíticos são validados via simulação Monte Carlo. Considerando aspectos da camada física, propomos também uma formulação matemática para obter o período médio de carregamento, e técnicas para estimar o número de transmissões simultâneas utilizando o método de estimação de máxima verossimilhança. O impacto do carregamento energético e das técnicas de estimação no desempenho do sistema considerando aspectos da camada física é avaliado via simulações. O desempenho do protocolo é estudado em termos de vazão normalizada sob diferentes condições de rede e valores de seus parâmetros de operação. Em particular, investigamos o comportamento da vazão da rede para diferentes valores do limiar de contagem de nós descarregados.

O sistema operando no modo HBC apresenta melhor desempenho, porém demanda mais energia do HAP. O período médio de carregamento obtido dado os parâmetros do sistema é capaz de recarregar as estações com alta probabilidade. Por fim, a utilização das técnicas para estimar o número de transmissões simultâneas permite que o sistema atinja alto desempenho para a maioria dos valores de limiar.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, Slotted ALOHA, Transferência de Energia sem Fio

---

## ABSTRACT

The growing interest of the industry on the new networking paradigm known as Internet of Things has leveraged a demand for large-scale adoption of battery-operated wireless devices capable of operating over long periods of time. However, the manual replacement of battery in networks with millions or even billions of devices has become a significant issue. In this context, wireless power transfer via radio frequency signals has emerged as a promising solution to the problem of extending the lifetime of devices' batteries and their frequent replacement, giving rise to Wireless Powered Communications Networks. To address this problem, we propose a modified Slotted ALOHA protocol for Wireless Powered Resource-Constrained Networks.

In this work, the Hibrid Access Point (HAP) performs wireless energy transfer over a specific and exclusive number of time slots (the charging period). Each wireless energy transfer performed by a HAP allows only basic operations and a single packet generation and transmission attempt by each node. After its transmission, the node goes to sleep mode. The HAP keeps track of the accumulated number of nodes that have already attempted a packet transmission over the channel since the end of the last charging period. This tracking is performed by estimating the number of stations that have already made a transmission attempt. Due to power restrictions of stations, a transmission attempt threshold value is set up to control when the HAP sends the radiofrequency signals for energy replenishment. As soon as the number of transmission attempts is larger than or equal to the configured threshold value, the HAP sends a wake-up signal indicating the start of the charging period in the next time slot. Stations switch to energy harvesting mode as soon as they receive the wake-up signal.

Two variations of the basic system operation are introduced: a hold-before-charge operation (HBC) and a drop-before-charge operation (DBC). In the HBC operation mode, the nodes with a packet generated in the same time slot where a wake-up signal is received keep their packets in their buffers until the end of the transmission of the consecutive energy packets, at which moment they resume their packet transmissions. But, in the DBC operation mode, any node with a packet generated in the same time slot where a wake-up signal is received must discard the packet from its buffer.

This work presents analytical models to evaluate the performance of both modes of operation assuming ideal channel conditions. In addition, we consider physical-layer issues to propose a formulation to obtain the average charging period, and techniques to estimate the number of simultaneous transmissions based on maximum likelihood estimation. The impact of energy charging and the estimation techniques on system performance while considering physical-layer issues are evaluated via Monte Carlo simulations. Protocol performance is studied in terms of normalized throughput under different network conditions and values of its operating parameters. In particular, we investigate the behavior of the network throughput for different values of the discharged node count threshold.

The system operating in HBC mode has better performance, but demands more energy from the

HAP. The average charging period obtained given the system parameters is capable of recharging the stations with high probability. Finally, using techniques to estimate the number of simultaneous transmissions allows the system to achieve high performance for most threshold values.

**Keywords:** Internet of Things, Slotted ALOHA, Wireless Energy Transfer

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	CONTRIBUIÇÕES	4
1.3	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1	INTRODUÇÃO	6
2.2	REDES DE COMUNICAÇÃO ENERGIZADAS SEM FIO	7
2.2.1	MODELOS DE FONTE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	9
2.2.2	ARQUITETURAS DE RECEPÇÃO HABILITADAS À WPT	11
2.3	O PROTOCOLO SLOTTED ALOHA	13
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS	15
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO SISTEMA</b>	<b>20</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	21
3.2	MODELAGEM ANALÍTICA	24
3.2.1	FUNDAMENTOS	24
3.2.2	MODO DE OPERAÇÃO <i>Drop-Before-Charge</i> (DBC)	25
3.2.3	MODO DE OPERAÇÃO <i>Hold-Before-Charge</i> (HBC)	29
3.2.4	NÚMERO MÉDIO DE PACOTES DE ENERGIA TRANSMITIDOS	32
<b>4</b>	<b>IMPACTO DA CAMADA FÍSICA</b>	<b>34</b>
4.1	INTRODUÇÃO	34
4.2	FUNDAMENTOS	35
4.3	PERÍODO DE CARREGAMENTO ADEQUADO	36
4.4	ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE TRANSMISSÕES SIMULTÂNEAS: TOPOLOGIA ALEATÓRIA	38
4.5	ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE TRANSMISSÕES SIMULTÂNEAS: TOPOLOGIA ANEL	42
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO CASO IDEAL</b>	<b>48</b>
5.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	49
5.2	ANÁLISE GERAL DO MODELO	53
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO COM CAMADA FÍSICA</b>	<b>69</b>

6.1	INTRODUÇÃO .....	69
6.2	EFICIÊNCIA DO MÉTODO DE COLETA DE ENERGIA .....	70
6.3	MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE TRANSMISSÕES SIMULTÂNEAS .....	75
6.3.1	TOPOLOGIA EM ANEL.....	76
6.3.2	TOPOLOGIA ALEATÓRIA .....	87
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>
<b>I</b>	<b>TABELAS E CÓDIGOS PARA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>106</b>
I.1	TABELA “T” DE STUDENT .....	106
I.2	CÓDIGOS .....	107

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama esquemático do módulo de coleta de energia.....	8
2.2	Representação de WPCN: (a) Ponto de Acesso Híbrido (HAP), (b) EN e AP separados	10
2.3	Arquitetura para Comutação no Tempo.....	11
2.4	Arquitetura para Comutação no Tempo.....	12
2.5	Vazão normalizada em função da carga oferecida para o ALOHA puro e Slotted ALOHA.....	15
3.1	Projeto da duração de um slot para o sistema.....	22
3.2	Modo de Operação HBC: pacotes gerados no mesmo slot de tempo em que ocorre o sinal de despertar têm suas transmissões atrasadas até o final do período de carregamento.....	22
3.3	Modo de Operação DBC: pacotes gerados no mesmo slot de tempo em que ocorre o sinal de despertar têm suas transmissões atrasadas até o final do período de carregamento.....	23
3.4	Modelo de Cadeia de Markov de tempo-discreto para o modo de operação DBC: $L = 3$ , $N > 3$ e $C$ pacotes de energia.....	25
3.5	Modelo de Cadeia de Markov de tempo-discreto para o modo de operação HBC: $L = 3$ , $N = 7$ e $C = 2$ pacotes de energia.....	30
3.6	Processo de renovação.....	32
4.1	Representação do nível de energia durante o período de carregamento ao final da transmissão de cada pacote de energia para dois dispositivos $u$ e $i$ com $d_{i,H} < d_{u,H}$ ...	37
4.2	Representação de uma colisão durante um slot considerando a Topologia Aleatória...	39
4.3	Representação de um slot com transmissões simultâneas considerando a Topologia em Anel.....	43
4.4	Função Digamma.....	46
5.1	Vazão média normalizada para $N = 20$ e $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC. ....	50
5.2	Vazão média normalizada para $N = 20$ e $C = 4$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC. ....	52
5.3	Vazão média normalizada para $N = 20$ e $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC. ....	54
5.4	Vazão média normalizada para $N = 20$ e $C = 4$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC. ....	55
5.5	Vazão média normalizada para $N = 20$ , $C = 1$ e $0 < \lambda \leq 8$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.....	57
5.6	Vazão média normalizada para $N = 40$ e $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC. ....	58

5.7	Vazão média normalizada para $N = 100$ e $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC....	60
5.8	Vazão média normalizada para $N = 30$ e $\lambda = 0.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC....	61
5.9	Vazão média normalizada para $N = 30$ e $\lambda = 1.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC....	63
5.10	Vazão média normalizada para $N = 30$ e $\lambda = 2.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC....	65
5.11	Vazão média normalizada para $N = 30$ e $\lambda = 1.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC....	66
6.1	Comparação dos desempenhos considerando diferentes topologias com $N = 30$ , $\lambda = 1.6$ pacotes/ms para os parâmetros da tabela 6.1 com $f = 900\text{MHz}$ e $d_u = 5$ m no modo HBC. (a) $C = 7$ , (b) $C = 10$ .....	74
6.2	.....	78
6.2	$N = 70$ , $L = 50$ , $\lambda = 1.8$ pacotes/ms, $C = 1$ , $d = 5$ m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as medidas de desempenho do sistema para o modelo analítico e simulação.....	79
6.3	.....	82
6.3	$N = 70$ , $L = 50$ , $\lambda = 3$ pacotes/ms, $C = 1$ , $d = 5$ m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as medidas de desempenho do sistema para o modelo ideal e simulação.....	83
6.4	Comparação entre modelo analítico e simulação com $N = 40$ , $L = 25$ , para os parâmetros da tabela 6.1 com $\eta = 0.8$ , $f = 900\text{MHz}$ , $d_u = 3$ m no modo HBC. (a) $\lambda = 1.4$ pacotes/ms, (b) $\lambda = 3$ pacotes/ms.....	86
6.5	.....	90
6.5	$N = 10$ , $L = 5$ , $\lambda = 1$ pacotes/ms, $C = 1$ , $d_u = 5$ m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as métricas do sistema para o modelo ideal e o proposto para estimacão de colisão.....	91
6.6	.....	94
6.6	$N = 10$ , $L = 4$ , $\lambda = 1$ pacotes/ms, $C = 4$ , $d_u = 3$ m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as métricas do sistema para o modelo ideal e o proposto para estimacão de colisão.....	95

# LISTA DE TABELAS

2.1	Comparação entre os trabalhos relacionados .....	19
5.1	Máxima vazão média normalizada ( $S_{max}$ ) .....	59
5.2	Tamanho médio de ciclo de transmissão de pacotes de dados (em <i>slots</i> ) e número total de pacotes de energia transmitidos pelo HAP em um milhão de slots para cada modo de operação com $N = 40$ e $C = 1$ . .....	67
6.1	Parâmetros do sistema .....	71
6.2	Menor período de carregamento com garantia de sustentabilidade energética considerando os parâmetros da Tabela 6.1.....	72

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$C$	Número de pacotes de energia do período de carregamento
$d$	Distância entre o HAP e uma estação
$E_{pac}$	Energia necessária para operação da estação
$E_T$	Energia total coletada pela estação mais afastada
$ h ^2$	Coefficiente de potência para um canal com desvanecimento Rayleigh
$m$	Número de transmissões simultâneas
$n$	Número de acumulado de transmissões
$N$	Número total de estações
$N_C$	Número médio de pacotes de energia transmitidos pelo HAP
$p$	probabilidade de geração de pacote
$P_{TX}^H$	Potência de transmissão do HAP
$P_{TX}^{no}$	Potência de transmissão da estação
$y$	Potência recebida pelo HAP

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Coefficiente de perda de caminho
$\eta$	Eficiência do conversor no circuito retificador
$\lambda$	Taxa agregada de geração de pacotes
$\Omega$	Energia média recebida por u ao receber um pacote de energia
$\Phi$	Potência média recebida pelo HAP relativa à transmissão de um nó
$\Psi$	Função Digamma
$\zeta$	Limiar de probabilidade para carregamento energético

## Siglas

CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DBC	Drop-Before-Charge
HAP	Hybrid Access Point
HBC	Hold-Before-Charge
IoT	Internet of Things
MIMO	Multiple Input Multiple Output
M2M	Machine-to-Machine
RFID	Radio Frequency Identification
RF-EHN	Radio Frequency Energy Harvesting Networks
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
TDMA	Time Division Multiple Access
WET	Wireless Energy Transfer
WPCN	Wireless Powered Communications Networks
WPT	Wireless Power Transfer
WSN	Wireless Sensor Network

# Capítulo 1

## Introdução

O paradigma de redes de comunicação energizadas sem fio (WPCN, do inglês *Wireless Powered Communications Networks*) introduz uma solução para a problemática inerente às redes sem fio convencionais, que diz respeito à necessidade de troca ou recarregamento manual das baterias dos dispositivos. O tempo de vida limitado das baterias implica em um aumento do custo de manutenção e do número de substituições, causando impactos negativos ao meio ambiente. Tais questões tendem a se agravar frente à ascensão da Internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), pois, estima-se que 38,6 bilhões de dispositivos IoT estarão conectados à internet [1] em 2025 com a tarefa de detectar e coletar dados para fins de suporte à tomada de decisão em sistemas inteligentes, monitoramento, atividades de vigilância aplicadas a vários cenários, de ambientes agrícolas e industriais a veículos autônomos e serviços de saúde. Dessa forma, estudos têm avançado em direção às tecnologias que permitam o carregamento de dispositivos sem fio remotamente, superando as redes sem fio convencionais alimentadas por bateria em muitos aspectos, tais como desempenho, tempo de vida, e custo operacional de rede [2].

Nesse sentido, a transferência de energia via sinais de radiofrequência (WPT, do inglês *Wireless Power Transfer*) é a tecnologia que torna possível a implementação das WPCN ao transmitir energia pelo ar (WET, do inglês *Wireless Energy Transfer*) por meio de sinais de radiofrequência. A tensão variável transportada por estes sinais é convertida em um nível de tensão DC no circuito retificador do dispositivo sem fio para alimentar a bateria ou um super capacitor. Em particular, esta tecnologia tem sido mais explorada em detrimento de outras que coletam energia de fontes naturais, que, em geral, são imprevisíveis e inconsistentes, como energia solar [3], e eólica [4]. Entretanto, esse paradigma se depara, essencialmente, com dois principais desafios: a baixa eficiência da tecnologia WPT sobre longas distâncias e a complexidade de se transmitir energia e informação na mesma rede (em alguns casos, de forma simultânea). Atualmente, a tecnologia WPT permite que dispositivos sem fio recebam, efetivamente, algumas dezenas de microwatts de potência via sinais de radiofrequência a uma distância de 10 metros. Embora isso seja uma limitação em muitos cenários, em outros é o bastante para tornar as WPCN adequadas a uma variedade de aplicações onde os dispositivos sem fio operam com potência de alguns miliwatts. Dentre estas, podemos citar: redes de sensores sem fio, comunicações máquina para máquina (M2M, do inglês *Machine-to-Machine*), e etiquetas eletrônicas (RFID, do inglês *Radio Frequency Identification*), todos inseridos em um

contexto de IoT.

Contudo, uma integração bem sucedida entre a tecnologia de WPT e IoT exige uma otimização do consumo de energia em tecnologias de comunicação sem fio em diferentes camadas da pilha de protocolos IoT. A camada de enlace é responsável por grande parte do consumo de energia, pois realiza tarefas como o agendamento de transmissão de quadros, sincronização, escuta ociosa, correção de erros, dentre outros. Portanto, existe a necessidade de adaptá-la para tornar os sistemas de comunicação baseados em IoT compatíveis com a tecnologia WPT. As mudanças para adaptação da camada de enlace vão além do uso de estratégias como métodos de redução do consumo de energia, de conservação de energia, e técnicas de gerenciamento de potência. O protocolo MAC precisa conciliar o agendamento de transmissões com o recebimento (ou transferência) de energia. O controle preciso destas tarefas pode ter maior ou menor complexidade e custo dependendo do protocolo MAC utilizado.

Os primeiros estudos com WPCN foram desenvolvidos, com o protocolo de acesso ao meio por divisão do tempo (TDMA, do inglês *Time Division Medium Access*), pertencente à categoria de protocolos MAC de acesso agendado. Neste cenário, tanto as transmissões de dados quanto as de energia ocorrem sobre o controle de um coordenador central, um ponto de acesso híbrido (HAP, do inglês *Hybrid Access Point*) [5]. A cada estação é reservado um slot de tamanho específico para a transmissão de dados no canal de subida em instantes predeterminados. Assim, o uso desta técnica implica em considerável sobrecarga em sinalização para estimação de canal e sincronização dos dispositivos, além de alta complexidade para redes com elevado número de nós.

Uma grande parcela dos trabalhos realizados com WPCN têm adotado a categoria de protocolos MAC de acesso aleatório, representados pelos protocolos da família ALOHA e CSMA (do inglês *Carrier Sense Multiple Access*), visando a integração com a tecnologia de WPT [6],[7]. Recentemente, Choi et al [8] propuseram uma abordagem de acesso híbrido, onde a rede opera com o protocolo Slotted ALOHA, porém o ponto de acesso pode escutar o canal (característica inerente ao protocolo CSMA) com o intuito de identificar um *slot* de tempo vazio e utilizá-lo para transferir energia. Entretanto, a taxa de transmissão de dados de uma estação específica varia de acordo com a quantidade de energia coletada. Assim, o protocolo não garante a devida energização do dispositivo para manter a taxa de transmissão constante. Posteriormente, Iqbal et. al [9] propuseram protocolo baseado em Slotted ALOHA com transferência ininterrupta de energia pelo HAP. As transmissões de dados e de energia ocorrem em canais distintos. O HAP opera com rádio *full duplex* e consegue transferir energia e decodificar informação simultaneamente. As estações operam com rádios em modo *half duplex*, portanto, comutam no tempo entre transmissão de dados e coleta de energia. O trabalho avalia o impacto da diversidade espaço-temporal na taxa de transmissão das estações. Contudo, mantém a taxa de transmissão de dados variável, sem garantir a devida energização das estações para o aumento da vazão.

Recentemente, muitos trabalhos de pesquisa têm sido feitos sobre WPCN usando protocolos MAC baseados em contenção, porém com excessivas adaptações, onde os dispositivos tornam-se cada vez mais robustos em aplicações simples. Um grande desafio no contexto de redes energizadas via sinais de RF é garantir a transferência da quantidade de energia adequada para que a estação

se mantenha não somente ativa, mas em condições de assegurar uma dada taxa de transmissão de dados constante. A adoção de canais exclusivos e identificação de *slots* vazios para a transferência de energia garantem que uma grande quantidade de energia esteja sendo lançada na rede, porém com alto custo para a rede em si, e para os sistemas vizinhos que sofrem com interferência. Há uma carência de soluções simples, porém promissoras, que garantam a sustentabilidade energética da rede sem causar maiores interferências em outros sistemas, e assegurem um bom desempenho. Por exemplo, o protocolo Slotted ALOHA seria apropriado para aplicações IoT com baixa vazão, pouca complexidade, e que requerem baixo consumo de energia. À luz do exposto, este trabalho introduz um protocolo MAC baseado em Slotted ALOHA para uma rede sem fio energizada via sinais de radiofrequência onde as estações têm recursos limitados: a energia transferida permite apenas operações básicas, a geração e a tentativa de transmissão de um único pacote. A taxa de geração de pacotes segue uma distribuição de Poisson. O dispositivo entra em modo de dormência após a tentativa de transmissão do pacote de dados. Além disso, o ponto de acesso híbrido monitora o número de tentativas de transmissões no canal desde o último período de carregamento. Esse monitoramento é realizado estimando o número acumulado de estações em modo de dormência (que realizaram uma tentativa de transmissão). Devido à restrição de energia das estações, um limiar de tentativas de transmissão é estipulado para que ocorra o carregamento da rede via sinais de radiofrequência emitidos pelo HAP. Quando a contagem do número acumulado de tentativas de transmissão atinge ou ultrapassa o limiar estipulado, o HAP envia um sinal de despertar. O sinal contém a informação da duração do período de carregamento e indica que a transferência de energia se iniciará no *slot* imediatamente seguinte. O período de carregamento é composto por  $C$  *slots* consecutivos usados para transmitir  $C$  pacotes de energia consecutivos.

O sistema contempla dois modos de operação: *Hold-Before-Charge* (HBC) e *Drop-Before-Charge* (DBC). No modo de operação HBC, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser mantido no *buffer* do dispositivo e transmitido no início do *slot* imediatamente seguinte ao período de carregamento. No modo de operação DBC, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser descartado antes do período de carregamento. Dada a importância de modelos analíticos para a análise de desempenho de um protocolo de comunicação, e o fato de haver muitos trabalhos com propostas baseadas em cadeias de Markov, propomos modelar o comportamento do sistema baseado no número de estações descarregadas (em modo de dormência) e no número de pacotes de energia consecutivos transmitidos do ponto de vista do HAP. Portanto, esta dissertação apresenta um modelo analítico baseado em uma cadeia de Markov de tempo discreto que representa a dinâmica de funcionamento da rede do ponto de vista do HAP para cada modo de operação em condições de canal ideal. Além disso, propomos uma formulação matemática para encontrar qual o número  $C$  de pacotes de energia que deve compor o período de carregamento a fim de garantir o recarregamento das estações com alta probabilidade após o período de carregamento considerando efeitos de propagação de canal. Por fim, ainda considerando efeitos de propagação de canal, e baseado no estado da rede, na topologia, e na amplitude do sinal recebido pelo HAP, desenvolvemos um método para estimar o número de transmissões simultâneas que geram uma colisão no canal de subida a fim de auxiliar o HAP na contagem do número acumulado de tentativas de transmissão no canal desde o último período de carregamento. A validação dos modelos analíticos e os demais resultados de desempenho obtidos

para o sistema operando com recarregamento e método de estimação de colisão foram obtidos via simulações Monte Carlo.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho propõe uma modificação do protocolo Slotted ALOHA para operar com transferência de energia. O protocolo contempla dois modos de operação: *Hold-Before-Charge* e *Drop-Before-Charge*. Devido à restrição de energia imposta aos dispositivos, o HAP necessita recarregar as estações. Dessa forma, o critério estabelecido para o recarregamento foi a adoção de um limiar que representa o número acumulado de estações em modo de dormência desde o último período de carregamento. A fim de alcançar o limiar estabelecido, o HAP estima o número acumulado de transmissões no canal desde o último período de carregamento. Os modelos analíticos são desenvolvidos para avaliação de desempenho considerando condições de canal ideais. Validaremos os modelos analíticos via simulações Monte Carlo. Em seguida, considerando os efeitos de propagação no canal, visamos a elaboração de um método que permita ao HAP escolher um período de carregamento adequado com o intuito de garantir a sustentabilidade energética da rede, ou seja, que as estações sejam recarregadas com alta probabilidade após o período de carregamento. Por fim, apresentamos um método de estimação do número de transmissões simultâneas baseado na potência do sinal recebido, no estado do sistema, e na topologia adotada para auxiliar o HAP na contagem de tentativas de transmissão sobre o canal.

## 1.2 Contribuições

As contribuições desta dissertação estão elencadas a seguir:

- Proposta de um protocolo baseado em Slotted ALOHA para operar com transferência de energia via sinais de radiofrequência em dois modos de operação: *Hold-Before-Charge* e *Drop-Before-Charge*.
- Proposta de um modelo analítico para a obtenção da vazão média normalizada de uma WPCN baseada em Slotted-ALOHA em cada modo de operação considerando condições de canal ideais.
- Validação dos modelos propostos via simulações Monte Carlo.
- Proposta de um método para encontrar um período de carregamento adequado considerando um modelo de canal com efeitos de propagação em larga e pequena escala.
- Proposta de um método de estimação do número de transmissões simultâneas que auxilie o ponto de acesso na contagem de tentativas de transmissão sobre o canal baseado na potência de sinal recebido, no estado do sistema e na topologia adotada.

### 1.3 Apresentação do Manuscrito

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento da tecnologia WPT e sua integração com a camada de enlace, mais especificamente, com os protocolos MAC, abordando, ao final, os trabalhos anteriores relacionados ao tema. Em seguida, o Capítulo 3 apresenta a descrição e modelagem do sistema para obtenção da vazão média normalizada considerando dois modos de operação da rede via cadeia de Markov. O Capítulo 4 apresenta uma formulação matemática para obter o período de carregamento adequado, e o desenvolvimento de métodos de estimação do número de transmissões simultâneas baseados na potência recebida pelo HAP e no estado do sistema considerando aspectos da camada física. Para aplicação deste método, assumimos que o HAP conhece a localização de todos os dispositivos (e, portanto, sua distância a cada um deles). Assim, o capítulo apresenta o método de estimação de colisão para duas topologias: anel e aleatória. Adiante, o Capítulo 5 apresenta a validação e desempenho dos modelos analíticos desenvolvidos para condições de canal ideais. No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos via simulação Monte Carlo para cenários considerando os aspectos da camada física no carregamento das estações e no método de estimação do número de transmissões simultâneas. Por fim, O Capítulo 7 traz as considerações finais sobre o trabalho indicando direcionamentos à realização de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

O paradigma tecnológico de Internet das Coisas consiste em interconectar uma quantidade massiva de dispositivos com recursos de energia e potência limitados com a finalidade comum de aprimorar uma gama de serviços e aplicações. Muitos são os obstáculos à real implementação deste paradigma, como protocolos de comunicação para redes densas, assegurar conectividade à longas distâncias, baixo consumo de energia, baixo custo de manutenção, além do impacto negativo ao meio ambiente. Nesse sentido, surgiram muitas tecnologias visando a resolução desses problemas, tal como o padrão IEEE 802.11 ah [10], comercialmente conhecido como Wi-Fi HaLow, operando em faixas de frequência abaixo de 1 GHz para ampliar a área de cobertura. Em particular, para sanar os problemas relacionados ao uso de baterias nos dispositivos das redes sem fio tradicionais, como tempo de vida limitado e a necessidade de substituições, muitos esforços têm sido realizados para encontrar formas de se entregar energia sem a necessidade de cabos. Dessa forma, a busca por novos métodos de fornecimento de energia culminou no desenvolvimento de duas tecnologias notáveis: coleta de energia (EH, do inglês *Energy Harvesting*) e transferência de energia via sinais de radiofrequência (WPT).

Dispositivos de rede sem fio equipados com tecnologia EH aproveitam a energia renovável do ambiente de maneira oportuna, fornecida de forma não dedicada, como energia solar e densidade de radiação eletromagnética do ambiente. Em cenários RF-EHN (do inglês *Radio Frequency Energy Harvesting Networks*), onde a coleta é realizada ao se capturar energia da densidade de radiação eletromagnética do ambiente ( $0.01\mu W/cm^2$  em ambientes WiFi [11]), para fins de recarregamento, os dispositivos coletores devem ser capazes de operar em amplas faixas de frequência, a fim de buscar a que lhes forneça mais energia. Devido à natureza dessas fontes, que são altamente instáveis em virtude da variabilidade e dependência dos parâmetros climáticos, bem como de fatores humanos, o fornecimento de energia de maneira estável e sob demanda para os dispositivos, frequentemente, não é alcançado em métodos baseados em EH.

Por outro lado, as fontes de energia na tecnologia WPT são baseadas em transmissores conectados à rede de distribuição de energia elétrica visando a energização dos dispositivos utilizando

uma faixa de frequência específica. Dessa forma, WPT se mostrou uma tecnologia promissora no que concerne à transferência de energia de forma dedicada, controlada e estável, sendo responsável pela construção de um novo paradigma de redes, as WPCN (do inglês *Wireless Power Communications Networks*). A seguir, apresentamos os fundamentos para a implementação de Redes de Comunicação Energizadas sem Fio, os principais aspectos do protocolo MAC Slotted ALOHA, e, por fim, uma revisão bibliográfica dos trabalhos anteriores relacionados à adaptação de protocolos MAC para implementação de redes sem fio com transferência de energia.

## 2.2 Redes de Comunicação Energizadas sem Fio

O conceito de transferência de energia via sinais de radiofrequência foi inicialmente proposto por Nikola Tesla e se refere à transmissão de energia de uma fonte para um dispositivo elétrico via ar. Há duas categorias distintas de WPT: não radiativa (campo próximo) e radiativa (campo distante) [12]. A primeira atém-se às técnicas de transmissão de energia para distâncias curtas. As principais são:

1. **Acoplamento Indutivo:** A energia elétrica é transferida via bobinas por meio de um campo magnético, segundo a Lei de Ampère. Esta técnica é usada no carregamento sem fio de laptops, smartphones, e outros dispositivos portáteis.
2. **Circuitos Ressonantes:** Nesta técnica, circuitos ressonantes são adicionados para melhorar a transmissão de potência por acoplamento indutivo. A cobertura de energia sem fio é uma possível área para a utilização de circuitos ressonantes, que podem ser usados para alimentação de lâmpadas e recargas de baterias móveis sem a utilização de cabos.
3. **Acoplamento Capacitivo:** Esta técnica transfere potência usando campos elétricos entre eletrodos, como placas de metal. Acoplamento capacitivo pode ser perigoso e pode produzir gás ozônio devido à exigência de alta tensão nos eletrodos para transmitir uma quantidade significativa de energia. Dessa forma, a técnica é mais utilizada em aplicações que requerem baixa potência. Recentemente, o acoplamento capacitivo tem sido empregado no carregamento de baterias de dispositivos portáteis e na transferência de potência entre as camadas de substrato de um circuito integrado.

A categoria radiativa lida com cenários onde a energia pode ser transferida sobre maiores distâncias sem a necessidade de uma rede elétrica cabeada. Assim, os sinais de radiofrequência, microondas e raios laser são as formas mais conhecidas de radiação eletromagnética usada para transferência de energia em campo distante. A transferência de energia em campo distante é aplicada em sistemas de comunicações sem fio, como redes de sensores, Wi-Fi e RFID's. Dessa forma, o conceito de rede energizadas via sinais de radiofrequência envolve diferentes cenários e tecnologias. Porém, realizar transferência de energia sem fio, requer, primeiramente, capacitar o dispositivo sem fio à coleta de energia proveniente dos sinais de RF. Para este fim, é preciso

adicionar um módulo responsável por tal tarefa, um coletor de energia de RF. A Figura 2.1 ilustra o módulo de coleta de energia integrado ao hardware do dispositivo sem fio [13].

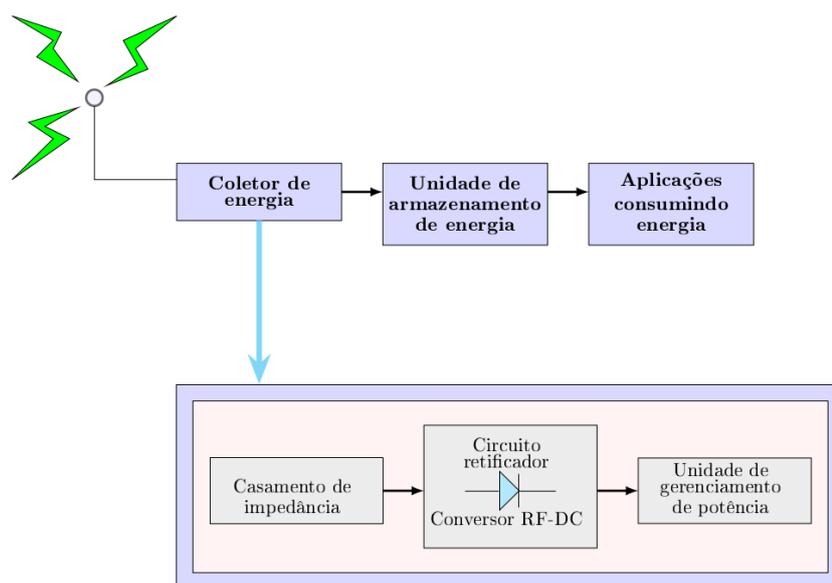


Figura 2.1: Diagrama esquemático do módulo de coleta de energia

Basicamente, o módulo é formado por 4 componentes, descritos a seguir:

1. **Antena:** É o dispositivo responsável por capturar os sinais de RF. A eficiência da antena é o fator chave relacionado à frequência de operação. Dessa forma, ganhos elevados e diminuição do seu comprimento são os objetivos principais da tecnologia de antenas nesse cenário.
2. **Casamento de impedância:** A função principal deste componente é aumentar a tensão de entrada do retificador e minimizar a perda de transmissão da antena para o conversor. Quando as impedâncias da carga e da saída da antena são casadas, a máxima transferência de potência pode ser alcançada.
3. **Circuito Retificador:** O retificador é responsável pela conversão dos sinais de RF capturados em níveis de tensão DC. A eficiência da conversão RF para DC é determinada pelo diodo do retificador, reconhecido como o principal componente do circuito. Maior eficiência na retificação pode ser obtida utilizando-se diodos de baixa potência [14].
4. **Unidade de gerenciamento de potência:** A unidade decide se armazena a energia obtida na conversão, segundo o método coleta-armazena-usa (do inglês, *harvest-store-use*), ou se a utiliza imediatamente para alimentar o dispositivo, conforme o método coleta-usa (do inglês, *harvest-use*).

A transferência de energia sem fio abrange uma vasto conjunto de cenários de rede, podendo auxiliar em diferentes cenários de aplicações em IoT. Além disso, a técnica pode ser integrada a

tecnologias como MIMO e em redes de rádios cognitivos. Entretanto, um cenário em especial tem sido mais favorável ao desenvolvimento da tecnologia, o de redes de sensores. Como a transferência de energia tem baixa eficácia, as WSN's emergem como principal candidato ao uso da técnica devido o baixo consumo de potência das estações. Tipicamente, o consumo de potência de um nó sensor varia de  $100\mu\text{W}$  a  $100\text{ mW}$ , sendo bastante inferior ao consumo de outros dispositivos, tais como *smartphones*, cujo consumo de potência varia na ordem de  $20\text{ mW}$  a  $1,3\text{ W}$ . Nesse sentido, como WSN formam um forte pilar no paradigma de IoT, apresentaremos os aspectos relevantes à construção de WPCN relacionados à estrutura da fonte transmissora de energia e, também, as principais arquiteturas para um dispositivo WSN-IoT habilitado à coleta de energia via sinais de RF.

### 2.2.1 Modelos de Fonte de Transmissão de Energia

Em uma WPCN, um nó de recarga energética (EN, do inglês, *Energy Node*), com recursos de energia ilimitados, transmite sinais de RF para os demais dispositivos da rede via canal de descida com o intuito de reabastecê-los energeticamente. Já os dispositivos, utilizam a energia coletada para transmitir informação ao ponto de acesso pelo canal de subida. A construção de uma WPCN, sob a ótica da transferência de energia, pode ser estruturada de duas formas: com o EN e AP representados por dispositivos distintos ou co-localizados e integrados como um ponto de acesso híbrido HAP [15]. Ambas as estruturas possuem vantagens e desvantagens.

Na Figura 2.2(a), o HAP integrado torna a coordenação das transmissões de informação e energia na rede mais fácil quando comparado à estrutura separada, e também ajuda a economizar custos de produção e operação, compartilhando seus módulos de comunicação e processamento de sinais. Entretanto, um dispositivo mais afastado do HAP coleta menos energia, porém consome mais para transmitir seus pacotes de dados do que um nó mais próximo. Dessa forma, pode ocorrer um desempenho injusto, desfavorável ao usuário mais afastado, que pode ter sua vazão de dados prejudicada por não alcançar níveis de relação sinal-ruído tão elevadas quanto as de um usuário mais próximo. Tal problema pode ser atenuado com a implementação de uma WPCN com EN e AP separados, conforme Figura 2.2(b). Nessa estrutura, o dispositivo ( $n1$ ), mais afastado do AP, consome muita energia nas transmissões de dados, porém coleta muita energia devido à sua proximidade ao EN. Já o dispositivo ( $n2$ ), mais próximo do AP, consome menos energia que ( $n1$ ) para transmitir dados no canal de subida devido a sua proximidade ao AP e também coleta menos energia que ( $n1$ ), pois se encontra mais afastado do EN.

A escolha de cada estrutura deve levar em consideração a disposição dos nós, as potências de transmissão de dados e energia, a sensibilidade do receptor em cada estado de recepção, custos de produção e operação, entre outros. Dessa forma, é possível destacar algumas arquiteturas de recepção habilitadas à coleta de energia via sinais de RF que permitem a realização de WPCN.

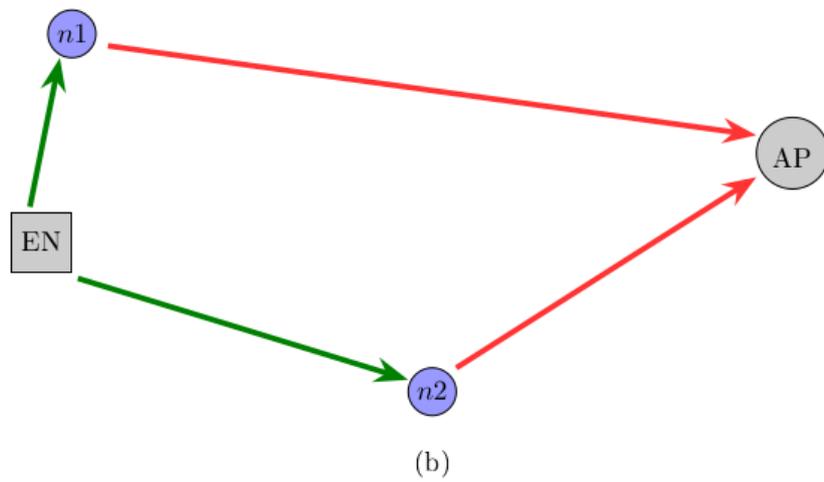
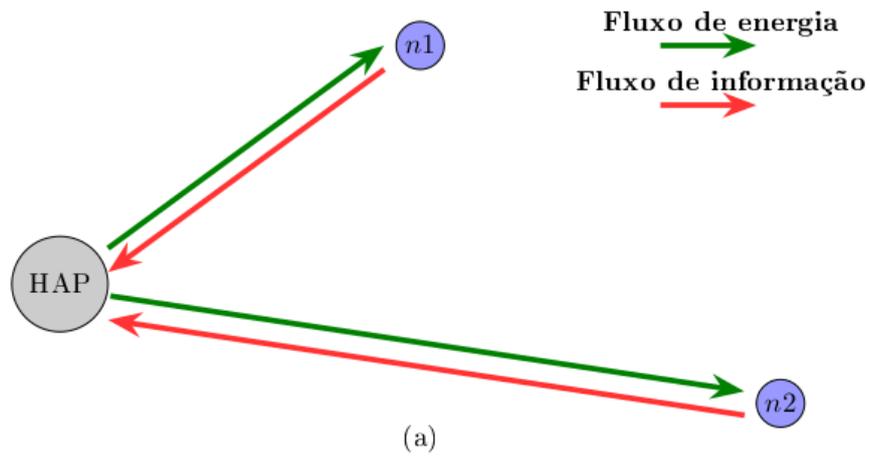


Figura 2.2: Representação de WPCN: (a) Ponto de Acesso Híbrido (HAP), (b) EN e AP separados

## 2.2.2 Arquiteturas de Recepção Habilitadas à WPT

Um dispositivo capaz de coletar energia via sinais de RF deve ter um módulo de coleta de energia, tal qual o da Figura 2.1, integrado a sua arquitetura. Sendo assim, a diferença entre os métodos de coleta de energia em uma WPCN reside na forma como essa integração é realizada, compondo a arquitetura do dispositivo e resultando em maior ou menor flexibilidade na política de coleta de energia. Dessa forma, a arquitetura básica de um dispositivo IoT habilitado à coleta de energia deve conter: uma unidade de comunicação com pelo menos as camadas física e de enlace, uma unidade de processamento formada por processador e memória, uma unidade de aquisição de dados, composta por sensores e/ou atuadores, e por fim, o módulo de coleta de energia. Quanto à integração desses componentes, há diferentes arquiteturas que implicam em políticas distintas de coleta de energia, como mostradas a seguir.

### 2.2.2.1 Comutação no tempo

A arquitetura de comutação no tempo (TS, do inglês *Time Switching*) é a forma mais simples de integração entre o módulo de coleta de energia e os demais componentes da arquitetura, e sua implementação resulta do compartilhamento da mesma antena para receber informação e energia. Nessa configuração, ora os sinais de RF capturados são destinados à decodificação de informação, ora são enviados para o circuito retificador. A Figura 2.3 retrata a integração dos componentes para realização de coleta de energia e informação alternadamente, requerendo sincronização no tempo e agendamento para comutação entre operações com precisão, a fim de executar a decodificação da informação integralmente e minimizar perdas na coleta de energia.

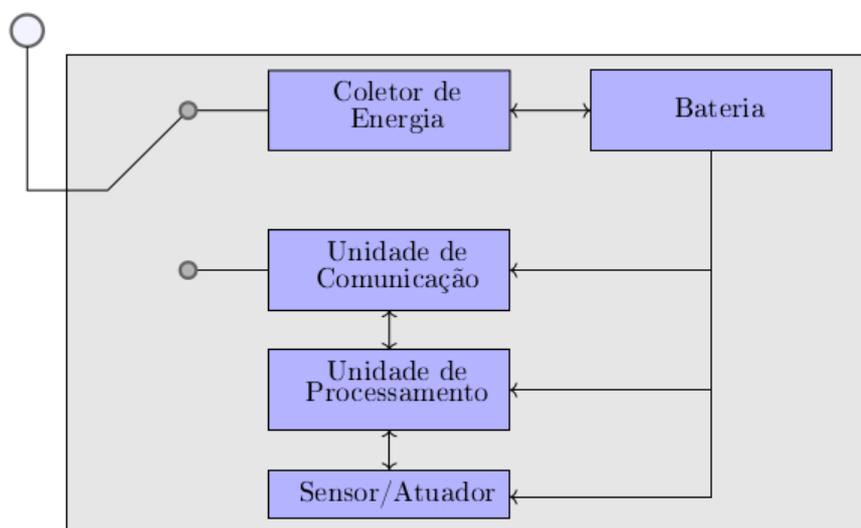


Figura 2.3: Arquitetura para Comutação no Tempo

### 2.2.2.2 Divisão de potência

A arquitetura para divisão de potência (PS, do inglês *Power Splitting*) introduz uma abordagem mais audaciosa, permitindo a decodificação da informação e a coleta de energia simultaneamente, sendo esta, a forma mais simples de se realizar SWIPT. A Figura 2.4 ilustra a integração do coletor de energia aos demais componentes da arquitetura utilizando apenas uma antena.

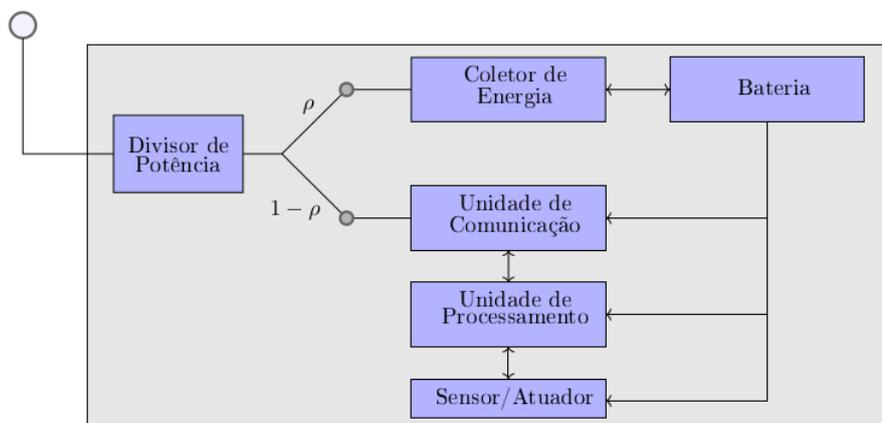


Figura 2.4: Arquitetura para Comutação no Tempo

Basicamente, a potência do sinal de RF capturado pela antena do receptor é dividida e uma fração é encaminhada ao módulo de coleta de energia e a outra é destinada à decodificação da informação. Certamente, o principal problema dessa abordagem consiste em escolher o fator de divisão  $\rho$ , uma vez que a decodificação pode ser prejudicada pela baixa SNR, caso seja priorizada a coleta de energia. Se a prioridade for a decodificação de informação, a sustentabilidade energética pode não ser alcançada e o dispositivo pode ficar inoperante. Dessa forma, existe a preocupação de se projetar módulos de coleta de energia com alta sensibilidade, ou seja, que possam coletar energia a partir de um dado nível de potência de sinal recebido, assim, alguns estudos adotam uma potência de ativação mínima de -30 dBm [16] nos terminais de entrada do circuito retificador como uma escolha razoável no projeto de módulos para coleta de energia.

Apesar do bom desempenho dessa arquitetura depender da otimização do fator de divisão de potência  $\rho$ , sua flexibilidade é mais notável, pois nada impede que a mesma opere como uma arquitetura de comutação no tempo, repassando a totalidade da potência recebida a uma das tarefas.

### 2.2.2.3 Integração com MIMO

O emprego de múltiplas antenas em WPCN amplia o número de possibilidades para a transferência de informação e energia simultânea [12], [13]. Assim, a integração é vista como uma forma de garantir a sustentabilidade energética e melhores relações sinal-ruído quando comparada às arquiteturas anteriores. Uma primeira abordagem é o uso dedicado de antenas para cada tarefa distinta, conhecida como receptores separados. Ambos circuitos para decodificação de informação

e coleta de energia são incluídos na arquitetura como dois receptores separados com suas próprias antenas. Assim, uma antena ou uma matriz de antenas é responsável por conduzir a informação à decodificação, e a outra, ou a matriz de antenas, fica incumbido de capturar os sinais de RF encaminhando-as ao módulo de coleta de energia. Outra abordagem, é a utilização de múltiplas antenas na arquitetura de comutação no tempo, onde cada antena comuta periodicamente entre coleta de energia e informação, podendo assim, realizar SWIPT. Por fim, uma arquitetura interessante é combinar vários divisores de potência, onde cada um possui um coeficiente de divisão de potência distinto  $\theta_j$ , onde  $j$  é o índice do divisor de potência. Em particular, essa técnica requer a resolução de um problema de otimização para encontrar os valores adequados dos  $\theta_j$  que maximizem a coleta de energia e a decodificação de informação [12].

Neste trabalho, consideramos uma rede sem fio energizada via sinais de radiofrequência em que as estações utilizam uma antena em modo *half-duplex* de acordo com a arquitetura de comutação no tempo. As transmissões de dados e a transferência de energia são realizadas no mesmo canal de comunicação. Entretanto, as estações coletam energia de sinais transmitidos exclusivamente para fins de carregamento, portanto, que não contêm informações.

## 2.3 O Protocolo Slotted ALOHA

O protocolo Slotted ALOHA é um protocolo de controle de acesso ao meio, baseado em contenção e pertencente à categoria de protocolos de acesso *cego* (do inglês *Blind Access*), pois o mesmo não realiza a detecção da portadora do estado do canal antes de tentar uma transmissão. Basicamente, o Slotted ALOHA [17] surgiu como uma proposta de melhoria ao ALOHA puro [18]. Sendo assim, conceituaremos este último, para depois, visando o aperfeiçoamento do protocolo, apontarmos as mudanças retratadas. No protocolo ALOHA o acesso ao canal é aleatório. Logo, uma dada estação não transmite em um instante de tempo predeterminado como em sistemas que utilizam acesso múltiplo por divisão do tempo (TDMA, do inglês *Time, Division Multiple Access*). Portanto, não há garantia de que uma dada transmissão seja recebida com sucesso. A análise do protocolo ALOHA considera um sistema com população infinita em que todos os dispositivos estão a um salto dos demais. A taxa agregada de geração de pacotes segue uma distribuição de Poisson com parâmetro  $\lambda$  pacotes/s. O tempo de transmissão de um pacote dado seu tamanho em bits e a taxa de transmissão é igual a  $T$ . O canal é livre de erro e não considera efeito de captura. Dessa forma, sempre que a transmissão de um pacote não sofre interferência de outra transmissão, o pacote transmitido é recebido corretamente. Todavia, ocorre uma colisão sempre que duas ou mais transmissões se sobrepõem no tempo, e nenhum dos pacotes é recebido corretamente. Os usuários cujos pacotes sofreram colisão são chamados usuários colidentes.

A política do protocolo é simplista: um novo pacote gerado é transmitido imediatamente na esperança de que não sofra interferência de outras transmissões. Caso a transmissão seja mal sucedida, cada usuário colidente, independentemente dos demais, agenda sua retransmissão para um tempo aleatório futuro. A aleatoriedade é requerida para garantir que o mesmo conjunto de pacotes não continue a colidir indefinidamente. Observando o canal ao longo do tempo, nota-se

um processo de pontos consistindo de pontos de agendamento de transmissão. Estes incluem tanto os instantes de geração de novos pacotes quanto os instantes de retransmissão para pacotes que sofreram colisão anteriormente. Dessa forma, considerando o conjunto total de instantes de tempo de transmissão de pacotes no canal, podemos assumir que a taxa de pontos de agendamento de transmissão de pacotes é  $g$  pacotes/s e, assim, o parâmetro  $g$  refere-se à carga oferecida ao canal. Logo, como nem todos os pacotes são transmitidos com sucesso na primeira tentativa, temos que  $g > \lambda$ . A fim de facilitar a análise matemática, uma vez que a caracterização de um processo de agendamento de pontos é bastante complexa, o protocolo assume que o sistema gera pacotes de acordo com um processo de Poisson com taxa  $g$ .

Nesse âmbito, um pacote agendado para transmissão em um instante  $t$  será recebido com sucesso se nenhuma outra transmissão for agendada no intervalo  $(t - T, t + T)$ , assumindo que todos os pacotes têm mesmo comprimento e, conseqüentemente, têm duração  $T$  de transmissão. Este intervalo é chamado de período de vulnerabilidade. Assim, um pacote será transmitido com sucesso se não houver agendamentos dentro do intervalo de tamanho  $2T$ . Logo, a probabilidade de sucesso pode ser dada por

$$P_{suc} = e^{-2gT} \quad (2.1)$$

Como a taxa agregada de agendamentos de transmissão de pacotes é de  $g$  pacotes/s, dos quais apenas uma fração  $P_{suc}$  é bem sucedida, a fração de pacotes transmitidos com sucesso é  $gP_{suc}$  pacotes/s. A eficiência, ou vazão média normalizada  $S$ , será a razão da vazão obtida pela taxa máxima de transmissão de pacotes no canal, que seria  $1/T$  pacotes/s (se não houvesse erros e tivéssemos um pacote transmitido atrás do outro sem intervalos ociosos no canal). Portanto, a vazão média normalizada  $S$ , será dada por

$$S = gTe^{-2gT} = Ge^{-2G} \quad (2.2)$$

onde  $G = gT$  é definida como a carga oferecida normalizada. Por fim, a vazão  $S$  assume seu valor máximo  $1/2e = 0,18$ , em  $G = 0,5$ , conforme demonstra o gráfico da Figura 2.5.

Agora que definimos a política de funcionamento do ALOHA puro, podemos obter uma melhora na vazão do ALOHA dividindo o canal em *slots* no tempo. Assim, obtemos o protocolo Slotted ALOHA, no qual cada *slot* tem duração  $T$ , assumindo pacotes de mesmo comprimento. Este protocolo impõe uma nova política de acesso ao canal: um nó arbitrário com um pacote gerado deve aguardar o início do próximo *slot* para transmiti-lo. Dessa forma, as colisões de pacotes ocorrem a partir de transmissões que se iniciam no mesmo instante, e que ocupam o canal durante o intervalo de tempo de  $T$  segundos, ou seja, o período de vulnerabilidade é reduzido à metade, ou seja, a  $T$ . Assim, um *slot* entregará um pacote com sucesso se apenas uma transmissão for agendada no *slot* anterior.

A vazão normalizada portanto, é a fração de *slots* nos quais um único pacote é agendado para transmissão. Assim, assumindo que o conjunto total de instantes de tempo de transmissão de pacotes no canal (incluindo tanto instantes de geração de novos pacotes quanto de instantes de retransmissão) pode ser caracterizado com um processo de Poisson com taxa  $g > \lambda$ , temos que a

vazão média normalizada  $S$ , será dada por

$$S = gTe^{-gT} = Ge^{-G}. \quad (2.3)$$

Embora a expressão seja bastante similar à vazão do ALOHA puro, o slotted ALOHA possui uma vazão normalizada máxima de  $1/e \approx 0,368$ , em  $G = 1$ , ou seja, o desempenho limite é duas vezes superior. A Figura 2.5 apresenta a vazão normalizada em função da carga oferecida  $G$  para ambos os protocolos.

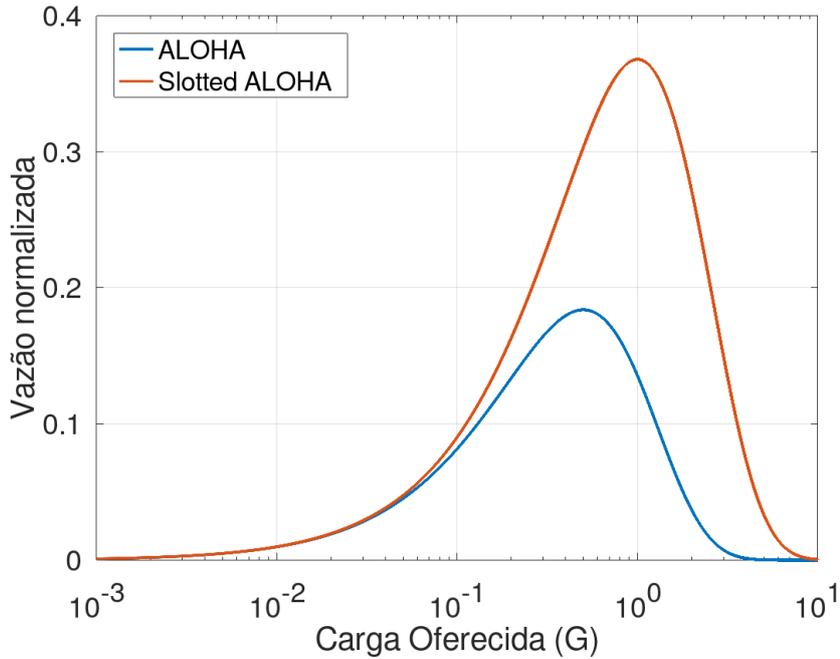


Figura 2.5: Vazão normalizada em função da carga oferecida para o ALOHA puro e Slotted ALOHA

Protocolos de acesso aleatório têm obtido maior êxito em redes que operam com transferência de energia. Vantagens como aumento do tempo de vida das estações e melhora do desempenho tem atraído a atenção da indústria e de pesquisadores. Nesse sentido, o protocolo Slotted ALOHA tem sido adotado em trabalhos relacionados à transferência de energia sem fio devido sua simplicidade e menor consumo de energia comparado aos demais protocolos de acesso aleatório como veremos na seção a seguir. Portanto, este trabalho propõe uma modificação do protocolo Slotted ALOHA para redes sem fio com recursos escassos e energizadas via sinais de radiofrequência.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

Em cenários de redes sem fio com transferência de energia para aplicações em IoT, nos quais a densidade de dispositivos é maior, faz-se necessário um protocolo de controle de acesso ao meio que viabilize tanto a troca de informação quanto de energia de forma eficiente. Apesar das eficientes técnicas de economia de energia encontradas na literatura, nenhuma pode, de fato, resolver o problema de tempo de vida limitado, e, conseqüentemente, a substituição ou recarregamento

manual da bateria. A utilização de um protocolo MAC em redes WPCN deve visar o acesso ao canal de forma eficiente e justa pelos dispositivos, garantir o carregamento energético da rede, e evitar desperdícios de energia a fim de manter a operabilidade da rede com dispositivos carregados e atuantes. Por isso, é primordial coordenar precisamente como e quando energia ou informação deve ser transmitida.

Há uma variedade de trabalhos recentes que aplicam técnicas de coleta de energia tanto com tecnologia EH quanto com WPT em redes com protocolos MAC baseados em contenção. Um protocolo para múltiplos usuários em uma WPCN é proposto por Zhang et al. [5], conhecido como coleta-depois-transmite. Os dispositivos sem fio coletam energia no canal de descida e transmitem dados no canal de subida usando a energia coletada por meio de um protocolo de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*). Kim et al. [19] propõem um protocolo MAC baseado em CSMA/CA onde um dispositivo sem fio coleta energia via sinais de RF transmitidos de forma dedicada. Entretanto, a probabilidade de acesso ao canal varia com a taxa de energia coletada pelo dispositivo. Naderi et al. [20] propõem um protocolo MAC com coleta de energia via sinais de RF em uma rede sem infraestrutura onde há transmissores dedicados à transferência de energia. Assim que uma estação atinge um limite predeterminado de nível de energia, ela solicita o carregamento energético com prioridade. Dessa forma, um ou mais transmissores de energia atendem a solicitação. Os dispositivos sem fio utilizam a energia coletada para a troca de dados entre si utilizando o protocolo CSMA/CA. Durante a transferência de energia proveniente da solicitação de uma dada estação, os demais dispositivos não decrementam o contador de *backoff* e entram em modo de coleta de energia. Lee et al [21] propõem uma rede composta de um ponto de acesso Wi-Fi, dispositivos sem fio e *Power Beacons* (PB), que são transmissores exclusivos para a transferência de energia. Como o ponto de acesso e os transmissores de energia compartilham o mesmo canal, o protocolo proposto  $W^2P$ -MAC visa a coordenação entre transferência de energia e dados baseada na informação que o AP tem dos níveis de energia de cada dispositivo, que reportam tal informação ao AP incluindo-a nos pacotes de dados. Basicamente, o AP encaminha o nível médio de energia dos dispositivos ao PB que utiliza essa informação para ativar ou inativar a si próprio, com uma dada probabilidade, a fim de transferir energia. Uma vez ativado, o PB participa da contenção segundo as diretrizes da Função de Coordenação Distribuída, baseada no protocolo CSMA/CA, selecionando um contador de *backoff* em uma janela de contenção.

Outra abordagem utilizando o padrão IEEE 802.11 é retratada por Khairy et al. [7]. Os dispositivos sem fio coletam energia das transmissões realizadas pelo ponto de acesso e pelos demais dispositivos utilizando a arquitetura de comutação no tempo. Um dado nó da rede permanece em modo ativo até realizar uma transmissão bem sucedida. Em seguida, entra em modo de dormência no qual coleta energia de todas as transmissões executadas durante sua permanência nesse estado, para em seguida retornar à atividade executando o algoritmo de backoff exponencial.

Adicionalmente aos protocolos baseados em detecção de portadora (CSMA e variantes), protocolos MAC baseados em ALOHA têm sido considerados como uma alternativa de protocolos distribuídos em redes densas habilitadas à coleta de energia via sinais de RF. Choi et al. [6] utilizam o protocolo de acesso ao meio *frame slotted ALOHA* com transferência de energia via sinais

de RF. Neste protocolo o tempo é dividido em quadros, e cada quadro é composto por um dado número de *slots*. Um ponto de acesso híbrido transfere, continuamente, energia no canal de descida e recebe informação via canal de subida simultaneamente (ou seja, utiliza dois canais de frequência separados). No início de cada quadro, o HAP transmite um sinal de *beacon* para sincronização de quadro e para informar o número de *slots* de acesso aleatório contidos no quadro, além de conter a lista de confirmações de pacotes recebidos no quadro anterior. Os dispositivos sem fio, com arquitetura de comutação no tempo e rádios *half-duplex*, são alimentados por supercapacitores. Coletam a energia transmitida pelo canal de descida e a utilizam para transmitir seus pacotes de dados. Cada dispositivo escolhe aleatoriamente um *slot* dentro do quadro para tentar uma transmissão. Uma dada estação coleta energia no canal de descida durante todos os *slots* anteriores ao envio de seu pacote de dados. Após a transmissão, a estação não coleta mais energia e aguarda o início do próximo quadro. O supercapacitor é caracterizado por um descarregamento rápido. Assim, não consegue armazenar energia por um longo intervalo de tempo. Por isso a estação não coleta energia após sua transmissão, pois o intervalo de tempo entre as transmissões pode ser longo, e o supercapacitor pode descarregar e comprometer a transmissão de seu pacote de dados seguinte. Os autores investigaram o tamanho ótimo de quadro que maximiza a vazão.

Chen et al.[22] propõem um protocolo baseado no *frame slotted ALOHA*, porém dinâmico, onde o ponto de acesso consegue estimar o número de nós que disputam o acesso ao canal em cada quadro, ajustando o número de *slots* do quadro para ser igual ao número de nós ativos. Diferentemente do *frame slotted ALOHA* com transferência de energia, este usa um modelo de coleta de energia baseado em técnicas de *Energy Harvesting*, coletando energia do ambiente de forma oportuna e instável, e não através da transferência de energia por meio de fonte dedicada e controlável. Choi et al. [23], comparam o desempenho entre o *frame slotted ALOHA* com transferência de energia e o *frame slotted ALOHA* dinâmico (o ponto de acesso adequa o tamanho de quadro baseado na contenção) com técnicas de EH. O trabalho mostra que o desempenho do dinâmico é menor devido à existência de slots vazios que não são utilizados para qualquer propósito, pois a coleta de energia é realizada separadamente por meio de técnicas de *Energy Harvesting*, e isso impacta no número de dispositivos ativos por quadro.

Outro cenário de aplicação do *frame slotted ALOHA* é proposto por Choi et al. [8], com o protocolo coleta ou acessa (do inglês, *harvest-or-access*), segundo o qual uma WPCN é composta por um HAP e vários dispositivos sem fio, todos operando em modo *half duplex*. Outra diferença em relação ao *frame slotted ALOHA* com transferência de energia anterior está no fato de se assumir que o ponto de acesso híbrido é capaz de escutar o canal, característica inerente aos protocolos da família CSMA. Dessa forma, pode identificar a ocorrência de um *slot* vazio e, diante dessa oportunidade, transferir energia no restante do *slot*. Assim, todo *slot* vazio é usado para realizar WET por parte do HAP, e todo dispositivo coleta energia enquanto não está transmitindo pacotes de dados. Dessa forma, cada *slot* é usado ou para coletar energia ou para acessar o canal.

Iqbal et al. [9] propõem um protocolo MAC, também baseado no *frame slotted ALOHA*, no qual o HAP transfere energia continuamente para os dispositivos via canal de descida durante os *slots* do quadro, e é capaz de receber, concomitantemente, pacotes de dados via canal de subida, ou seja, utiliza canais de frequência separados. Por sua vez, dispositivos alternam a função do

rádio entre transmissão de dados e coleta de energia, no modo *half-duplex*. Em sua análise, os autores assumiram filas de dados saturadas nos dispositivos, sempre havendo um pacote de dados para ser transmitido. A diferença entre o *frame slotted ALOHA* com transferência de energia proposto por Iqbal e o *frame slotted ALOHA* com transferência de energia proposto por Choi [6], reside no tempo de coleta de energia. Iqbal assume que os dispositivos são alimentados por baterias recarregáveis, enquanto Choi assume que os dispositivos são alimentados por super capacitores com descarregamento rápido. Assim, a utilização de baterias recarregáveis permite ao dispositivo coletar energia antes e após o *slot* escolhido em um quadro para transmissão de seu pacote. Além disso, seu trabalho considera a diversidade espaço-temporal, onde os nós estão distribuídos aleatoriamente em um disco e o ganho de canal é modelado como uma variável aleatória que leva em conta a disposição desses nós e os efeitos de desvanecimento em pequena e larga escala, adotando um canal com desvanecimento Rayleigh. Uma vez que o tempo de coleta de energia é variável e as transmissões são afetadas pelo ganho de canal com desvanecimento, o objetivo é avaliar o impacto da diversidade espaço-temporal no desempenho da rede, e encontrar um tamanho de quadro ótimo para um dado número de nós disputando por acesso ao canal que maximize a vazão da rede.

Redes sem fio convencionais precisam lidar com o problema onde os usuários mais afastados recebem menos energia que os mais próximos do ponto de acesso, exigindo um controle de energia cuidadoso para permitir que todos os usuários transmitam à mesma taxa de dados. Naturalmente, em WPCN's, os dispositivos mais afastados coletam menos energia dos sinais de RF e gastam muito mais para garantir a taxa de transmissão dos usuários mais próximos. A fim de equiparar a quantidade de energia coletada pelas estações, Zoran et al. [24] propõe uma WPCN baseada em Slotted ALOHA que divide cada slot de tempo em duas fases de duração fixa. A primeira é dedicada à transferência de energia pela estação base, e a segunda fase é alocada para acesso aleatório pelos usuários. Um problema de otimização é resolvido para alcançar justiça e atribuir valores ótimos para os parâmetros do sistema, tais como potência de transmissão na estação base, a duração das fases dentro do slot em cada nó, e suas probabilidades de acesso ao canal.

Os trabalhos abordados nesta seção não apresentam uma solução para o carregamento energético efetivo das estações. Muitos consideram a taxa de transmissão variável de acordo com a quantidade de energia coletada pelo dispositivo. A utilização de canais separados para transmissão de energia e a adoção de protocolos híbridos (Slotted ALOHA com detecção de portadora) indicam a carência de soluções simples e baratas. Nesse sentido, propomos uma modificação do protocolo Slotted ALOHA [25] para operar com transferência de energia em que momento e a duração do período carregamento adequados dependem dos parâmetros do sistema. De forma simples, a energia é transferida na mesma banda de frequência que os pacotes de dados são transmitidos, mas a coleta de energia não é realizada sobre os sinais que carregam informação. Além disso, nenhum dispositivo da rede realiza detecção de portadora.

A Tabela 2.1 compara os principais aspectos adotados nos trabalhos citados relacionados à energização das estações. A Tabela indica os protocolos utilizados na camada de enlace e características quanto à transferência de energia, além do modelo de fonte de transmissão adotado. A expressões *in-band* e *out-band* indicam que a transmissão de energia é realizada no mesmo canal que a transmissão de dados e em canal separado, respectivamente.

Tabela 2.1: Comparação entre os trabalhos relacionados

<b>Referência</b>	<b>Protocolo MAC</b>	<b>Transferência de Energia</b>	<b>Fonte</b>
[5]	TDMA	in-band, intermitente	HAP
[19]	CSMA/CA	in-band, intermitente	HAP
[20]	CSMA/CA	out-band, intermitente	separado
[21]	CSMA/CA	in-band, intermitente	separado
[7]	CSMA/CA	in-band, intermitente	HAP
[6]	frame Slotted ALOHA	out-band, contínua	HAP
[22]	frame Slotted ALOHA	out-band, intermitente	separado
[8]	frame Slotted ALOHA	in-band, intermitente	HAP
[9]	frame Slotted ALOHA	out-band, contínua	HAP
Proposto [25]	Slotted ALOHA	in-band, intermitente	HAP

Este capítulo apresentou o paradigma de redes sem fio energizadas via sinais de radiofrequência. Indicou as principais arquiteturas e técnicas para implementação de WPCN em cenários com aplicações em IoT. Além disso, apresentou as características do protocolo de acesso ao meio Slotted ALOHA (protocolo MAC adotado para este trabalho), e os principais trabalhos realizados na literatura sobre a aplicação de protocolos de acesso aleatório com transferência de energia.

## Capítulo 3

# Descrição e Modelagem do Sistema

O surgimento da Internet das Coisas culminou em uma crescente demanda por dispositivos sem fio com características distintas. Dentre estes, RFIDs e sensores são os que possuem as arquiteturas mais simples e com maiores restrições de recursos, como escassez de energia, transmissão em baixa potência, capacidade de armazenamento muito limitada, entre outros. No entanto, são dispositivos perfeitos para coletar informações sobre um ambiente ou sistema, e dessa forma são muito requisitados em cenários IoT. Embora RFIDs sejam bastante estudados em cenários com transferência de energia [15], pois as etiquetas precisam ser energizadas para, logo em seguida, transmitirem seus dados, este trabalho visa uma aplicação com dispositivos sensores, que possuem uma arquitetura mais complexa que um RFID, visando obter maior liberdade operacional, e não precisar responder imediatamente após a energização.

O protocolo utilizado para controlar o acesso dos dispositivos ao meio é o Slotted ALOHA. A escolha desse protocolo se dá, principalmente, pela restrição de energia imposta aos dispositivos, pois, como o mesmo não realiza escuta de canal e nem utiliza pacotes de controle, necessita de menos energia para se manter operacional, e isso implica em um menor tempo de energização dos dispositivos, que como veremos, será um parâmetro de nosso sistema. Além disso, este sistema visa aplicações cujo fenômeno observado possui uma variação lenta no tempo, dispensando, assim, a necessidade de retransmissões de pacotes e possibilitando ao dispositivo, mesmo entrando em modo de dormência entre os períodos de atividade, realizar medições em intervalos de tempo adequados para uma acurada caracterização do fenômeno.

Neste capítulo apresentaremos um protocolo de acesso ao meio, baseado no Slotted ALOHA, que permite a transferência de energia via sinais de radiofrequência com o intuito de recarregar as baterias dos nós da rede. Introduziremos, detalhadamente, os modelos analíticos para avaliar o desempenho da rede em condições ideais considerando dois modos de operação do sistema, e, também, um modelo para prever a quantidade de energia demandada pelo sistema para alimentação dos dispositivos sem fio durante um determinado período de funcionamento da rede.

### 3.1 Descrição do Sistema

Os nós que compõem a rede sem fio em análise dispõem de recursos muito limitados e dependem, exclusivamente, da transferência de energia pelo ponto de acesso híbrido para desempenhar suas funções. Os nós geram dados para serem enviados ao HAP. O buffer de cada nó tem capacidade para armazenar apenas um pacote de dados. Todos os nós executam o protocolo Slotted ALOHA, e cada pacote de dados deve ser transmitido no início do *slot* de tempo que se segue imediatamente à sua geração. Devido à restrição de energia e à natureza da aplicação, nenhuma transmissão confiável é imposta, o que significa que nem o HAP envia confirmações nem ocorrem retransmissões (isto é, cada pacote tem uma única chance de alcançar o HAP com sucesso), pois o fenômeno observado ocorre com relativa frequência e varia lentamente com o tempo. A energia transferida pelo ponto de acesso é suficiente para cobrir operações básicas (tais como sensoriamento, coleta de dados, sincronização de *slot*) e uma única tentativa de transmissão de pacote. Consequentemente, cada nó entra em modo de dormência após sua tentativa de transmissão de pacote. Os nós em modo de dormência não podem gerar pacotes, e devem esperar pelo sinal de despertar (do inglês *wake-up signal*) [26] enviado pelo HAP. Quando o sinal de despertar é enviado, todos os nós em estado de dormência acordam para, nos *slots* seguintes, receberem os pacotes de energia transmitidos pelo HAP a fim de recarregá-los completamente. Cada nó possui um módulo de coleta de energia integrado de acordo com a arquitetura de comutação no tempo, permitindo-lhe alternar a função do rádio entre transmissão e coleta de energia. O período de carregamento compreende  $C$  sucessivos *slots* de tempo usados para transmitir  $C$  pacotes de energia. Os nós não geram nem transmitem pacotes enquanto os pacotes de energia são transmitidos, ou seja, eles só podem retomar suas operações no fim do período de carregamento. Assim, a rede opera em ciclos que iniciam com o HAP transmitindo pacotes de energia e terminam com o HAP enviando o sinal de despertar. O HAP envia o valor do parâmetro  $C$  em cada sinal de despertar. Denotaremos por *ciclo de transmissão* os *slots* de tempo compreendidos entre dois períodos de carregamento sucessivos, no qual ocorre a disputa dos dispositivos pelo acesso ao canal. Logo, um ciclo de operação é formado pelo período de carregamento seguido do ciclo de transmissão.

Com o intuito de enviar o sinal de despertar, o HAP monitora o número total de nós que já tentaram transmitir um pacote (com sucesso ou não) desde o fim do último período de carregamento. Na verdade, porque a atual tecnologia de WET impõe aos nós uma maior proximidade à fonte de energia (cerca de 10 metros [8]), a rede opera em regime de alta SNR. Portanto, com precisão relativamente alta, o HAP pode estimar o número de tentativas de transmissões em um dado *slot* de tempo medindo a intensidade de potência total recebida. No capítulo 4, propomos e avaliamos um método que estima o número de transmissões simultâneas em uma colisão considerando aspectos da camada física. Se o número acumulado de tentativas de transmissão se tornar maior ou igual ao limiar  $L$ , o HAP envia um curto sinal de despertar antes do fim do *slot* de tempo no qual a detecção foi realizada (os *slots* são projetados para acomodar tais transmissões do HAP).

A Figura 3.1 ilustra como o *slot* de tempo,  $T_{slot}$ , é projetado em nosso sistema. Ele compreende o tempo de propagação do sinal  $T_{prop}$ , o tempo de transmissão de pacote  $T_{trans}$ , o tempo  $T_{proc}$  para estimar o número de tentativas de transmissões e realizar a troca do modo de operação do

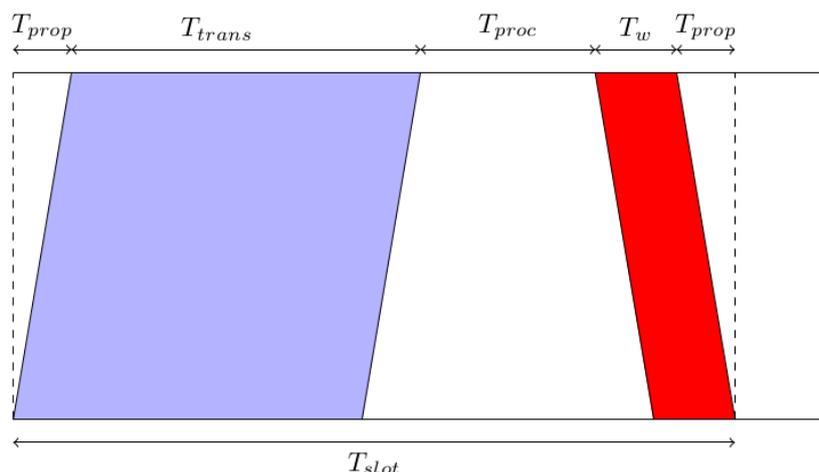


Figura 3.1: Projeto da duração de um slot para o sistema

rádio de recepção para transmissão, e o tempo  $T_w$  necessário para transmitir o sinal de despertar para os nós.

Neste trabalho definimos dois modos de operação, dependendo do comportamento dos nós cujos pacotes foram gerados no mesmo *slot* de tempo no qual o sinal de despertar é recebido: o HBC (do inglês *Hold-before-charge*) e o DBC (do inglês *Drop-before-charge*). No modo de operação HBC, os nós com um pacote gerado no mesmo *slot* de tempo em que o sinal de despertar é recebido mantêm seus pacotes armazenados até o final dos sucessivos pacotes de energia, quando eles podem retomar suas transmissões. A Figura 3.3 mostra um exemplo de operação no modo HBC com  $L = 4$  e período de carregamento com apenas um pacote de energia. O ciclo se inicia com um pacote de energia (retângulo verde) transmitido pelo HAP no primeiro *slot* da figura, no *slot* seguinte, uma seta indica que uma dada estação gerou um pacote (Pacote 1: chegada), e este pacote é transmitido logo no início do próximo *slot* (retângulo azul), seguindo a política do protocolo Slotted ALOHA. Mais adiante, podemos perceber a sobreposição de duas transmissões gerando uma colisão, e nesse mesmo *slot*, o HAP constata que o limiar de tentativas de transmissão foi atingindo, transmitindo o sinal de despertar (retângulo vermelho). Em particular, a figura ainda exemplifica o comportamento do nó que gerou um pacote durante o mesmo *slot* de tempo em que

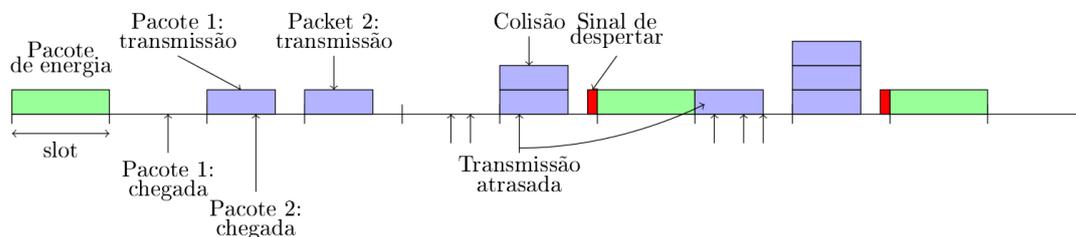


Figura 3.2: Modo de Operação HBC: pacotes gerados no mesmo slot de tempo em que ocorre o sinal de despertar têm suas transmissões atrasadas até o final do período de carregamento

o HAP envia o sinal de despertar para todos os nós. Neste caso, o nó deve aguardar pelo fim da transmissão dos  $C$  sucessivos pacotes de energia para transmitir seu pacote de dados no *slot* de

tempo imediatamente seguinte ao período de carregamento.

No modo de operação DBC, qualquer nó com um pacote gerado no mesmo *slot* de tempo em que o sinal de despertar for recebido, deve descartá-lo de seu *buffer* para iniciar um novo ciclo de transmissão com as mesmas condições que os nós descarregados. Aplicando esta política, o primeiro *slot* de tempo após o período de carregamento é sempre ocioso, já que nenhum nó terá pacotes prontos para transmissão. Somente após o final deste primeiro *slot* ocioso é que poderá haver *slots* ocupados. Nós consideramos este modo de operação porque, embora o desempenho seja pior que o HBC (há sempre uma *slot* ocioso imediatamente após o período de carregamento), ele geralmente implica em maiores períodos de transmissão de dados, resultando em menos transmissões de pacotes de energia sobre um determinado período de tempo. Isto é um fator interessante se nós queremos reduzir, por exemplo, interferência em redes vizinhas ou o consumo de potência pelo HAP enquanto alcançamos um desempenho próximo ao modo HBC. A Figura 3.3 apresenta um exemplo para este caso quando  $L = 4$  e  $C = 1$ . Novamente, o ciclo se inicia com um pacote de energia, um pacote é gerado em uma estação no *slot* seguinte, e enviado no início do *slot* subsequente. outra vez, podemos visualizar uma colisão gerada pela transmissão simultânea de duas estações, e neste mesmo *slot* a transmissão do sinal de despertar. Entretanto, a figura ainda ilustra o comportamento do nó que gerou um pacote durante o mesmo *slot* de tempo em que o HAP envia o sinal de despertar para todos os nós. E neste modo de operação, o nó deve descartar seu pacote de dados e coletar energia para iniciar o próximo ciclo de transmissão.

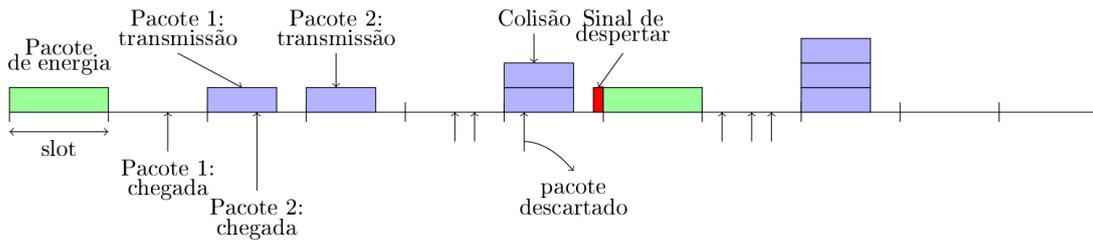


Figura 3.3: Modo de Operação DBC: pacotes gerados no mesmo slot de tempo em que ocorre o sinal de despertar têm suas transmissões atrasadas até o final do período de carregamento

O sistema proposto é formado por uma rede sem fio com dispositivos que coletam energia via sinais de radiofrequência transmitidos no canal de descida pelo HAP e transmitem pacotes de dados via canal de subida para o HAP. Devido à restrição de recursos e a fim de economizar energia, as estações competem pelo acesso ao canal de acordo com o protocolo MAC Slotted ALOHA. O HAP monitora o número de tentativas de transmissão realizadas no canal, desde o último período de carregamento, a fim de decidir o momento para o recarregamento das estações. Sempre que um dado limiar de tentativas de transmissão é alcançado, o HAP envia um sinal de despertar aos dispositivos para que estes possam coletar energia a partir do *slot* seguinte à transmissão do sinal de despertar. Assim, o sistema pode operar em dois modos: HBC e DBC. A seção a seguir trata do desenvolvimento de modelos analíticos para os dois modos de operação sem levar em conta aspectos da camada física, como um modelo de canal. Além disso, é proposto um modelo para encontrar o número médio de pacotes de energia que o HAP transmite para um dado tempo de operação da rede.

## 3.2 Modelagem Analítica

Nesta seção apresentamos os modelos matemáticos desenvolvidos para expressar a dinâmica da rede no estado de equilíbrio para ambos os modos de operação descritos anteriormente. Primeiramente, obtemos a vazão média normalizada, que indica a probabilidade de ocorrer uma transmissão com sucesso no canal, e as demais métricas do sistema, como as probabilidades de ocorrência de um *slot* vazio, de colisão, e de pacote de energia. Em seguida, modelamos a ocorrência do período de carregamento como um processo de renovação a fim de obter uma expressão para o tamanho de “ciclo médio”, e, conseqüentemente, prever a quantidade média de pacotes de energia transmitidos pelo HAP para um dado período de operação do sistema.

### 3.2.1 Fundamentos

O desenvolvimento do modelo parte de algumas premissas básicas. Para obtermos a vazão média normalizada alcançável na camada MAC sob condições de canal ideais, consideramos que erros de pacotes só ocorrem se dois ou mais pacotes forem transmitidos simultaneamente no mesmo *slot* de tempo (isto é, não ocorrem erros de propagação de canal ou efeito de captura), e cada pacote transmitido sem colisão é recebido com sucesso pelo HAP. Assumimos que o HAP conhece, antecipadamente, o número de dispositivos  $N$  da rede, e que ele é capaz de estimar com precisão o número de tentativas de transmissão de pacotes sobre o canal (com ou sem colisões). Além do mais, no estado de equilíbrio, o HAP utiliza um valor fixo  $C$  de pacotes de energia consecutivos necessários para carregar completamente os dispositivos em modo de dormência. Os *slots* têm tempo de duração unitária, e assumimos que a potência do sinal recebida neste *slot* de duração unitária é suficiente pra transferir energia aos dispositivos. Ademais, a geração de pacotes em cada nó ativo segue um processo de Poisson com parâmetro  $\lambda/N$  independentemente dos outros nós. Dessa forma, cada nó ativo gera um pacote em um dado *slot* de tempo com probabilidade  $p = 1 - e^{-\lambda/N}$  independente dos *slots* anteriores (após ser energizado).

Em nossa rede WET, um nó entra em estado de dormência após transmitir seu pacote, e deve esperar pelo próximo sinal de despertar ser enviado, com posterior período de carregamento, para gerar novo pacote novamente. Quando um ciclo se inicia, o HAP monitora o número de nós descarregados contando o número  $n$  de tentativas de transmissão de pacotes no canal. Ao detectar que  $n \geq L$  (onde  $L$  é o limiar do número de tentativas de transmissão), o HAP envia o sinal de despertar seguido por  $C$  consecutivos pacotes de energia transmitidos em  $C$  *slots* consecutivos, zerando o contador de dispositivos descarregados, e iniciando um novo ciclo. Vamos denotar  $E_k$  como o número de dispositivos descarregados na rede ao final do *slot*  $k$ , e  $V_k$  como o número de sucessivos pacotes de energia transmitidos ao final do mesmo *slot*  $k$ . Assim,  $E = (E_k, k \in \mathbb{N})$ ,  $E_k \in \{0, \dots, N\}$ , e  $V = (V_k, k \in \mathbb{N})$ ,  $V_k \in \{0, \dots, C\}$  denotam processos estocásticos. Agora, considere  $(E_k, V_k)$  como o estado da rede ao final do *slot*  $k$ , do ponto de vista do HAP. O estado da rede ao final do próximo *slot*,  $(E_{k+1}, V_{k+1})$ , depende apenas do número de dispositivos descarregados e dos consecutivos pacotes de energia transmitidos ao final do *slot* de tempo  $k$ . Portanto,

$$P\{E_{k+1}, V_{k+1} | E_k, V_k, E_{k-1}, V_{k-1}, \dots, E_1, V_1\} = P\{E_{k+1}, V_{k+1} | E_k, V_k\}, \quad (3.1)$$

e o processo estocástico de tempo-discreto de estado-finito satisfaz a propriedade de Markov. Sendo assim, do ponto de vista do HAP, o sistema pode ser modelado por uma cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC, do inglês *Discrete-Time Markov Chain*) bidimensional.

### 3.2.2 Modo de operação *Drop-Before-Charge* (DBC)

Neste modo de operação, os pacotes gerados no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é recebido devem ser descartados antes do início do próximo ciclo de transmissão. Consequentemente, nenhum pacote é agendado para transmissão no primeiro *slot* de tempo após o período de carregamento. A Figura 3.4 retrata o modelo da cadeia de Markov para o caso onde  $L = 3$  (círculo vermelho),  $N > 3$  e um número genérico  $C$  de pacotes de energia. Neste caso, tão logo o HAP detecta um número acumulado de três (ou mais) tentativas de transmissão de pacotes no canal (desde o fim do último período de carregamento), ele envia o sinal de despertar seguido por  $C$  pacotes de energia com o intuito de recarregar completamente as baterias dos dispositivos em modo de dormência. Em seguida, outro ciclo se inicia com nenhum dispositivo descarregado e zero pacotes consecutivos de energia.

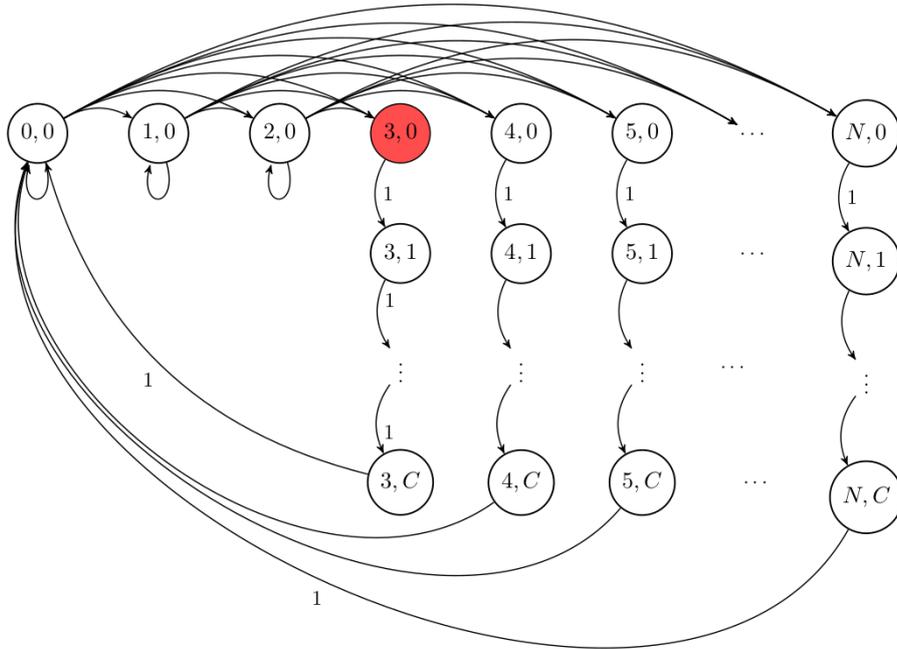


Figura 3.4: Modelo de Cadeia de Markov de tempo-discreto para o modo de operação DBC:  $L = 3$ ,  $N > 3$  e  $C$  pacotes de energia

Note que, cada conjunto de parâmetros  $\{N, C, L\}$  define um modelo de cadeia de Markov específico. A DTMC exemplifica os estados do sistema e suas transições do ponto de vista do HAP. Assim, o estado  $(3, 0)$  é o par que representa o limiar a ser atingindo com  $L = 3$  tentativas de transmissão realizadas pelas estações e 0 pacotes de energia consecutivos transmitidos pelo HAP. Enquanto o sistema se encontrar nos estados anteriores ao estado  $(3, 0)$ , significa que o ciclo de transmissão de dados está em curso, e os dispositivos seguem competindo por acesso ao canal.

Nesses estados, as transições entre os estados ocorrem por meio de transmissões bem sucedidas ou colisões. Por exemplo, supondo que o sistema se encontre no estado  $(1, 0)$  em um dado *slot*  $k$ , significa que o HAP contabilizou a transmissão de alguma estação no canal e zero pacotes de energia consecutivos transmitidos desde o último período de carregamento até o *slot* em decurso. Assim, há uma estação em estado de dormência e  $N - 1$  estações ativas. Caso não haja geração de pacotes pelas estações no decorrer do *slot*  $k$ , o *slot* seguinte,  $k + 1$ , será ocioso e o sistema permanecerá no estado  $(1, 0)$  com probabilidade  $\binom{N-1}{0}p^0(1-p)^{N-1}$ , entretanto, havendo a geração de apenas um pacote por uma estação qualquer, o sistema transita do estado  $(1, 0)$ , no *slot*  $k$ , para o estado  $(2, 0)$ , no *slot*  $k + 1$ , com probabilidade  $\binom{N-1}{1}p(1-p)^{N-2}$ . Por outro lado, havendo a geração, não de um, mas de 3 pacotes no *slot* atual, o sistema transita do estado  $(1, 0)$  para o estado  $(4, 0)$  com probabilidade  $\binom{N-1}{3}p^3(1-p)^{N-4}$ . Dessa forma, quando o sistema se encontra em um estado  $(n, 0)$  da cadeia de Markov, com  $n < 3$ , a probabilidade de transição para qualquer estado é definida como uma distribuição binomial. Genericamente, sempre que o sistema, em modo DBC, se encontrar em um estado  $(n, 0)$ , com  $n < L$ , as probabilidades de transição de estados serão definidas por distribuições binomiais.

Se o sistema se encontrar em algum estado  $(n, 0)$ , em que  $n \geq 3$ , significa que o HAP constatou que o limiar de tentativas de transmissão foi atingido ou ultrapassado, e assim, o ciclo de transmissão de dados se encerra com a transmissão do sinal de despertar pelo HAP ao final do *slot* atual. Portanto, no *slot* imediatamente seguinte, o HAP inicia o período de carregamento em que a transmissão do primeiro pacote de energia pelo HAP é representada pelo estado  $(n, 1)$ , e o último por  $(n, C)$ , com  $(n \geq 3)$ . A probabilidade de transição entre os estados que representam o período de carregamento é um, pois o número de pacotes de energia é fixo e determinado previamente de acordo com os parâmetros do sistema (o capítulo 4 apresenta um método para determinação do período de carregamento considerando aspectos da camada física). Por último, ao chegar ao fim do período de carregamento, ou seja, algum estado  $(n, C)$ , com  $n \geq 3$ , o sistema retornará ao estado  $(0, 0)$  com probabilidade 1, pois, a característica principal desse modo de operação é o descarte de pacotes gerados no *slot* imediatamente anterior à transmissão do primeiro pacote de energia pelo HAP. Logo, ao final do período de carregamento, nenhuma estação terá pacotes prontos para transmissão, e assim, o novo ciclo de transmissão se inicia com um *slot* vazio.

Além disso, é importante frisar as propriedades da DTMC apresentadas na Figura 3.4. Note, primeiramente, que a cadeia é formada por estados *comunicantes*, ou seja, dado um estado qualquer da cadeia, é possível se chegar a outro estado em um número finito de passos. Dessa forma, podemos dizer que a cadeia é formada apenas por uma classe de estados comunicantes, portanto, ela é *irredutível*. Todos os estados da cadeia são *aperiódicos*, pois uma vez em um dado estado, o retorno ao mesmo se dá em períodos irregulares. Por último, todos os estados são *recorrentes*, isto é, uma vez em um dado estado, sempre haverá uma probabilidade não nula de retorno ao mesmo.

Considerando que os nós ativos geram pacotes independentemente dos outros em um dado *slot* de tempo com probabilidade  $p$ , as entradas da matriz  $\mathbf{P}$  de probabilidade de transição a um passo

da cadeia de Markov são dadas pela equação (3.2),

$$P_{n,n+k} = \begin{cases} P\{n+i, 0 \mid n, 0\} = b(i, N-n, p), & n < L, \quad 0 \leq i \leq N-n, \\ P\{n, c+1 \mid n, c\} = 1, & L \leq n \leq N, \quad 0 \leq c \leq C-1, \\ P\{i, 0 \mid n, C\} = 1, & L \leq n \leq N, \quad 0 \leq i \leq N-n. \end{cases} \quad (3.2)$$

em que  $b(i, m, p)$  denota a função de densidade de probabilidade binomial com parâmetros  $i, m$ , e  $p$ , ou seja,

$$b(i, m, p) = \binom{m}{i} p^i (1-p)^{m-i}. \quad (3.3)$$

O vetor de probabilidades estacionárias dos estados ou distribuição de equilíbrio  $\boldsymbol{\pi} = [\pi_{0,0}, \dots, \pi_{N,C}]$  para os estados da cadeia de Markov podem ser obtidos analiticamente. E, como mencionado anteriormente, dado que a DTMC é irredutível, aperiódica e recorrente, temos que a distribuição de equilíbrio  $\boldsymbol{\pi}$  é única. Logo, podemos encontrá-la utilizando a equação  $\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi}\mathbf{P}$ , em que  $\boldsymbol{\pi}$  é o autovetor associado ao autovalor 1.

O sistema linear formado pela equação  $\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi}\mathbf{P}$  nos revela que a probabilidade estacionária de um estado qualquer da cadeia de Markov é função das probabilidades estacionárias de estados anteriores ponderadas por binomiais, definindo um caráter recursivo. Dessa forma, nós podemos encontrar a relação entre  $\pi_{n,c}$  e  $\pi_{0,0}$ , dada por:

$$\pi_{n,0} = \begin{cases} \binom{N}{n} \frac{p^n (1-p)^{N-n}}{1-(1-p)^{N-n}} \Delta(n) \pi_{0,0}, & 1 \leq n \leq L-1, \\ \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \phi(n) \pi_{0,0}, & L \leq n \leq N, \end{cases} \quad (3.4)$$

em que o termo  $\Delta(j)$  é definido recursivamente como

$$\Delta(j) = 1 + \sum_{i=1}^{j-1} \binom{j}{i} \frac{(1-p)^{N-i}}{1-(1-p)^{N-i}} \Delta(i), \quad j \geq 1 \quad (3.5)$$

e, o termo  $\phi(j)$  é definido como:

$$\phi(j) = 1 + \sum_{i=1}^{L-1} \binom{j}{i} \frac{(1-p)^{N-i}}{1-(1-p)^{N-i}} \Delta(i), \quad j \geq 1. \quad (3.6)$$

Note que, quando  $j = 1$ ,  $\Delta(1) = 1$ , pois, nesse caso, o limite inferior do somatório é maior que o limite superior, o que leva a,  $\sum_{i=1}^0 (\cdot) = 0$ . Análise semelhante ocorre para a função  $\phi$ , de modo que, quando  $L = 1$ , temos que  $\phi(j) = 1$  para  $\forall j$ .

As probabilidades dos estados estacionários que compreendem o período de carregamento são dadas por:

$$\pi_{n,0} = \pi_{n,1} = \dots = \pi_{n,C}, \quad L \leq n \leq N. \quad (3.7)$$

Um aspecto interessante de cada elemento do vetor  $\boldsymbol{\pi}$  é seu caráter recursivo, indicado nas equações (3.5) e (3.6), pelas funções  $\Delta(j)$  and  $\phi(j)$ . Para um estado arbitrário  $(n, 0)$ ,  $1 \leq n \leq L-1$ , a probabilidade estacionária  $\pi_{n,0}$  depende das probabilidades estacionárias de todos os estados anteriores  $\pi_{i,0}$ ,  $i \in \{0, \dots, n-1\}$ . No caso do estado  $(n, 0)$ ,  $L \leq n \leq N$ ,  $\pi_{n,0}$  depende de todas as

probabilidades estacionárias  $\pi_{i,0}$ ,  $i \in \{0, \dots, L-1\}$ . Baseado nas Eqs. (3.4)–(3.7) e sabendo que  $\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^C \pi_{i,j} = 1$ , finalmente obtemos a probabilidade estacionária do estado inicial,

$$\pi_{0,0} = \frac{1}{(C+2 - (C+1)(1-p)^N) + \sum_{i=1}^{L-1} \binom{N}{i} \frac{p^i(1-p)^{N-i}}{1-(1-p)^{N-i}} \Delta(i)}, \quad (3.8)$$

que é usada para calcular todas as outras probabilidades estacionárias do vetor de equilíbrio. Perceba que, infelizmente, a natureza recursiva desta solução não conduz à uma expressão fechada para as probabilidades estacionárias da DTMC. Entretanto, nós podemos utilizar tais expressões para calcular a solução da cadeia de Markov numericamente.

A probabilidade condicional de transmissão de pacote com sucesso em um *slot* de tempo, dado que  $n$  nós estão em modo de dormência desde o último período de carregamento, é dada por:

$$P\{suc|n, c\} = \begin{cases} P\{n+1, c | n, c\}, & c = 0, n < L, \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3.9)$$

Por fim, a vazão média normalizada da rede operando no modo DBC corresponde à fração de tempo que um *slot* contém uma transmissão de pacote bem sucedida, e pode ser obtida tomando-se a média sobre todos os possíveis estados, ou seja,

$$S = \frac{T_{trans}}{T_{slot}} P\{suc\} = \frac{T_{trans}}{T_{slot}} E[P\{suc, n, c\}] = \frac{T_{trans}}{T_{slot}} \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{suc|n, c\} \pi_{n,c} \quad (3.10)$$

$$= \frac{T_{trans}}{T_{slot}} \sum_{n=0}^{L-1} P\{n+1, 0 | n, 0\} \pi_{n,0}, \quad (3.11)$$

É necessário levar em consideração a razão entre o tempo de transmissão de pacote de dados e a duração do tempo de *slot*, pois  $T_{trans} < T_{slot}$ . Além disso  $S < \frac{1}{e}$ , isto é, a vazão sempre será menor que o limite teórico estabelecido pelo Slotted ALOHA clássico, pois a utilização de *slots* para transferência de energia implica na redução da vazão máxima alcançável. Podemos, ainda, extrair as demais métricas do sistema, como a probabilidade de um *slot* se encontrar vazio, conter uma colisão, ou um pacote de energia. Dessa forma, a probabilidade condicional de ocorrência de *slot* vazio, dado que  $n$  nós estão descarregados desde o último período de carregamento é

$$P\{slot\ vazio|n, c\} = \begin{cases} P\{n, 0 | n, 0\} = b(0, N-n, p), & n < L, \\ P\{0, 0 | n, C\} = 1, & n \geq L, \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Analogamente à Eq. (3.9), obtemos

$$\begin{aligned} P\{slot\ vazio\} &= E[P\{slot\ vazio, n, c\}] = \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{slot\ vazio|n, c\} \pi_{n,c} \\ &= \sum_{n=0}^{L-1} P\{n, 0 | n, 0\} \pi_{n,0} + \sum_{n=L}^N P\{0, 0 | n, C\} \pi_{n,C}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Já a probabilidade de ocorrer um *slot* contendo um pacote de energia, dado um estado qualquer da cadeia de Markov, é

$$P\{energia|n, c\} = \begin{cases} P\{n, c+1|n, c\} = 1, & n \geq L, 0 \leq c \leq C-1 \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Consequentemente,

$$\begin{aligned}
P\{\text{energia}\} &= E[P\{\text{energia}, n, c\}] = \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{\text{energia}|n, c\} \pi_{n,c} \\
&= \sum_{n=L}^N \sum_{c=0}^C P\{n, c+1 | n, c\} \pi_{n,c} = \sum_{n=L}^N \sum_{c=0}^{C-1} \pi_{n,c}.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Por sua vez, como a soma das probabilidades dos eventos em um espaço amostral tem que ser um, podemos encontrar a probabilidade de colisão usando a relação,

$$P\{\text{col}\} = 1 - P\{\text{suc}\} - P\{\text{slot vazio}\} - P\{\text{energia}\}. \tag{3.16}$$

### 3.2.3 Modo de operação *Hold-Before-Charge* (HBC)

Neste modo de operação, os pacotes gerados no mesmo *slot* de tempo onde um sinal de despertar ocorre não são descartados. De fato, os nós mantêm seus pacotes gerados armazenados em seus *buffers* até o início do próximo ciclo de transmissão de pacotes de dados. Portanto, pode ocorrer transmissão de pacotes no primeiro *slot* após o período de carregamento, resultando em colisão ou transmissão bem sucedida. A Figura 3.5 mostra o modelo da cadeia de Markov de tempo discreto para o modo de operação HBC para os seguintes parâmetros:  $L = 3$ ,  $N = 7$  e  $C = 2$ . Há muitas semelhanças entre esta cadeia de Markov e a cadeia apresentada na Figura 3.4 para o modo de operação DBC, por exemplo, o ciclo de transmissão de dados ocorre enquanto o sistema se encontra nos estados  $(n, 0)$ , com  $(n < 3)$ , e as transições partindo desses estados também são representadas por variáveis aleatórias binomiais. Também, quando o sistema se encontra em um estado  $(n, 0)$ , com  $(n \geq 3)$ , significa que a contagem de tentativas de transmissão realizadas pelo HAP atingiu ou ultrapassou o limiar  $L = 3$  estipulado, e no *slot* imediatamente seguinte, o HAP dará início à transmissão do período de carregamento, e dessa forma, o sistema transitará para um estado  $(n, 1)$ , com  $n \geq 3$ .

Por outro lado, a pequena diferença entre os modos de operação, em que o modo DBC descarta pacotes e o HBC não, gera um grande impacto na modelagem analítica do sistema. Vamos supor que o sistema se encontre no estado  $(1, 0)$  da cadeia de Markov da Figura 3.5, em um dado *slot*  $k$ , e que durante este *slot*, com probabilidade  $\binom{7-1}{3} p^3 (1-p)^{7-4}$ , três estações arbitrárias gerem pacotes de dados que serão transmitidos no *slot* seguinte  $k+1$ , o que levará o sistema ao estado  $(4, 0)$ . Assim, o *slot*  $k+1$  se inicia com três estações transmitindo simultaneamente durante o intervalo de tempo  $T_{trans}$ , uma em modo de dormência, e outras três em modo ativo que podem, inclusive, gerar pacotes antes do fim do *slot*. Após a colisão, agora no intervalo de tempo  $T_{proc}$ , ainda dentro do intervalo de tempo do *slot* atual  $k+1$ , o HAP contabiliza que o número acumulado de tentativas de transmissão no canal ultrapassou o limiar  $L = 3$ , e que o sistema se encontra no estado  $(4, 0)$ . De posse desse conhecimento, o HAP envia o sinal de despertar antes do término do *slot*  $k+1$ . Durante o *slot*  $k+1$ , em algum instante, um pacote é gerado por um dos dispositivos ativos, isso acontece com probabilidade  $\binom{3}{1} p (1-p)^2$  do ponto de vista do HAP. Ao receber o sinal de despertar, esse dispositivo não descarta seu pacote, seguindo a política do modo HBC, ele o

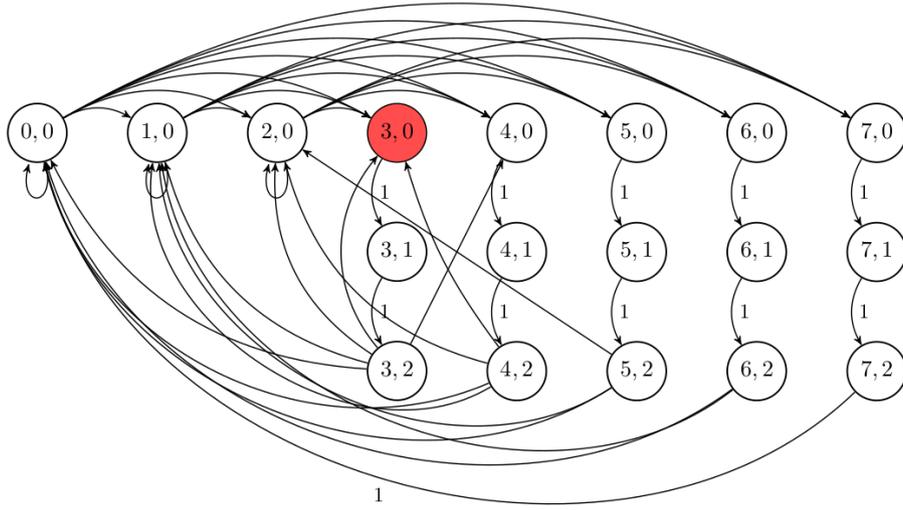


Figura 3.5: Modelo de Cadeia de Markov de tempo-discreto para o modo de operação HBC:  $L = 3$ ,  $N = 7$  e  $C = 2$  pacotes de energia

mantém armazenado em seu *buffer*. Com probabilidade 1, o *slot*  $k + 2$  se inicia com a transmissão de um pacote de energia pelo HAP, e ao final desse *slot*, o sistema se encontra no estado  $(4, 1)$ . Novamente, com probabilidade 1, o HAP envia o segundo e último pacote de energia no *slot*  $k + 3$ , e ao final do slot, o sistema se encontra no estado  $(4, 2)$ . No início do slot  $k + 4$ , a estação que manteve seu pacote de dados armazenado realiza sua transmissão, mas para o HAP esse evento ocorre com probabilidade  $\binom{3}{1}p(1-p)^2$ , e ao final do slot, o sistema se encontra no estado  $(1, 0)$ . Assim, o novo ciclo de transmissão de dados se iniciou com uma transmissão bem sucedida, mas poderia, também, ter se iniciado com uma colisão, ou até mesmo, com um *slot* ocioso. A questão é que, após o período de carregamento, o sistema pode transitar para outros estados além do  $(0, 0)$  porque pode haver nós que geraram um pacote no mesmo *slot* em que o sinal de despertar foi recebido, e essas transições, também são representadas por variáveis aleatórias binomiais.

Para o caso geral, as entradas da matriz  $\mathbf{P}$  de probabilidades de transição a um passo da cadeia de Markov são dadas por

$$P_{n,n+i} = \begin{cases} P\{n+i, 0 \mid n, 0\} = b(i, N-n, p), & n < L, & 0 \leq i \leq N-n, \\ P\{n, c+1 \mid n, c\} = 1, & L \leq n \leq N, & 0 \leq c \leq C-1, \\ P\{i, 0 \mid n, C\} = b(i, N-n, p), & L \leq n \leq N, & 0 \leq i \leq N-n. \end{cases} \quad (3.17)$$

Diferentemente ao modo de operação DBC, expressões analíticas para as probabilidades estacionárias da cadeia de Markov não podem ser descritas de forma geral como uma função dos parâmetros  $L, N$ , e  $C$  conforme Eqs. (3.4) - (3.8). Em vez disso, uma solução diferente deve ser obtida para cada conjunto de parâmetros  $\{N, L, C\}$ . Por isso, nós obtemos as probabilidades estacionárias para este modo de operação resolvendo o sistema numericamente, utilizando a matriz de probabilidade de transição a um passo  $\mathbf{P}$ . Finalmente, a probabilidade condicional de transmissão de um pacote de dados com sucesso em um slot de tempo, dado que  $n$  dispositivos estão em modo de dormência

desde o último período de carregamento, é dado por

$$P\{suc|n, c\} = \begin{cases} P\{n+1, c | n, c\}, & n < L, & c = 0, \\ P\{1, 0 | n, C\}, & L \leq n \leq N-1 \\ 0, & n \geq L, & 0 \leq c \leq C-1, \end{cases} \quad (3.18)$$

Assim, a vazão média normalizada para o modo de operação HBC é obtida tomando-se a média sobre todos os possíveis estados considerando a razão entre o tempo de transmissão de pacote de dados e a duração do tempo de *slot*, ou seja,

$$\begin{aligned} S &= \frac{T_{trans}}{T_{slot}} P\{suc\} = \frac{T_{trans}}{T_{slot}} E[P\{suc, n, c\}] = \frac{T_{trans}}{T_{slot}} \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{suc|n, c\} \pi_{n,c} \\ &= \frac{T_{trans}}{T_{slot}} \left( \sum_{n=0}^{L-1} P\{n+1, 0|n, 0\} \pi_{n,0} + \sum_{n=L}^{N-1} P\{1, 0|n, C\} \pi_{n,C} \right). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Novamente, podemos encontrar as demais métricas do sistema baseados na cadeia de Markov de tempo discreto da Figura 3.5. Assim, a probabilidade condicional de ocorrência de slot vazio, dado que  $n$  nós estão descarregados desde o último período de carregamento é dada por

$$P\{slot\ vazio|n, c\} = \begin{cases} P\{n, 0 | n, 0\} = b(0, N-n, p), & n < L, \\ P\{0, 0 | n, C\} = b(0, N-n, p), & n \geq L, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.20)$$

Analogamente à Eq. (3.19), obtemos

$$\begin{aligned} P\{slot\ vazio\} &= E[P\{slot\ vazio, n, c\}] = \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{slot\ vazio|n, c\} \pi_{n,c} \\ &= \sum_{n=0}^{L-1} P\{n, 0 | n, 0\} \pi_{n,0} + \sum_{n=L}^N P\{0, 0 | n, C\} \pi_{n,C}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Já a probabilidade de ocorrer um slot contendo um pacote de energia, dado um estado qualquer da cadeia de Markov, é dada por

$$P\{energia|n, c\} = \begin{cases} P\{n, c+1|n, c\} = 1, & n \geq L, \ 0 \leq c \leq C-1 \\ 0, & \text{Caso contrário.} \end{cases} \quad (3.22)$$

Consequentemente,

$$\begin{aligned} P\{energia\} &= E[P\{energia, n, c\}] = \sum_{n=0}^N \sum_{c=0}^C P\{energia|n, c\} \pi_{n,c} \\ &= \sum_{n=L}^N \sum_{c=0}^C P\{n, c+1 | n, c\} \pi_{n,c} = \sum_{n=L}^N \sum_{c=0}^{C-1} \pi_{n,c}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Por sua vez, como a soma das probabilidades dos eventos de um espaço amostral tem que ser um, podemos encontrar a probabilidade de colisão usando a relação

$$P\{col\} = 1 - P\{suc\} - P\{slot\ vazio\} - P\{energia\}. \quad (3.24)$$

### 3.2.4 Número médio de pacotes de energia transmitidos

Na análise de desempenho de muitos sistemas, principalmente os que utilizam protocolos MAC baseados em contenção (como os das famílias ALOHA e CSMA), é recorrente a análise baseada na caracterização do que acontece no canal durante um “ciclo típico” de operação. No nosso caso não é diferente, pois definimos que um ciclo se inicia com a transmissão do primeiro pacote de energia do período de carregamento e termina com o recebimento do sinal de despertar. Em nossa análise, convencionamos que o período de carregamento teria duração fixa, ou um número determinado  $C$  de pacotes de energia. Entretanto, o ciclo de transmissão de pacote de dados ou, simplesmente, ciclo de transmissão, denotado aqui por  $T_{pt}$ , tem uma duração aleatória, ou um número de *slots* de tempo não determinístico, onde os dispositivos disputam o acesso ao canal. Dessa forma, é interessante sabermos antecipadamente, qual seria o comprimento médio do ciclo de transmissão dados os parâmetros do sistema.

De acordo com a Teoria da Renovação [27], um processo de contagem  $W(t)$  é o número de ocorrências de um dado evento até o instante de tempo  $t$ . Definindo  $X_1$  como o intervalo de tempo até a ocorrência do primeiro evento partindo do instante  $t = 0$ ,  $X_2$  o intervalo de tempo entre a primeira e a segunda ocorrência, e  $X_k$  o intervalo de tempo entre a  $(k - 1)$ -ésima e  $k$ -ésima ocorrência. Se a sequência de variáveis aleatórias não-negativas  $\{X_1, X_2, \dots\}$  são independentes e identicamente distribuídas, então o processo de contagem  $\{W(t), t \geq 0\}$  é um *processo de renovação*. Assim, temos que a *taxa de renovação* é o número de renovações (ocorrências) pelo período de observação, descrita por  $W(t)/t$ . Utilizando a Lei Forte dos Grandes Números, é possível mostrar que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{W(t)}{t} \rightarrow \frac{1}{E[X]} \quad (3.25)$$

Em nosso contexto, definimos  $T_{ciclo} = C + T_{pt}$  como a duração de um ciclo em nosso sistema. Em seguida, definimos o evento *início de um ciclo* como o início de um *slot* de tempo no qual o HAP inicia a transmissão do primeiro pacote de energia. Dessa forma, o tempo até ocorrer o primeiro evento tem uma dada distribuição de probabilidade  $F$ , e o intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo evento tem, independentemente, a mesma distribuição  $F$ , e assim por diante. Então, quando um ciclo se inicia com a transmissão de um pacote de energia, nós podemos afirmar que houve uma renovação, ou seja, podemos tratar a ocorrência desses eventos como um processo de renovação, em que os intervalos tempos entre renovações podem ser representados pela variável aleatória  $T_{ciclo}$ . A Figura 3.6 ilustra o processo de renovação para o nosso sistema.

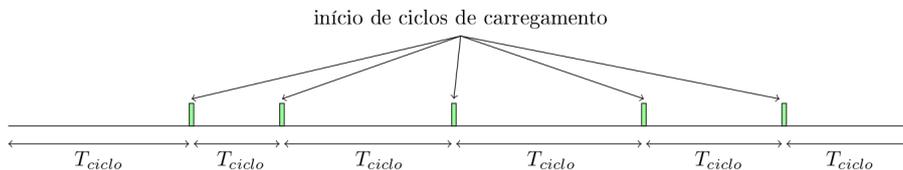


Figura 3.6: Processo de renovação

Assim, considerando  $W(t)$  como nosso processo de contagem, podemos reescrever a equação (3.25) da seguinte forma:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{W(t)}{t} \rightarrow \frac{1}{E[T_{ciclo}]} \quad (3.26)$$

Desse modo, temos que a *taxa de renovação* em nosso sistema, quando  $t \rightarrow \infty$ , nada mais é do que a probabilidade de que o evento ocorra, ou seja, é a probabilidade de nosso sistema se encontrar no início do primeiro *slot* do período de carregamento, ou melhor, em algum dos estados  $\{(L, 1), (L + 1, 1), \dots, (N, 1)\}$ . Portanto, temos que a taxa de renovação tende à soma das probabilidades dos estados estacionários ( $n \geq L, 1$ ). Entretanto, pela Eq. (3.7), temos que  $\pi_{n,0} = \pi_{n,1}$  para todo  $L \leq n \leq N$ . Logo

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{W(t)}{t} = \sum_{n=L}^N \pi_{n,0} = \pi_{L,0} + \pi_{L+1,0} + \dots + \pi_{N,0} \quad (3.27)$$

e, conseqüentemente,

$$E[T_{ciclo}] = \frac{1}{\sum_{n=L}^N \pi_{n,0}} \quad e \quad E[T_{pt}] = \frac{1}{\sum_{n=L}^N \pi_{n,0}} - C \quad (3.28)$$

Dessa forma, conhecendo a distribuição estacionária dos estados da cadeia de Markov, a Eq. (3.28) nos permite determinar o tamanho médio de ciclo e o tamanho médio de ciclo de transmissão para ambos os modos de operação. Em particular, para o modo de operação DBC, podemos ir um pouco mais além, e expressar tais resultados substituindo na Eq. (3.28) a expressão apresentada na Eq. (3.4). Logo, o tamanho médio de ciclo, para o modo DBC, pode ser dado por

$$E[T_{ciclo}] = \frac{1}{\sum_{n=L}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \phi(n) \pi_{0,0}}, \quad (3.29)$$

e o tamanho médio do ciclo de transmissão de dados, para o modo DBC, pode ser dado por

$$E[T_{pt}] = \frac{1}{\sum_{n=L}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \phi(n) \pi_{0,0}} - C. \quad (3.30)$$

De posse de tais expressões, para ambos os modos de operação, é possível encontrar o número médio de pacotes de energia  $N_C$ , encaminhados pelo HAP durante um determinado período  $T$  de funcionamento da rede, em que  $T$  é um múltiplo de  $T_{slot}$ , a partir da seguinte expressão:

$$N_C = \frac{T}{E[T_{ciclo}]} C. \quad (3.31)$$

A Eq. (3.31) nos indica o número médio de pacotes de energia transmitidos pelo HAP durante um determinado período de funcionamento, para ambos os modos de operação: DBC e HBC. Esse parâmetro informa a quantidade média total de energia demandada ao HAP durante o período de funcionamento  $T$  com a finalidade de manter a rede sustentável. Por outro lado, como o tempo é dividido em *slots*, podemos extrair da equação qual o percentual de ocupação do canal dedicado apenas à transmissão de energia. Com isso, o parâmetro  $N_C$  ajuda a definir qual o melhor cenário a ser implementado, considerando o tamanho da rede, a duração do período de carregamento, o limiar de tentativas de transmissão, e o modo de operação.

# Capítulo 4

## Impacto da Camada Física

### 4.1 Introdução

O Capítulo 3 apresentou a modelagem do sistema desprezando os efeitos do canal de comunicação sobre os sinais transmitidos com o intuito de obter as condições para a máxima vazão média normalizada alcançável. Entretanto, em aplicações reais, o canal de rádio impõe limitações para o desempenho de redes sem fio. O fato é que, em um cenário real, um sinal de RF transmitido em um canal sem fio sofre efeitos físicos, tais como difração, reflexão, absorção, refração e dispersão, que ocasionam a perda de intensidade do sinal, e conseqüentemente, uma baixa relação sinal ruído, acarretando prejuízos à comunicação.

Um modelo de propagação de canal tenta caracterizar os efeitos que perturbam o sinal de comunicação considerando aspectos do ambiente de propagação. Por exemplo, sistemas que operam em áreas urbanas com alta densidade de construções de grande porte, onde não existe linha de visada entre o transmissor e receptor, sofrem perda acentuada por difração. Os sinais trafegam por diferentes caminhos de tamanhos variáveis devido às múltiplas reflexões impostas pela alta concentração de obstáculos. A interação desses sinais causa uma distorção de caminhos múltiplos no receptor, e a intensidade dos sinais diminui à medida que a distância entre transmissor e receptor aumenta. Os modelos de propagação que visam prever a intensidade média do sinal recebido para uma distância arbitrária do transmissor são chamados de modelos de desvanecimento em larga escala. Já os modelos de propagação que caracterizam as mudanças rápidas na intensidade do sinal em uma pequena distância ou intervalo de tempo são chamados de modelos de desvanecimento em pequena escala.

Neste capítulo apresentamos um modelo de propagação de canal que caracteriza o ambiente de operação da nossa rede WPCN. A consideração do modelo de propagação de canal afeta as transmissões realizadas no canal de subida e no canal de descida. Sendo assim, com os efeitos da propagação no canal de subida, a estimação do HAP sobre o número de transmissões simultâneas em um dado *slot* com colisão precisa ser tratada. Nesse sentido, desenvolvemos método baseado em estimação de máxima verossimilhança considerando a topologia da rede. Da mesma forma, com os efeitos da propagação no canal de descida, o período de carregamento das estações via transferência

de energia pelo HAP precisa ser definido a fim de garantir a sustentabilidade energética da rede. Assim, propomos uma formulação matemática para encontrar o número de pacotes de energia que deve compor o período de carregamento adequado para garantir o recarregamento energético das estações com alta probabilidade.

## 4.2 Fundamentos

Até agora, desenvolvemos nossa análise em um cenário com condições ideais, sem estruturar os aspectos necessários para a realização da transferência de energia e tampouco para a estimação de transmissões simultâneas, ambas realizadas pelo HAP. Contemplar tais aspectos suscita a necessidade de adicionar ao modelo questões da camada física a fim de caracterizar a perda de intensidade do sinal com a distância (desvanecimento em larga escala), e mudanças rápidas na intensidade do sinal em uma pequena distância ou intervalo de tempo (desvanecimento em pequena escala). Nesse âmbito, é necessário considerar um modelo de propagação que represente os aspectos citados, para, em seguida, verificar qual o impacto da inclusão dos efeitos de canal no desempenho do sistema. Assim, consideramos que a potência recebida pela estação  $i$  quando a estação  $k$  transmite, pode ser dada por [28]

$$P_{RX}^i = P_{TX}^k G_t G_r |h|^2 \left( \frac{c}{4\pi f d_0} \right)^2 \left( \frac{d_0}{d_{i,k}} \right)^\alpha, d_{i,k} > d_0 \quad (4.1)$$

em que a potência de transmissão é  $P_{TX}^k = P_{TX}^H$  se o HAP está transmitindo no canal de descida, ou  $P_{TX}^k = P_{TX}^{no}$  se um nó está transmitindo no canal de subida,  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente,  $|h|^2 \sim Exp(1)$  representa o coeficiente de potência para um canal com desvanecimento Rayleigh,  $c$  a velocidade da luz,  $f$  a frequência de operação,  $d_{i,k}$  a distância entre os dispositivos  $i$  e  $k$  (neste trabalho essa distância vai se referir, sempre, à distância de uma estação ao HAP, assim,  $i = H$  ou  $k = H$ ),  $d_0$  a distância de referência para a qual a potência recebida é constante quando  $d_{i,k} < d_0$ , e  $\alpha$  é o coeficiente de perda de percurso. Embora as estações encontrem-se a poucos metros do HAP, o ambiente em estudo leva em consideração um ambiente sem linha de visada direta, em um cenário com efeitos de canal severos.

Os efeitos de canal atuam tanto nas transmissões de pacotes de energia quanto de dados, e, assim, afetam a coleta de energia e a estimação de transmissões simultâneas respectivamente. Primeiramente, precisamos definir qual o período de carregamento adequado para garantir a sustentabilidade energética da rede, isto é, qual o número  $C$  de pacotes de energia que devem ser transmitidos consecutivamente pelo HAP a fim de garantir o carregamento dos dispositivos com alta probabilidade considerando o modelo de canal da Eq. (4.1). De acordo com o modelo de propagação, quanto maior a distância entre transmissor e receptor, maior a atenuação do sinal, ou seja, menor a potência recebida, e isso prejudica os usuários mais afastados do transmissor. Dessa forma, encontrando um período de carregamento adequado que garanta a sustentabilidade energética do dispositivo mais afastado do HAP, com alta probabilidade, podemos garantir o carregamento dos dispositivos mais próximos.

A segunda problemática decorre do fato de que o HAP precisa atualizar o número de dispositivos que tentaram uma transmissão no canal a cada *slot* desde o último período de carregamento,

para, assim, poder decidir se já é o momento de iniciar a transmissão de um novo período de carregamento. O HAP detecta *slot* ocioso se a energia é menor do que um certo valor de limiar. Como os dispositivos estão relativamente próximos, e a potência é relativamente alta, os *slots* ociosos são detectados como tal com probabilidade 1. Assume-se que, se um único dispositivo transmite em dado *slot*, seu pacote é recebido com sucesso com probabilidade 1. Como não há efeito de captura, os sinais de dois ou mais nós transmitindo simultaneamente não serão decodificados. Portanto, o HAP necessita de um método que o auxilie a decidir o número de transmissões simultâneas (estações colidentes) em um dado *slot*, dada a potência recebida e o número de estações que já transmitiram no ciclo de operação em questão (ou seja, o estado da cadeia de Markov) sempre que o número de transmissões simultâneas é igual ou maior que 2. Para aplicação deste método, assumimos que o HAP conhece a localização de todos os dispositivos (e, portanto, sua distância a cada um deles). Logo, definimos por  $D = [d_1 \dots d_N]$  o vetor de distâncias associado às  $N$  estações. Note, ainda, que o número de estações colidentes é um elemento pertencente ao grupo  $\mathcal{A} = \{2, 3, \dots, N\}$ . Nesse contexto, o modelo de propagação vai atuar na intensidade da potência recebida pelo HAP, e este vai se utilizar dessas informações para estimar o número acumulado de tentativas de transmissão através do método de estimação por máxima verossimilhança, com o intuito de decidir se o número de dispositivos descarregados atingiu o valor de limiar  $L$ .

Diante do exposto, percebemos que a inclusão dos aspectos da camada física, representados pelo modelo de propagação considerando a atenuação do sinal com a distância e os efeitos de múltiplos percursos (desvanecimento em larga e pequena escala, respectivamente), influenciam na duração do período de carregamento e na estimação de transmissões simultâneas, e, conseqüentemente, no desempenho do sistema. Pois, um cenário com um longo período de carregamento implica em um decréscimo na vazão, e a aleatoriedade da intensidade de potência recebida pode conduzir o HAP à estimativas incorretas. As seções a seguir apresentam um método para encontrar o período de carregamento adequado considerando o dispositivo mais afastado do HAP, e métodos para estimação do número de transmissões simultâneas em um *slot* considerando as topologias aleatória, e em anel, respectivamente.

### 4.3 Período de carregamento adequado

O objetivo desta seção é determinar o período de carregamento adequado ao dispositivo mais afastado do HAP, designado por  $u$ , que garanta sua sustentabilidade energética com alta probabilidade. Uma vez assegurado o recarregamento do dispositivo  $u$ , os dispositivos mais próximos também serão sustentáveis energeticamente. A Figura 4.1 ilustra o carregamento dos dispositivos  $u$  e  $i$  com  $d_{i,H} < d_{u,H}$  durante um período de carregamento arbitrário. Devido à degradação da amplitude do sinal, que sofre os efeitos de canal, o dispositivo mais afastado tende a coletar menos energia, enquanto que o mais próximo consegue recarregar completamente sua bateria antes do término do período de carregamento. Partimos da premissa de que um dispositivo é sustentável energeticamente quando ele consegue coletar energia suficiente dos  $C$  pacotes de energia consecutivos para operar em modo ativo no ciclo de transmissão seguinte com alta probabilidade. Dessa forma, definimos  $E_{pac}$  como a energia necessária para um dispositivo gerar um pacote de dados,

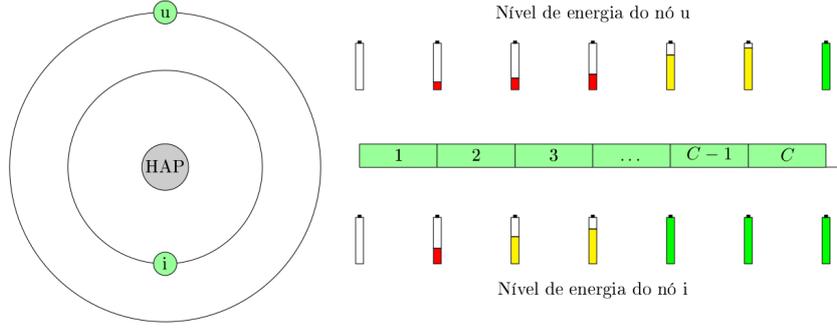


Figura 4.1: Representação do nível de energia durante o período de carregamento ao final da transmissão de cada pacote de energia para dois dispositivos  $u$  e  $i$  com  $d_{i,H} < d_{u,H}$ .

realizar uma tentativa de transmissão, e, logo em seguida, manter-se em modo de dormência até o recarregamento de sua bateria. Além disso, definimos  $E_T$  como uma variável aleatória que representa a energia total coletada pelo dispositivo mais afastado após os  $C$  pacotes de energia consecutivos. Assim, dado um período de carregamento qualquer, a probabilidade da energia total coletada ser maior do que a quantidade de energia constante, representada por  $E_{pac}$ , tem que ser maior que um dado limiar  $\zeta$ . Quanto maior for o limiar de probabilidade a ser atingindo, maior será a probabilidade de carregamento da estação  $u$ . Logo,

$$P(E_T > E_{pac}) \geq \zeta. \quad (4.2)$$

A escolha do parâmetro  $\zeta$  é uma questão de projeto que, a depender do cenário proposto, pode ser muito próximo de 1. A constante  $E_{pac}$  depende de outros parâmetros previamente estabelecidos, como potência de transmissão do dispositivo, tamanho de pacote de dados, e tempo de duração de *slot*.

O cerne do problema recai sobre a variável aleatória  $E_T$ . Assim, precisamos saber qual a distribuição de probabilidade que rege a coleta total de energia pelo dispositivo  $u$  em um período de carregamento. Nesta seção, como estamos tratando das transmissões no canal de descida para fins de recarregamento, podemos definir  $P_{TX}^k = P_{TX}^H$  como sendo a potência de transmissão do HAP,  $P_{RX}^i = P_{RX}^u$  a potência recebida por  $u$ , e  $d_{u,H} = d_u$  a distância do dispositivo mais afastado. Em seguida, definimos  $X$  como a quantidade de energia que o dispositivo  $u$  coleta após a transmissão de um pacote de energia, ou seja,

$$X = \eta P_{RX}^u T_{slot}. \quad (4.3)$$

em que,  $\eta$  é a eficiência da coleta de energia pelo circuito coletor do dispositivo. uma vez que a energia armazenada é menor que a energia recebida devido às perdas no processo de conversão. Portanto,  $0 \leq \eta \leq 1$ . Assim, a energia média  $\Omega$  armazenada por  $u$ , em um *slot* de carregamento, será dada por

$$\Omega = E[X] = \eta P_{TX}^H G_t G_r \left( \frac{c}{4\pi f d_0} \right)^2 \left( \frac{d_0}{d_u} \right)^\alpha T_{slot} \quad (4.4)$$

Note na Eq. (4.1) que a potência recebida é caracterizada por uma variável aleatória exponencial, pois  $|h|^2 \sim \text{Exp}(1)$ . Portanto,  $X \sim \text{Exp}(\frac{1}{\Omega})$ , ou seja,  $X$  é uma variável aleatória exponencial. A

dedução segue do fato de que uma variável aleatória exponencial de parâmetro  $z$ , multiplicada por uma constante  $K$ , por exemplo, gera outra variável aleatória exponencial de parâmetro  $\frac{z}{K}$ .

Durante o período de carregamento, formado por  $C$  sucessivos *slots* reservados ao HAP para transmissão de energia, a quantidade de energia recebida em um dado *slot* independe da quantidade da energia recebida em *slots* anteriores. Assumindo que  $X_i$  é a quantidade de energia recebida por  $u$  no *slot* de carregamento  $i$ , com  $i \in \{1, 2, \dots, C\}$ , a quantidade de energia total recebida após  $C$  *slots* de carregamento pode ser dada pela soma das quantidades recebidas em cada *slot*. Assim:

$$E_T = X_1 + X_2 + \dots + X_C. \quad (4.5)$$

Como  $X_i$  são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, ou seja,  $X_i \sim \text{Exp}(\frac{1}{\Omega})$ ,  $\forall i \in \{1, \dots, C\}$ , temos que a soma na Eq. (4.5) resulta em uma variável aleatória com distribuição Gama, ou seja,  $E_T \sim \text{Gama}(C, \frac{1}{\Omega})$ , com função densidade de probabilidade dada por

$$f_{E_T}(x) = \frac{x^{C-1} e^{-\frac{x}{\Omega}}}{\Omega^C \Gamma(C)}, \quad (4.6)$$

em que  $\Gamma(C) = (C - 1)!$ . Sabendo a distribuição de probabilidade de  $E_T$ , temos que

$$P(E_T > E_{pac}) = 1 - \int_0^{E_{pac}} \frac{x^{C-1} e^{-\frac{x}{\Omega}}}{\Omega^C \Gamma(C)} dx = \sum_{k=0}^{C-1} \frac{(\frac{E_{pac}}{\Omega})^k e^{-\frac{E_{pac}}{\Omega}}}{k!}, \quad (4.7)$$

e, alternativamente, a probabilidade da energia coletada em um período de carregamento ser maior do que a quantidade de energia  $E_{pac}$  pode ser obtida por meio de uma distribuição de Poisson com parâmetro  $(\frac{E_{pac}}{\Omega})$ . Portanto, podemos reescrever a Eq. (4.2) da seguinte forma,

$$P(E_T > E_{pac}) = \sum_{k=0}^{C-1} \frac{(\frac{E_{pac}}{\Omega})^k e^{-\frac{E_{pac}}{\Omega}}}{k!} \geq \zeta. \quad (4.8)$$

Baseado no modelo de canal proposto, que contempla os efeitos de propagação em larga e pequena escala, a Eq. (4.8) permite encontrar, previamente, o número de  $C$  de pacotes de energia que deve compor o período de carregamento a fim de garantir a sustentabilidade energética do dispositivo mais afastado do HAP com uma probabilidade maior ou igual ao limiar  $\zeta$ . Evidentemente, o HAP precisa ser configurado com informações referentes à distância  $d_u$ , à constante energética  $E_{pac}$ , ao canal sem linha de visada (desvanecimento Rayleigh) e ao fator de atenuação com a distância  $\alpha$ .

## 4.4 Estimação do Número de Transmissões Simultâneas: Topologia Aleatória

A grande maioria das aplicações não impõe restrições quanto à localização dos dispositivos conectados à rede e, dessa forma, os nós podem estar espalhados aleatoriamente sobre a área de cobertura do ponto de acesso. Neste caso geral, assumimos que o HAP conhece a localização de cada dispositivo, e portanto, sua distância. A única restrição imposta neste caso, é que duas

estações quaisquer não ocupem a mesma posição dentro da área de cobertura do HAP. Portanto, a distância de uma dada estação ao HAP é única. A elaboração do método de estimação do número de transmissões simultâneas decorre da análise dos eventos que ocorrem exclusivamente no canal de subida, isto é, das transmissões de pacotes de dados das estações para o HAP. Mais especificamente, das colisões geradas pelas transmissões simultâneas de duas ou mais estações no mesmo *slot*. A Figura 4.2 ilustra um *slot* arbitrário com colisão em uma rede com topologia aleatória, nela podemos verificar os dispositivos que transmitem no *slot* atual, bem como algumas estações em modo de dormência e outras em modo ativo que podem vir a gerar pacotes. Dessa forma, seguindo o modelo de propagação da Eq. (4.1), e assumindo que todas estações possuem a mesma configuração, temos que  $P_{TX}^k = P_{TX}^{no}$  é a potência de transmissão de uma estação que se encontra a uma distância  $d_{H,k} = d_k$  do HAP.

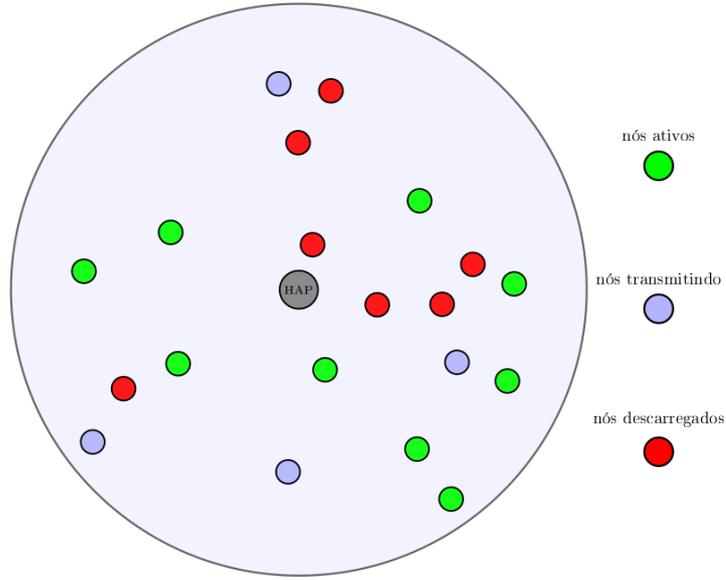


Figura 4.2: Representação de uma colisão durante um slot considerando a Topologia Aleatória

Assim, apresentamos nesta seção um método que auxilia o HAP a decidir qual o número  $m$  de transmissões simultâneas e seu respectivo vetor de distâncias  $\underline{d} = [d_1 \dots d_m]$  em um slot com colisão, dada a potência recebida  $y$ , e o número  $n$  de estações que já transmitiram no ciclo de operação atual. Encontrar o número de transmissões simultâneas mais provável de ocorrer durante uma colisão implica em conhecer a densidade de probabilidade conjunta das  $m$  estações que transmitem simultaneamente e o vetor de distâncias  $\underline{d}$  associado às estações, condicionada à potência recebida  $y$  e ao número acumulado de tentativas de transmissão  $n$ , ou seja, a função densidade de probabilidade conjunta condicional  $f(m, \underline{d} = [d_1 \dots d_m] | y, n)$ . Nesse sentido, aplicando o Teorema de Bayes, obtemos

$$f(m, \underline{d} | y, n) = \frac{f(y, n | m, \underline{d}) f(m, \underline{d})}{f(y, n)}. \quad (4.9)$$

O passo seguinte consiste em aplicar a seguinte propriedade às densidades  $f(y, n | m, \underline{d})$  e  $f(y, n)$ ,

$$P(W, V | Z) = P(W | V, Z) P(V | Z), \quad (4.10)$$

em que  $W, V$ , e  $Z$  são variáveis aleatórias genéricas. Logo,

$$\frac{f(y, n|m, \underline{d})f(m, \underline{d})}{f(y, n)} = \frac{f(y|n, m, \underline{d})f(n|m, \underline{d})f(m, \underline{d})}{f(y|n)f(n)}. \quad (4.11)$$

Por fim, aplicando o Teorema de Bayes à densidade  $f(n|m, \underline{d})$ , encontramos

$$f(m, \underline{d}|y, n) = \frac{f(y|n, m, \underline{d})f(m, \underline{d}|n)}{f(y|n)}. \quad (4.12)$$

Note que a densidade  $f(y|n)$ , no denominador da Eq. (4.12), será comum a todos os casos que serão investigados e, portanto, pode ser desconsiderada no cálculo de estimação realizado pelo HAP durante o tempo de processamento  $T_{proc}$ , dentro de um *slot* com colisão, pois a potência recebida e o estado da cadeia de Markov são conhecidos. Portanto, podemos afirmar que a escolha do número de transmissões simultâneas mais adequado é aquele que maximiza o numerador da Eq. (4.12). Assim, utilizando o método de estimação por máxima verossimilhança, temos que

$$(\hat{m}, \hat{\underline{d}}) = \arg \max_{m, \underline{d}} f(m, \underline{d}|y, n) \propto \arg \max_{m, \underline{d}} f(y|n, m, \underline{d})f(m, \underline{d}|n). \quad (4.13)$$

Precisamos ressaltar que o conjunto de valores que  $m$  pode assumir em cada *slot* com colisão varia com o tempo, pois depende diretamente do estado da cadeia de Markov no qual o sistema se encontra. Dessa forma, definimos  $\mathcal{M} = \{2, \dots, N - n\}$  como o conjunto de valores possíveis para  $m$  em um dado *slot* em que  $n$  estações encontram-se em modo de dormência, assim,  $\mathcal{M} \subset \mathcal{A}$ . Sendo assim, o método tradicional utilizado para encontrar o argumento que maximiza uma dada função, que consiste em descobrir o argumento cuja derivada da função é zero, não se revela uma solução promissora no contexto de nossa análise. A aplicação desse método na Eq. (4.13) nos retornará o número  $m$  e o vetor de distâncias  $\underline{d}$  que maximizam a função densidade de probabilidade entre todos os valores possíveis, e não com relação ao espaço amostral definido. Isto porque, em nossa aplicação  $m \in \mathcal{M}$  e  $\underline{d} \subset \mathcal{D}$ . Dessa forma, descobrir o estimador  $\hat{m}$  implica, também, encontrar o vetor de distâncias associado às  $m$  estações, e verificar qual o par  $(m, \underline{d})$  que maximiza a função densidade de probabilidade pertencente ao espaço amostral  $(\mathcal{M}, \mathcal{D})$ . Assim, definimos uma classe de transmissões simultâneas (ou classe de colisão) como o conjunto de todas as combinações de estações  $m$ -a- $m$  possíveis que podem transmitir simultaneamente em um dado *slot* com colisão. Por exemplo, em um cenário de rede com  $N$  estações, a classe com  $m = 2$  transmissões simultâneas é formada por todas as combinações de dispositivos, dois a dois, que se encontravam em modo ativo antes de uma dada colisão. Sendo  $n$  o número acumulado de tentativas de transmissão antes da colisão no ciclo de operação em questão, a classe é formada por  $\binom{N-n}{2}$  elementos.

Perceba que, uma vez que o HAP conheça as densidades  $f(y|n, m, \underline{d})$  e  $f(m, \underline{d}|n)$ , o processo para encontrar a melhor estimativa do número de transmissões colidentes consiste em percorrer todas as classes de transmissões simultâneas possíveis e verificar, dentre todas, qual o par  $(m, \underline{d})$  que retorna o valor máximo para  $f(m, \underline{d}|y, n)$ . Após estimar quantas e quais são as estações colidentes, o HAP incrementa em  $\hat{m}$  unidades seu contador de tentativas de transmissão, e retira da lista de dispositivos ativos as estações verificadas. Portanto, em um *slot* qualquer com colisão, o HAP realiza  $2^{N-n} - (N - n) - 1$  verificações para encontrar sua melhor estimativa. Estabelecido o

procedimento para encontrar  $\hat{m}$ , devemos descobrir quais são as funções densidade de probabilidade  $f(y|n, m, \underline{d})$  e  $f(m, \underline{d}|n)$ .

Prosseguindo, a FDP  $f(y|n, m, \underline{d})$  representa a função densidade de probabilidade de o HAP receber um sinal com intensidade de potência  $y$ , dado o número de estações colidentes  $m$ , o vetor de distâncias  $\underline{d}$ , e o número acumulado de transmissões  $n$ . O fato é que, como estamos tratando de colisão, precisamos ressaltar que cada dispositivo transmite independentemente dos demais, e cada transmissão segue o modelo de propagação da Eq. (4.1). Assim, a potência recebida pelo HAP é a soma das potências das  $m$  transmissões simultâneas no *slot* em observação. Entretanto, a partir do modelo de propagação proposto, vimos na seção anterior que a potência recebida por um dispositivo qualquer ou pelo HAP, oriunda de uma transmissão isolada, pode ser representada por um variável aleatória exponencial. Então, denotamos por  $U_k$  a potência recebida pelo HAP quando uma dada estação  $k$  transmite, e  $\Phi_k$  a potência média recebida pelo HAP relativa às transmissões realizadas pela estação  $k$ . De maneira similar à seção anterior, com a diferença de que agora estamos analisando as transmissões sobre o canal de subida, podemos afirmar que  $U_k \sim \text{Exp}(\frac{1}{\Phi_k})$ . Com o intuito de evitar conflitos de notação, denotamos  $Y$  como a variável aleatória que representa a intensidade de potência agregada recebida pelo HAP em um *slot* com colisão, e  $y$  representa um valor específico de intensidade de potência agregada detectado na antena receptora do HAP em um *slot* específico. Assim, podemos representar a variável aleatória  $Y$  como soma das  $m$  intensidades de potência recebidas pelo HAP, procedentes das  $m$  transmissões simultâneas independentes no canal de subida, portanto

$$Y = U_1 + U_2 + \dots + U_m. \quad (4.14)$$

Cabe ressaltar que as variáveis aleatórias  $\{U_1, \dots, U_k\}$  são exponenciais independentes, mas possuem parâmetros distintos devido às diferentes distâncias associadas aos dispositivos. Dessa forma, dado um número de transmissões simultâneas  $m$ , seu vetor de distâncias  $\underline{d}$ , e número acumulado de transmissões  $n$  estimado pelo HAP, temos que  $Y \sim \text{Hipoexponencial}(\underline{\mu})$ , em que  $\underline{\mu}$  é o vetor de parâmetros  $\{\mu_1, \dots, \mu_m\}$  relacionado às variáveis aleatórias exponenciais e  $\mu_k = \frac{1}{\Phi_k}$ , com  $k \in \{1, \dots, m\}$ . Logo,

$$f(y|\underline{d}, m, n) = \sum_{i=1}^m \mu_i e^{-\mu_i y} \left( \prod_{j=1, j \neq i}^m \frac{\mu_j}{\mu_j - \mu_i} \right). \quad (4.15)$$

Do ponto de vista operacional do HAP, a função densidade de probabilidade  $f(m, \underline{d}|n)$  representa a escolha do par  $(m, \underline{d})$  baseada apenas no número acumulado de transmissões  $n$  estimado pelo HAP. Logo, a função densidade de probabilidade conjunta condicional pode ser dada por

$$f(m, \underline{d}|n) = \begin{cases} p^m (1-p)^{N-n-m}, & n < L, \quad 0 \leq m \leq N-n, \\ 0, & n \geq L. \end{cases} \quad (4.16)$$

Mais um vez, devemos lembrar que o HAP escolhe um número inteiro específico para  $m$  e um vetor  $\underline{d}$ , de tamanho  $m$ , também específico, logo, não há necessidade de usar o coeficiente binomial na Eq. (4.16). Portanto, temos que

$$(\hat{m}, \hat{\underline{d}}) = \arg \max_{m, \underline{d}} \left[ p^m (1-p)^{N-n-m} \left( \sum_{i=1}^m \mu_i e^{-\mu_i y} \prod_{j=1, j \neq i}^m \frac{\mu_j}{\mu_j - \mu_i} \right) \right]. \quad (4.17)$$

Por fim, a Eq. (4.17) permite ao HAP estimar o número de transmissões simultâneas em um dado slot com colisão, considerando o conhecimento da localização das estações, do número acumulado de transmissões estimado pelo HAP, e da potência recebida. Devido à complexidade da equação, não foi possível encontrar uma expressão fechada para o estimador  $\hat{m}$ , e dessa forma, como explicado anteriormente, o HAP precisa fazer uma busca sobre todas as possíveis combinações de transmissões simultâneas, substituindo na Eq. (4.17) todos os pares  $(m, \underline{d})$  a fim de encontrar aquele que lhe retorne o maior valor para a função densidade de probabilidade. Isso ocorre porque a função densidade de probabilidade obtida para cada par  $(m, \underline{d})$  tende a ser diferente, pois cada estação é única do ponto de vista do HAP. Obviamente, o método não é adequado para aplicação em redes densas, pois o tempo de estimação deve ser tal que possa ser acomodado no intervalo de tempo de processamento  $T_{proc}$ , conforme Figura (3.1). Entretanto, pode ser aplicado às redes com poucos dispositivos, em cenários de aplicação *indoor*, como automação residencial e casas inteligentes. Nesse âmbito, resultados de simulação são apresentados com o uso deste método.

## 4.5 Estimação do Número de Transmissões Simultâneas: Topologia Anel

Na seção anterior, abordamos o caso geral relacionado à topologia em que a única restrição imposta foi que duas estações quaisquer não ocupassem a mesma localização dentro da área de cobertura do HAP e, conseqüentemente, cada estação podia ser identificada por sua distância ao HAP. Propomos, nesta seção, um caso mais específico. Aqui, como no caso geral, as estações ocupam posições distintas dentro da área de cobertura do HAP. No entanto, a distância de cada estação ao ponto de acesso híbrido é a mesma, ou seja,  $d_{H,k} = d$ , em que  $k$  é um dispositivo qualquer. Logo, as estações estão dispostas sobre a borda de uma circunferência de raio  $d$ . Nesse contexto, podemos considerar que todas as estações são iguais, pois possuem a mesma configuração e distância ao HAP. Nosso objetivo ainda é o mesmo da seção anterior, desenvolver um método que auxilie o HAP a decidir qual o número de transmissões simultâneas  $m$  em um dado *slot*, dada a potência recebida  $y$ , e o número de estações que já transmitiram no ciclo de operação em questão (no caso, o estado  $(n, 0)$  da cadeia de Markov). Porém, diferentemente da seção anterior, o HAP não precisa mais conhecer a localização de cada dispositivo, basta conhecer o raio  $d$  da circunferência onde os dispositivos estão dispostos sobre a borda. A Figura 4.3 ilustra um *slot* arbitrário com colisão em uma rede com topologia em anel. Nela podemos verificar os dispositivos que transmitem no *slot* atual, bem como algumas estações em modo de dormência e outras em modo ativo que podem vir a gerar pacotes.

De modo similar ao exposto no desenvolvimento do método de estimação de colisão para a topologia aleatória, estamos interessados em encontrar uma função densidade de probabilidade que indique o número  $m$  de transmissões simultâneas mais provável de haver gerado a colisão, dada a potência  $y$  recebida pelo HAP e o atual número acumulado de transmissões estimadas  $n$ . Assumindo que o HAP conhece o raio  $d$  da circunferência, precisamos encontrar  $f(m|y, n)$ . Perceba que as restrições impostas para este caso específico permitiram uma simplificação na função densidade de probabilidade, isto é, a exclusão da aleatoriedade referente às distâncias das

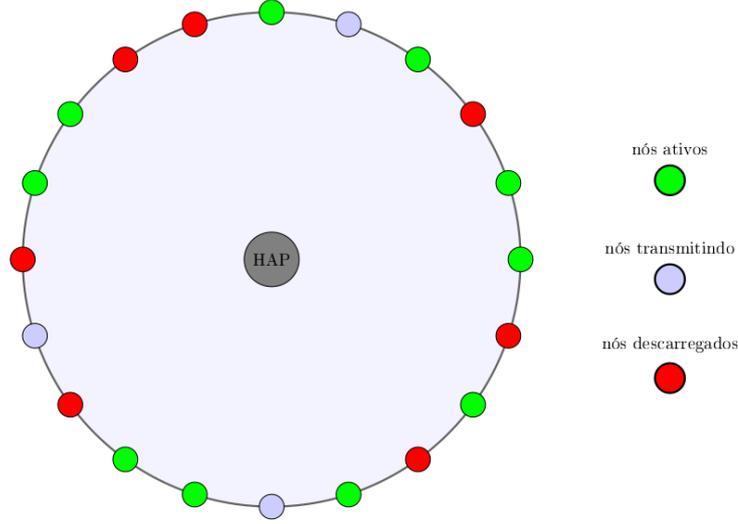


Figura 4.3: Representação de um slot com transmissões simultâneas considerando a Topologia em Anel

estações. Dessa forma, aplicando o Teorema de Bayes à função densidade de probabilidade e em seguida a propriedade da Eq. (4.10), obtemos

$$f(m|y, n) = \frac{f(y, n|m)f(m)}{f(y, n)} = \frac{f(y|m, n)f(m|n)}{f(y|n)}. \quad (4.18)$$

Novamente, o denominador da Eq. (4.18) é comum a todos os casos investigados. Pois  $y$  e  $n$  são conhecidos pelo HAP. Por isso, podemos afirmar que a escolha do número de transmissões simultâneas  $m$  mais adequado é aquele que maximiza o numerador da Eq. (4.18), ou seja, o produto das densidades  $f(y|m, n)f(m|n)$ . Assim, utilizando o método de estimação por máxima verossimilhança, temos que o estimador  $\hat{m}$  pode ser dado por

$$\hat{m} = \arg \max_m f(m|y, n) \propto \arg \max_m f(y|m, n)f(m|n). \quad (4.19)$$

Analogamente à seção anterior, não estamos interessados em descobrir o  $m$  que retorna o máximo absoluto da função densidade de probabilidade, mas o  $m$  que retorna o máximo local para o domínio  $\mathcal{M}$ . Portanto, seguiremos procedimento similar para encontrar o estimador  $\hat{m}$ . Perceba que, uma vez de posse das densidades  $f(y|m, n)$  e  $f(m|n)$ , da potência recebida  $y$ , e do número  $n$  de dispositivos descarregados estimados, o HAP pode simplesmente substituir os valores de  $m$  inteiro na Eq. (4.19) e escolher aquele que lhe retornasse o maior valor da função densidade de probabilidade. Nesse sentido, desejamos encontrar tais funções densidade de probabilidade.

Primeiramente, precisamos encontrar a função densidade de probabilidade  $f(y|m, n)$ . Essa densidade representa a probabilidade do HAP detectar um sinal com intensidade de potência  $y$ , dado o número  $m$  de estações colidentes e o número acumulado de transmissões  $n$  estimado pelo HAP. A análise é análoga ao caso geral da seção anterior, entretanto, devemos tomar cuidado com o seguinte aspecto: a variável aleatória  $U_k$  representa a potência recebida pelo HAP quando a estação  $k$  transmite um pacote de dados, e  $\Phi_k$  representa a potência média recebida pelo HAP relacionada

às transmissões realizadas pela estação  $k$ . Portanto, temos que  $U_k = \text{Exp}(\frac{1}{\Phi_k})$ . Porém, como todos os dispositivos são igualmente configurados e estão à mesma distância do HAP, podemos afirmar que  $U_k = U$  e  $\Phi_k = \Phi$ . Logo, a potência recebida pelo HAP, dada a transmissão isolada de um dispositivo qualquer, pode ser caracterizada pela variável aleatória  $U = \text{Exp}(\frac{1}{\Phi})$ .

De modo similar à seção anterior, a variável aleatória  $Y$  representa a intensidade de potência agregada recebida pelo HAP quando ocorre uma colisão com  $m$  transmissões simultâneas e o sistema se encontra com  $n$  estações em estado de dormência. Assim, podemos expressar tal potência agregada como

$$Y = U_1 + U_2 + \dots + U_m. \quad (4.20)$$

Lembrando que cada dispositivo realiza uma transmissão independente dos demais, as variáveis aleatórias  $U_1, \dots, U_N$  são exponenciais independentes e identicamente distribuídas, pois, conforme vimos,  $U_k = U = \text{Exp}(\frac{1}{\Phi})$ . A soma das variáveis aleatórias exponenciais, independentes e identicamente distribuídas da Eq. (4.20), resulta na variável aleatória  $\text{Gamma}(m, \frac{1}{\Phi})$ . Logo,

$$f(y|m, n) = \frac{y^{m-1} e^{-\frac{y}{\Phi}}}{\Phi^m \Gamma(m)}. \quad (4.21)$$

com  $\Gamma(m) = (m-1)!$  Assim, temos que a função de densidade de probabilidade almejada pode ser definida por

$$f(m|y, n) \propto f(y|m, n) f(m|n) = \frac{y^{m-1} e^{-\frac{y}{\Phi}}}{\Phi^m \Gamma(m)} \binom{N-n}{m} p^m (1-p)^{N-n-m}, \quad (4.22)$$

Em seguida, a função densidade de probabilidade conjunta condicional  $f(m|n)$  expressa a densidade de probabilidade de ocorrência de uma colisão com  $m$  transmissões simultâneas dado o número de estações descarregadas no ciclo de operação atual. Logo, tal densidade exprime a probabilidade de transição de estado da cadeia de Markov por meio de uma colisão. Assim,  $f(m|n)$  é a distribuição binomial da Eq. (3.3), portanto,

$$f(m|n) = \binom{N-n}{m} p^m (1-p)^{N-n-m}. \quad (4.23)$$

Note que, diferentemente da Eq. (4.16), o fato de todos os dispositivos estarem à mesma distância do HAP imprime a necessidade de se incluir o coeficiente binomial, pois, agora, a distância não influencia na determinação da densidade. Logo, não se considera a individualidade das estações do caso anterior (Topologia aleatória). Apenas os valores de  $m$ ,  $N$  e  $n$ . Aqui, a diferença é que não se sabe quem transmitiu. Por fim, podemos reescrever a Eq. (4.19) da seguinte forma,

$$\hat{m} = \arg \max_m \frac{y^{m-1} e^{-\frac{y}{\Phi}}}{\Phi^m \Gamma(m)} \binom{N-n}{m} p^m (1-p)^{N-n-m} \quad (4.24)$$

De posse do valor da potência recebida  $y$ , do número  $n$  de transmissões ocorridas até o *slot* atual do ciclo em questão, e o número total de nós  $N$ , o HAP pesquisa o valor de  $m \in \mathcal{M}$  que produz o maior valor para a Eq. (4.24).

Algo importante precisa ser mencionado aqui. Na seção anterior, definimos o conceito de classe de colisão, e notamos que, na Eq. (4.17), dois elementos da mesma classe retornavam valores de

densidade de probabilidade distintos, exigindo, portanto, que o HAP realizasse  $2^{N-n} - (N-n) - 1$  verificações em busca do maior valor da função densidade de probabilidade, ou seja, o HAP devia percorrer todos os elementos de todas as classes de colisão. Dependendo do tamanho da rede, isso gera um elevado custo computacional. Por outro lado, o método de estimação de colisão na topologia em anel nos mostra que todos os elementos de uma mesma classe retornam a mesma densidade de probabilidade, e que, uma vez que o HAP conheça  $y$  e  $n$ , a Eq. (4.22) retorna a densidade de probabilidade da colisão pertencer a uma dada classe. Isso é resultado da restrição imposta à topologia em anel, tornando todas as estações iguais perante o HAP. Conseqüentemente, o HAP só precisa verificar a densidade de probabilidade das classes existentes, ou seja,  $(N-n-1)$  verificações em busca do  $m$  que retorne a maior densidade de probabilidade. Dessa forma, percebemos que a adoção de uma dada topologia pode demandar mais ou menos custo computacional para executar o método de estimação de colisão.

Alternativamente, seria possível reduzir ainda mais o custo computacional do HAP encontrando uma expressão fechada para o estimador  $\hat{m}$ . Do cálculo, sabemos que o argumento que maximiza uma dada função é aquele cuja função tem derivada igual a zero para esse argumento. Dessa forma, poderíamos seguir esse procedimento e tentar derivar a Eq. (4.22) com relação a  $m$ . Porém, isso nos conduziria à derivada do produto de fatoriais e exponenciais, revelando-se um processo exaustivo. Outra abordagem comum, é aplicar o logaritmo natural à função antes de derivá-la. Esse procedimento se mostra mais atrativo, uma vez que, com a aplicação do logaritmo natural, podemos eliminar os expoentes e dividir a função em parcelas, para em seguida derivá-las separadamente. Antes de continuar, devemos observar que o domínio da função  $f(m|y, n)$  é o conjunto  $\mathcal{M}$ . Logo, é necessário que a derivada desta função densidade exista para  $\forall m \in \mathcal{M}$ . Assim, partindo da Eq. (4.18), obtemos

$$\begin{aligned} \frac{d\{\ln[f(m|y, n)]\}}{dm} &= \frac{d}{dm} \left[ \ln \left( \frac{f(y|m, n)f(m|n)}{f(y|n)} \right) \right] = \\ &= \frac{d}{dm} [\ln(f(y|m, n)) + \ln(f(m|n)) - \ln(f(y|n))] = \\ &= \frac{d}{dm} [\ln(f(y|m, n))] + \frac{d}{dm} [\ln(f(m|n))]. \end{aligned} \quad (4.25)$$

A função densidade de probabilidade  $f(y|n)$  é uma constante durante o intervalo de tempo de processamento  $T_{proc}$  em um slot com colisão, logo, independe de  $m$ . Sendo assim, a  $\frac{d}{dm} [\ln(f(y|n))] = 0$ .

Em seguida, substituindo as Eqs. (4.23) e (4.21) na Eq. (4.25), obtemos

$$\begin{aligned} \frac{d\{\ln[f(m|y, n)]\}}{dm} &= \frac{d}{dm} \left[ \ln \left( \frac{y^{m-1} e^{-\frac{y}{\Phi}}}{\Phi^m \Gamma(m)} \right) \right] + \frac{d}{dm} \left[ \ln \left( \binom{N-n}{m} p^m (1-p)^{N-n-m} \right) \right] \\ &= \frac{d}{dm} \left[ (m-1)\ln(y) + \frac{-y}{\Phi} - m\ln(\Phi) - \ln\Gamma(m) \right] + \frac{d}{dm} \left[ m\ln(p) + (N-n-m)\ln(1-p) + \right. \\ &\quad \left. + \ln(N-n)! - \ln(N-n-m)! - \ln(m!) \right] \end{aligned} \quad (4.26)$$

Derivando o segundo membro da Eq. (4.26), e lembrando que  $\Gamma(x+1) = x!$ , podemos rearranjar

a equação da seguinte forma,

$$\begin{aligned} \frac{d\{\ln[f(m|y, n)]\}}{dm} &= \ln\left(\frac{yp}{\Phi(1-p)}\right) - \frac{d}{dm}[\ln(\Gamma(N-n-m+1))] \\ &- \frac{d}{dm}[\ln(\Gamma(m+1))] - \frac{d}{dm}[\ln(\Gamma(m))]. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Agora, bastaria igualar a Eq. (4.27) a zero e resolvê-la para encontrar o  $m$  que maximiza  $f(m|y, n)$ . Entretanto, o que podemos dizer à respeito da função  $\frac{d}{dm}[\ln(\Gamma(x))]$ ? Bom, o fato é que essa função é conhecida na literatura como função *Digamma* [29], representada pela letra  $\Psi$ , e definida como

$$\Psi(x) = \frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)} = \frac{d}{dx}[\ln(\Gamma(x))]. \quad (4.28)$$

A Figura 4.4 ilustra o comportamento da função Digamma no intervalo real  $[-\infty, +\infty]$ . Note que,

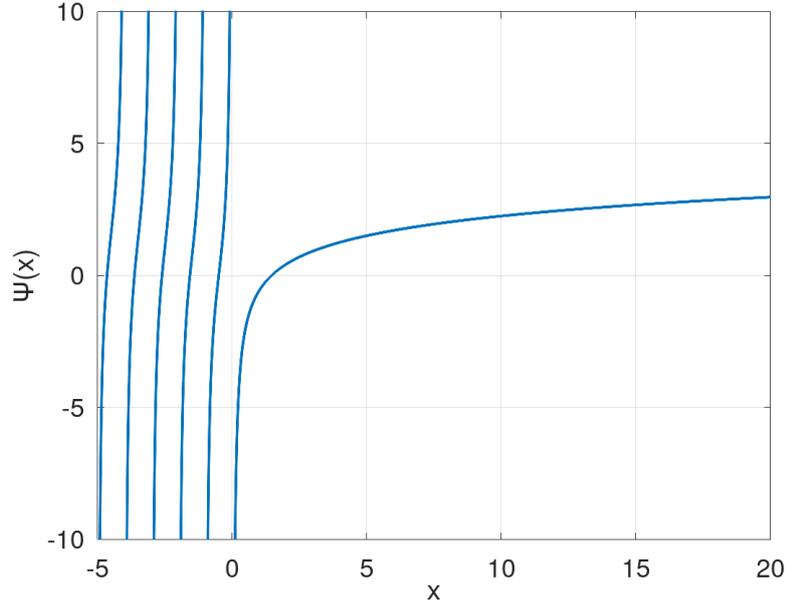


Figura 4.4: Função Digamma.

para  $x \in \mathbb{Z}_-$ ,  $\Psi(x) \rightarrow \infty$ , apresentando infinitas descontinuidades. Entretanto, para  $x \in \mathbb{R}_+$  a função é contínua e bem definida.

Na Eq. (4.27),  $m$  é uma variável que assume valores inteiros, sendo todos os demais parâmetros da equação constantes, e conhecidos pelo HAP durante um slot com colisão, dentro do intervalo de processamento  $T_{proc}$ . Reforçando mais uma vez, em nossa aplicação,  $m$  é sempre um valor inteiro que representa o número de transmissões simultâneas em um dado slot com colisão, tal que  $m \in \mathcal{M}$ . Dessa forma, quando restringimos o domínio da função *Digamma* ao conjunto dos números inteiros positivos  $\mathbb{Z}_+^*$ , ou a um subconjunto de  $\mathbb{Z}_+^*$ , e, em nosso caso,  $\mathcal{M} \subset \mathbb{Z}_+^*$ , a função *Digamma* [29] pode ser representada por

$$\Psi(m) = \sum_{l=1}^{m-1} \frac{1}{m} - \gamma = H_{m-1} - \gamma, \quad (4.29)$$

em que  $H_m$  é o  $m$ -ésimo número harmônico, e  $\gamma$  é a constante de Euler-Mascheroni. Diante do exposto, substituindo a Eq. (4.28) em Eq. (4.27) obtemos

$$\frac{d\{\ln[f(m|y, n)]\}}{dm} = \Psi(N - n - m + 1) - \Psi(m + 1) - \Psi(m) + \ln\left(\frac{yp}{\Phi(1 - p)}\right). \quad (4.30)$$

Conforme vimos anteriormente, o  $m$  que maximiza  $\ln[f(m|y, n)]$  é aquela cuja derivada da função no ponto  $m$  é igual a zero, ou seja,  $\frac{d\{\ln[f(m|y, n)]\}}{dm} = 0$ . Logo,

$$\Psi(N - n - m + 1) - \Psi(m + 1) - \Psi(m) + \ln\left(\frac{yp}{\Phi(1 - p)}\right) = 0. \quad (4.31)$$

Novamente, como  $m$  é inteiro, podemos substituir a Eq. (4.30) na Eq. (4.31), e rearranjando a equação resultante, obtemos

$$H_{N-n-m} - H_m - H_{m-1} - \gamma + \ln\left(\frac{yp}{\Phi(1 - p)}\right) = 0. \quad (4.32)$$

Assim, temos que o  $m$  inteiro que satisfaz a Eq. (4.32) é a melhor estimativa para o número de transmissões simultâneas em um slot com colisão. Entretanto, no caso de não haver tal inteiro que satisfaça a igualdade, a melhor estimativa, então, seria o inteiro que mais se aproximasse de satisfazê-la. Portanto, definimos uma função  $\epsilon$  da seguinte maneira

$$\epsilon(m) = H_{N-n-m} - H_m - H_{m-1} - \gamma + \ln\left(\frac{yp}{\Phi(1 - p)}\right). \quad (4.33)$$

Dessa forma, estamos interessados no  $\epsilon$  mais próximo de zero, não necessariamente o menor, pois a função  $\epsilon(m)$  pode assumir valores negativos. Sendo assim, a melhor estimativa para o número de estações colidentes é

$$\hat{m} = \underset{m}{\arg \min} |\epsilon(m)|. \quad (4.34)$$

A Eq. (4.34) determina o valor  $m$  mais apropriado baseado na distância de  $\epsilon(m)$  a zero, por isso a função módulo. Assim, o estimador  $\hat{m}$  é o argumento inteiro aplicado à função  $\epsilon(m)$  que retorna a menor distância. Perceba que tal definição abrange todos os casos, pois, se existir um  $m^*$  inteiro que satisfaça a Eq. (4.32), temos que  $\epsilon(m^*) = 0$ , portanto,  $\hat{m} = m^*$ .

Mais uma vez não foi possível exprimir  $m$  através de uma fórmula fechada, entretanto, a aplicação alternativa desse método, usando a função harmônica, reduz o custo computacional exigido para executar o método de estimação quando comparado ao método utilizando a Eq. (4.24). Ambos os métodos propostos para estimar o número de transmissões simultâneas em uma colisão na topologia em anel produzem os mesmos resultados, verificados numericamente.

## Capítulo 5

# Avaliação de Desempenho do Caso Ideal

Neste capítulo apresentamos a vazão média normalizada da rede para diferentes números de estações, taxas agregadas de geração de pacotes, limiares de tentativas de transmissão de pacotes de dados, e períodos de carregamento, em ambos os modos de operação: DBC e HBC. Nas avaliações, apresentamos os resultados para o caso ideal aplicando a modelagem analítica do Capítulo 3 e sua validação via simulações Monte Carlo.

As simulações foram realizadas utilizando o software Octave. Elaboramos uma rotina principal que simula a política de acesso das estações ao canal de acordo com o protocolo MAC Slotted ALOHA com transferência de energia. Consideramos que o número de pacotes determinado para o período de carregamento atende à demanda energética dos dispositivos, e que, o HAP estima corretamente o número de estações colidentes em todo *slot* com colisão. Tais premissas estão de acordo com a modelagem da Seção 3.2 e permitem entender o desempenho máximo alcançável sem os efeitos da camada física. No Capítulo 6 investigaremos o impacto da camada física no desempenho do sistema. Sem prejuízo à análise, as simulações são realizadas considerando o intervalo de tempo de *slot* com duração de 1 ms. Além disso, assumimos que o tempo de propagação  $T_{prop}$ , o tempo de processamento  $T_{proc}$  e a duração do sinal de despertar  $T_w$  são nulos. Logo, temos que o tempo de transmissão de pacote de dados é igual ao tempo de duração de um slot, ou seja,  $T_{trans} = T_{slot}$ . Um cenário de avaliação é formado pelo número de estações  $N$ , taxa agregada de geração de pacotes  $\lambda$ , limiar de tentativas de transmissão  $L$ , número  $C$  de pacotes de energia consecutivos, e modo de operação. Cada estação gera um pacote de dados segundo uma distribuição de Poisson com parâmetro  $\lambda/N$ , resultando na taxa agregada  $\lambda$ . Em um dado cenário de rede, a rotina é executada para um milhão de *slots* em que é possível obter a vazão média normalizada com alta precisão em comparação com o modelo analítico.

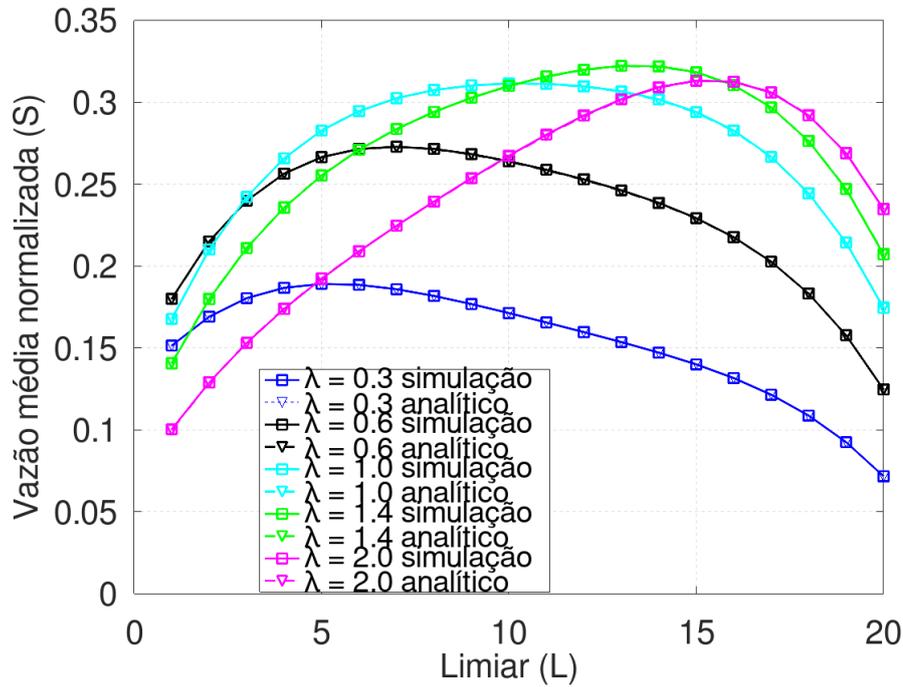
Investigamos a vazão média normalizada alcançável como função do parâmetro de limiar  $L$  para transmissão do pacote de energia. Em particular, temos interesse em descobrir o valor do limiar ótimo  $L^*$  que maximiza a vazão média normalizada para o conjunto de parâmetros supracitados.

## 5.1 Validação do modelo

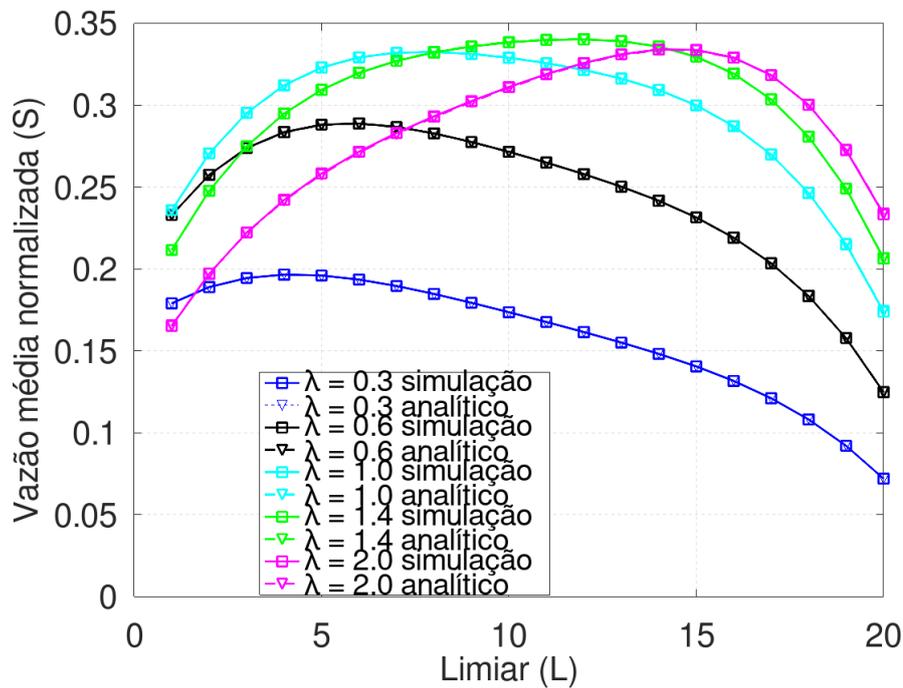
Nesta seção validamos o modelo analítico proposto no Capítulo 3, comparando os resultados obtidos com os resultados simulados, considerando uma rede com  $N = 20$  estações, um conjunto de taxas agregadas de geração de pacotes  $\lambda \in \{0,3, 0,6, 1,0, 1,4, 2,0\}$  pacotes/ms, e períodos de carregamento distintos com  $C = 1$  e  $C = 4$  pacotes de energia. A vazão média normalizada foi obtida para todos os valores possíveis do limiar  $L$ , isto é,  $1 \leq L \leq N$ , em ambos os modos de operação DBC e HBC.

A Figura 5.1 compara os resultados de vazão média normalizada obtidos via modelos analíticos, desenvolvidos na Seção (3.2), e por simulações. A sobreposição dos valores de vazão média normalizada, ao compararmos o modelo analítico e simulação, expressa a acurácia do modelo. As Figuras 5.1(a) e 5.1(b) retratam os modos de operação DBC e HBC, respectivamente, para um período de carregamento  $C = 1$ . Em ambos os modos de operação, o modelo se mostra preciso em diferentes cenários, para taxas agregadas de geração de pacotes distintas e para um amplo intervalo de valores de limiar. Para uma taxa agregada de geração de pacotes fixa, a vazão média normalizada cresce à medida que o valor do limiar  $L$  aumenta, atinge seu máximo para um valor do limiar  $L^*$ , e, então, decresce. Além disso, as figuras revelam que valores menores de  $L$  alcançam melhor desempenho quando o tráfego é menos intenso. Porém, para um tráfego mais intenso, o melhor desempenho é obtido para valores do limiar mais altos. Por exemplo, na Figura 5.1(a), para a taxa agregada de geração de pacotes  $\lambda = 0,6$  pacotes/ms, a vazão máxima  $S = 0,2731$  acontece em  $L^* = 7$  enquanto que, para a taxa agregada  $\lambda = 2$  pacotes/ms, a vazão máxima  $S = 0,31107$  ocorre quando  $L^* = 16$ . Precisamos entender que, no decorrer de um ciclo de transmissão de dados, a disputa das estações por acesso ao canal diminui, pois, uma vez que uma dada estação tentou uma transmissão ela entra em modo de dormência e não realiza outra tentativa de transmissão no mesmo ciclo de operação. Além disso, um valor de limiar menor implica em um tamanho médio de ciclo de transmissão de dados menor, uma vez que menos tentativas de transmissão sobre o canal são necessárias para se atingir o valor do limiar  $L$  estipulado. Por sua vez, um tamanho médio de ciclo de transmissão de dados menor resulta na ocorrência de mais ciclos. E, por fim, uma taxa agregada baixa representa um sistema com baixa contenção, ocorrendo mais *slots* ociosos do que *slots* ocupados com transmissões. Assim, para uma taxa agregada baixa, os melhores desempenhos ocorrem para valores do limiar  $L$  menores, em que os ciclos de transmissão de dados são curtos, e um *slot* com transmissão bem sucedida representa um percentual significativo do ciclo de transmissão de dados. Por outro lado, para valores do limiar  $L$  maiores, os ciclos de transmissão de dados são longos, formados, em sua maioria por *slots* ociosos. Dessa forma, o número de transmissões bem sucedidas é muito pequeno comparado ao tamanho do ciclo de transmissão de dados. O contrário ocorre para uma taxa agregada alta, em que valores do limiar  $L$  menores resultam em ciclos de transmissão de dados pequenos com muita colisão e poucas transmissões bem sucedidas. Enquanto que valores do limiar  $L$  maiores implicam em ciclos de transmissão de dados longos, em que a contenção reduz bastante à medida que o ciclo avança, portanto, as transmissões com sucesso tornam-se mais prováveis, e, conseqüentemente, a vazão média normalizada cresce.

O par de gráficos ainda evidencia a superioridade de desempenho do modo HBC, principalmente



(a)



(b)

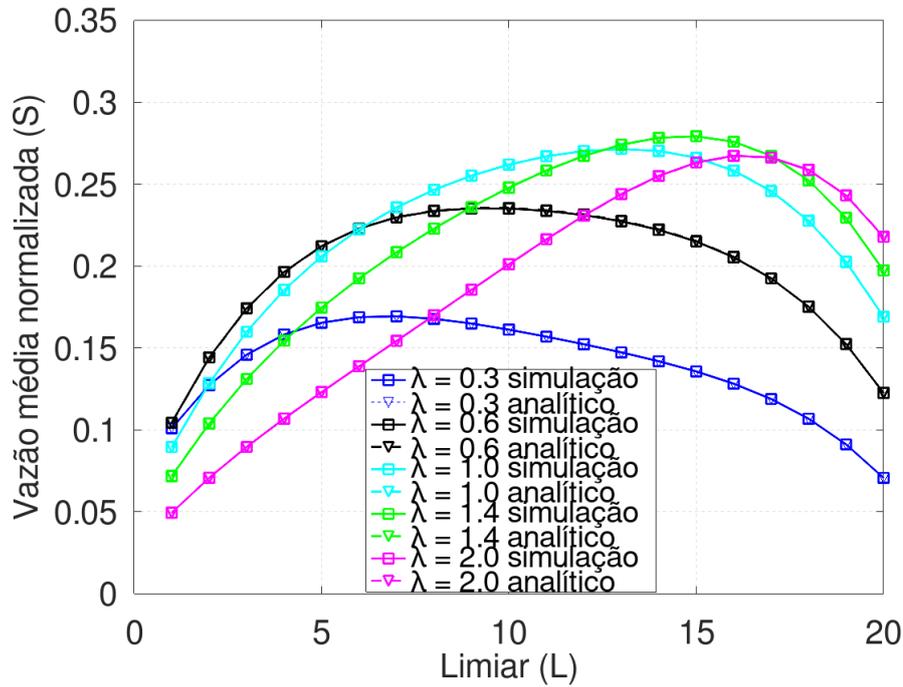
Figura 5.1: Vazão média normalizada para  $N = 20$  e  $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

na primeira metade de valores de  $L$ , onde a diferença entre os desempenhos é bem maior. Por exemplo, para a taxa agregada de geração de pacotes  $\lambda = 1$  pacotes/ms e valor do limiar  $L = 5$ , o modo HBC alcança uma vazão média normalizada 14% maior que a do modo DBC. Já para  $L = 15$ , considerando a mesma taxa agregada, o modo HBC alcança uma vazão média normalizada, apenas, 2,09% maior que a do modo DBC.

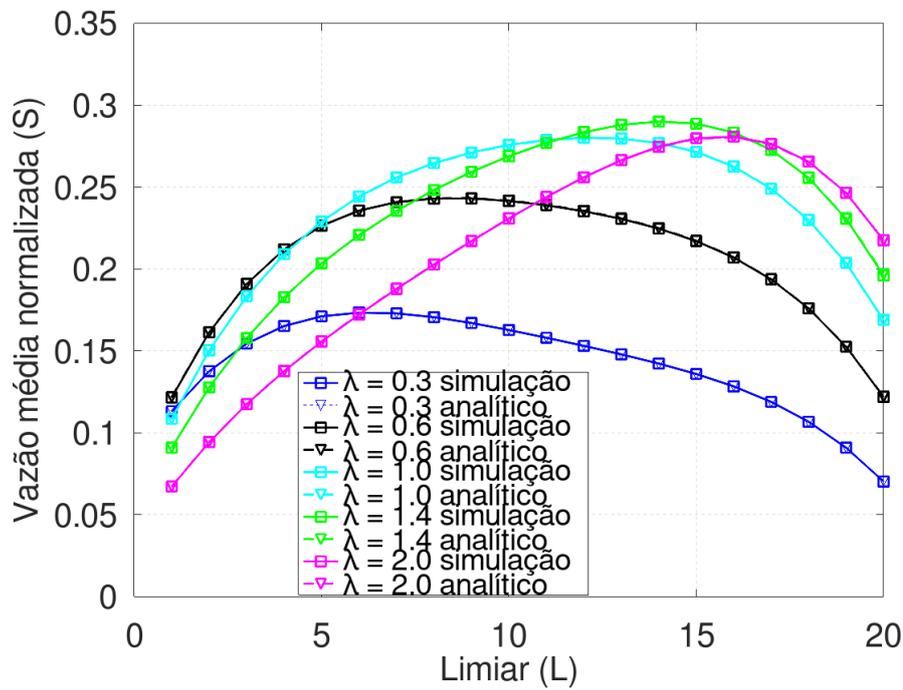
Para o modo de operação HBC, ter mais ciclos significa ter mais oportunidades de transmissões bem sucedidas, pois tal modo de operação não descarta os pacotes gerados no *slot* imediatamente anterior ao período de carregamento, apenas os atrasa para transmiti-los no primeiro *slot* do próximo ciclo de transmissão de pacotes de dados. Cabe ressaltar ainda que, mantendo a mesma taxa de geração de pacotes, os modos de operação alcançam seus desempenhos máximos em valores distintos de  $L$ . Por exemplo, para  $\lambda = 1,0$  pacotes/ms, a vazão máxima do modo de operação DBC acontece em  $L^* = 10$  ( $S = 0,313$ ), ao passo que no modo HBC a vazão máxima ocorre quando  $L^* = 8$  ( $S = 0,332$ ).

Nas Figuras 5.2(a) e 5.2(b) percebemos que o modelo se mantém preciso quando aumentamos a duração do período de carregamento. Além disso, notamos o impacto do aumento da duração do período de carregamento na vazão média normalizada nos modos de operação DBC e HBC, respectivamente. Com o período de carregamento quatro vezes maior, podemos perceber que um aumento no número de pacotes de energia introduz um custo que reduz a vazão média geral devido a uma menor fração do total de slots de tempo disponíveis para transmissões de pacotes com sucesso. Analisando o cenário com taxa agregada de geração de pacotes  $\lambda = 1,0$  pacotes/ms e valor do limiar  $L = 5$ , o modo HBC alcança uma vazão média normalizada 11,22% maior que a do modo DBC. Já para o valor de limiar  $L = 15$ , considerando a mesma taxa agregada, o modo HBC alcança uma vazão média normalizada, apenas, 2,08% maior que a do modo DBC. Assim, ainda podemos notar que a diferença de desempenho entre os modos de operação continua sendo maior para valores de limiar menores, apesar do aumento do período de carregamento. Entretanto, percebemos que o aumento do número de pacotes de energia reduz o ganho percentual do modo HBC com relação ao modo DBC, principalmente para valores do limiar menores. Note que, para os cenários da Figura 5.1, com  $N = 20$ ,  $\lambda = 1$ , e  $C = 1$ , o ganho de desempenho do modo HBC sobre o DBC foi de 14% para  $L = 5$  e 2,09% para  $L = 15$ , respectivamente. Portanto, o impacto causado pelo aumento do período de carregamento no ganho de desempenho do modo HBC sobre o DBC foi praticamente insignificante para  $L = 15$ , pois sofreu uma redução de apenas 0,01%, enquanto que, para  $L = 5$  a redução de 2,78% é mais significativa. Isso acontece porque para  $L = 15$  o custo relacionado à adição de pacotes de energia praticamente alcança o ganho relacionado ao não descarte de pacotes do modo HBC. Por fim,  $S < 0,3$  em todos os cenários ilustrados nas Figuras 5.1 e 5.2.

Esta Seção comparou a vazão média normalizada como função do valor do limiar  $L$  obtida, tanto via modelos analíticos, quanto via simulações. Os cenários utilizados para a obtenção dos resultados foram construídos a partir de um número de estações  $N = 20$  fixo, um conjunto de valores de taxa agregada de geração de pacotes, de períodos de carregamento com  $C = 1$  e  $C = 4$  pacotes de energia, e dos modos de operação DBC e HBC.



(a)



(b)

Figura 5.2: Vazão média normalizada para  $N = 20$  e  $C = 4$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

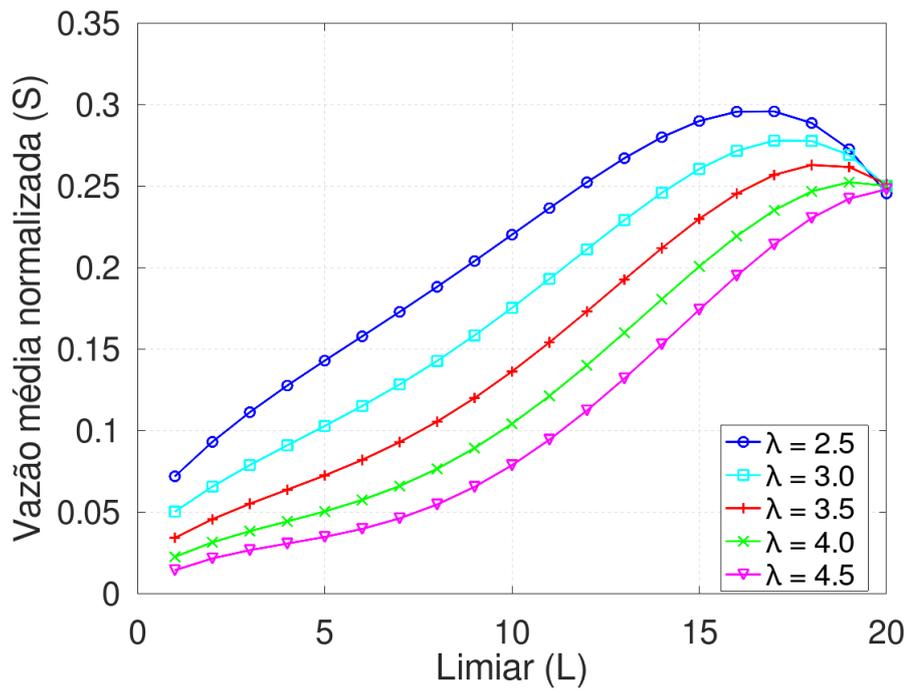
O modelo mostrou-se preciso para representar o comportamento do sistema, exibindo resultados acurados para as variadas taxas agregadas e valores do limiar  $L$ , bem como para os dois períodos de carregamento e modos de operação. A seguir analisaremos o impacto causado na vazão média normalizada quando consideramos taxas agregadas mais altas, redes densas e períodos de carregamento com longa duração. Por fim, analisaremos o gasto de energia do HAP para garantir a sustentabilidade energética, e mostraremos o valor do limiar  $L^*$  e taxa agregada  $\lambda^*$  ótimos que atingem a vazão máxima para tamanhos de rede distintos.

## 5.2 Análise Geral do Modelo

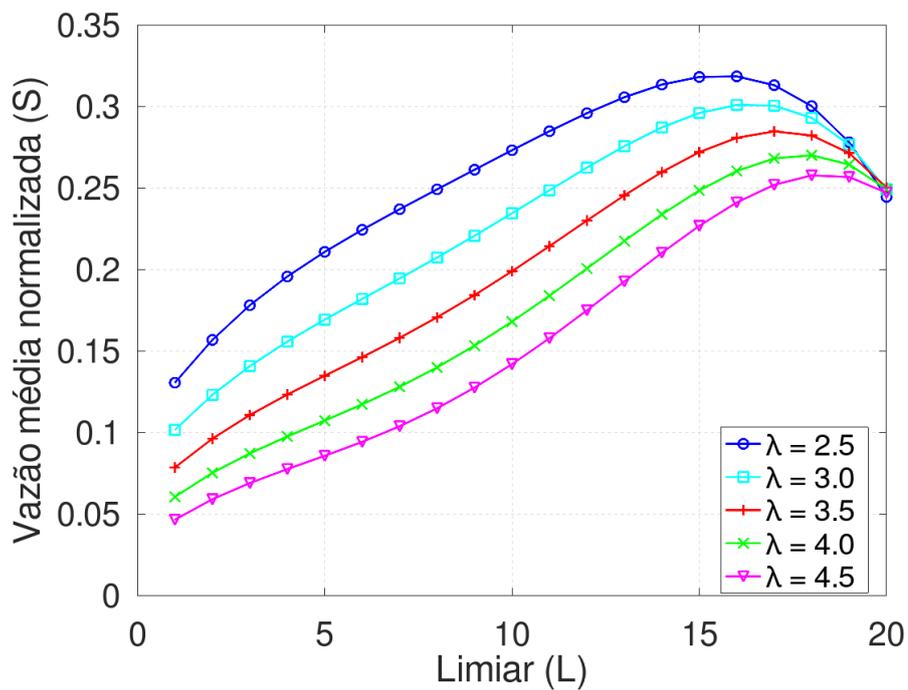
Nesta seção apresentamos o impacto do uso de taxas agregadas altas, redes densas, e períodos de carregamento com longa duração na vazão média normalizada via modelo analítico, e avaliamos a demanda energética da rede para fins de sustentabilidade energética. Apresentamos, também, dentre uma ampla gama de valores de limiar e taxas agregadas simuladas, os que permitem o sistema alcançar a vazão máxima para tamanhos de rede distintos, considerando um período de carregamento  $C = 1$  pacote de energia.

Baseado nos cenários com períodos de carregamento  $C = 1$  e  $C = 4$ , estamos interessados em descobrir o comportamento da vazão média normalizada para taxas agregadas de geração de pacotes  $\lambda > 2$  pacotes/ms com o intuito de identificar para qual intervalo de valores de taxa agregada o sistema alcança melhores desempenhos. As Figuras 5.3 e 5.4 retratam o desempenho do sistema para taxas de geração de pacotes mais altas e com período de carregamento  $C = 1$  e  $C = 4$  respectivamente.

Neste contexto de taxas elevadas, de modo geral, a curva com menor taxa alcança os melhores desempenhos independente do valor de  $L$  observado. Além disso, para cada valor da taxa agregada  $\lambda$ , a máxima vazão média normalizada é alcançada para valores de  $L$  muito próximos ou iguais ao número de nós  $N$ . No protocolo Slotted ALOHA, a ociosidade do canal diminui e o número de transmissões no canal aumenta à medida que a taxa agregada aumenta. Dessa forma, há uma taxa agregada ótima que permite um maior número de transmissões bem sucedidas. Portanto, valores de taxa agregada elevados geram uma maior incidência de colisão, e causam a redução de *slots* ociosos e transmissões de pacotes com sucesso. Assim, em nossa WPCN, um valor de taxa agregada  $\lambda > 2$  pacotes/ms já caracteriza um cenário com alta incidência de colisão, e, quanto maior a taxa agregada, menor a vazão média normalizada para um dado  $L$  fixo. A vazão média normalizada é maior para valores do limiar  $L$  mais próximos de  $N$  porque um valor de limiar  $L$  alto gera um tamanho médio de ciclo maior. Como cada dispositivo só tem energia para uma tentativa de transmissão e o número de colisões é maior para taxas agregadas mais altas, a disputa pelo acesso ao canal diminui bastante à medida que o ciclo avança, favorecendo, portanto, a ocorrência de transmissões bem sucedidas. Novamente, aqui corroboramos a superioridade do modo HBC sobre o DBC, concretizando-se assim como o modo de operação com melhor desempenho em todas as taxas analisadas, considerando tanto valores baixos como valores altos para as taxas agregadas de geração de pacotes. A única exceção dá-se no caso em que  $L = N$ , quando o limiar adotado é

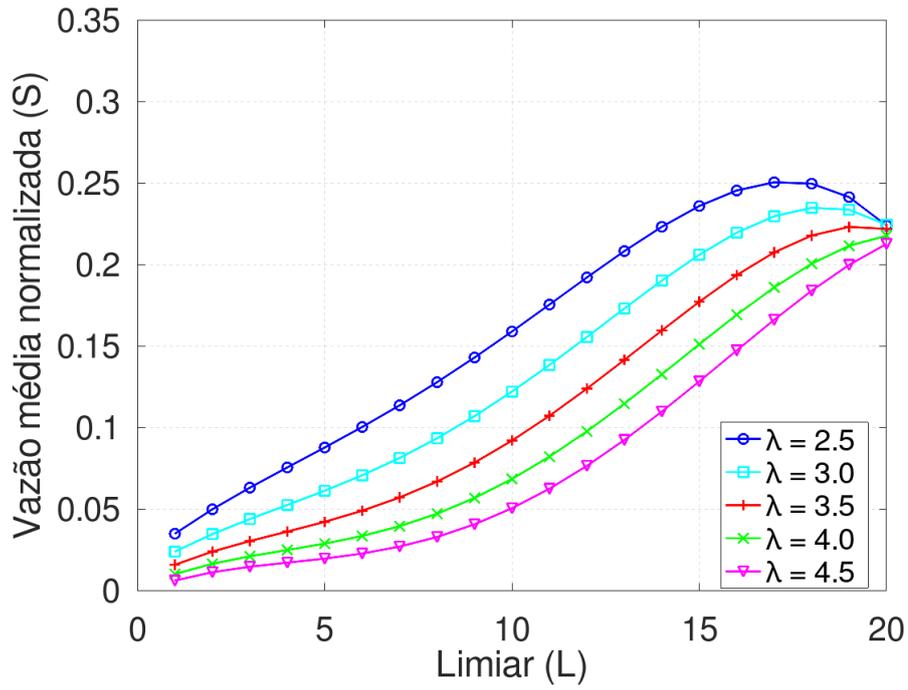


(a)

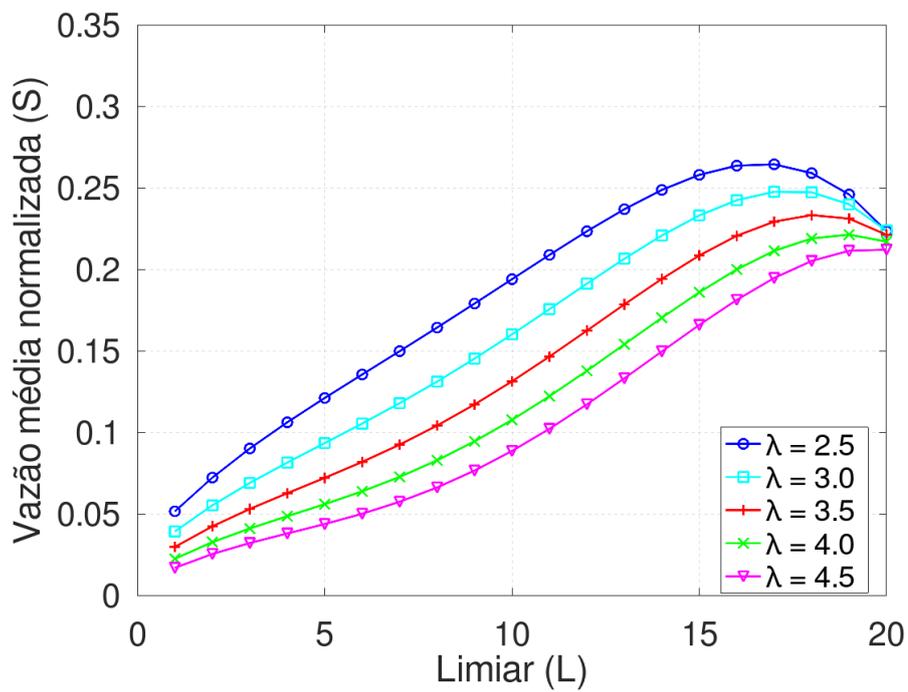


(b)

Figura 5.3: Vazão média normalizada para  $N = 20$  e  $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.



(a)



(b)

Figura 5.4: Vazão média normalizada para  $N = 20$  e  $C = 4$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

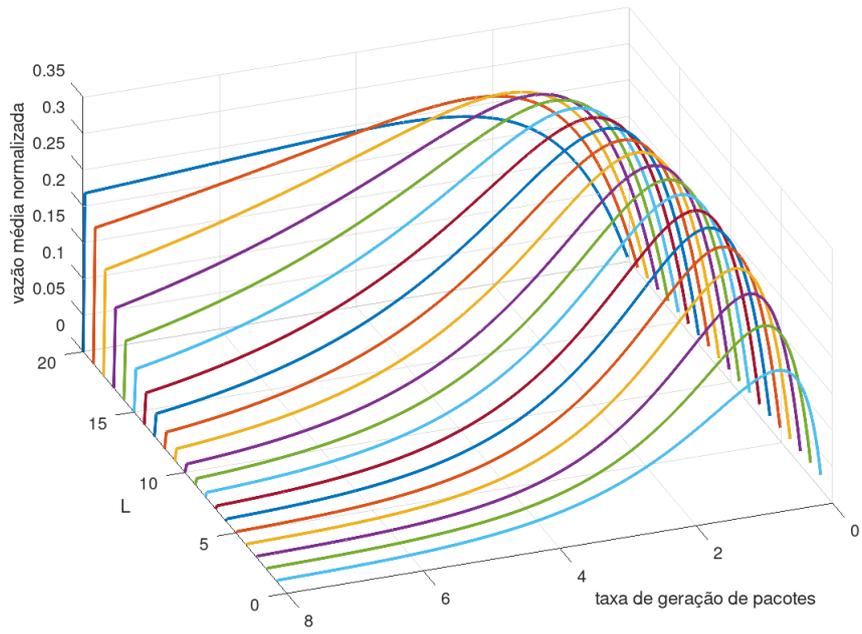
igual ao número de dispositivos conectados à rede. Nesse cenário, percebe-se que a vazão média normalizada é a mesma nos dois modos de operação. Isso ocorre porque o modo HBC perde a vantagem de poder transmitir pacotes no início do próximo ciclo de transmissão de pacotes de dados, uma vez que todos os dispositivos encontram-se descarregados.

A Figura 5.5 mostra o comportamento da vazão média normalizada considerando  $N = 20$ ,  $1 \leq L \leq 20$  e  $0 < \lambda \leq 8$  pacotes/ms em ambos os modos de operação. De fato, a vazão máxima para qualquer valor de  $L$  é dada para uma taxa de geração de pacotes  $\lambda \in (1, 2)$ , independente do modo de operação adotado.

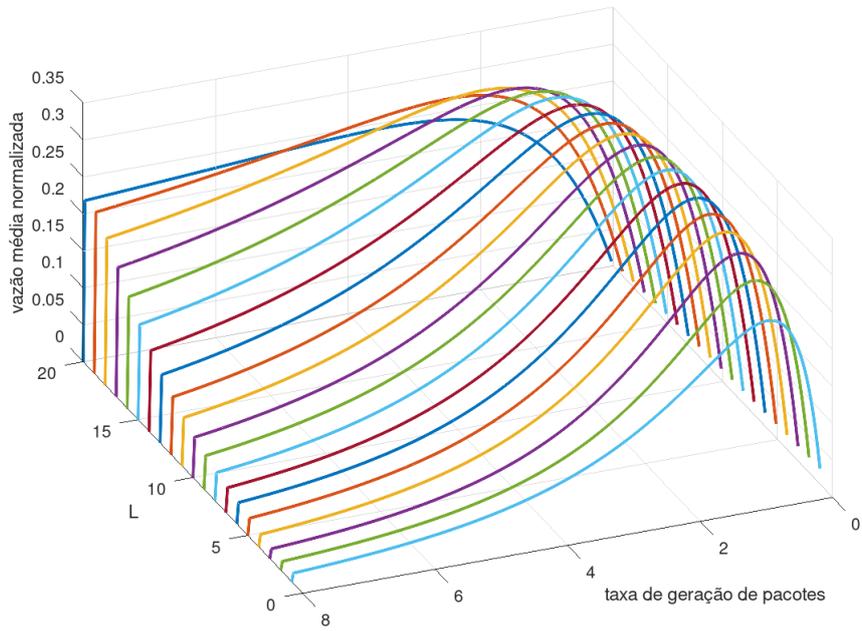
Além disso, a figura evidencia o melhor desempenho do modo HBC sobre um amplo intervalo de taxas, mantendo-se os demais parâmetros constantes. A figura ainda nos mostra que, para cada valor do limiar  $L$ , existe uma taxa agregada ótima  $\lambda^*$  que conduz à vazão máxima. A vazão decresce à medida que a taxa agregada ultrapassa o valor ótimo para todo valor de limiar, entretanto, ela decresce mais lentamente à medida que o valor do limiar aumenta. Assim, para a taxa agregada  $\lambda = 8$  pacotes/s, a vazão máxima alcançada  $S > 0,2$  é obtida para o valor do limiar  $L = 20$ . Por fim, constatamos, também, que existe um valor de limiar ótimo  $L^*$  para uma dada taxa agregada de geração de pacotes.

Até agora, foi possível entender a dinâmica do sistema, o comportamento da vazão média normalizada como uma função de valores de  $L$  sobre um amplo intervalo de taxa agregada de geração de pacotes. Todavia, essa análise foi realizada para um número relativamente baixo de dispositivos. Dessa forma, gostaríamos de ampliar o leque de aplicações e estender nossa análise para um contexto com maior densidade de dispositivos, em um cenário de rede bastante em voga, o da Internet das coisas. Nesse sentido, a Figura 5.6 contempla o desempenho do sistema para uma rede com  $N = 40$  dispositivos, mantendo o período de carregamento com  $C = 1$  pacotes de energia.

Cabe frisar que, embora as taxas de geração de pacotes apresentadas neste novo cenário sejam distintas daquelas anteriormente analisadas com  $N = 20$ , nenhuma das taxas em análise, em ambos cenários, ultrapassa o limiar de vazão  $S = 0,35$ , muito embora notemos uma maior aproximação deste quando aumentamos o número de dispositivos. Dessa forma, concluímos que o aumento do número de dispositivos tem sua parcela de contribuição para o aumento da vazão. A Figura 5.6 fortalece a ideia que o intervalo de taxa geração de pacotes  $1 \leq \lambda \leq 2$  pacotes/ms é o intervalo ótimo. Perceba que para uma taxa qualquer desse intervalo é possível obter desempenhos muito próximos para valores do limiar bem distintos. Por exemplo, na Figura 5.6(a), temos  $S \approx 0.32$  para  $\lambda = 1,2$  pacotes/ms em  $L = 10$  e  $L = 30$ . Isso é muito importante no que diz respeito ao projeto do sistema porque um  $L$  pequeno implica ciclos de transmissão de dados com poucos *slots*. Logo, para um dado período de operação da rede, observamos a ocorrência de muitos ciclos, e conseqüentemente, a transmissão de muitos pacotes de energia pelo HAP. Por outro lado, um  $L$  grande implica ciclos de transmissão de dados com muitos *slots*. Logo, para um dado período de operação da rede, observamos a ocorrência de menos ciclos, e conseqüentemente, a transmissão de menos pacotes de energia pelo HAP. Note também que é possível encontrar uma gama de valores de limiares consecutivos, para os valores de taxas agregadas do intervalo  $1 \leq \lambda \leq 2$  pacotes/ms, para os

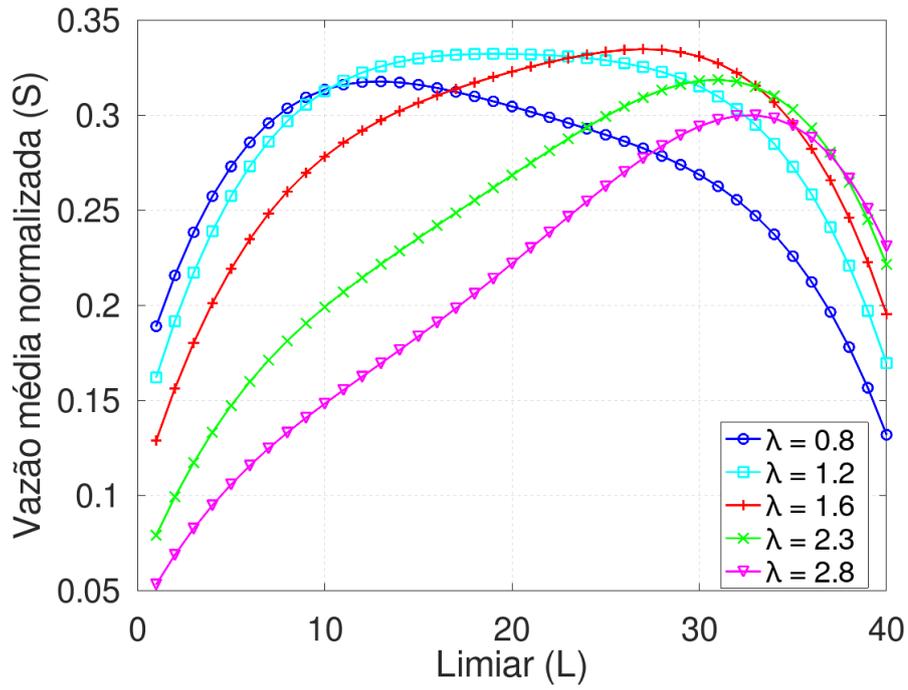


(a)

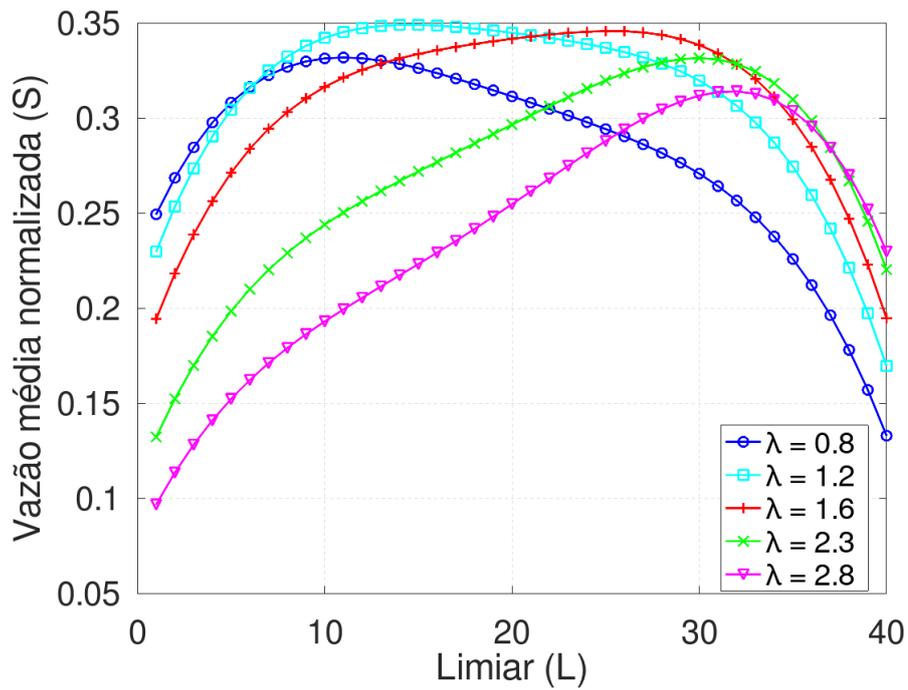


(b)

Figura 5.5: Vazão média normalizada para  $N = 20$ ,  $C = 1$  e  $0 < \lambda \leq 8$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.



(a)



(b)

Figura 5.6: Vazão média normalizada para  $N = 40$  e  $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

quais o desempenho do sistema é praticamente o mesmo. Esse último aspecto é mais acentuado nas taxas mais próximas de 1 pacotes/s em redes com um grande número de dispositivos, o que torna a escolha de  $L$  bastante flexível sem causar maiores impactos no tamanho do ciclo de transmissão de pacotes de dados e na quantidade de energia transmitida pelo HAP.

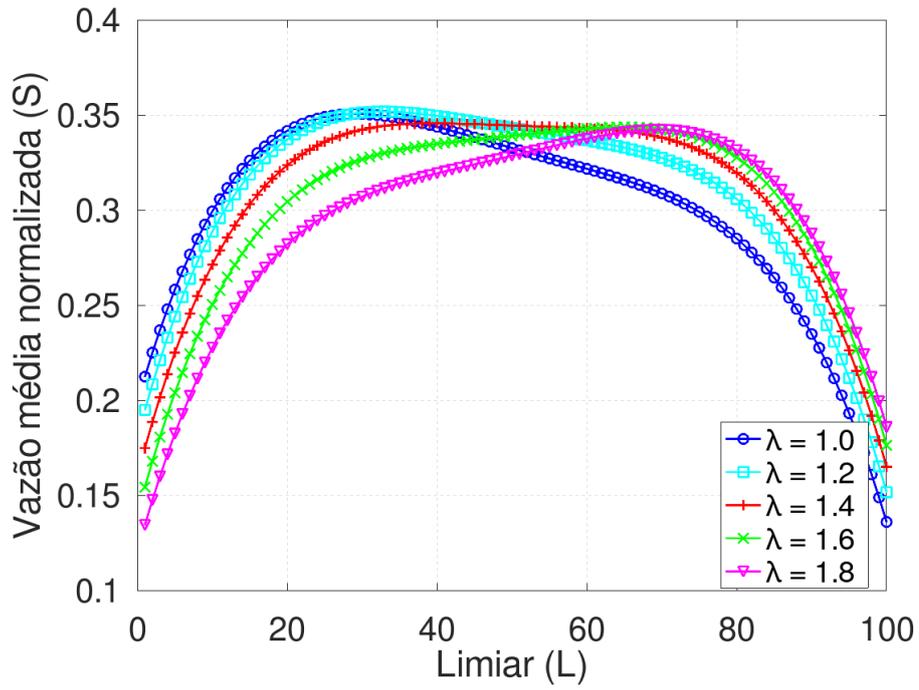
Por fim, a Figura 5.7 ilustra o desempenho do sistema para  $N = 100$  dispositivos com  $C = 1$ . A intenção de estudar esse cenário é extrair o máximo desempenho do sistema considerando uma rede densa, por isso escolhemos traçar as curvas da vazão para taxas do intervalo  $1 \leq \lambda \leq 2$  pacotes/ms. Certamente, o cenário para  $N = 100$  estações chama atenção ao revelar, além de consolidar todos os aspectos elucidados para o cenário com  $N = 40$  nós, valores do limiar  $L$  para os quais  $S > 0.35$ . Portanto, neste cenário com  $N = 100$  estações e  $C = 1$  pacotes de energia, é possível escolher valores de taxa agregada e do limiar para os quais a vazão média normalizada atinge um valor muito próximo ao máximo teórico de 0,368 estipulado pelo protocolo Slotted ALOHA tradicional. Dentre a vasta gama de valores de taxas agregadas simulados, a Tabela 5.1 elenca as taxas e limiares que atingem a maior vazão para redes com número de dispositivos distintos.

Tabela 5.1: Máxima vazão média normalizada ( $S_{max}$ )

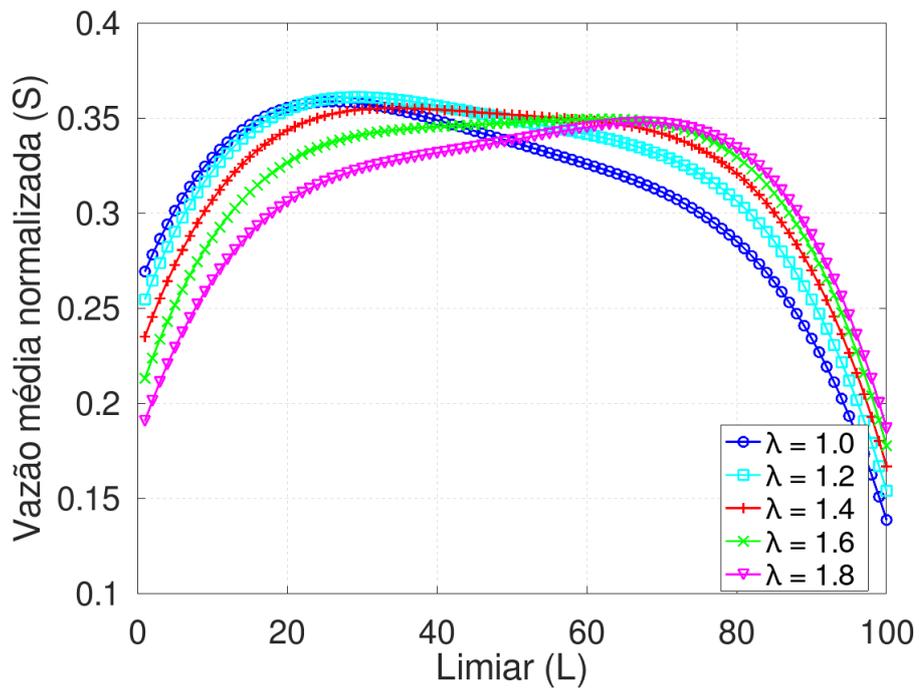
$C = 1$	DBC			HBC		
	$\lambda^*$	$L^*$	$S_{max}$	$\lambda^*$	$L^*$	$S_{max}$
$N = 10$	1.33	7	0.3025	1.41	6	0.3302
$N = 20$	1.39	13	0.3208	1.38	11	0.3412
$N = 30$	1.36	18	0.3301	1.33	15	0.3464
$N = 40$	1.32	22	0.3359	1.31	19	0.3497
$N = 50$	1.33	27	0.3399	1.30	27	0.3519
$N = 100$	1.28	46	0.3497	1.24	39	0.3573

Das taxas pesquisadas,  $\lambda = 1,24$  pacotes/ms foi a que gerou maior vazão,  $S = 0,3573$ , em  $L = 39$ , em uma rede operando em modo HBC com  $N = 100$  estações e período de carregamento  $C = 1$ . Note que em todos os cenários apresentados na tabela, a maior vazão é alcançada para uma taxa agregada próxima ao valor de 1,3 pacotes/ms. Entretanto, os limiares se diversificam conforme o tamanho da rede.

Até então, pouco foi explorado sobre o impacto que a duração do período de carregamento tem sobre a vazão. De fato, sabemos que a vazão tende a cair com a inclusão de mais pacotes de energia no período de carregamento. Pois, quanto mais pacotes de energia o HAP transmite por ciclo, menos *slots* são destinados à transmissão de pacotes de dados. Contudo, é preciso averiguar quão drástica pode ser essa redução na vazão com o aumento da duração do período de carregamento para uma taxa de geração de pacotes fixa. As Figuras 5.8(a) e 5.8(b) mostram o comportamento da vazão para períodos de carregamento distintos, com  $N = 30$  estações e taxa agregada  $\lambda = 0,6$  pacotes/ms, para a rede operando nos modos DBC e HBC, respectivamente. Em ambos os casos, a vazão decresce consideravelmente quando o número de pacotes de energia

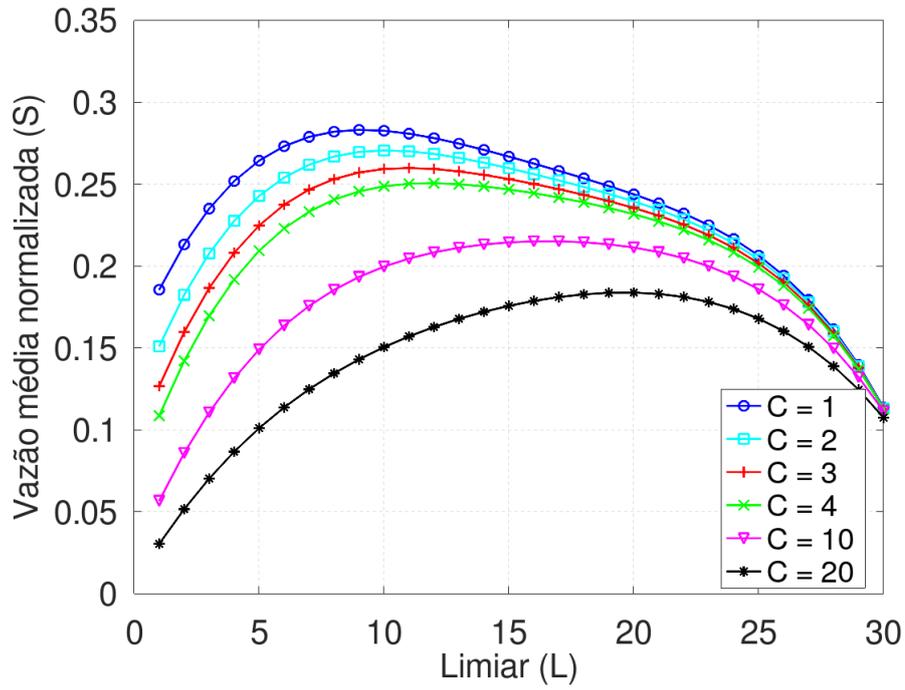


(a)

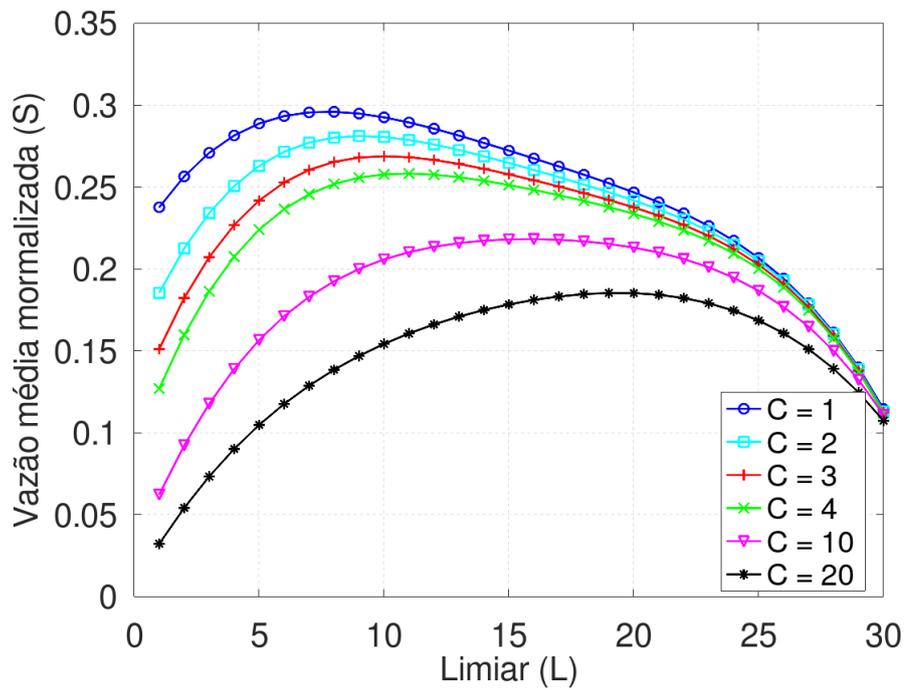


(b)

Figura 5.7: Vazão média normalizada para  $N = 100$  e  $C = 1$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.



(a)

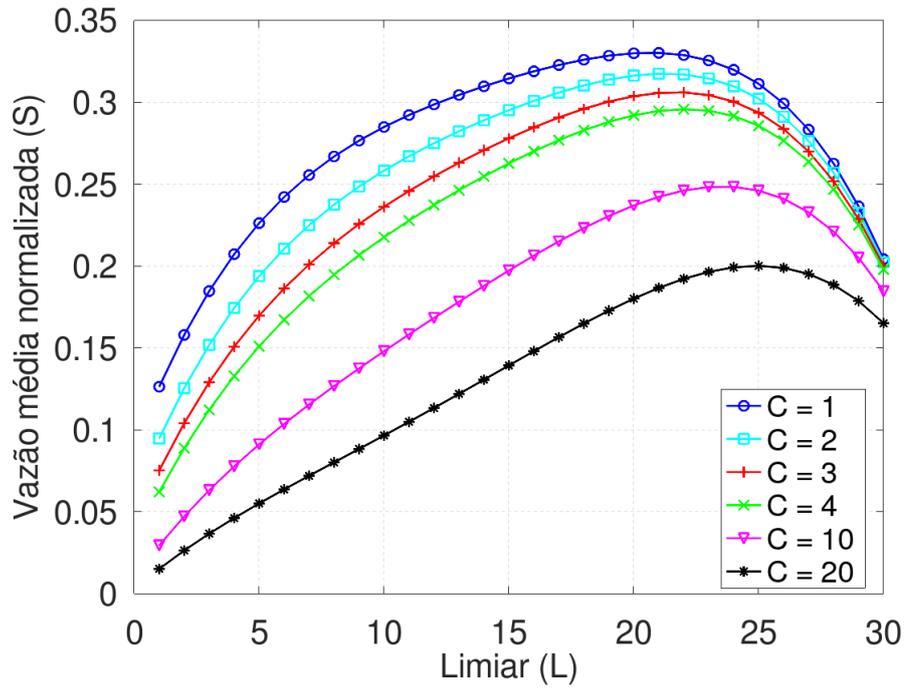


(b)

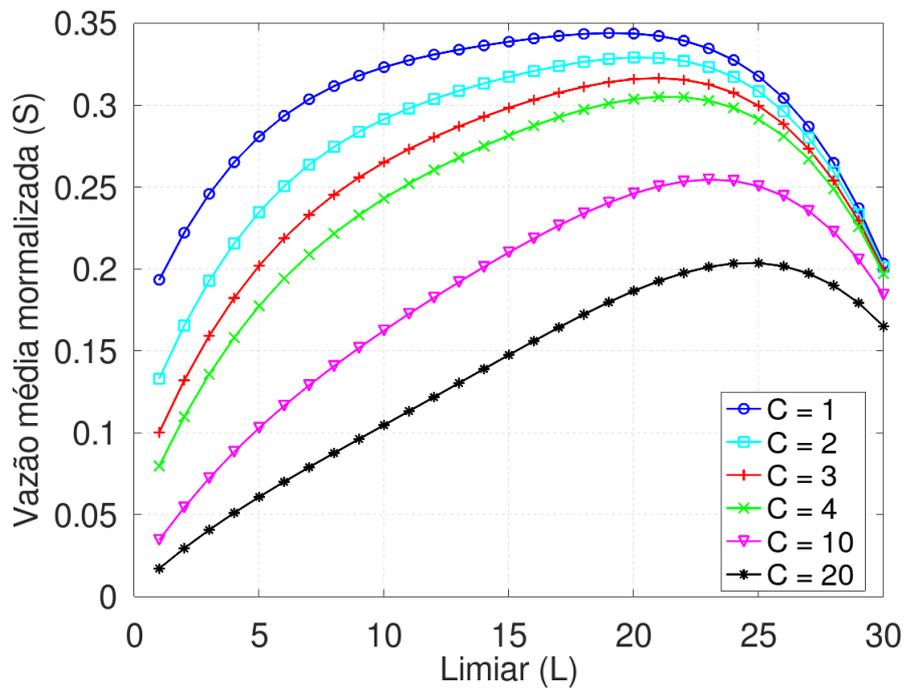
Figura 5.8: Vazão média normalizada para  $N = 30$  e  $\lambda = 0.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

aumenta de  $C = 1$  para  $C = 20$ : a vazão máxima alcançável para os modos de operação DBC e HBC sofrem uma redução de 34,47% e 36,9%. Além disso, o valor de limiar  $L$  que alcança a vazão máxima também aumenta quando o número de pacotes de energia cresce. O valor de limiar ótimo  $L^*$  representa o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados cujo percentual de ocupação do ciclo com *slots* contendo apenas uma transmissão é o maior em relação aos demais valores do limiar. Considerando o valor de limiar ótimo  $L^*$ , quando o número de pacotes de energia cresce, a vazão decresce porque o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados permanece inalterado, portanto, inadequado para a nova quantidade de pacotes de energia do período de carregamento. Dessa forma, o novo ciclo médio de transmissão de dados ótimo, adequado ao novo período de carregamento, precisa ter mais *slots*. Logo, o novo valor de limiar ótimo precisa ser maior que o anterior. Se o novo valor de limiar for menor que o limiar ótimo anterior, o tamanho de ciclo médio de transmissão de dados diminui, e o período de carregamento tem mais impacto na vazão. Sendo assim, o aumento do número de pacotes de energia provoca o aumento do valor de limiar que alcança a vazão máxima. Tendência similar é observada nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b), para  $N = 30$  e  $\lambda = 1.6$  pacotes/ms. De fato, o decaimento da vazão máxima alcançável é até maior: 38,73% e 40,7% para os modos DBC e HBC, respectivamente.

Adiante, as Figuras 5.10(a) e 5.10(b) mostram os resultados quando  $N = 30$  e  $\lambda = 2.6$  pacotes/ms, obtendo a maior redução dentre os três casos: 41,13% e 42,9% para os modos DBC e HBC, respectivamente. Percebe-se que o impacto do número de pacotes de energia na vazão máxima é maior para um tráfego mais intenso. Isso ocorre porque a diferença entre o número médio de transmissões com sucesso por ciclo obtido para o valor de limiar ótimo quando  $C = 20$  e o obtido para o valor de limiar ótimo quando  $C = 1$  decresce à medida que a taxa agregada aumenta. Por exemplo, na Figura 5.8(b), para a taxa agregada  $\lambda = 0,6$  pacotes/ms e  $C = 1$  pacotes de energia, o número médio de transmissões com sucesso por ciclo é de 4,333 pacotes com tamanho médio de ciclo 14,763 *slots* (1 pacote de energia + 13,763 *slots* para transmissão de dados) para o valor do limiar ótimo  $L^* = 7$ . Para a mesma taxa agregada e  $C = 20$  pacotes de energia, o número médio de transmissões com sucesso por ciclo é de 12,9145 pacotes com tamanho médio de ciclo igual a 69,628 *slots* (20 pacotes de energia + 49,628 *slots* para transmissão de dados) no valor do limiar ótimo  $L^* = 19$ . Já na Figura 5.9(b), para a taxa agregada  $\lambda = 1,6$  pacotes/ms e  $C = 1$  pacotes de energia, o número médio de transmissões com sucesso por ciclo é de 6,489 pacotes com tamanho médio de ciclo 18,858 *slots* (1 pacote de energia + 17,858 *slots* para transmissão de dados) para o valor do limiar ótimo  $L^* = 18$ . Para a mesma taxa agregada e  $C = 20$  pacotes de energia, o número médio de transmissões com sucesso por ciclo é de 10,91 pacotes com tamanho médio de ciclo igual a 53,5 (20 pacotes de energia + 33,5 *slots* para transmissão de dados) *slots* no valor do limiar ótimo  $L^* = 25$ . No tráfego menos intenso o valor do limiar ótimo saltou de  $L^* = 7$  para  $L^* = 19$  quando o período de carregamento aumentou de  $C = 1$  para  $C = 20$ . Isso permitiu o aumento do tamanho médio do ciclo de transmissão de dados, e conseqüentemente, o aumento do número de transmissões bem sucedidas. Note que o número médio de transmissões com sucesso triplicou. No tráfego mais intenso o valor do limiar ótimo saltou de  $L^* = 18$  para  $L^* = 25$  quando o período de carregamento aumentou de  $C = 1$  para  $C = 20$ . Isso permitiu o aumento do tamanho médio do ciclo de transmissão de dados, e conseqüentemente, o aumento do número de transmissões bem sucedidas. Porém, menos significativo comparado ao cenário com tráfego menos intenso.



(a)



(b)

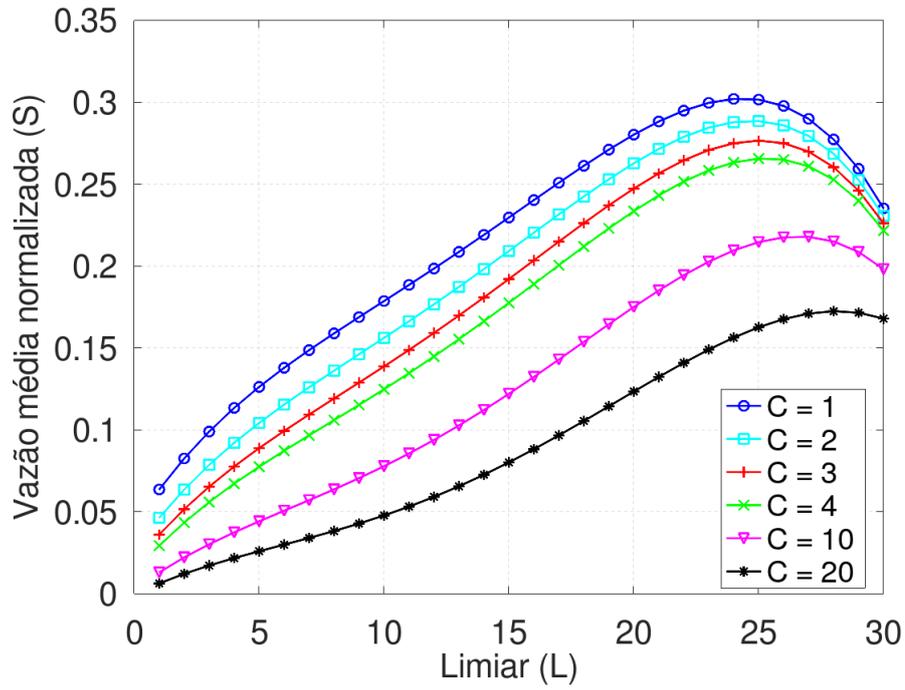
Figura 5.9: Vazão média normalizada para  $N = 30$  e  $\lambda = 1.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

Portanto, o aumento do número de pacotes de energia força o crescimento do valor de limiar ótimo  $L^*$  que implica em um aumento do tamanho médio do ciclo de transmissão de dados. Por sua vez, o aumento do tamanho médio do ciclo de transmissão de dados favorece um aumento mais significativo de transmissões bem sucedidas para um valor de taxa agregada menor, causando uma menor redução na vazão máxima para um cenário com tráfego menos intenso.

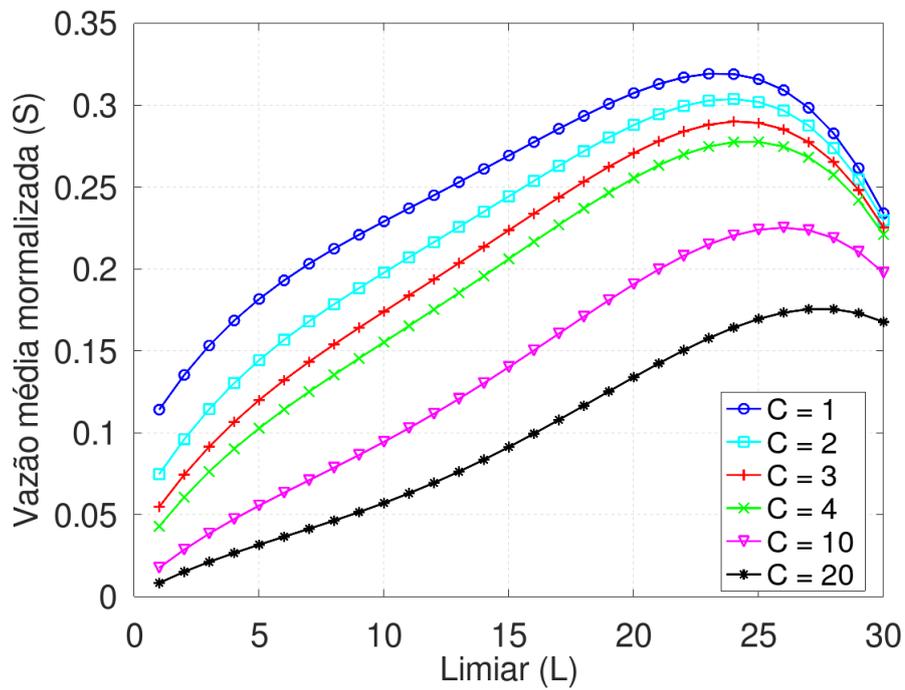
Já constatamos que o aumento do período de carregamento afeta o desempenho do sistema, além de alterar características como o valor do limiar que atinge a vazão máxima para uma dada taxa agregada e um dado número de estações. Entretanto, estamos interessados em saber qual o desempenho do sistema para períodos de carregamento muito maiores que  $C = 20$  pacotes de energia. Estes cenários podem ser considerados em sistemas cujos efeitos de canal sobre o sinal transmitido é muito acentuado. Dessa forma, as Figuras 5.11(a) e 5.11(b) retratam a vazão média normalizada para o conjunto  $\{40, 60, 80, 100\}$  de pacotes de energia considerando uma rede com  $N = 30$  estações e uma taxa agregada  $\lambda = 1.6$  pacotes/ms, para os modos de operação DBC e HBC, respectivamente. A figura consolida a perda de vantagem do modo de operação HBC uma vez que a diferença entre a vazão máxima atingida é insignificante. Dentre todos os cenários apresentados na Figura 5.11(a), a vazão máxima  $S = 0,15064$  ocorre para em  $L = 27$  para o  $C = 40$  pacotes de energia. Do mesmo modo, na Figura 5.11(b), a vazão máxima  $S = 0,1521$  ocorre em  $L = 27$  para  $C = 40$  pacotes de energia. O ganho de desempenho do modo HBC sobre o DBC é de 0,96%. Analisando o cenário específico com  $C = 100$  pacotes de energia, a vazão máxima ocorre para  $L = 29$ , com  $S = 0,0897884$  e  $S = 0,0900617$  nos modos DBC e HBC, respectivamente. Assim, temos que o ganho de desempenho do modo HBC sobre o DBC é de 0,3%. Com isso, temos que a vantagem é quase nula. Além disso, a curva de vazão para  $C = 100$  pacotes de energia já não expressa um nível de vazão considerável, pois  $S < 0,1$ , com uma redução da vazão máxima de 72,63% e 73,83% para os modos de operação DBC e HBC, respectivamente, quando o período de carregamento sobe de  $C = 1$  para  $C = 100$  pacotes de energia.

Analisaremos agora o dispêndio de energia por parte do HAP. Para isso, precisamos entender que a escolha do valor do limiar  $L$ , da taxa de geração de pacotes  $\lambda$  e do modo de operação, DBC ou HBC, influenciam diretamente na quantidade de energia que será transmitida aos nós durante um determinado período de funcionamento da rede com o intuito de mantê-la sustentável. Como já dito anteriormente, para uma dada taxa de geração de pacotes, um limiar pequeno implica em um ciclo médio de transmissão de pacotes de dados com menor duração, pois menos transmissões são necessárias até que o número de dispositivos descarregados atinja ou ultrapasse o limiar, enquanto que para valores de  $L$  grande, é justamente o contrário. A Tabela 5.2 apresenta o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados e o número total de pacotes de energia transmitidos pelo HAP para os dois modos de operação, considerando o número de estações  $N$  e o período de carregamento  $C$  fixos. Os resultados foram obtidos via simulação executada com 1 milhão de *slots* para cada conjunto de parâmetros.

Percebe-se que, para um valor fixo de  $\lambda$ , o tamanho de ciclo médio de transmissão de pacotes de dados tende a aumentar com o crescimento do valor do limiar  $L$ , independentemente do modo de operação. Porém, o número total de pacotes de energia transmitidos sofre uma redução. Por exemplo, para o valor de taxa agregada  $\lambda = 0,5$  pacotes/ms no modo DBC, o tamanho médio

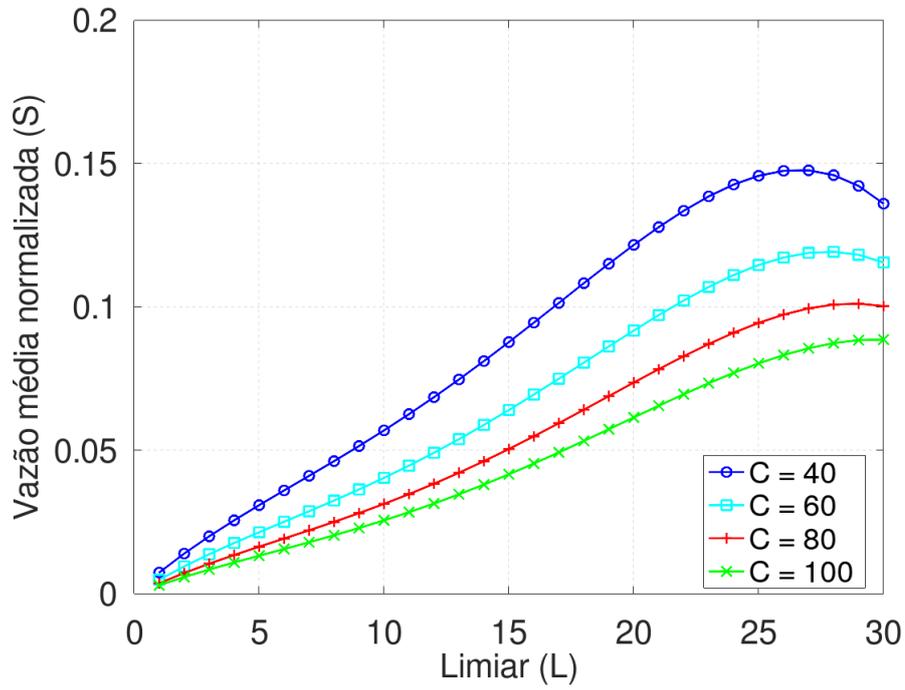


(a)

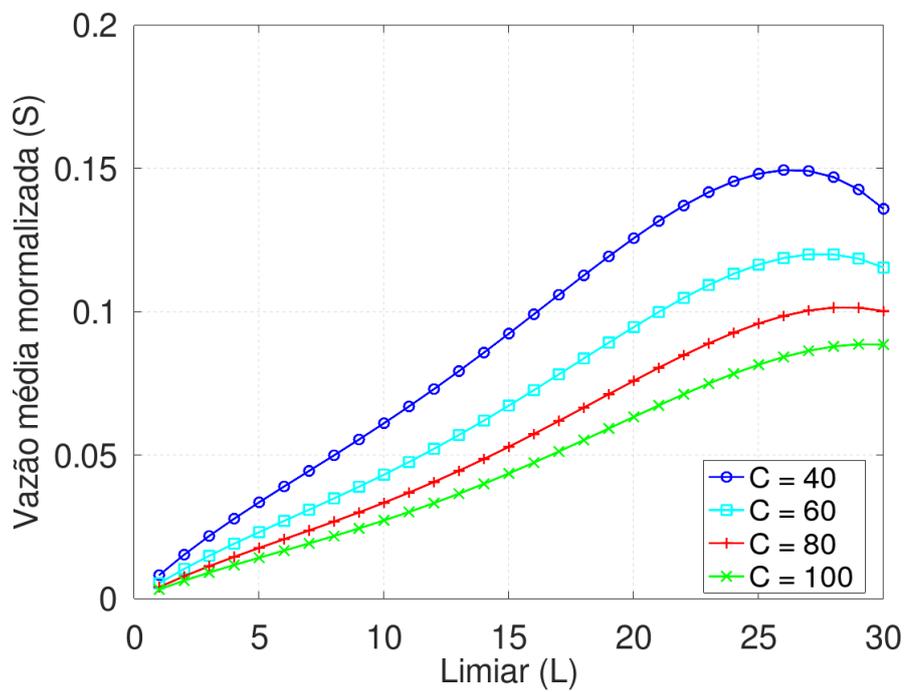


(b)

Figura 5.10: Vazão média normalizada para  $N = 30$  e  $\lambda = 2.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.



(a)



(b)

Figura 5.11: Vazão média normalizada para  $N = 30$  e  $\lambda = 1.6$ . (a) modo DBC, (b) modo HBC.

Tabela 5.2: Tamanho médio de ciclo de transmissão de pacotes de dados (em *slots*) e número total de pacotes de energia transmitidos pelo HAP em um milhão de slots para cada modo de operação com  $N = 40$  e  $C = 1$ .

$N = 40$ $C = 1$	$\lambda = 0,5$ pacotes/ms				$\lambda = 1,4$ pacotes/ms			
	DBC		HBC		DBC		HBC	
$L = 5$	12.04	76663	11.18	82094	5.26	159599	4.40	184867
$L = 10$	24.18	39715	23.41	40961	9.6	94292	8.85	101430
$L = 15$	38.43	25355	37.93	25684	14.74	63511	14.09	66266
$L = 20$	56.04	17530	55.61	17663	20.95	45542	20.44	46631
$L = 25$	78.47	12583	77.72	12702	28.92	33417	28.59	33789
$L = 30$	109.47	9089	109.22	9083	40.10	24329	39.82	24492

de ciclo de transmissão de dados aumenta de 38,43 para 78,47 *slots* quando o valor do limiar passa de  $L = 15$  para  $L = 25$ , enquanto o número médio de pacotes de energia reduziu de 25.355 para 12.583 pacotes, considerando os mesmos valores de limiar. Por outro lado, note que, em um modo de operação específico com um limiar fixo, o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados e o número total de pacotes de energia são, respectivamente, inversamente e diretamente proporcionais à taxa de geração de pacotes. Por exemplo, para o valor do limiar  $L = 10$  no modo HBC, o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados diminui de 23,41 para 8,85 *slots* quando a taxa agregada aumenta de 0,5 para 1,4 pacotes/ms. Enquanto que o número médio de pacotes de energia aumentou de 40.961 para 101.430 pacotes de energia transmitidos pelo HAP.

A tabela nos mostra ainda que o ciclo médio de transmissão de pacotes de dados é menor no modo HBC mas que tende a se igualar ao DBC à medida que  $L$  cresce. Isso é natural, pois devemos lembrar que quando  $L = N$  os modos de operação são equivalentes. O mesmo acontece para o número total de pacotes de energia. Entretanto, à medida que o valor de limiar decresce o modo de operação HBC demanda mais energia do HAP. Por exemplo, para  $L = 5$  e  $\lambda = 1,4$  pacotes/ms o modo HBC exige 15,83% a mais de energia do que o DBC.

Por fim, podemos utilizar as Eqs. (3.28) e (3.31) para encontrar o tamanho médio de ciclo e o número médio de pacotes de energia enviados pelo HAP durante um determinado tempo de operação da rede. Por exemplo, da Tabela 5.2, podemos considerar o modo de operação DBC com  $\lambda = 0,5$  pacotes/ms e  $L = 15$ , em que o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados e o número total de pacotes de energia transmitidos pelo HAP são 38,43 *slots* e 25.355 pacotes de energia respectivamente. Enquanto que os valores obtidos pelas Eqs. (3.28) e (3.31) foram 38,507 *slots* e 25.311 pacotes de energia respectivamente.

Em outro exemplo da Tabela, podemos considerar o modo de operação HBC com  $\lambda = 1.4$  pacotes/ms,  $L = 10$ , em que o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados e o número total de pacotes de energia transmitidos pelo HAP são 8,85 *slots* e 101.430 pacotes de energia respectivamente. Enquanto que os valores obtidos pelas Eqs. (3.28) e (3.31) foram 8,86 *slots* e

101.336 pacotes de energia respectivamente.

Note que a Tabela apresenta resultados simulados considerando apenas uma realização com um milhão de *slots*, enquanto as Eqs. (3.28) e (3.31) apresentam os valores para os quais o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados e o número médio de pacotes de energia convergem quando observamos o sistema por um longo período de funcionamento. Dessa forma, à medida que aumentamos o número de *slots* na simulação, mais os resultados simulados se aproximam do modelo teórico.

## Capítulo 6

# Avaliação de Desempenho com Camada Física

### 6.1 Introdução

Neste capítulo avaliamos o desempenho da rede considerando aspectos da camada física. Baseado no modelo de canal da Eq. (4.1), analisamos o impacto dos efeitos de propagação de canal no carregamento energético e na estimação de colisão, via simulações Monte Carlo. Nesse contexto, os dispositivos coletam a energia dos sinais de RF durante um período de carregamento definido pela Eq. (4.8). Além disso, o HAP estima o número de transmissões simultâneas em um *slot* com colisão utilizando o estimador de máxima verossimilhança obtido a partir das Eqs. (4.17) e (4.24) para as topologias aleatória e em anel, respectivamente.

Além da rotina principal, que simula a política de acesso das estações ao canal de acordo com o protocolo MAC Slotted ALOHA, implementamos mais duas rotinas auxiliares. A primeira simula a quantidade de energia que cada dispositivo coleta a cada pacote de energia transmitido pelo HAP durante o período de carregamento. Essa rotina é chamada pela rotina principal sempre que o número de tentativas de transmissão ultrapassa o valor do limiar estipulado. Já a segunda rotina auxiliar executa o procedimento para estimar o número de transmissões simultâneas sempre que o HAP detecta um *slot* com colisão. O uso dessas técnicas causa um impacto no comportamento do sistema porque nem todas as estações podem alcançar o nível de energia desejado após o período de carregamento, permanecendo em estado de dormência, assim como o HAP pode realizar estimativas incorretas.

As rotinas funcionam independentemente, de modo que podemos realizar uma simulação considerando apenas uma das rotinas. Por exemplo, podemos estar interessados em avaliar apenas o impacto da coleta de energia na vazão do sistema. Dessa forma, a rotina responsável pela estimação de colisão não é executada, portanto, o HAP sabe exatamente o número de transmissões em colisão. Da mesma forma, podemos avaliar apenas o impacto da técnica de estimação do número de transmissões simultâneas e considerar que todos os dispositivos encontram-se completamente carregados após o período de carregamento.

Nas análises deste capítulo, comparamos resultados de medidas de desempenho obtidos via simulação considerando os efeitos de propagação de canal com resultados obtidos para o caso ideal via modelo analítico (Capítulo 5). Lembramos que o caso ideal não considera os efeitos de propagação de canal. Sendo assim, o caso ideal assume que o número de pacotes de energia escolhido para o período de carregamento é suficiente para recarregar todas as estações após a transmissão do período de carregamento. Além disso, o caso ideal assume que todas as colisões são estimadas corretamente pelo HAP. A ideia por trás dessa comparação é a seguinte: se um sistema considera os efeitos de propagação de canal e garante o carregamento de todos os dispositivos após um período de carregamento com  $C$  pacotes de energia, e utilizando um dado método de estimação do número de transmissões simultâneas estima corretamente o número de transmissões envolvendo todas as colisões, este sistema terá um comportamento igual ao caso ideal para um período de carregamento com  $C$  pacotes de energia.

A realização das simulações considerando aspectos da camada física exige a definição de parâmetros mais específicos, como a potência de transmissão das estações e do HAP, a duração do tempo de *slot*, frequência de operação, ganhos de antena, fator de eficiência do conversor de energia, entre outros. As seções seguintes avaliam o desempenho do sistema considerando aspectos da camada física comparando-o com o desempenho alcançado pelo sistema sem os efeitos de canal, ou seja, considerando que todos os dispositivos são completamente recarregados após o período de carregamento ou/e que o HAP estima corretamente o número de transmissões simultâneas em todo *slot* com colisão. Além disso, consideramos o tempo de propagação  $T_{prop}$ , o tempo de processamento  $T_{proc}$ , e a duração do sinal de despertar  $T_w$  desprezíveis. Portanto,  $T_{trans} = T_{slot}$ .

## 6.2 Eficiência do método de coleta de energia

A coleta de energia visa manter os nós da rede operantes por muito mais tempo, aumentando o tempo de vida da rede e reduzindo os custos de manutenção. Um método para coletar energia nada mais é do que uma política, incorporada ao protocolo de comunicação, que deve ser seguida pelos dispositivos, especificando sob que condições ou em quais momentos essa coleta pode ser realizada, uma vez que os dispositivos sejam capacitados para isso. Neste trabalho, adotamos a técnica de comutação no tempo, que consiste em alternar o uso da antena do dispositivo entre um período no modo de transmissão de dados e outro no modo de recepção a fim de coletar energia. Como os dispositivos aqui apresentados possuem restrição de energia, sendo capazes de gerar e transmitir apenas um pacote entre recargas, é necessário que a escolha do período de carregamento seja adequada para que os dispositivos descarregados possam voltar a operar após a recepção dos  $C$  pacotes de energia. Nesta seção, a fim de avaliar a técnica, vamos considerar que o HAP estima, de forma ideal, o número de transmissões em um dado *slot*. Como os erros no canal só ocorrem como resultado de duas ou mais transmissões no mesmo *slot*, o HAP consegue distinguir entre uma transmissão bem sucedida e uma colisão. Entretanto, a estimação correta do número de transmissões por *slot* é irrelevante para esta análise, uma vez que estamos preocupados apenas com o impacto do carregamento das estações na vazão do sistema. Isto é, se as estações foram ou não carregadas após a transmissão dos  $C$  pacotes de energia. Dessa forma, não nos interessa

quando o período de carregamento ocorreu.

A Tabela 6.1 enumera os parâmetros fixos do sistema utilizados nas simulações. Os valores dos parâmetros adotados são típicos para aplicações em cenários com transferência de energia em redes de sensores que utilizam protocolos MAC como Slotted ALOHA ou CSMA/CA. Os valores para a potência de transmissão do HAP, do expoente de perda de percurso, da distância de referência, e dos ganhos da antena transmissora e receptora foram baseados nos trabalhos [9], [16]. A frequência de operação de 900 MHz tem sido adotada em cenários com transferência de energia devido ao aumento da eficiência na coleta de energia [7], principalmente pela indústria [30]. A potência de transmissão da estação está de acordo com a potência utilizada em dispositivos sensores [31]. O tempo de duração de *slot* é o mesmo adotado pelo protocolo Frame Slotted ALOHA em [8], [23]. O fator de eficiência escolhido está de acordo com os dispositivos desenvolvidos pela indústria especializada para aplicações com transferência de energia [30]. Para a realização das simulações, a energia de operação foi definida como  $E_{pac} = P_{no}T_{slot}$ .

Tabela 6.1: Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor
Potência de Transmissão do HAP $P_{TX}^H$	30 dBm
Potência de Transmissão do nó ( $P_{no}$ )	-10 dBm
Frequência de operação ( $f$ )	900 MHz
Ganho de antena ( $G_t, G_r$ )	5 dBi
Duração do slot de tempo	1 ms
Expoente de perda de percurso ( $\alpha$ )	3
Distância de Referência ( $d_0$ )	1 m
Fator de eficiência na conversão de energia ( $\eta$ )	0,8
Energia de operação da estação ( $E_{pac}$ )	0,1 $\mu$ J
Limiar de probabilidade ( $\zeta$ )	0,99

Note que a frequência de operação é um parâmetro fundamental no projeto de redes com transferência de energia por sinais de RF. Neste cenário, sistemas com frequências abaixo de 1GHz coletam mais energia, pois os sinais transmitidos sofrem uma menor atenuação em frequências mais baixas, proporcionando um ganho substancial na coleta de energia [30]. Certamente, outro fator essencial é a distância, que influencia diretamente na perda de potência média do sinal. Além disso, a caracterização de um canal mais severo, com expoente de perda de percurso elevado, é outro ponto negativo para o recarregamento dos dispositivos. Assim, considerando aspectos da camada física retratados no Capítulo 4, a sustentabilidade energética é alcançada com alta probabilidade quando o dispositivo mais afastado do HAP coleta uma quantidade de energia igual ou superior à energia de operação  $E_{pac}$  durante um período de carregamento. O HAP utiliza a Eq. (4.8) para determinar o número  $C$  de pacotes de energia que deve compor o período de carregamento. O cálculo é realizado previamente a partir do conhecimento dos parâmetros do sistema, e da distância do dispositivo mais afastado.

A Tabela 6.2 indica qual a quantidade mínima de pacotes de energia sucessivos que deve compor o período de carregamento para que o dispositivo mais afastado  $u$  seja totalmente recarregado com probabilidade maior que  $\zeta = 0,99$ . O número de pacotes de energia foi obtido usando a Tabela 6.2: Menor período de carregamento com garantia de sustentabilidade energética considerando os parâmetros da Tabela 6.1.

$d_u$ (metros)	$f = 900\text{MHz}$	$f = 2.4\text{GHz}$
3	4(0.998)	9(0.9914)
5	7(0.9921)	27(0.9935)
8	18(0.9940)	85(0.9908)
10	29(0.9910)	154(0.9902)

Eq. (4.8) para os parâmetros da Tabela 6.1. O termo fora do parênteses indica o número de pacotes de energia, enquanto o termo entre parênteses expressa a probabilidade de carregamento do dispositivo mais afastado para o número de pacotes de energia obtido, considerando a distância  $d_u$  do nó mais afastado do HAP. A quantidade de pacotes de energia necessária para alcançar o limiar de probabilidade  $\zeta$  proposto é muito maior para frequência de operação de 2.4 GHz. Como dito anteriormente, um sinal transmitido em uma frequência mais alta sofre maior atenuação, logo, o período de carregamento deve ser maior para garantir o carregamento do dispositivo mais afastado para o limiar de probabilidade estabelecido.

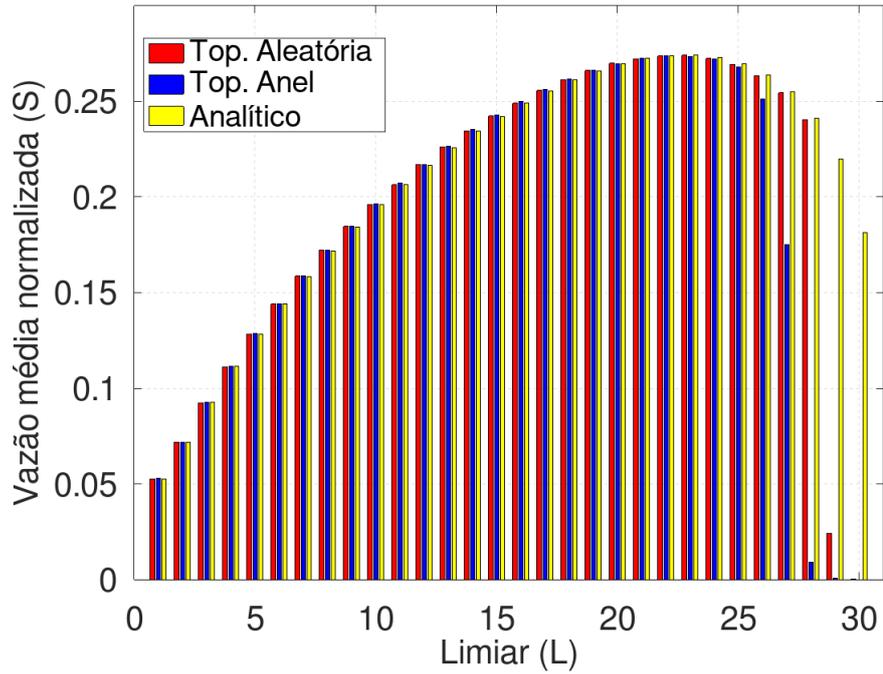
Existe um problema inerente à natureza do nosso sistema que envolve o carregamento dos dispositivos e a contagem do número acumulado de tentativas de transmissão no canal realizada pelo HAP quando o limiar de probabilidade estabelecido é  $\zeta < 1$ . Note que é mais difícil carregar as estações na topologia em anel do que na aleatória, pois todos os dispositivos estão a uma mesma distância do HAP. Muito embora o período de carregamento escolhido garanta o recarregamento dos dispositivos com alta probabilidade, ainda há uma incerteza associada ao carregamento. Dessa forma, após um período de carregamento qualquer, existe a possibilidade da quantidade de energia coletada por algumas estações ser menor que a quantidade de energia necessária para entrar em modo ativo, principalmente na topologia em anel. Assim, alguns dispositivos podem iniciar um novo ciclo de transmissão de dados ainda em modo de dormência, e isso pode afetar o funcionamento da rede. Perceba que o HAP considera que todos os dispositivos encontram-se ativos no início do ciclo de transmissão de dados, mas, na realidade, isso pode não acontecer. Assim, se o número de dispositivos for menor que  $N$ , a contagem do número acumulado de transmissões pode não atingir um dado valor de limiar. Por exemplo, em um caso extremo, o cenário em que  $L = N$ , se apenas um dispositivo não estiver recarregado após o período de carregamento, a contagem do HAP nunca alcançará o valor do limiar  $L = N$ . Pois, uma vez que o HAP estime corretamente o número de transmissões em todos os *slots*, ele contará apenas  $N - 1$  estações. Então, o HAP aguardará indefinidamente por uma transmissão com o intuito de que sua contagem atinja o valor de limiar, entretanto, todas as estações já se encontrarão descarregadas. Esse problema conduz à completa ociosidade da rede. Quanto menor o limiar de probabilidade  $\zeta$  estabelecido, maior

o número de estações que não alcançam o recarregamento após a transmissão dos pacotes de energia. Conseqüentemente, a vazão média normalizada tende a diminuir quando comparada à vazão obtida no modelo analítico (caso ideal), pois uma premissa básica do modelo analítico é que todas as estações são recarregadas após o período de carregamento determinado.

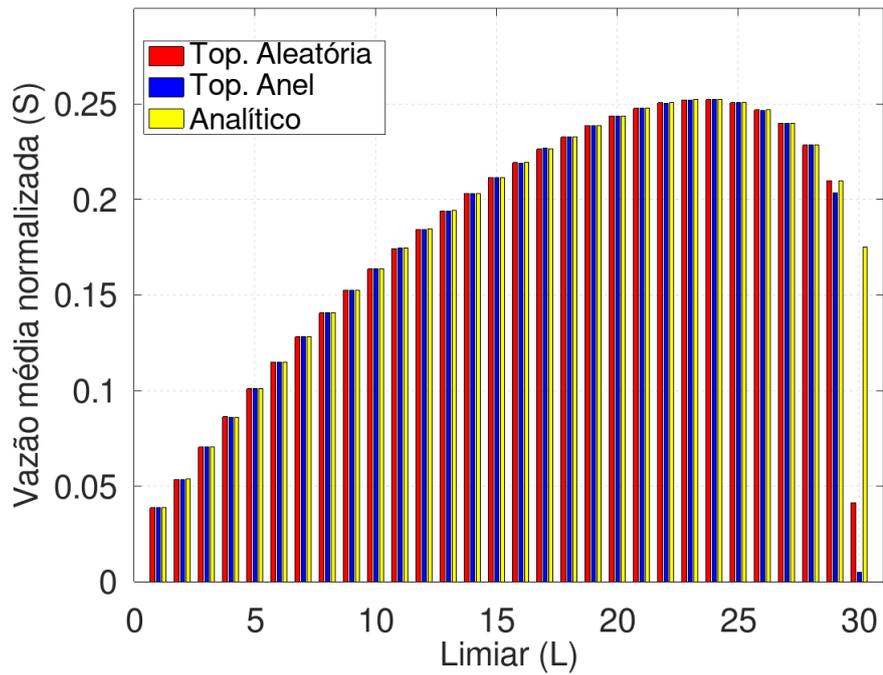
Dessa forma, queremos comparar a vazão média normalizada para dois valores distintos de número de *slots* de carregamento, mantendo-se os demais parâmetros. Além disso, para cada período de carregamento, temos interesse em comparar a vazão média normalizada obtida para três cenários: Topologia aleatória e em anel considerando aspectos da camada física no canal de descida, e o caso ideal. Perceba que, para o caso ideal, é irrelevante a topologia, pois assume-se que todas as estações encontram-se recarregadas após o período de carregamento. Dessa forma, pouco importa a disposição das estações. Além disso, assumimos que o HAP estima corretamente o número de transmissões em um dado slot nos três cenários em análise. Os valores de vazão média normalizada do caso ideal foram obtidos via modelo analítico, uma vez que este mostrou-se bastante acurado. Já os valores de vazão, considerando aspectos da camada física no canal de descida para a topologia aleatória e em anel, foram obtidos via simulação.

A Figura 6.1(a) compara a vazão média normalizada entre o caso ideal obtida via modelo analítico para  $C = 7$  pacotes de energia e a obtida via simulações Monte Carlo para a topologia aleatória e em anel considerando os efeitos de propagação no canal de descida, tendo em vista o conjunto de parâmetros da Tabela 6.1 com período de carregamento  $C = 7$  pacotes de energia, de acordo com a Tabela 6.2 para  $d_u = 5$  metros. Como estamos interessados em avaliar o impacto do carregamento em um cenário com alto desempenho, assumimos a rede operando no modo HBC, com  $N = 30$  e  $\lambda = 1.6$  pacotes/ms. Note que, como dimensionamos a duração do tempo de *slot* em 1ms, a taxa agregada deve estar de acordo com a unidade de tempo. Para a topologia aleatória, as distâncias dos dispositivos foram geradas de acordo com uma distribuição uniforme dentro do intervalo  $(1, 5)$ , sendo que apenas um dispositivo foi fixado, propositadamente, a uma distância de 5 metros do HAP. Para cada topologia foram realizadas 10 simulações com um milhão de slots. A Figura 6.1(b) compara os resultados de vazão para um cenário que difere do anterior apenas no período de carregamento, agora com  $C = 10$  pacotes de energia, cuja probabilidade de recarregamento do dispositivo mais afastado é igual a 0,99989.

Na Figura 6.1(a), em ambas as topologias, a figura revela que o número de pacotes de energia obtido para compor o período de carregamento permite ao sistema atingir a vazão estabelecida pelo modelo analítico em mais de 80% dos limiares, se não, muito próxima. Como o limiar de probabilidade  $\zeta = 0,99$  é alto, o número de estações que não alcançam o recarregamento é pequeno, e assim, não afeta o desempenho da rede para a maioria dos limiares. Sendo assim, a vazão média normalizada, tanto na topologia em anel, quanto na aleatória, atingem o patamar da vazão obtida no modelo analítico. Entretanto, para  $L \geq 26$  já é possível perceber um decaimento mais acentuado da probabilidade de transmissão com sucesso na topologia em anel, enquanto que, na topologia aleatória, verifica-se apenas para  $L \geq 29$ . Isso decorre do problema relacionando ao carregamento e à contagem do número acumulado de transmissões no canal citado anteriormente. Para algumas simulações, a contagem realizada pelo HAP não atinge o valor de limiar do cenário em um dado ciclo de operação. Dessa forma, o HAP aguarda por transmissões, mas não há mais dispositivos



(a)



(b)

Figura 6.1: Comparação dos desempenhos considerando diferentes topologias com  $N = 30$ ,  $\lambda = 1.6$  pacotes/ms para os parâmetros da tabela 6.1 com  $f = 900\text{MHz}$  e  $d_u = 5$  m no modo HBC. (a)  $C = 7$ , (b)  $C = 10$ .

ativos na rede. Assim, o ciclo de operação prossegue com *slots* ociosos até o fim da simulação. Portanto, a vazão média normalizada diminui. Então, a vazão vai ser tão menor quanto menos ciclos ocorrerem antes do ciclo em que a contagem do HAP não atinge o valor do limiar. Este efeito é maior à medida que o valor do limiar se aproxima de  $N$ , e mais acentuado na topologia em anel. Como todas as estações estão a uma mesma distância do HAP, elas têm a mesma probabilidade de recarregamento. Por outro lado, na topologia aleatória, apenas uma estação está à distância limite, enquanto as demais se encontram mais próximas. Consequentemente, as estações mais próximas tem maior probabilidade de recarregamento. Portanto, a figura revela uma discrepância enorme dos valores de vazão obtidos para ambas as topologias com relação ao modelo analítico para os limiares  $L \geq 29$ . Note que, no caso extremo  $L = 30$ , a vazão atingida em ambas topologias é praticamente zero. Isso indica que em todas as simulações realizadas para uma dada topologia, o ciclo em que a contagem do HAP não atinge o valor de limiar ocorreu muito próximo do início da simulação.

Na Figura 6.1(b) a análise se repete para um período de carregamento maior, com  $C = 10$  pacotes de energia, mantendo-se os demais parâmetros da figura anterior. Primeiramente, o aumento do ciclo de carregamento aumenta a probabilidade de carregamento da estação mais afastada do HAP, atingindo o valor de 0,99989. Isso indica que mais estações alcançam o carregamento após a transmissão dos  $C = 10$  pacotes de energia. Assim a figura nos mostra que até o valor de limiar  $L = 28$  ambas as topologias atingem a mesma vazão que o modelo analítico (caso ideal). Mais especificamente, a topologia aleatória atinge o mesmo valor de vazão que o modelo analítico até o valor de limiar  $L = 29$ . Além disso, o efeito das estações que não atingem o carregamento após a transmissão dos  $C = 10$  pacotes de energia, passa a ser relevante para os valores de limiar  $L \geq 29$  na topologia em anel, e somente para  $L = 30$  na topologia aleatória.

O aumento do número de pacotes de energia no período de carregamento aumenta a probabilidade de recarregamento das estações, e, consequentemente, o funcionamento da rede para valores de limiar mais altos. Entretanto, impõe uma diminuição na vazão. Para o conjunto de parâmetros adotados, o período de carregamento composto por  $C = 14$  pacotes de energia garante o recarregamento do dispositivo mais afastado com probabilidade 1. Portanto, para este período de carregamento, ambas as topologias alcançam a vazão média normalizada estabelecida pelo modelo analítico para todos os valores de limiar.

### 6.3 Métodos de estimação do número de transmissões simultâneas

Esta seção visa avaliar o método de estimação do número de transmissões simultâneas e seu impacto no desempenho do protocolo Slotted ALOHA com transferência de energia para as topologias em Anel e Aleatória, realizando simulações Monte Carlo. Primeiramente, avaliamos a técnica de estimação do número de transmissões simultâneas considerando os efeitos de propagação apenas no canal de subida e o carregamento energético ideal das estações, ou seja, em que todos os dispositivos conseguem recarregar suas baterias após o período de carregamento. Posteriormente, analisamos um cenário considerando os efeitos de propagação, tanto no canal de subida, quanto no

canal de descida. Assim, impactando as estimações e o carregamento respectivamente. Note que existe a possibilidade de erro de estimação do número de transmissões simultâneas pelo HAP ao utilizar o método de estimação. Portanto, o HAP pode decidir erroneamente quando a contagem do número acumulado de transmissões no canal atinge o valor do limiar  $L$ . Por exemplo, se o método de estimação subestimar demais, ou seja, decidir que uma dada colisão foi gerada por um número de transmissões simultâneas menor do que aquele que de fato ocorreu, o tempo que decorre até o contador do número acumulado de transmissões do HAP atingir o valor do limiar  $L$  aumenta comparado ao tempo encontrado usando o método de estimação ideal, ou seja, aquele que o HAP estima corretamente o número de transmissões em todo *slot* com colisão. Isso significa que o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados aumenta com a utilização do método de estimação. Por outro lado, se o método de estimação superestimar demais, isto é, decidir que uma dada colisão foi gerada por um número de transmissões simultâneas maior do que aquele que de fato ocorreu, o tempo que decorre até o contador do número acumulado de transmissões do HAP atingir o valor do limiar  $L$  diminui comparado ao tempo encontrado usando o método de estimação ideal. Nesse caso, isso significa que o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados diminui com a utilização do método de estimação.

Além disso, nos cenários em que consideramos aspectos da camada física, tanto na técnica de estimação do número de transmissões simultâneas, quanto no carregamento, o problema torna-se mais complexo. Nesses cenários, ocorrem erros de estimação do número de transmissões simultâneas e, caso o limiar de probabilidade estabelecido seja  $\zeta < 1$ , existe a probabilidade de estações não alcançarem o nível de energia necessário após o período de carregamento.

A fim de garantir a confiabilidade dos resultados apresentados nas seções a seguir, utilizamos o conceito de intervalo de confiança. Utilizando a distribuição de probabilidade “ $t$ ” de Student podemos calcular o intervalo de confiança para um dado conjunto de amostras para um nível desejado de confiança. Para um pequeno número de amostras o intervalo de confiança pode ser dado por

$$I = \bar{x} \pm t_{[(1-\alpha)/2, a-1]} \frac{s}{\sqrt{a}}, \quad (6.1)$$

em que  $\bar{x}$  é a média das amostras,  $\alpha$  é o nível de significância (para um nível desejado de confiança de 95%,  $1 - \alpha = 0.95$ ),  $s$  é o desvio padrão das amostras,  $a$  a o número de amostras e  $t$  o valor extraído da tabela da distribuição “ $t$ ” de Student.

### 6.3.1 Topologia em Anel

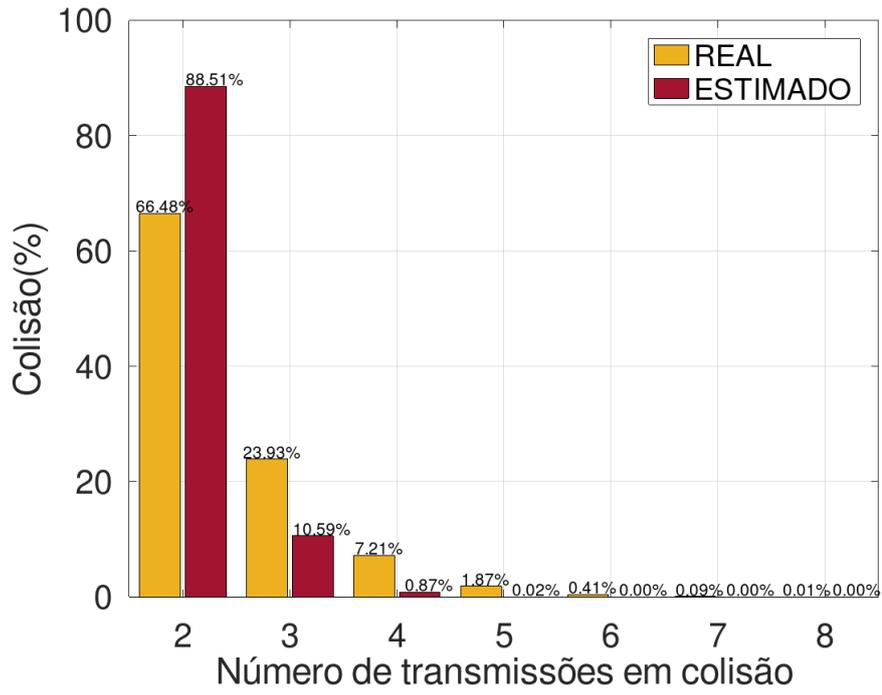
A topologia em anel considera que os dispositivos estão fixados na borda da circunferência de raio  $d_u$ . Como assumimos que não há erros de transmissão e, portanto, todo pacote transmitido sozinho no slot é decodificado corretamente, HAP consegue discernir facilmente entre um pacote transmitido com sucesso e uma colisão. Porém, o desafio consiste em estimar o número de transmissões envolvidas em uma dada colisão. Utilizamos o método de estimação de máxima verossimilhança para encontrar o número de transmissões simultâneas no canal, como apresentado na Eq. (4.24). O método consiste em encontrar o número  $m$  de transmissões simultâneas que maximiza a função densidade de probabilidade  $f(m|y, n)$  em um dado *slot* com colisão, dada a potência

do sinal  $y$  recebido pelo HAP e o número  $n$  de dispositivos descarregados (até então estimados pelo HAP).

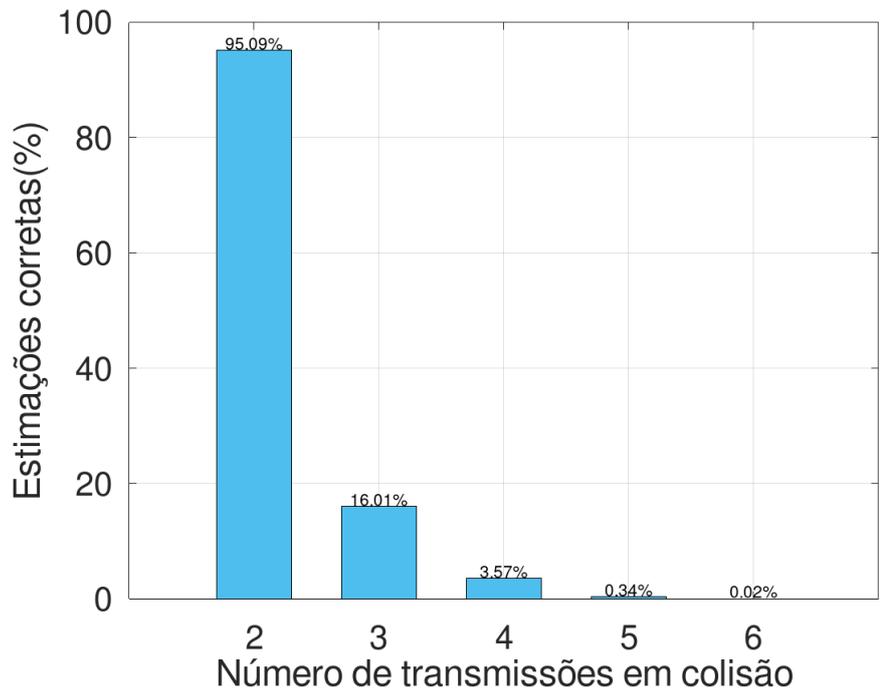
O conjunto de gráficos da Figura 6.2 apresenta o desempenho do método de estimação do número de transmissões simultâneas na topologia em anel e seu impacto sobre algumas medidas de desempenho. Estes resultados são valores médios de 10 execuções realizadas para um milhão de *slots* cada uma. Assim, o intervalo de confiança para a vazão é  $(0,33133, 0,33223)$  para um nível de confiança desejado igual a 95%. O cenário proposto consiste de  $N = 70$  nós, limiar para acionar a recarga  $L = 50$  nós descarregados,  $\lambda = 1,8$  pacotes/ms,  $C = 1$  pacote de energia,  $d_u = 5$  metros, e modo de operação HBC. Assumimos o carregamento energético ideal dos dispositivos, ou seja, que todos os dispositivos são completamente recarregados após o período de carregamento. Além disso, assumimos que  $C = 1$  pacote de energia é suficiente para recarregar as estações. Assim, os efeitos de propagação são considerados somente no canal de subida. Dessa forma, os parâmetros: potência de transmissão do nó, frequência de operação, expoente de perda de percurso, e ganho da antena transmissora e receptora, e duração do tempo de *slot* estão de acordo com a Tabela 6.1. O cenário em questão foi escolhido por apresentar um valor de vazão média normalizada alto para uma taxa agregada que gera um número relativo de colisões.

A Figura 6.2(a) compara os percentuais de colisões estimadas pelo método de estimação de máxima verossimilhança e as ocorridas de fato em simulações para cada classe de transmissões simultâneas em relação ao número total de colisões. Isto é, a figura expressa o percentual de colisões estimadas e ocorridas para cada número de transmissões simultâneas em relação ao número total de colisões ocorridas. Por exemplo, o gráfico apresenta que, dentre todas as colisões que ocorreram, 23,93% foram com três transmissões simultâneas. Porém, para o HAP, o percentual de colisões com três transmissões simultâneas foi de 10,59%. Isso mostra que o HAP estima menos colisões com três transmissões simultâneas do que realmente acontece. Nota-se que o método estima muito mais colisões com duas transmissões simultâneas do que realmente acontece, e muito menos para os demais valores de transmissões simultâneas. Dada a taxa de geração de pacotes deste cenário, o gráfico mostra, ainda, que 99,49% envolveram um número de transmissões simultâneas dentro da faixa  $2 \leq m \leq 5$ . Isso mostra uma disputa relativamente baixa pelo acesso ao canal, indicando que a probabilidade de transmissão bem sucedida é alta, pois há uma predominância de colisões com um baixo número de transmissões simultâneas. Se a disputa pelo acesso ao canal fosse alta, o gráfico apresentaria percentuais relevantes para um número de transmissões simultâneas maior que 5.

A Figura 6.2(b) apresenta o percentual de estimações corretas para cada número de transmissões simultâneas, ou seja, do total de colisões envolvendo um dado número de transmissões simultâneas quantas o HAP estima corretamente. Note que a figura anterior apresentou o percentual absoluto, sem discernir se a estimação foi correta ou não. Aqui, estamos interessados no percentual de estimações corretas em uma dada classe de transmissões simultâneas. Por exemplo, do total de colisões envolvendo apenas duas transmissões simultâneas (68,48% do total de colisões, Figura 6.2(a)), o HAP estimou 95,09% delas empregando a técnica proposta. O modelo matemático, que considera o canal com desvanecimento Rayleigh, estima, muitas vezes, colisões envolvendo menos transmissões simultâneas do que realmente ocorreram e, com menor frequência,

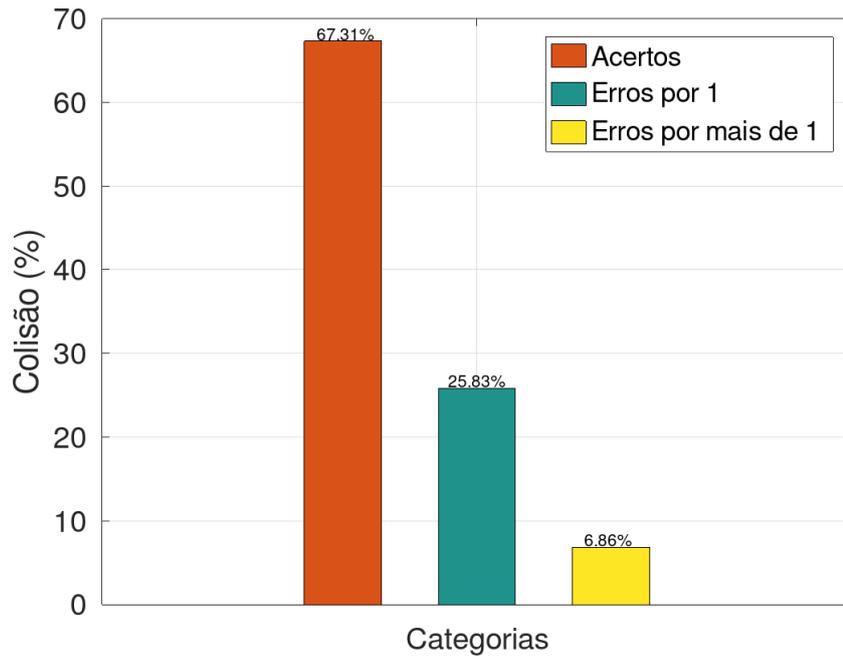


(a)

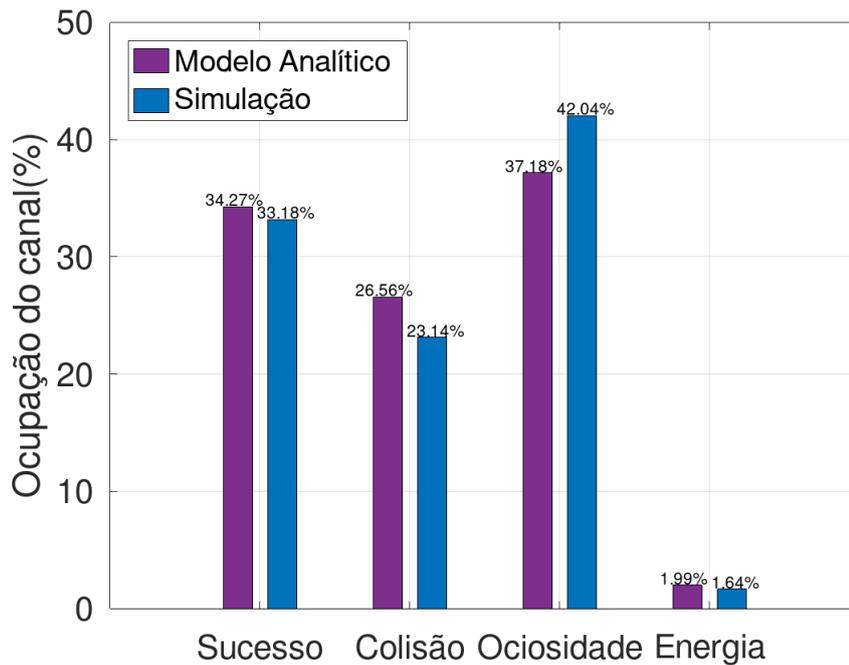


(b)

Figura 6.2



(c)



(d)

Figura 6.2:  $N = 70$ ,  $L = 50$ ,  $\lambda = 1.8$  pacotes/ms,  $C = 1$ ,  $d = 5$  m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimativas corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as medidas de desempenho do sistema para o modelo analítico e simulação.

o caso oposto.

A Figura 6.2(c) apresenta o percentual de colisões estimadas em três categorias: *Acertos*, quando o HAP estima corretamente o número de transmissões simultâneas que envolvem a colisão detectada; *Erros por 1*, quando o HAP erra a estimação do número de transmissões simultâneas da colisão por uma unidade, para mais ou para menos; e *Erros por mais de 1*, quando o HAP erra a estimação do número de transmissões simultâneas da colisão por mais de uma unidade, para mais ou para menos. A figura revela que a técnica estima o número de transmissões simultâneas corretamente em 63,31% das colisões. Erra o número de transmissões simultâneas por apenas uma unidade em 25,83% das colisões. E, erra o número de transmissões simultâneas por mais de uma unidade em 6,86% das colisões. Note que a técnica erra o número de transmissões simultâneas em 32,69% das colisões, com predominância de subestimações. Entretanto, a maioria desses erros é por uma unidade. Para este cenário, que considera uma rede com  $N = 70$  estações e uma limiar de estações descarregadas  $L = 50$ , o fato da técnica errar pouco, e em sua maioria para menos, sobre o número correto de transmissões simultâneas, tem um impacto fraco na contagem do número acumulado de estações descarregadas. Por exemplo, quando a contagem do número acumulado de estações descarregadas realizada pelo HAP atinge o valor do limiar  $L = 50$ , na realidade, o número de estações descarregadas é maior que o valor do limiar  $L = 50$ . Porém, o número de estações descarregadas que excedem o limiar é pequeno, bem menor do que a diferença  $N - L = 20$ . Quanto menor a diferença  $N - L$ , maior a chance de todas as estações descarregarem antes da contagem do número acumulado de transmissões atingir o valor do limiar  $L$ . Embora o percentual de acertos seja inferior à 70%, o percentual obtido como resultado da soma das categorias "Acertos" e "Erros por 1" é alto, chegando a 93,14%. Na prática, considerando um cenário em que o erro, associado às subestimações, impacta fortemente a contagem do número acumulado de estações descarregadas a ponto de todas as estações descarregarem antes do limiar ser atingido, propõe-se um contador de *slots* ociosos consecutivos. O HAP deve contar o número de *slots* ociosos consecutivos para julgar se todas as estações já se encontram descarregadas mesmo a contagem não atingindo o limiar estabelecido. Se a contagem ultrapassar um dado valor específico, o HAP inicia o período de carregamento mesmo não atingindo o limiar de estações descarregadas  $L$ .

Por fim, a Figura 6.2(d) apresenta uma comparação entre algumas medidas de desempenho obtidas via simulação (considerando efeitos de propagação no canal de subida e carregamento energético ideal dos dispositivos) e via modelo analítico para o caso ideal (estimação correta das colisões e carregamento energético ideal dos dispositivos). O objetivo dessa análise é verificar o quanto a técnica de estimação de colisão impacta nas medidas de desempenho isoladamente. Nesse âmbito, para esse cenário específico, verifica-se que a vazão obtida na simulação é ligeiramente menor que a obtida no modelo analítico. Mostra um menor número de colisões para o cenário simulado também. Assim como um menor número médio de pacotes de energia transmitidos pelo HAP para a simulação sobre um milhão de slots. Por outro lado, a figura revela um aumento do número de slots ociosos com a aplicação da técnica de estimação de colisão. A diferença nos valores das medidas de desempenho decorre da subestimação realizada pelo HAP ao utilizar a técnica de estimação do número de transmissões simultâneas, ou seja, de estimar, várias vezes, um número

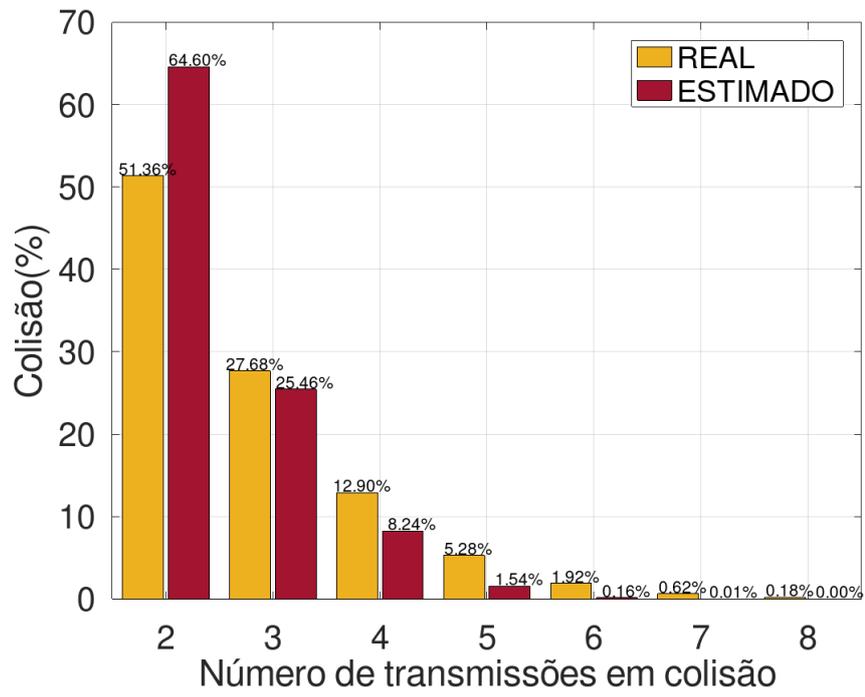
$m$  de transmissões simultâneas menor do que aquele que originou a colisão. Dessa forma, quando o HAP julga que o número de dispositivos descarregados atingiu o limiar, na realidade, o limiar já fora ultrapassado, e um número maior de dispositivos encontram-se descarregados.

De maneira geral, devido à predominância das subestimações, o número real de dispositivos ativos após uma colisão é menor do que o número de dispositivos ativos sob a ótica do HAP, incorrendo em menor contenção se comparada àquela do ponto de vista do HAP. Isso implica em mais slots vazios até a ocorrência de slots ocupados com colisão ou transmissão bem sucedida, resultando em um aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados. Logo, a utilização do método aumenta o número de slots vazios e reduz o número de transmissões com sucesso, de colisões, e de ciclos, quando comparados ao modelo analítico. Conseqüentemente, menos ciclos demandam menos pacotes de energia do HAP.

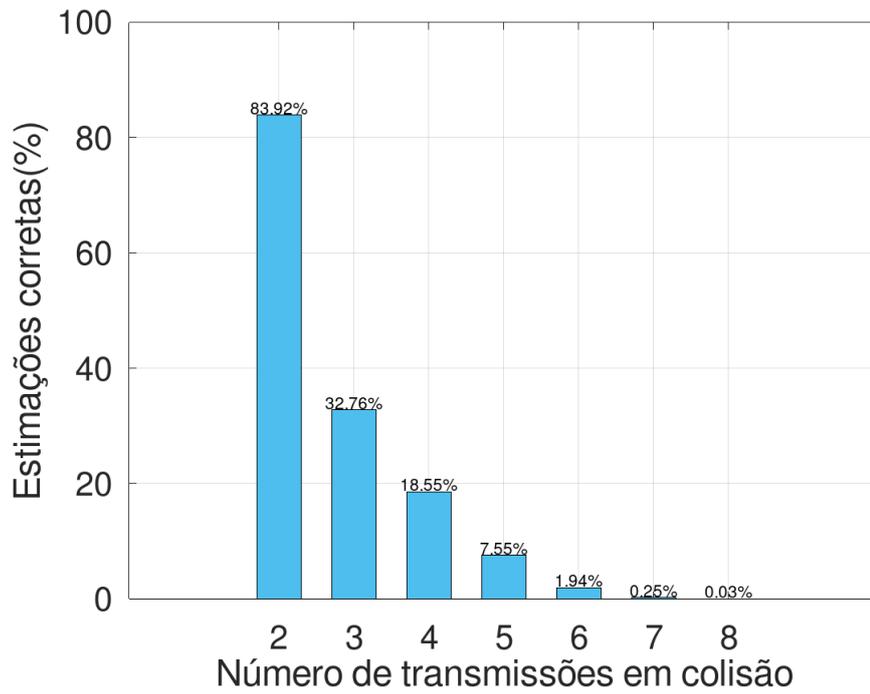
O conjunto de gráficos na Figura 6.3 apresenta o desempenho do método de estimação do número de transmissões simultâneas na topologia em anel e seu impacto sobre algumas medidas de desempenho. Estes resultados são valores médios de 10 execuções realizadas para um milhão de *slots* cada uma. Assim, o intervalo de confiança para a vazão é (0,30408, 0,30464) para um nível de confiança desejado igual a 95%. O cenário proposto consiste de  $N = 70$  nós, limiar para acionar a recarga  $L = 50$  nós descarregados,  $\lambda = 3$  pacotes/ms,  $C = 1$  pacote de energia,  $d_u = 5$  metros, e modo de operação HBC. Assumimos o carregamento energético ideal dos dispositivos, ou seja, que todos os dispositivos são completamente recarregados após o período de carregamento. Além disso, assumimos que  $C = 1$  pacote de energia é suficiente para recarregar as estações. Assim, os efeitos de propagação são considerados somente no canal de subida. Dessa forma, os parâmetros: potência de transmissão do nó, frequência de operação, expoente de perda de percurso, e ganho da antena transmissora e receptora, e duração do tempo de *slot* estão de acordo com a Tabela 6.1. O cenário em questão foi escolhido por apresentar uma incidência maior de colisões envolvendo um maior número de transmissões simultâneas comparado ao cenário anterior.

Na Figura 6.3(a), o aumento da taxa agregada de geração de pacotes refletiu em uma menor incidência de colisões envolvendo duas transmissões simultâneas, e em um aumento do número de colisões envolvendo mais transmissões simultâneas. O percentual de colisões envolvendo duas transmissões simultâneas sofreu uma redução de 22,74%, e o percentual de colisões envolvendo três transmissões simultâneas sofreu um aumento de 15,67% com o aumento da taxa agregada de geração de pacotes de  $\lambda = 1,8$  para  $\lambda = 3$  pacotes/ms. Note que o método ainda estima muito mais colisões envolvendo duas transmissões do que realmente acontece. Mesmo com o aumento da taxa agregada o número de colisões envolvendo essa classe ( $m = 2$ ), ainda é superior as demais.

Na Figura 6.3(b), houve uma queda no percentual de estimações corretas em colisões envolvendo duas transmissões, e um aumento de estimações corretas para as demais classes de transmissões simultâneas. O percentual de estimações corretas para colisões envolvendo duas transmissões simultâneas reduziu de 95,09% para 83,92%, e o percentual de estimações corretas para colisões envolvendo três transmissões simultâneas aumentou de 16,01% para 32,76%. O baixo percentual de acertos nas colisões envolvendo mais de duas transmissões simultâneas não é uma indicação de que o método é ruim. Pois, a maioria das colisões ocorrem para a classe envolvendo duas transmis-

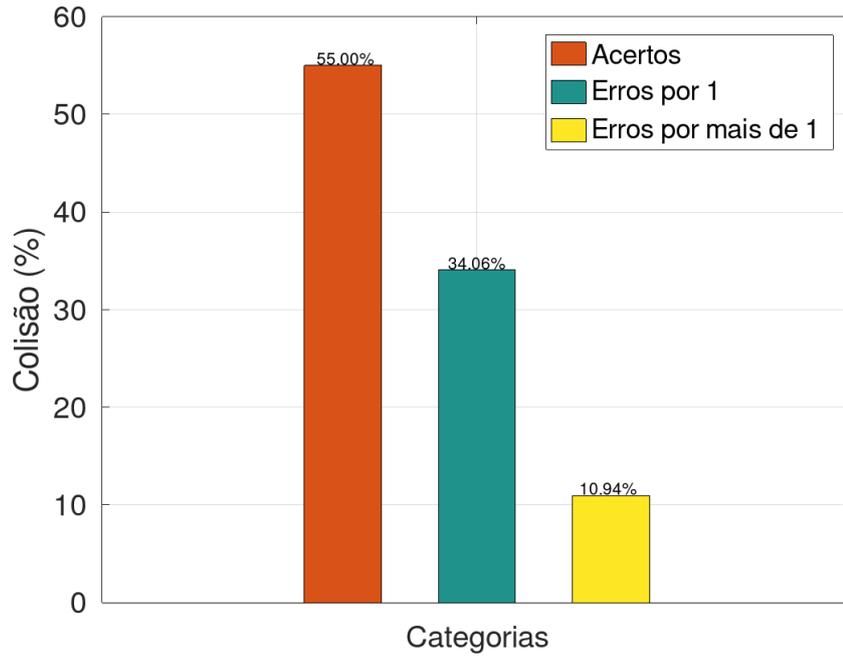


(a)

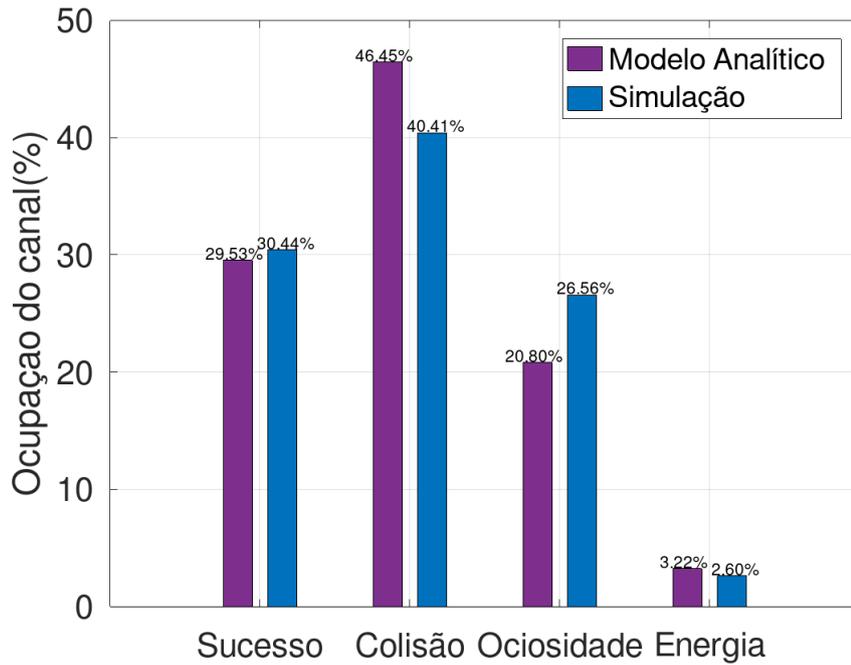


(b)

Figura 6.3



(c)



(d)

Figura 6.3:  $N = 70$ ,  $L = 50$ ,  $\lambda = 3$  pacotes/ms,  $C = 1$ ,  $d = 5$  m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as medidas de desempenho do sistema para o modelo ideal e simulação

sões simultâneas, com percentual de acertos elevado. Também precisamos levar em consideração se o método adotado errou por muito ou pouco em suas estimações para avaliar o impacto no comportamento do sistema.

Na Figura 6.3(c) o percentual reduziu de 67,31% para 55% e aumentou de 25,83% para 34,06% com o aumento da taxa agregada nas categorias *Acertos* e *Erros por 1*, respectivamente. O aumento da taxa agregada provocou uma redução das estimações corretas porque o método tende a subestimar o número de transmissões simultâneas. Por isso, ele acerta mais para colisões envolvendo duas e três transmissões simultâneas, pois essas classes retornam as maiores densidades de probabilidade na maioria das colisões. Note que, para este cenário, o percentual resultante da soma das categorias *Acertos* e *Erros por 1* atinge 89,06%. De 100 *slots* com colisão, na média, em 89,06 deles, ou o método acerta o número de transmissões ou erra por uma transmissão. O possível excedente de dispositivos descarregados quando a contagem do HAP atinge o valor do limiar  $L$ , ainda é menor que a diferença  $N - L = 20$  neste cenário. Portanto, neste cenário, a possibilidade de todos os dispositivos descarregarem antes da contagem do número acumulado de estações descarregadas ultrapassar o valor do limiar  $L$  é muito baixo. Na verdade, esse efeito não foi verificado em nenhuma das simulações para este cenário específico.

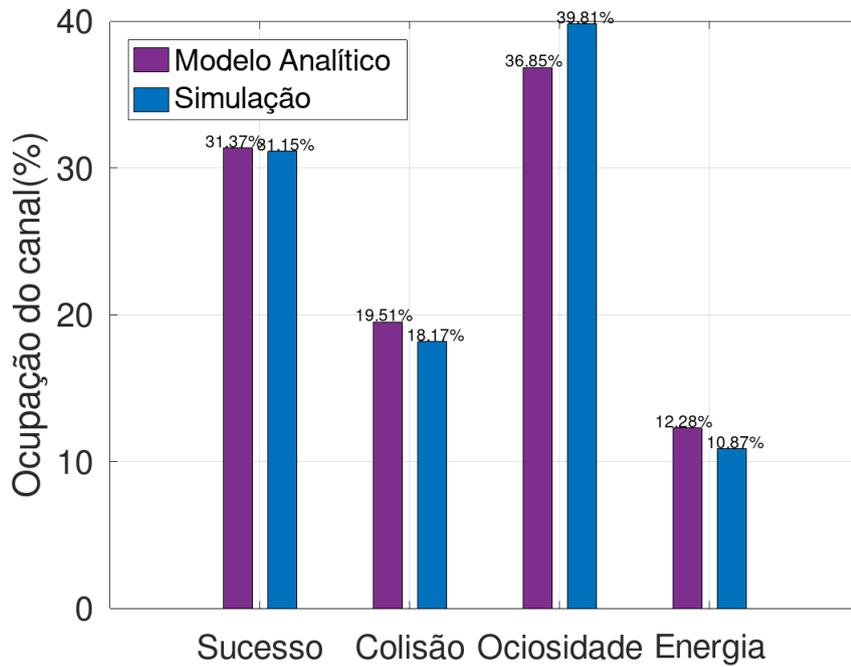
Por fim, o aumento da taxa de geração de pacotes nos revela, por meio da Figura 6.3(d), uma maior ocupação do canal com colisões, diferentemente do cenário com taxa agregada  $\lambda = 1,8$  pacotes/ms que mantinha o canal mais ocioso. Além disso, a comparação entre o modelo analítico e a simulação, no cenário atual, traz uma surpresa: a vazão obtida na simulação com o método de estimação de colisão proposto superou a vazão do modelo analítico (caso ideal). Para este método de estimação baseado na topologia em anel, percebe-se a predominância de subestimações nas estimações incorretas. Então, na maioria dos ciclos de transmissão de dados, quando o contador do número acumulado de estações descarregadas atinge ou ultrapassa o limiar  $L$ , na realidade, o número total de estações descarregadas é maior que o estimado pelo HAP ao final do ciclo. Portanto, as subestimações provocam o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados, uma vez que retardam o tempo para que a contagem do número acumulado de estações descarregadas atinja o valor do limiar. Em nosso sistema, a contenção reduz à medida que o ciclo de transmissão de dados avança. Se a taxa agregada é baixa, o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados favorece a ocorrência de muito mais *slots* ociosos que transmissões bem sucedidas. Por outro lado, se a taxa agregada é alta, o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados ainda favorece a ocorrência de muitos *slots* ociosos, mas aumenta a transmissão de pacotes com sucesso, comparado ao cenário com taxa agregada menor. Assim, a figura nos revela que a vazão obtida para o cenário simulado considerando a técnica de estimação ultrapassou a vazão obtida para o modelo analítico (caso ideal sem considerar aspectos da camada física). O menor percentual de colisão na simulação, comparado ao modelo analítico do caso ideal, também decorre do aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados, bem como o maior percentual de ociosidade. Por fim, com o aumento do tamanho médio de ciclo, menos ciclos ocorrem, logo menos energia é demandada pelo HAP.

O conjunto de gráficos na Figura 6.4 compara as medidas de desempenho entre a simulação (considerando os efeitos de propagação nos canais de subida e descida) e modelo analítico (caso

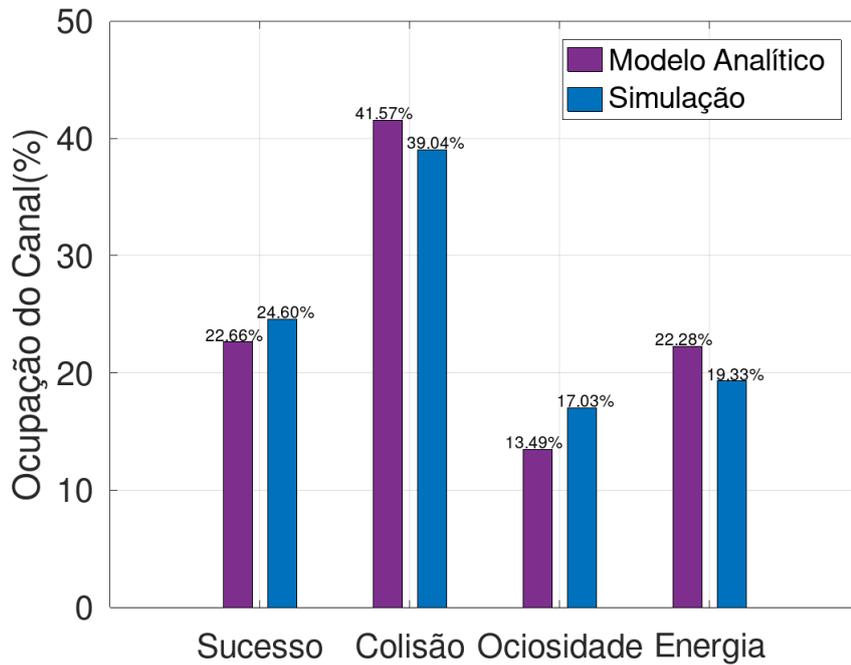
ideal). Diferentemente dos cenários anteriores, os efeitos de canal interferem, tanto nos sinais transmitidos para fins de carregamento, quanto nas transmissões de dados. Lembramos mais uma vez que o caso ideal não considera efeitos de propagação de canal. Ele representa o funcionamento ideal do carregamento energético dos dispositivos e do método de estimação do número de transmissões simultâneas, ou seja, todos os dispositivos são recarregados com probabilidade 1 após o período de carregamento determinado, e que o HAP estima corretamente o número de transmissões simultâneas independente da potência recebida. Assim, as medidas de desempenho do caso ideal podem ser obtidas via modelo analítico desenvolvido no Capítulo 3.

A Figura 6.4(a) compara as medidas de desempenho para um cenário com  $N = 40$  nós, limiar para acionar a recarga  $L = 25$ ,  $\lambda = 1,4$  pacotes/ms,  $C = 4$  pacotes de energia, e  $d_u = 3$  metros. O período de carregamento  $C = 4$  pacotes de energia foi obtido de acordo com a Tabela 6.2 para o conjunto de parâmetros da Tabela 6.1. Reduzimos o número de estações com relação aos cenários anteriores devido a diminuição do raio da circunferência. Os resultados simulados são valores médios de 10 execuções realizadas para um milhão de *slots* cada uma. Assim, o intervalo de confiança para a vazão é  $(0,31124, 0,31178)$  para um nível de confiança desejado igual a 95%. Em comparação com o modelo analítico, a simulação apresentou uma diminuição no número total de pacotes bem sucedidos, colisões e pacotes de energia, enquanto houve um aumento do número de *slots* ociosos. Novamente, aqui, observamos a subestimação no número de transmissões simultâneas identificadas anteriormente no caso com taxa agregada  $\lambda = 1,8$  pacotes/ms da Figura 6.2. Além disso, a incerteza de carregamento dos dispositivos após a transmissão dos pacotes de energia, resulta em uma contenção menor, favorecendo o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados com *slots* ociosos. Portanto, o uso conjunto das técnicas de carregamento e estimação de colisão geram um aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados resultando em alta ociosidade em cenários com baixa taxa agregada. Entretanto, para o valor de limiar  $L = 25$  estações descarregadas adotado, os erros de estimações e a incerteza do carregamento não afetam o comportamento da rede drasticamente. De modo que a vazão obtida na simulação considerando os aspectos da camada física atingiu o patamar de 99,29% da vazão obtida no modelo analítico para o caso ideal. Como informação adicional, mantendo todos os demais parâmetros deste cenário, e alterando apenas o valor do limiar  $L$ , podemos verificar uma queda maior da vazão via simulação comparada ao modelo analítico do caso ideal. Por exemplo, para  $L = 31$ , a vazão média normalizada obtida via simulação, considerando as técnicas de carregamento e de estimação de colisão, é de 0,1842, enquanto a vazão média normalizada do caso ideal obtida via modelo analítico é 0,3022. Dessa forma, à medida que o valor do limiar aumenta, os erros de estimação e incerteza atribuída ao carregamento das estações afetam o desempenho do sistema fortemente.

A Figura 6.4(b) compara as medidas de desempenho para um cenário com  $N = 40$  nós, limiar para acionar a recarga  $L = 25$ ,  $\lambda = 3$  pacotes/ms,  $C = 4$  pacotes de energia, e  $d_u = 3$  metros. O período de carregamento  $C = 4$  pacotes de energia foi obtido de acordo com a Tabela 6.2 para o conjunto de parâmetros da Tabela 6.1. Os resultados simulados são valores médios de 10 execuções realizadas para um milhão de *slots* cada uma. Assim, o intervalo de confiança para a vazão é  $0,24568 \leq S \leq 0,24628$  para um nível de confiança desejado igual a 95%. Em comparação com o modelo analítico, a simulação apresentou uma diminuição no número total de colisões e



(a)



(b)

Figura 6.4: Comparação entre modelo analítico e simulação com  $N = 40$ ,  $L = 25$ , para os parâmetros da tabela 6.1 com  $\eta = 0.8$ ,  $f = 900\text{MHz}$ ,  $d_u = 3\text{ m}$  no modo HBC. (a)  $\lambda = 1.4$  pacotes/ms, (b)  $\lambda = 3$  pacotes/ms.

pacotes de energia, enquanto houve um aumento do número total de pacotes bem sucedidos e de *slots* ociosos. Novamente, aqui, observamos a subestimação no número de transmissões simultâneas identificada anteriormente no caso com taxa agregada  $\lambda = 3$  pacotes/ms da Figura 6.3. Também, a incerteza de carregamento dos dispositivos após a transmissão dos pacotes de energia, resulta em uma contenção menor, favorecendo o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados com *slots* ociosos. Entretanto, como a taxa agregada é alta, comparada ao cenário anterior com  $\lambda = 1,4$  pacotes/ms, a redução da contenção favorece mais transmissões com sucesso. Para o valor do limiar  $L = 25$  essas transmissões bem sucedidas adicionais são o suficiente para a vazão no cenário simulado, considerando efeitos de propagação nos canais de subida e descida, ultrapassar vazão do caso ideal obtida via modelo analítico em 8,56%. Como informação adicional, mantendo todos os demais parâmetros deste cenário, e alterando apenas o valor do limiar  $L$ , para valores de limiar  $L > 27$  a vazão do obtida via simulação considerando os aspectos da camada física já não supera a vazão do caso geral via modelo analítico. Ainda, em  $L = 29$  o valor da vazão obtida via simulação considerando aspectos da camada física alcança apenas 0,1035%, enquanto a vazão obtida para o caso geral via modelo analítico atinge 0,2541%.

Essa seção apresentou o impacto relacionado a inclusão da camada física no comportamento do sistema com topologia em anel. A questão é que, ao considerarmos aspectos da camada física (efeitos de propagação de canal), alteramos o funcionamento ideal do sistema. Dessa forma, foi necessário desenvolver técnicas de carregamento e estimação de colisão. Cada técnica tem um grau de incerteza associado. Dessa forma, podem ocorrer erros na estimação do número de transmissões simultâneas, bem como o período de carregamento pode não garantir a energização de todas as estações. Assim, percebemos que as técnicas impactam principalmente no tamanho médio de ciclo de transmissão de dados, tornando-o maior em relação ao tamanho médio de ciclo de transmissão de dados encontrado no caso ideal (não contempla aspectos da camada física). Apesar disso, percebemos que o sistema apresenta um bom desempenho para valores de limiar relativamente altos, considerando as técnicas adotadas em cenários com intensidade de tráfego distintos. Naturalmente, a vazão média normalizada diminui muito a partir de um determinado valor de limiar, pois as incertezas relacionadas às técnicas influenciam mais fortemente na contagem do número acumulado de dispositivos descarregados realizada pelo HAP. De modo geral, os métodos mostraram-se eficientes para todos os cenários analisados. Note que, em todos esses cenários, para valores do limiar menores que os adotados, o sistema apresentará bom desempenho com o uso das técnicas. Devemos lembrar que o ponto crítico, para cada cenário analisado, é quando o valor de limiar passa ser maior do que os que foram apresentados. Para a obtenção dos resultados, cabe ressaltar que o número de transmissões simultâneas foi estimado de acordo com a Eq. (4.24). Entretanto, a utilização do método de estimação de transmissões simultâneas baseado na Eq. (4.34) (função Digamma e números harmônicos) produz resultados muito próximos.

### 6.3.2 Topologia aleatória

Nesta seção assumimos que os nós estão dispostos aleatoriamente em uma área circular na qual o HAP tem conhecimento, não necessariamente da posição, mas da distância de cada dispositivo.

Assim, de forma similar ao realizado para a topologia em anel, nosso objetivo é analisar a eficiência do método de estimação de colisão e seu impacto no desempenho do protocolo Slotted ALOHA com transferência de energia para a topologia aleatória, realizando simulações Monte Carlo, onde o HAP utiliza a Eq. (4.17) para estimar o número de transmissões simultâneas em uma dada colisão. Como o método desenvolvido considera até  $2^{N-n} - (N - n) - 1$  combinações para encontrar a melhor estimativa para o número de transmissões colidentes, o número de dispositivos na rede e a taxa de geração de pacotes são dois parâmetros que requerem atenção. O primeiro porque tende a aumentar o número de combinações realizadas em cada colisão, e o segundo, porque aumenta o número de colisões. Ambos aumentam o tempo gasto pelo HAP para realizar a estimação, e assim, o tempo de processamento  $T_{proc}$ , definido no dimensionamento do *slot* na Figura 3.1, tende a aumentar quando tais parâmetros são elevados. Dessa forma, a duração do intervalo de tempo de *slot* é um parâmetro de projeto que precisa ser cuidadosamente pensado para implantação da rede, tendo em vista o número de verificações que HAP deve realizar em uma dada colisão.

Diferentemente da topologia em anel, aqui realizamos 10 simulações da operação do Slotted ALOHA sobre 1 milhão de *slots* considerando um conjunto fixo de localizações dos nós dentro de uma circunferência de raio  $d_u$ . As 10 simulações são executadas para 5 topologias distintas (ou seja, 5 conjuntos de disposições espaciais dos nós). As posições dos  $N - 1$  dispositivos foram geradas segundo uma distribuição uniforme dentro do intervalo (1,5), e um nó particular foi fixado na borda da circunferência. Precisamos considerar o impacto das transmissões de uma estação no limite da área de cobertura do HAP.

Primeiramente, analisamos o método de estimação considerando os efeitos de propagação apenas no canal de subida com carregamento energético ideal dos dispositivos, ou seja, que todos os dispositivos conseguem recarregar suas baterias após o período de carregamento estabelecido. Em seguida, analisamos a eficácia do método de estimação considerando os aspectos da camada física no canal de subida e descida, ou seja, os efeitos de canal em ambas as técnicas de carregamento e estimação de colisão. Em ambas abordagens acima citadas, comparamos algumas medidas de desempenho obtidas via simulação, contemplando as técnicas propostas, com as mesmas medidas de desempenho para o caso ideal obtidas via modelo analítico. Cabe lembrar que o caso ideal não considera os aspectos da camada física, e que todas as estações são completamente recarregadas após o período de carregamento e que o HAP estima corretamente todas as colisões.

O conjunto de gráficos contidos na Figura 6.5 apresenta o desempenho do método de estimação de colisão para uma rede com  $N = 10$  dispositivos, valor de limiar  $L = 5$ , taxa de geração de pacotes  $\lambda = 1$  pacotes/ms,  $C = 1$  pacotes de energia e a distância do dispositivo mais afastado do HAP  $d_u = 5$  metros. Assumimos o carregamento energético ideal dos dispositivos, ou seja, que todos os dispositivos são completamente recarregados após o período de carregamento. Além disso, assumimos que  $C = 1$  pacote de energia é suficiente para recarregar as estações. Assim, os efeitos de propagação são considerados somente no canal de subida. Também, assumimos que esse dimensionamento de *slot* tem um intervalo de tempo de processamento  $T_{proc}$  suficiente para a realização do método de estimação para os parâmetros estabelecidos. Os demais parâmetros: potência de transmissão do nó, frequência de operação, expoente de perda de percurso, e ganho da antena transmissora e receptora, e duração do tempo de *slot* estão de acordo com a Tabela 6.1. Os

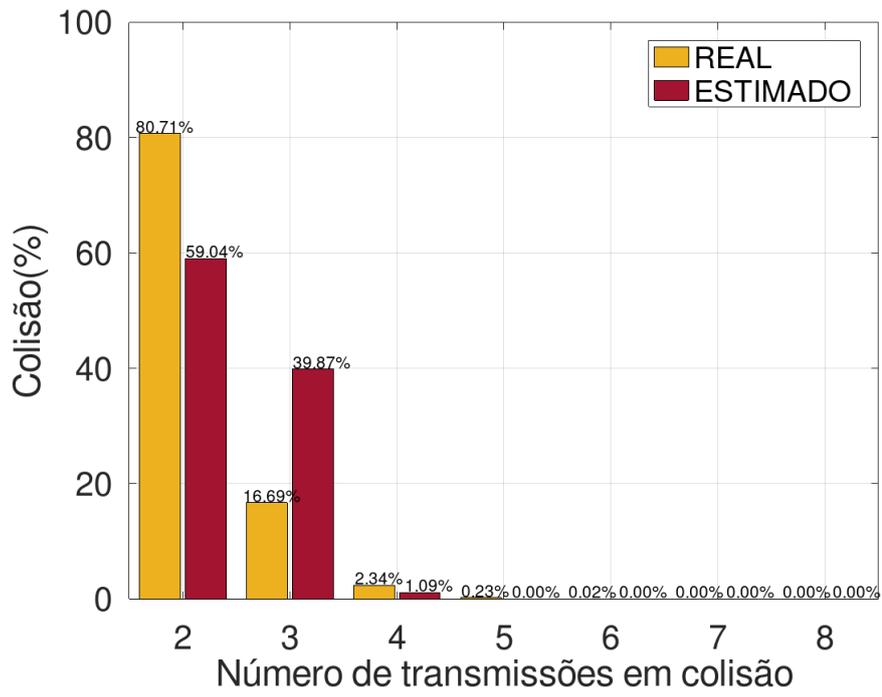
resultados obtidos são valores médios sobre todas as 5 topologias consideradas. Nesse sentido, a aferição da precisão estatística do método pode ser melhorada considerando mais topologias. Embora cada execução seja realizada sobre um grande número de *slots*, as variações das posições não foram suficientes ao ponto de considerar que os dispositivos podem ocupar qualquer posição dentro da circunferência de raio  $d_u$ . Dessa forma, apresentamos os intervalos de confiança considerando as amostras para cada topologia para um nível desejado de confiança de 95%: (0,31746, 0,31809), (0,31692, 0,31775), (0,28012, 0,33258), (0,31759, 0,31819), (0,31721, 0,31786).

A Figura 6.5(a) contém a comparação dos percentuais de colisões estimadas pelo método de estimação de máxima verossimilhança e as ocorridas de fato em simulações para cada classe de transmissões simultâneas em relação ao total de colisão. A figura mostra que o percentual de colisões envolvendo duas transmissões simultâneas predomina sobre as demais. Porém, o HAP estima menos colisões envolvendo duas transmissões, ou seja, 80,71% das colisões envolveram duas transmissões, mas o método estimou que apenas 59,04% de colisões envolvendo duas transmissões ocorreram. Por outro lado, o método estimou um percentual de 39,87% de colisões envolvendo três transmissões, quando na realidade o percentual de colisões que aconteceram foi de 16,69%. O interessante deste método de estimação para a topologia aleatória é conseguir estimar muitas colisões envolvendo três transmissões para uma taxa agregada baixa. Embora os cenários sejam distintos, mas para a topologia em anel, nenhum cenário estimou mais colisões envolvendo três transmissões do que de fato aconteceu, mesmo para uma taxa agregada  $\lambda = 3$  pacotes/s. Assim, podemos notar o impacto da distribuição espacial dos dispositivos sobre a área de cobertura do HAP.

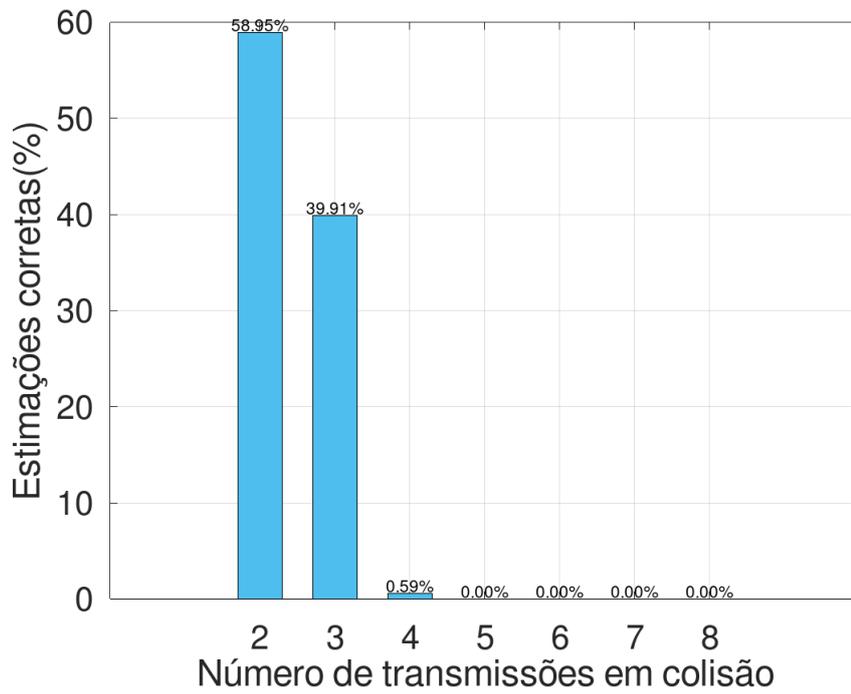
Na Figura 6.5(b) podemos observar o percentual de acertos para cada classe de transmissões colidentes, constatando, assim, um maior número de estimações corretas em colisões com duas transmissões. Embora o percentual de estimações corretas em colisões com três transmissões seja de aproximadamente 40%, cabe ressaltar que o número de colisões reais nessa classe não chegou a 17% do total de colisões ocorridas.

A Figura 6.5(c) retrata um panorama geral do método de estimação de transmissões simultâneas, revelando um percentual de acertos superior a 54,31%, com 43,09% de estimações erradas por apenas uma transmissão (ou seja, o método interfere pouco na contagem do número de estações descarregadas, pois a predominância de erros de estimação por uma transmissão é quase absoluta), e 2,6% de estimações erradas por mais de uma transmissão. Somando os percentuais das categorias *Acertos e Erros por 1*, verificamos que 97,4% das colisões estão nesse conjunto, e isso nos mostra que quando o HAP não acertou, ele errou por pouco, de tal forma que os erros nas estimações não impactaram o comportamento do sistema.

Na Figura 6.5(d), as medidas de desempenho comparadas atingem resultados semelhantes para o modelo analítico (caso ideal) e simulação (considerando efeitos de propagação no canal de subida). A medida de desempenho *Energia* nos informa que a utilização do método de estimação do número de transmissões simultâneas demandou mais energia do HAP. Uma vez que tanto a simulação e o modelo analítico consideram o mesmo número de pacotes de energia no período de carregamento, isso indica que o tamanho médio de ciclo de transmissão de dados na simulação é menor do

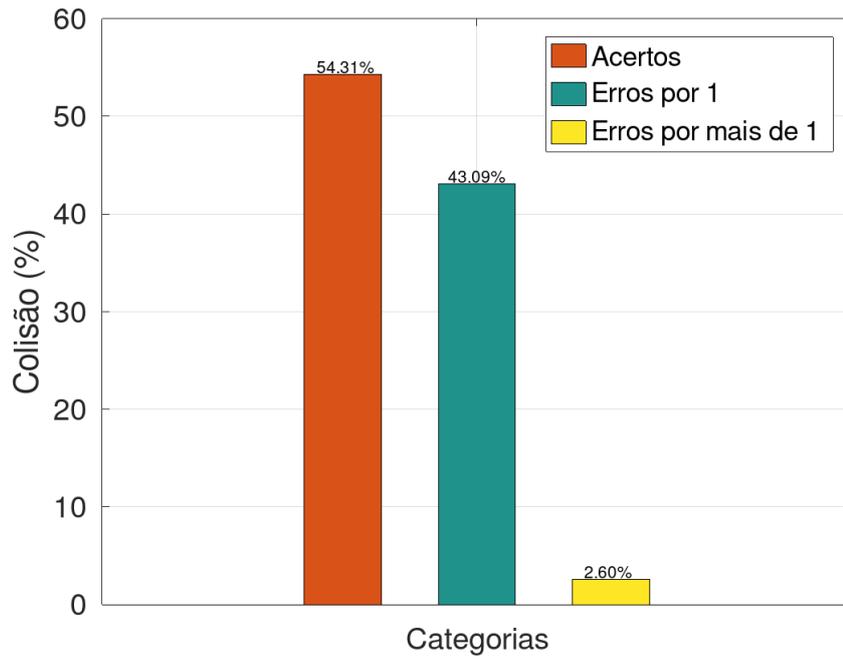


(a)

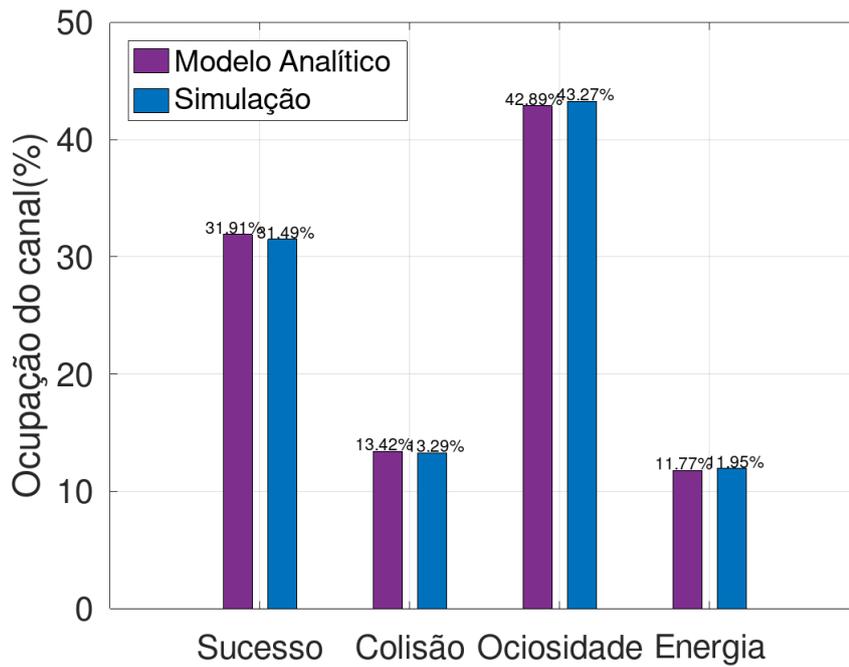


(b)

Figura 6.5



(c)



(d)

Figura 6.5:  $N = 10$ ,  $L = 5$ ,  $\lambda = 1$  pacotes/ms,  $C = 1$ ,  $d_u = 5$  m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimativas corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as métricas do sistema para o modelo ideal e o proposto para estimativa de colisão.

que o obtido pelo modelo analítico para o caso ideal. Conseqüentemente, mais ciclos ocorrem na simulação considerando o método de estimação do número de transmissões simultâneas, e, portanto, a energia transmitida pelo HAP é maior do que a esperada caso o sistema não cometesse erros de estimação. A diminuição do tamanho médio de ciclo de transmissão ocorre porque a contagem do número acumulado de estações descarregadas atinge o valor do limiar mais rapidamente, e isso acontece devido às superestimções. Diferentemente do ocorrido na topologia em anel, aqui, o HAP acaba superestimando mais as colisões. Dessa forma, quando o HAP decide transmitir os pacotes de energia, o número real de dispositivos descarregados é inferior a  $L$ . E, assim, o ciclo de transmissão tende a ser menor. Entretanto, o número de superestimções não é tão maior que o de subestimções neste cenário. Caso isso ocorresse, o tamanho médio do ciclo de transmissão de dados obtido via simulação considerando o método de estimação de colisão seria muito menor que o tamanho médio do ciclo de transmissão de dados obtido no modelo analítico (caso ideal). Assim, teríamos uma diferença maior na comparação entre as medidas de desempenho do que estas observadas no gráfico. Como o tamanho médio do ciclo de transmissão de dados é um pouco menor na simulação considerando o método de estimação, menos transmissões ocorrem dentro do ciclo. Assim, o percentual de colisões e pacotes com sucesso obtidos via simulação com o método de estimação de colisão são menores que os obtidos para o caso ideal via modelo analítico. Conseqüentemente, o percentual de ociosidade é maior para a simulação com o método de estimação de colisão proposto.

Por fim, o conjunto de gráficos da Figura 6.6 retrata o comportamento do sistema considerando os efeitos de propagação de canal para a coleta de energia e para a estimação de colisão, utilizando os parâmetros da Tabela 6.1. O cenário em questão é o de uma rede com  $N = 10$  dispositivos,  $L = 4$ , taxa de geração de pacotes  $\lambda = 1$  pacotes/ms,  $C = 4$  pacotes de energia e a distância do dispositivo mais afastado do HAP  $d_u = 3$  metros. Consideramos uma distância menor para verificar o efeito da distribuição das estações em uma área menor. Propositadamente, uma estação foi fixada à distância  $d_u$  do HAP. Dessa forma, período de carregamento foi escolhido conforme Tabela 6.2, para  $d_u = 3$  metros. Além disso, os resultados obtidos são valores médios sobre todas as 5 topologias consideradas. Nesse sentido, a aferição da precisão estatística do método pode ser melhorada considerando mais topologias. Embora cada execução seja realizada sobre um grande número de *slots*, as variações das posições não foram suficientes ao ponto de considerar que os dispositivos podem ocupar qualquer posição dentro da circunferência de raio  $d_u$ . Dessa forma, apresentamos os intervalos de confiança considerando as amostras para cada topologia para um nível desejado de confiança de 95%: (0,20267, 0,20341), (0,22105, 0,22157), (0,22087, 0,22140), (0,21967, 0,22016), (0,21634, 0,21672).

A Figura 6.6(a) contém a comparação dos percentuais de colisões estimadas pelo método de estimação de máxima verossimilhança e as ocorridas de fato em simulações para cada classe de transmissões simultâneas em relação ao total de colisão. Mais uma vez, a predominância de colisões resultantes de duas transmissões simultâneas devido à maior proximidade dos nós ao HAP e uns dos outros, pois estão distribuídos em uma área menor. Além disso, para essa classe de colisões, o percentual estimado de colisões é muito próximo do percentual de colisões que ocorreram de fato, havendo uma maior diferença para as classes com 3 e 4 transmissões simultâneas. Nesse cenário,

ainda podemos verificar que o HAP estimou mais colisões com 4 transmissões do que realmente ocorreram.

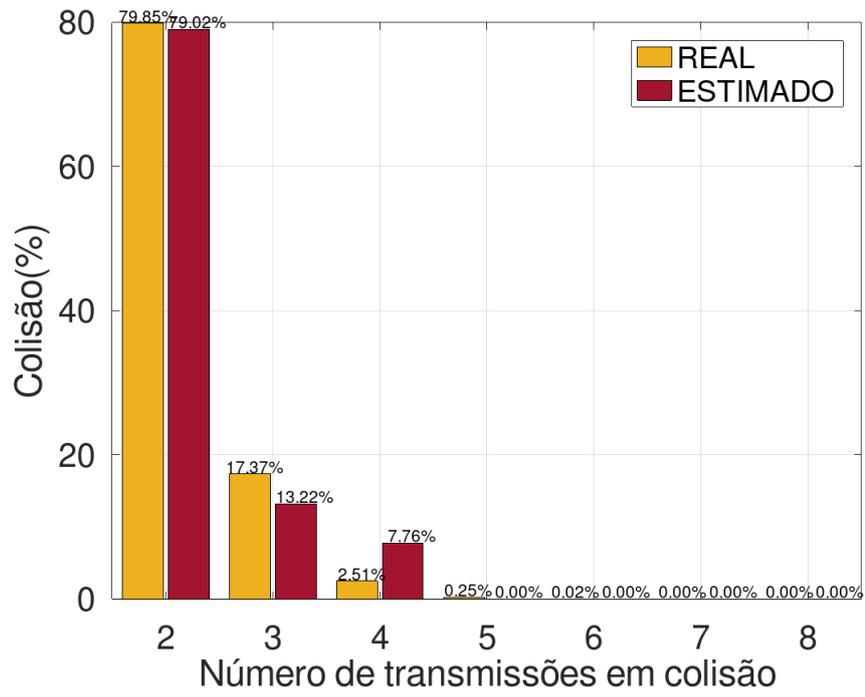
A Figura 6.6(b) retrata o percentual de estimações corretas realizadas pelo ponto de acesso. Nela, notamos a predominância de acertos nas colisões para a classe com duas transmissões. No geral, a Figura 6.6(c) mostra um percentual de 65,69% de estimações corretas, 26,03% de estimações erradas por uma diferença de uma transmissão, e 8,29% para os demais erros. Novamente, o percentual obtido pela junção das categorias *Acertos e Erros por 1* ultrapassa 90% das colisões observadas, que por sua vez não provoca alterações significativas no comportamento da rede.

Por fim, a Figura 6.6(d) consolida esta última constatação ao comparar as medidas de desempenho entre a simulação (considerando os efeitos de propagação nos canais de subida e descida) e modelo analítico(caso ideal), indicando diferenças menores que 1,5% em cada medida de desempenho. Tal qual o cenário anterior, da Figura 6.5, percebemos aqui que o método de estimação de colisão forçou uma diminuição do tamanho médio de ciclo em relação modelo analítico, porém, muito pequena, mas que ainda assim levou o HAP a gastar um pouco mais de energia. Esses slots a mais gastos com energia reduziram, ainda que pouco, o número de slots ocupados com transmissões de dados, ou seja, pacotes transmitidos com sucesso ou colisões, quando comparados aos resultados obtidos para o caso ideal via modelo analítico.

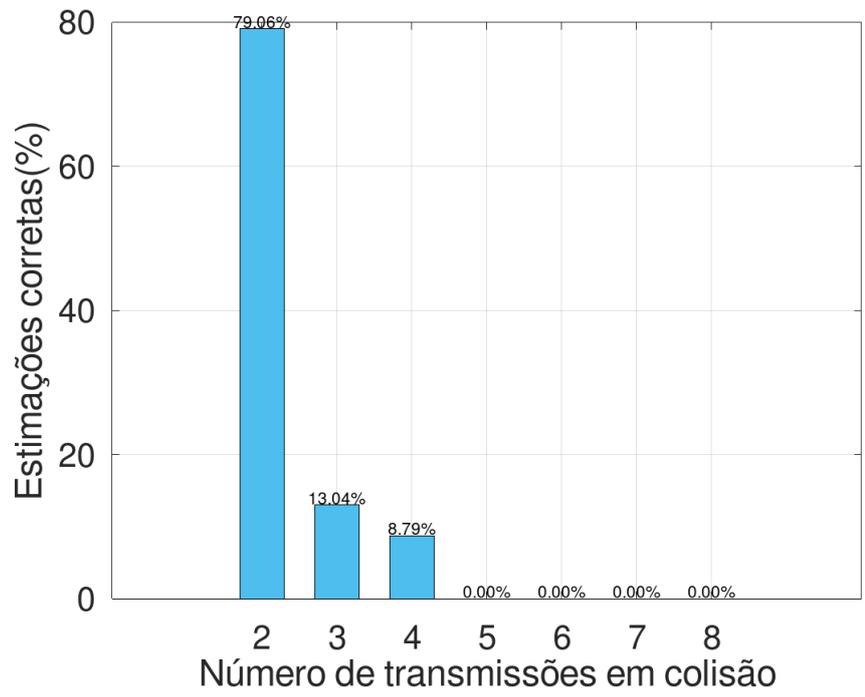
Este capítulo apresentou os resultados obtidos considerando os aspectos da camada física, ou seja, os efeitos de propagação de canal nas transmissões, tanto no canal de subida, quanto no canal de descida. Constatamos que o dispositivo mais afastado pode ser realmente carregado com alta probabilidade escolhendo o número de pacotes de energia para compor o período de carregamento segundo a Eq. (4.8). Além disso, a escolha de um limiar de probabilidade de carregamento do dispositivo mais afastado pode ser  $\zeta < 1$ . Entretanto, deve-se ter cuidado na escolha do limiar adotado para que não haja interferência na contagem do número acumulado de dispositivos descarregados realizada pelo HAP.

O método de estimação do número de transmissões simultâneas para a topologia em anel apresentou desempenho bastante satisfatório. Notamos que esse método subestima o número transmissões simultâneas na maioria dos erros de estimação. Assim, o método força o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados. Observamos que em um cenário específico, para uma taxa agregada de 1,8 pacotes/ms e para um limiar  $L$  relativamente alto, o método impactou pouco nas medidas de desempenho comparado ao caso ideal. Para um cenário com taxa agregada alta, notamos que o aumento do tamanho médio de ciclo de transmissão de dados proporcionou até uma melhora na vazão do sistema, chegando a ultrapassar a vazão obtida para o caso ideal neste cenário específico.

O método de estimação do número de transmissões simultâneas para a topologia aleatória também mostrou-se satisfatório para os cenários observados. Diferentemente da topologia em anel, o método de estimação comete mais erros por superestimação do que subestimação. Esse comportamento aproxima mais o tamanho médio do ciclo de transmissão de dados ao obtido para o modelo analítico no caso ideal, embora seja menor. Dessa forma, um ciclo de operação menor induz a ocorrência de mais ciclos, e conseqüentemente, a transmissão de mais energia pelo HAP.

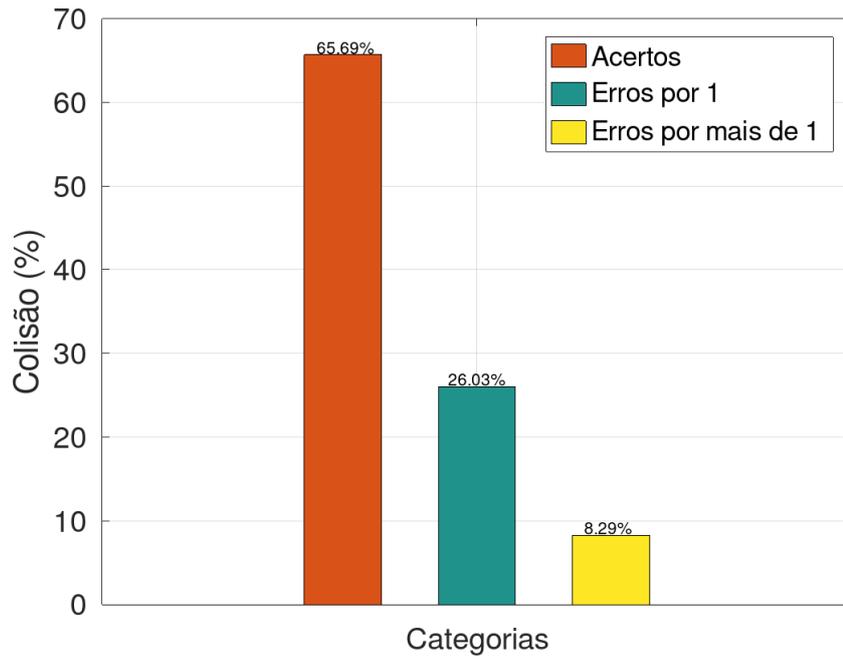


(a)

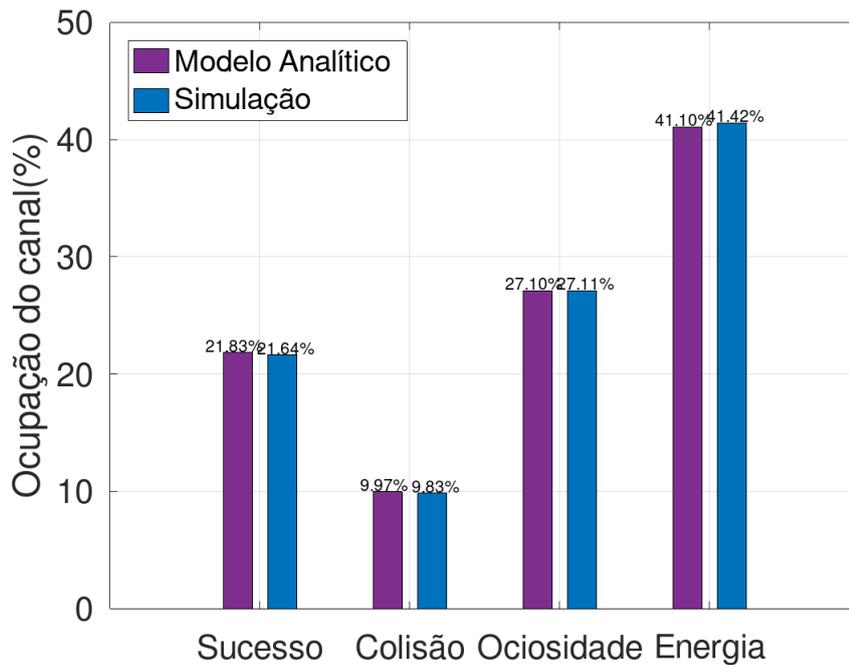


(b)

Figura 6.6



(c)



(d)

Figura 6.6:  $N = 10$ ,  $L = 4$ ,  $\lambda = 1$  pacotes/ms,  $C = 4$ ,  $d_u = 3$  m, e modo HBC. (a) Comparação entre o número de colisões reais e estimadas para cada número de transmissões simultâneas, (b) Número de estimações corretas para cada conjunto de transmissões simultâneas, (c) Percentual por categoria, (d) Comparação entre as métricas do sistema para o modelo ideal e o proposto para estimativa de colisão.

Além disso, a simulação considerando os efeitos de propagação de canal apresentou um desempenho muito próximo ao atingido pelo caso ideal via modelo analítico.

## Capítulo 7

# Conclusões

Neste trabalho analisamos o desempenho de um protocolo MAC baseado em slotted ALOHA para uma rede sem fio energizada via sinais de radiofrequência onde as estações têm recursos limitados. A transferência de energia durante o período de carregamento provê energia suficiente apenas para as operações básicas e a geração e tentativa de transmissão de um único pacote de dados por dispositivo. A taxa agregada de geração de pacotes segue uma distribuição de Poisson. Após a tentativa de transmissão, o dispositivo entra em modo de dormência. Além disso, o ponto de acesso híbrido monitora o número de tentativas de transmissões no canal desde o período de carregamento. Esse monitoramento é realizado contabilizando o número acumulado de transmissões bem sucedidas e de transmissões simultâneas estimadas que envolvem uma colisão. Como os dispositivos têm restrição de energia, um limiar de tentativas de transmissão é estipulado para que ocorra o carregamento da rede via sinais de radiofrequência emitidos pelo HAP. Quando a contagem do número acumulado de tentativas de transmissão atinge ou ultrapassa o limiar estipulado, o HAP envia um sinal de despertar. Este sinal informa aos dispositivos em modo de dormência que a transferência de energia se iniciará na *slot* imediatamente seguinte, com duração de  $C$  *slots* consecutivos usados para a transmissão de  $C$  pacotes de energia consecutivos. Portanto, o sistema opera em ciclos. Cada ciclo de operação é formado por um período de carregamento com  $C$  pacotes de energia consecutivos e um ciclo de transmissão de dados em que as estações disputam o acesso ao canal.

De acordo com a política de funcionamento do protocolo Slotted ALOHA, um pacote gerado em um dado *slot* deve ser enviado no início do *slot* imediatamente seguinte. Assim, apresentamos dois modos de operação: HBC e DBC. No modo de operação *Hold-Before-Charge*, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser mantido no *buffer* do dispositivo e transmitido no início do *slot* imediatamente seguinte ao período de carregamento. Sendo assim, o primeiro *slot* do ciclo de transmissão de dados pode ser ocioso, conter uma transmissão bem sucedida ou conter uma colisão. No modo de operação *Drop-Before-Charge*, um pacote gerado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é enviado deve ser descartado antes do período de carregamento. Desse modo, o primeiro *slot* do ciclo de transmissão de dados é obrigatoriamente vazio. Assumindo que o HAP estima corretamente o número de transmissões simultâneas em cada *slot* com colisão, e que um dado período de carregamento garante a recarga das baterias dos nós

com probabilidade 1, representamos cada modo de operação como um sistema que assume estados distintos em instantes de tempo específicos. Do ponto de vista do HAP, um estado é representado pelo número acumulado de tentativas de transmissão no canal e pelo número de pacotes de energia consecutivos transmitidos no período de carregamento pelo HAP. Como a transição de um estado para outro depende apenas da informação referente ao estado atual, o sistema pode ser modelado como um cadeia de Markov bidimensional.

Para o modo de operação HBC, o sistema transita de um estado em que o número de tentativas de transmissão é menor que o limiar estipulado para outro estado, de acordo com uma distribuição binomial. O sistema transita de um estado para outro com probabilidade 1 durante um período de carregamento. Pois, a cadeia de Markov é modelada sobre a ótica do HAP. Após o período de carregamento, o sistema transita para algum outro estado da cadeia de Markov, que não seja relativo ao período de carregamento, segundo uma distribuição binomial que se refere ao número de pacotes gerados aleatoriamente no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é recebido. A solução da cadeia de Markov nos permite encontrar as probabilidades estacionárias de estado do sistema. A partir delas, podemos encontrar medidas de desempenho do sistema, como por exemplo, a vazão média normalizada, a probabilidade de ocorrer, colisão, *slot* vazio, ou pacote de energia. Além disso, podemos extrair a informação referente ao tamanho médio de ciclo e com isso aferir o número médio de pacotes de energia transmitidos pelo HAP para um dado período de funcionamento da rede. O modelo analítico proposto para o modo de operação HBC foi validado via simulações Monte Carlo. Uma simulação é realizada para o conjunto específico de parâmetros: Número de estações, taxa agregada de geração de pacotes, limiar de tentativas de transmissão, e número de pacotes de energia do período de carregamento. Simulamos a política de acesso ao canal do protocolo Slotted ALOHA sobre 1 milhão de *slots* para um dado conjunto de valores de parâmetros. A simulação contempla o carregamento energético ideal dos dispositivos e a estimação do número de transmissões simultâneas ideal pelo HAP. Isto é, todas as estações são completamente carregadas após a transmissão dos  $C$  pacotes de energia consecutivos, e não ocorrem erros de estimação de colisão pelo HAP. Os resultados obtidos via simulação validam os resultados obtidos via modelo analítico com alta precisão.

Para o modo de operação DBC, o sistema transita de um estado em que o número de tentativas de transmissão é menor que o limiar estipulado de acordo com uma distribuição binomial. O sistema transita de um estado para outro com probabilidade 1 durante um período de carregamento. Pois, a cadeia de Markov é modelada sobre a ótica do HAP. Após o período de carregamento, o sistema transita com probabilidade 1 para o estado em que nenhuma tentativa de transmissão ocorreu. Isso decorre do descarte de pacotes realizado no mesmo *slot* em que o sinal de despertar é recebido. Similar ao modo de operação HBC, a solução da cadeia de Markov nos permite encontrar as probabilidades estacionárias de estado do sistema, e da mesma forma obter resultados para as medidas de desempenho. Também, o modelo analítico proposto para o modo de operação DBC foi validado via simulações Monte Carlo. Uma simulação é realizada para o conjunto específico de parâmetros: Número de estações, taxa agregada de geração de pacotes, limiar de tentativas de transmissão, e número de pacotes de energia do período de carregamento. Simulamos a política de acesso ao canal do protocolo Slotted ALOHA sobre 1 milhão de *slots* para um dado conjunto

de valores de parâmetros. A simulação contempla o carregamento energético ideal dos dispositivos e a estimação do número de transmissões simultâneas ideal pelo HAP. Isto é, todas as estações são completamente carregadas após a transmissão dos  $C$  pacotes de energia consecutivos, e não ocorrem erros de estimação de colisão pelo HAP. Os resultados obtidos via simulação validam os resultados obtidos via modelo analítico com alta precisão.

Em seguida, considerando um canal com desvanecimento em pequena e larga escala, e baseado em informações prévias como a distância do nó mais afastado do HAP, a energia necessária para um dispositivo gerar e transmitir um pacote de dados, e a energia média que o nó mais afastado coleta por *slot*, propomos uma expressão matemática para se obter o número de pacotes de energia que deve compor o período de carregamento a fim de garantir a sustentabilidade energética do usuário mais distante com alta probabilidade.

Por fim, ainda considerando o modelo de canal supracitado, e baseado no estado da rede, na topologia, e na amplitude do sinal recebido pelo HAP, desenvolvemos um método para estimar o número de transmissões simultâneas que geram uma colisão no canal de subida a fim de auxiliar o HAP na contagem do número acumulado de tentativas de transmissão no canal desde o último período de carregamento. A estimação pode ser facilitada a depender da topologia dos nós, ou seja, como os nós estão dispostos no terreno. Por esta razão, apresentamos expressões matemáticas para a estimação de máxima verossimilhança do número de transmissões simultâneas considerando dois casos: quando todos os nós estão a uma mesma distância do HAP (topologia em anel) ou quando os nós estão dispostos aleatoriamente em uma dada área (topologia aleatória). Entretanto, para aplicação desse método o HAP conhece a localização de cada dispositivo, e portanto, sua distância.

Primeiramente, para o caso de canal ideal, ou seja, sem efeito de propagação, percebemos que dentre todos os valores de taxa agregada de geração de pacotes considerados, os que se encontram no intervalo  $1 \leq \lambda \leq 2$  exibem melhor desempenho para redes com até 100 estações. E mais, nesse intervalo é possível manter desempenhos muito próximos ao máximo teórico estabelecido pelo Slotted ALOHA tradicional para um número de estações  $N \geq 50$ , alterando o valor de taxa agregada e o valor de limiar. Para uma rede com  $N = 100$  estações, taxa agregada  $\lambda = 1,28$  pacotes/s e valor de limiar  $L = 46$ , a vazão média normalizada alcança o patamar de 97,09% do máximo teórico estabelecido pelo Slotted ALOHA tradicional. Além disso, para uma dada taxa agregada (no intervalo considerado), é possível encontrar desempenhos semelhantes para valores de limiar distantes. Isso exprime alta flexibilidade na elaboração do projeto do sistema. Por exemplo, se queremos reduzir a interferência causada em redes próximas, podemos reduzir a transmissão de pacotes de energia aumentando o valor do limiar, e ainda manter um bom desempenho. Para os valores de  $N$  considerados, taxas agregadas acima do intervalo especificado tendem a gerar mais colisões e restringem à poucos limiares os melhores desempenhos, mais especificamente, para alguns valores de  $L$  mais próximos de  $N$ . Certamente, o parâmetro mais importante do sistema é o limiar de transmissões realizadas ou de dispositivos descarregados  $L$ . Pois, para cada valor de taxa média de geração de pacotes agregada, há um limiar que atinge uma vazão máxima. Pois, para cada taxa, há um limiar que atinge uma vazão máxima. A escolha de um valor do limiar  $L$  implica, indiretamente, na escolha de um tamanho de ciclo médio, o que leva a algumas semelhanças entre este trabalho e o frame slotted ALOHA [6], pois este último analisa o desempenho da rede em

função do tamanho de quadro. Ainda, o valor de limiar ótimo  $L^*$  implica em um tamanho de ciclo médio ótimo, ou aquele número de slots mais adequado a ocorrência de mais transmissões bem sucedidas. Por isso, este trabalho elencou para redes de tamanhos distintos, seus respectivos limiares e taxas que atingem o maior desempenho.

Há uma redução de desempenho em sistemas cuja transferência de energia sem fio é realizada na mesma banda que a transmissão de informação. Pois, parte do tempo de operação da rede deve ser dedicado a energização dos dispositivos, reduzindo a ocorrência dos demais eventos sobre o canal, e principalmente, das transmissões bem sucedidas. Dessa forma, o aumento do período de carregamento impacta no desempenho da rede. Entretanto, garante com alta probabilidade a sustentabilidade energética do sistema. Com isso, deve-se projetar a rede de modo eficiente e escolher parâmetros adequados para se reduzir o período de carregamento visando altos desempenhos e ainda manter a sustentabilidade energética. Vimos que para um cenário com período de carregamento  $C \leq 10$  pacotes de energia, valores de taxa agregada no intervalo  $1 \leq \lambda \leq 2$  e número de estações  $N \leq 100$ , ainda é possível se alcançar bons desempenhos. Além disso, os resultados mostraram que a questão da sustentabilidade energética é crítica quando adotamos limiares próximos ao tamanho da rede, o que implica no problema de nem todos os dispositivos iniciarem o ciclo como ativos. Entretanto, à medida que o limiar decresce, esse problema impacta menos no desempenho de uma rede com alta probabilidade de recarregamento. Pois o número de estações que não atingem a energia necessária para iniciar um novo ciclo em modo ativo é muito menor, sendo possível, até, reduzir o número de pacotes de energia no período de carregamento, e assim, possibilitar o aumento do desempenho da rede.

Os métodos de estimação do número de transmissões simultâneas propostos, tanto para a topologia em anel quanto para a aleatória, mostraram-se eficazes, na maioria dos cenários, para um vasto conjunto de limiares, uma vez que não alteraram significativamente as medidas de desempenho do sistema. Entretanto, mais uma vez, para valores de limiares mais próximos de  $N$ , as estimações incorretas tendem a afetar a operação da rede por se tratarem de cenários críticos. Para esses casos, uma solução seria implementar um contador de *slots* vazios consecutivos, e, assim que o mesmo ultrapasse um dado limite estipulado, o HAP, mesmo não atingindo o limiar  $L$  transmitiria os pacotes de energia, pois julgaria que todos os dispositivos se encontram descarregados. Além disso, um fator que acarreta um número maior de erros de estimação é a consideração do canal com desvanecimento Rayleigh. Esse aspecto retrata um canal sem linha de visada, onde o sinal recebido é resultado dos múltiplos sinais refletidos, refratados e difratados no canal, caracterizando assim, o pior caso de canal. Um modelo de propagação de canal com linha de visada (por exemplo, desvanecimento Rice) aumenta a potência recebida por um dispositivo sem fio (estação ou HAP), devido à componente de sinal dominante que segue o caminho de propagação na linha de visão. Dessa forma, as componentes de caminho múltiplos aleatórias são sobrepostos a um sinal dominante estacionário. A tecnologia de transferência de energia via sinais de RF é aplicada à redes cujas estações encontram-se a curtas distâncias do HAP. Assim, um modelo de canal com linha de visada pode aumentar a precisão do método de estimação do número de transmissões simultâneas e a quantidade de energia capturada por *slot*, uma vez que a potência recebida é bem maior devido à baixa atenuação da componente do sinal na linha de visão nos cenários considerados (pequenas

distâncias).

Neste trabalho não coube uma comparação do protocolo proposto com os trabalhos relacionados devido as especificidades de cada trabalho. Apesar da maioria dos trabalhos utilizarem o protocolo frame Slotted ALOHA, a comparação seria injusta por este considerar um quadro com um número fixo de *slots* para acesso aleatório e tráfego saturado. Já em nosso modelo, o número de *slots* que compõem o período de transmissão de dados é aleatório com tráfego não saturado.

Considerando os objetivos elencados, este trabalho contribuiu com a proposta de operação do Slotted ALOHA com transferência de energia, tendo em vista o cenário de dispositivos com recursos escassos. Apresentou uma modelagem analítica do sistema em condições ideais, desenvolveu um método para o dimensionamento do período de carregamento a fim de garantir a sustentabilidade energética da rede com alta probabilidade, baseado em parâmetros do sistema, e propôs métodos para a estimação do número de transmissões simultâneas em uma colisão para auxiliar a contagem do número acumulado de transmissões no canal pelo HAP considerando as topologias da rede e parâmetros do sistema.

Como trabalhos futuros, pretende-se utilizar um modelo de canal com linha de visada, como canais com desvanecimento Rice ou Nakagami. Dessa forma, podemos avaliar o caso em que a quantidade de energia coletada por slot é maior, reduzir o período de recarga energética e aumentar a vazão do sistema. Além disso, podemos avaliar a precisão do método de estimação do número de transmissões simultâneas com o aumento da potência recebida pelo HAP dado a baixa atenuação da componente direta do sinal em cenários com pequenas distâncias. Ao se utilizar um modelo de canal com linha de visada, seria possível eliminar um conjunto de estações na busca pela maior densidade de probabilidade do método de estimação do número de transmissões simultâneas a partir da intensidade de sinal recebido? Se possível, podemos diminuir o número de verificações realizadas pelo HAP e acelerar o processo de estimação. Assim, o intervalo de tempo de processamento  $T_{proc}$  pode ser reduzido, e, conseqüentemente, o intervalo de tempo de *slot*.

Outra linha emerge da identificação e agrupamento de dispositivos com o intuito de adequar o período de carregamento a um conjunto específico de nós descarregados, ajustando o número de pacotes de energia em cada ciclo a depender do grupo alvo para energização, evitando o desperdício de energia transferida e obtendo uma maior eficiência energética.

Uma questão desafiadora reside em encontrar métodos analíticos para o cálculo do valor ótimo de limiar para um dado conjunto de parâmetros da rede. Encontrar o vazão média normalizada para um dado valor de limiar requer a solução de uma cadeia de Markov específica. Dessa forma, o desenvolvimento de um método analítico para esse fim, requer uma solução que associe uma família de cadeias de Markov geradas para diferentes valores do limiar  $L$  mantendo os demais parâmetros do sistema constantes.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WWW.STATISTA.COM/STATISTICS. 2021.
- [2] ELTRESY, N. A.; DARDEER, O. M. Smart home IoT system by using RF energy harvesting. *Journal of Sensors*, v. 2020, n. 14, p. 518–521, 2020.
- [3] RAGHUNATHAN, V.; KANSAL, A. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In: *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 457–462.
- [4] JUSHI, A.; PEGATOQUET, A.; LE, T. N. Wind energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. In: *2016 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 301–308.
- [5] JU, H.; ZHANG, R. Throughput maximization in wireless powered communication networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 1, p. 418–428, 2014.
- [6] CHOI, H. H.; SHIN, W. Slotted ALOHA for wireless powered communication networks. *IEEE Access*, v. 6, p. 53342–53355, 2018.
- [7] KHAIRY, S.; HAN, M.; CAI, L. X. Sustainable wireless IoT networks with RF energy charging over Wi-Fi (CoWiFi). *IEEE Internet of Things Journal*, v. 6, n. 6, p. 10205–10218, 2019.
- [8] CHOI, H. H.; SHIN, W.; LEVORATO, M. Harvest-or-access: Slotted ALOHA for wireless powered communication networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 68, n. 11, p. 11394–11398, 2019.
- [9] IQBAL, A.; LEE, T. J. Spatio-temporal medium access control for wireless powered IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 19, p. 14822–14834, 2021.
- [10] TIAN, L.; DERONNE, S.; LATRÉ, S. Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for NS-3. In: . New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. ISBN 9781450342162.
- [11] ADU-MANU, K. S.; ADAM, N.; TAPPARELLO, C. Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs): A review. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 14, n. 2, 2018. ISSN 1550-4859.

- [12] PERERA, T. D. P.; JAYAKODY, D. N. K.; SHARMA, S. K. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 1, p. 264–302, 2018.
- [13] LU, X.; WANG, P.; NIYATO, D. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, p. 757–789, 2015.
- [14] AKKERMANS, J.; BEURDEN, M. van; DOODEMAN, G. Analytical models for low-power rectenna design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 4, p. 187–190, 2005.
- [15] BI, S.; ZENG, Y.; ZHANG, R. Wireless powered communication networks: an overview. *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 2, p. 10–18, 2016.
- [16] ZHAO, Y.; HU, J.; DIAO, Y. Modelling and performance analysis of wireless lan enabled by RF energy transfer. *IEEE Transactions on Communications*, v. 66, n. 11, p. 5756–5772, 2018.
- [17] ROBERTS, L. G. ALOHA packet system with and without slots and capture. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 5, n. 2, 1975. ISSN 0146-4833.
- [18] ABRAMSON, N. THE ALOHA SYSTEM: Another alternative for computer communications. In: . New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1970. ISBN 9781450379045. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1478462.1478502>>.
- [19] KIM, J.; LEE, J.-W. Performance analysis of the energy adaptive MAC protocol for wireless sensor networks with RF energy transfer. In: *ICTC 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 14–19.
- [20] NADERI, M. Y.; NINTANAVONGSA, P.; CHOWDHURY, K. R. RF-MAC: A medium access control protocol for re-chargeable sensor networks powered by wireless energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 7, p. 3926–3937, 2014.
- [21] LEE, H.; KIM, Y.; AHN, J. H. Wi-Fi and wireless power transfer live together. *IEEE Communications Letters*, v. 22, n. 3, p. 518–521, 2018.
- [22] WU, S.; CHEN, Y.; CHAI, K. K. Analysis and performance evaluation of dynamic Frame Slotted-ALOHA in wireless machine-to-machine networks with energy harvesting. In: *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1081–1086.
- [23] CHOI, H. H.; SHIN, W. Harvest-until-access protocol based on Slotted ALOHA for wireless powered dense networks. In: *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- [24] HADZI-VELKOV, Z.; PEJOSKI, S.; ZLATANOV, N. Proportional fairness in ALOHA networks with RF energy harvesting. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 8, n. 1, p. 277–280, 2019.
- [25] SILVA, C. d. V.; CARVALHO, M. M. Slotted ALOHA for wireless powered resource-constrained networks. In: *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.

- [26] DEMIRKOL, I.; ERSOY, C.; ONUR, E. Wake-up receivers for wireless sensor networks: benefits and challenges. *IEEE Wireless Communications*, v. 16, n. 4, p. 88–96, 2009.
- [27] ROSS, S. M. *Introduction to Probability Models*. [S.l.]: Academic Press, USA, 2014.
- [28] GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- [29] HAVIL, J. *GAMMA Exploring Euler's constant*. [S.l.: s.n.], 2003.
- [30] POWERCAST Corp. <http://www.powercastco.com>. 2021.
- [31] HUANG, J.; ZHOU, Y.; NING, Z. Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects. *IEEE Wireless Communications*, v. 26, n. 4, p. 163–169, 2019.

# ANEXOS

# I. TABELAS E CÓDIGOS PARA SIMULAÇÃO

## I.1 Tabela “t” de Student

NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA					
gl	0,20 (20%)	0,10 (10%)	0,05 (5%)	0,01 (1%)	gl
1	3,0777	6,3137	12,7062	63,6559	1
2	1,8856	2,9200	4,3027	9,9250	2
3	1,6377	2,3534	3,1824	5,8408	3
4	1,5332	2,1318	2,7765	4,6041	4
5	1,4759	2,0150	2,5706	4,0321	5
6	1,4398	1,9432	2,4469	3,7074	6
7	1,4149	1,8946	2,3646	3,4995	7
8	1,3968	1,8595	2,3060	3,3554	8
9	1,3830	1,8331	2,2622	3,2498	9
10	1,3722	1,8125	2,2281	3,1693	10
11	1,3634	1,7952	2,2010	3,1058	11
12	1,3562	1,7823	2,1788	3,0545	12
13	1,3502	1,7709	2,1604	3,0123	13
14	1,3450	1,7613	2,1448	2,9768	14
15	1,3406	1,7531	2,1315	2,9467	15
16	1,3368	1,7459	2,1199	2,9208	16
17	1,3334	1,7396	2,1098	2,8982	17
18	1,3304	1,7341	2,1009	2,8784	18
19	1,3277	1,7291	2,0930	2,8609	19
20	1,3253	1,7247	2,0860	2,8453	20
21	1,3232	1,7207	2,0796	2,8314	21
22	1,3212	1,7171	2,0739	2,8188	22
23	1,3195	1,7139	2,0687	2,8073	23
24	1,3178	1,7109	2,0639	2,7970	24
25	1,3163	1,7081	2,0595	2,7874	25
26	1,3150	1,7056	2,0555	2,7787	26
27	1,3137	1,7033	2,0518	2,7707	27
28	1,3125	1,7011	2,0484	2,7633	28
29	1,3114	1,6991	2,0452	2,7564	29
30	1,3104	1,6973	2,0423	2,7500	30
35	1,3062	1,6896	2,0301	2,7238	35
40	1,3031	1,6839	2,0211	2,7045	40
45	1,3007	1,6794	2,0141	2,6896	45
50	1,2987	1,6759	2,0086	2,6778	50
60	1,2958	1,6706	2,0003	2,6603	60
70	1,2938	1,6669	1,9944	2,6479	70
80	1,2922	1,6641	1,9901	2,6387	80
90	1,2910	1,6620	1,9867	2,6316	90
100	1,2901	1,6602	1,9840	2,6259	100
1000	1,2824	1,6464	1,9623	2,5807	1000
gl	0,20 (20%)	0,10 (10%)	0,05 (5%)	0,01 (1%)	gl

NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA

## I.2 Códigos

CÓDIGOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO IDEAL: HAP ESTIMA CORRETAMENTE O NÚMERO DE TRANSMISSÕES E TODOS OS DISPOSITIVOS SÃO COMPLETAMENTE RECARREGADOS APÓS O PERÍODO DE CARREGAMENTO

##### GERAÇÃO DE PACOTES #####

```
function dev = packetGeneration(n, r, disp)
    a = rand(1,n);
    s = -log(a)./(r/n);
    %s
    for i = 1:n
        if(s(i) > 0.001)
            disp(i).packet = 0;
        else
            if(disp(i).battery == 0)
                disp(i).packet = 0;
            else
                disp(i).packet = 1;
            endif
        endif
        %disp(i).packet
    endfor
    dev = disp;
endfunction
```

##### INICIALIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS #####

```
function [cont, dev] = InicializaDispositivos(n, nslots)

    cont = zeros(1, nslots);

    for i = 1:n
        dev(i).battery = 1;
        dev(i).packet = 0; % 0 não transmite - 1 transmite
        dev(i).distance = 5*rand(); % distância ao ponto de acesso
        dev(i).fading = -log(rand()); % desvanecimento
    endfor

endfunction
```

##### SLOTTED ALOHA #####

```
function [res energyPackets] = simulation(numberDevices, arrivalRate, slots, Limit)
```

```

res = zeros(1,slots);
L = Limit;
C = 0; % número de dispositivos descarregados
energyPackets = 0;

%inicializa os dispositivos e o vetor número de transmissores por slot
[cont_trans_slot, device] = InicializaDispositivos(numberDevices,slots);

%laço principal em que cada incremento é a representação de um tempo de slot
for t = 1:slots
    if(C < L)
        for i = 1:numberDevices
            if( device(i).packet == 1)
                device(i).packet = 0;
                device(i).battery = 0;
                cont_trans_slot(t) = cont_trans_slot(t) + 1;
            endif
        endfor
        C = C + cont_trans_slot(t);
        device = packetGeneration(numberDevices, arrivalRate, device);
    else
        for i = 1:numberDevices
            device(i).battery = 1;
            %device(i).packet = 0; %comenta para enviar pacote após beacon (memória)
        endfor
        cont_trans_slot(t) = 0.5;
        energyPackets++;
        C = 0;
    endif
    %C = C + cont_trans_slot(t);
    %device = packetGeneration(numberDevices, arrivalRate, device);

endfor

res = cont_trans_slot;

endfunction

```

CÓDIGOS DA SIMULAÇÃO CONSIDERANDO EFEITO DE PROPAGAÇÃO NO CANAL DE DESCIDA: IMPACTO

## DO CARREGAMENTO NA VAZÃO DO SISTEMA

#####START DEVICES#####

```
function [cont, dev] = StartDevices(n, nslots, dist)
```

```
cont = zeros(1, nslots);
```

```
f = 900e6;
```

```
c = 3e8;
```

```
G = 3.16;
```

```
P_tx = 0.0001; % (em Watts) equivalente à -10 dBm
```

```
E = 1e-7; % Joules : tempo de slot = 1e-3 segundos, potência de transmissão  
%do dispositivo = -20 dBm ou -10 dBm ( 1e-5 W ou 1e-4 W)
```

```
for i = 1:n
```

```
dev(i).ID = i;
```

```
dev(i).battery = 1;
```

```
dev(i).energy = E;
```

```
dev(i).packet = 0; % 0 não transmite - 1 transmite
```

```
dev(i).distance = dist(i); % (b - a)*rand() + a;
```

```
dev(i).fading = -log(rand()); % desvanecimento
```

```
dev(i).averagePower = (G*G*P_tx*((c/(4*pi*f))^2))*((1/dev(i).distance)^3);
```

```
dev(i).mi = 1/dev(i).averagePower;
```

```
dev(i).collider = 1; % define se o dispositivo já participou de uma colisão
```

```
%dentro do ciclo atual de transmissão
```

```
endfor
```

```
endfunction
```

#####CARREGAMENTO ENERGÉTICO#####

```
function [device, EDid] = ChargingPeriod(device, efi, EDid)
```

```
P_txW = 1; % potência de transmissão do AP em Watts
```

```
f = 900e6;
```

```
c = 3e8;
```

```

for i = 1:length(EDid)

    j = EDid(i);

    if (device(j).energy < 1e-7)

        d = device(j).distance;

        device(j).energy = device(j).energy + (efi)*(0.001)*(3.16*3.16*P_txW*((c/(4*pi*f))^2))

    else

        device(j).battery = 1;
        device(j).energy = 0;
        EDid(i) = 0;

    endif

endfor

EDid = EDid(EDid != 0);

endfunction

#####SLOTTED ALOHA COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA#####

function average_throughput =
simulation_EnergyHarvest(N,vet_rate,ChargingBeaconNumber,efi,vet_distances,mode)

slots = 1000000;

average_throughput = zeros(1,N);

EDID = zeros(1,N);%armazena os ID's dos dispositivos que transmitiram pacotes

A = zeros(length(vet_rate),N);

for k = 1:length(vet_rate)

```

```

for L = 1:N

    [cont_trans_slot, device] = StartDevices(N, slots, vet_distances);

    C = 0;

    ChargingBeaconCount = 1;

    cont_successPacket = 0;

    cont_beacon = 0;

    cont_collision = 0;

    cont_emptySlot = 0;

    m = 1;

    for t = 1:slots

        if(C < L)

            for i = 1:N

                if( device(i).packet == 1)

                    device(i).packet = 0;

                    device(i).battery = 0;

                    device(i).energy = 0;

                    EDID(m) = device(i).ID; %armazena o ID do dispositivo que transmitiu

                    m++;

                    cont_trans_slot(t) = cont_trans_slot(t) + 1;

                endif

            endfor

        endfor

```

```

C = C + cont_trans_slot(t);

device = packetGeneration(N, vet_rate(k), device);

EDID_aux = EDID(EDID != 0);

else

if(ChargingBeaconCount < ChargingBeaconNumber)

    [device, EDID_aux] = ChargingPeriod(device,efi,EDID_aux);

    cont_trans_slot(t) = 0.5;

    ChargingBeaconCount++;

else

    [device, EDID_aux] = ChargingPeriod(device,efi,EDID_aux);

    for i = 1:length(EDID_aux)

        j = EDID_aux(i);

        if(device(j).energy >= 1e-7)

            device(j).battery = 1;
            device(j).energy = 0;
            EDID_aux(i) = 0;

        endif

    endfor

switch mode

    case "DBC"

        [device.packet] = deal(0); %limpa os buffers dos dispositivos

    otherwise

```

```

        endswitch

        cont_trans_slot(t) = 0.5;

        ChargingBeaconCount = 1;

        C = 0;

        EDID = EDID_aux;

        m = length(EDID_aux) + 1;

    endif

endif

if(cont_trans_slot(t) == 1)

    cont_successPacket++;

elseif(cont_trans_slot(t) == 0.5)

    cont_beacon++;

elseif(cont_trans_slot(t) > 1)

    cont_collision++;

else

    cont_emptySlot++;

endif

endfor

average_throughput(L) = cont_successPacket/(slots);

endfor

```

```
endfor
```

```
endfunction
```

```
CÓDIGOS DA SIMULAÇÃO CONSIDERANDO EFEITOS DE PROPAGAÇÃO NOS CANAIS DE SUBIDA  
E DESCIDA NA TOPOLOGIA EM ANEL: OBTENÇÃO DA VAZÃO CONSIDERANDO O CARREGAMENTO  
ENERGÉTICO E ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE TRANSMISSÕES SIMULTÂNEAS
```

```
#####SLOTTED ALOHA COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E MÉTODO DE ESTIMAÇÃO#####
```

```
function control_List = TrialRuns_RT(N,L,rate,ChargingBeaconNumber,efi,dist,mode)
```

```
p = 1 - exp(-rate/N);
```

```
z = b = 1;
```

```
slots = 40;
```

```
average_throughput = 0;
```

```
C = track = 0; %depleted devices and successive empty slots count
```

```
ChargingBeaconCount = 1;
```

```
EDID = zeros(1,N);%armazena os ID's dos dispositivos que transmitiram pacotes
```

```
estimationVector = zeros(1,N);
```

```
value = 0;
```

```
f = 900e6;
```

```
c = 3e8;
```

```
P_tx = 1e-4;% (em Watts) equivalente à -10 dBm
```

```
power = 0;
```

```
totalPower = 0;
```

```
averagePower = (3.16*3.16*P_tx*((c/(4*pi*f))^2))*((1/dist)^3);
```

```

for j = 1:slots

    control_List(j) = InitiateController_RT(N);

endfor

device = StartDevices_RT(N, slots, dist);

for t = 1:slots

    if(C < L)

        control_List(t) = InitiateController_RT(N);

        for i = 1:N

            if( device(i).packet == 1)

                device(i).packet = 0;

                device(i).battery = 0;

                device(i).energy = 0;

                power = (3.16*3.16*P_tx*((c/(4*pi*f))^2))*((1/device(i).distance)^3)
                *(-log(rand()));

                control_List(t).sumPower = control_List(t).sumPower + power;

                power = 0;

                control_List(t).transmissions++;

                EDID(b) = device(i).ID; %armazena o ID do dispositivo que transmitiu

                b++;
            end
        end
    end
endfor

```

```

        endif

    endfor

totalPower = control_List(t).sumPower;

if(control_List(t).transmissions == 0)

    control_List(t).estimation = 0;

    track++;

elseif( control_List(t).transmissions == 1)

    control_List(t).estimation = 1;

    track = 0;

else %elseif(control_List(t).transmissions > 1)

    for m = 2:N - C

        estimationVector(1,m) = (gampdf(totalPower,m,averagePower))*(binopdf(m,N-C,p));

    endfor

    [value,control_List(t).estimation] = max(estimationVector);

    track = 0;

endif

C = C + control_List(t).estimation; %control_List(t).transmissions;

device = packetGeneration_RT(N, rate, device);

EDID_aux = EDID(EDID != 0);

else

    if(ChargingBeaconCount < ChargingBeaconNumber)

```

```

[device, EDID_aux] = ChargingPeriod(device,efi,EDID_aux);

control_List(t) = InitiateController_RT(N);

control_List(t).transmissions = 0.5;

control_List(t).estimation = 0.5;

ChargingBeaconCount++;

else

[device, EDID_aux] = ChargingPeriod(device,efi,EDID_aux);

for i = 1:length(EDID_aux)

    j = EDID_aux(i);

    if(device(j).energy >= 1e-7)

        device(j).battery = 1;
        device(j).energy = 0;
        EDID_aux(i) = 0;

    endif

endfor

switch mode

    case "DBC"

        [device.packet] = deal(0); %limpa os buffers dos dispositivos

    otherwise

endswitch

control_List(t) = InitiateController_RT(N);

control_List(t).transmissions = 0.5;

```

```

        control_List(t).estimation = 0.5;

        ChargingBeaconCount = 1;

        C = 0;

        EDID = EDID_aux;

        b = length(EDID_aux) + 1;

    endif

endif
EDID
endfor

endfunction

CÓDIGOS DA SIMULAÇÃO CONSIDERANDO EFEITOS DE PROPAGAÇÃO NOS CANAIS DE SUBIDA
E DESCIDA NA TOPOLOGIA ALEATÓRIA: OBTENÇÃO DA VAZÃO CONSIDERANDO O CARREGAMENTO
ENERGÉTICO E ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE TRANSMISSÕES SIMULTÂNEAS

#####SLOTTED ALOHA COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA E MÉTODO DE ESTIMAÇÃO#####

function [control_List, distancias] = TrialRuns(N,L,rate,ChargingBeaconNumber,mode)

z = 1;

slots = 40;

average_throughput = 0;

C = 0; %depleted devices count

ChargingBeaconCount = 1;

p = 1 - exp(-rate/N);% packet generation probability

    for j = 1:slots

```

```

    control_List(j) = InitiateController(N);

endfor

[cont_trans_slot, device] = StartDevices(N, slots);

distancias = [device.distance];

for t = 1:slots

    if(C < L)

        [control_List(t), device] = collisionEstimation(device,N,C,p);

        C = C + control_List(t).estimation;

        device = packetGeneration(N, rate, device);

    else

        if(ChargingBeaconCount < ChargingBeaconNumber)

            control_List(t) = InitiateController(N);

            control_List(t).transmissions = 0.5;

            control_List(t).estimation = 0.5;

            ChargingBeaconCount++;

        else

            control_List(t) = InitiateController(N);

            control_List(t).transmissions = 0.5;

            control_List(t).estimation = 0.5;

            [device.battery] = deal(1);

```

```

[device.energy] = deal(0);
[device.collider] = deal(1);

ChargingBeaconCount = 1;

C = 0;

switch mode

    case "DBC"

        [device.packet] = deal(0); %limpa os buffers dos dispositivos

    otherwise

endswitch

endif

endif

if(t/(z*1000) == 1)

    printf("\n slot: %i \n", t);

    z++;

endif

endfor

endfunction

#####START DEVICES#####

function [cont, dev] = StartDevices(n, nslots)

    cont = zeros(1, nslots);

    vet = ([1.2271 2.3171 3.6933 3.0484 2.9957 4.3250 1.9806 5.00 2.3069 4.5133]);

```

```

f = 900e6;

c = 3e8;

G = 3.16;

P_tx = 0.0001;% (em Watts) equivalente à -10 dBm

E = 1e-7; % Joules : tempo de slot = 1e-3 segundos, potência de transmissão do dispositivo =

for i = 1:n
    dev(i).ID = i;
    dev(i).battery = 1;
    dev(i).energy = E;
    dev(i).packet = 0; % 0 não transmite - 1 transmite
    dev(i).distance = vet(i);%(b - a)*rand() + a;
    dev(i).fading = -log(rand()); % desvanecimento
    dev(i).averagePower = (G*G*P_tx*((c/(4*pi*f))^2))*((1/dev(i).distance)^3);
    dev(i).mi = 1/dev(i).averagePower;
    dev(i).collider = 1; % define se o dispositivo já participou de uma colisão dentro do ciclo
    de transmissão
endfor

endfunction

#####FIND COLLIDERS#####

function StructColliders = findColliders(devices, N, state, power, p)

    activeDevices = devices([devices.collider] == 1); % seleciona aqueles dispositivos
    que ainda não transmitiram

    colliders = createDensityVector(N,N); % vetor de struct com a densidade e os
    respectivos usuários que participaram da colisão

    %%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO
    COM 2 USUÁRIOS %%%%%%%%%%

    if( length(activeDevices) > 1)

```

```

activeDevicesAux = createNullDevices(2); % cria dispositivos auxiliares

dens2 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),2),N); % vetor de struct
com os campos de densidade e os ID's dos usuários

t = 1;

for i = 1:length([activeDevices])-1

    activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);

    for j = i+1:length([activeDevices])

        activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);

        dens2(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);

        dens2(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;

        dens2(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;

        t++;

    endfor

endfor

[valor, ind] = max([dens2.intensity]);

colliders(1) = dens2(ind);

clear dens2;

valor = 0;

ind = 0;

endif

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO  
COM 3 USUÁRIOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if( length(activeDevices) > 2)  
  
    clear activeDevicesAux;  
  
    activeDevicesAux = createNullDevices(3);  
  
    dens3 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),3),N);  
  
    t = 1;  
  
    for i = 1:length([activeDevices]) - 2  
  
        activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);  
  
        for j = i+1:length([activeDevices]) - 1  
  
            activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);  
  
            for k = j+1:length([activeDevices])  
  
                activeDevicesAux(3) = activeDevices(k);  
  
                dens3(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);  
  
                dens3(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;  
  
                dens3(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;  
  
                dens3(t).users(1,3) = activeDevices(k).ID;  
  
                t++;  
  
            endfor  
  
        endfor  
  
    endfor
```

```

endfor

[valor, ind] = max([dens3.intensity]);

colliders(2) = dens3(ind);

clear dens3;

valor = 0;

ind = 0;

endif

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO
COM 4 USUÁRIOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if( length(activeDevices) > 3)

    clear activeDevicesAux;

    activeDevicesAux = createNullDevices(4);

    dens4 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),4),N);

    t = 1;

    for i = 1:length([activeDevices]) - 3

        activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);

        for j = i+1:length([activeDevices]) - 2

            activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);

            for k = j+1:length([activeDevices]) - 1

                activeDevicesAux(3) = activeDevices(k);

```

```

for q = k+1:length([activeDevices])

    activeDevicesAux(4) = activeDevices(q);

    dens4(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);

    dens4(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;

    dens4(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;

    dens4(t).users(1,3) = activeDevices(k).ID;

    dens4(t).users(1,4) = activeDevices(q).ID;

    t++;

endfor

endfor

endfor

endfor

[valor, ind] = max([dens4.intensity]);

colliders(3) = dens4(ind);

clear dens4;

valor = 0;

ind = 0;

endif

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO
COM 5 USUÁRIOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if( length(activeDevices) > 4)

    clear activeDevicesAux;

    activeDevicesAux = createNullDevices(5);

    dens5 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),5),N);

    t = 1;

    for i = 1:length([activeDevices]) - 4

        activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);

        for j = i+1:length([activeDevices]) - 3

            activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);

            for k = j+1:length([activeDevices]) - 2

                activeDevicesAux(3) = activeDevices(k);

                for q = k+1:length([activeDevices]) - 1

                    activeDevicesAux(4) = activeDevices(q);

                    for w = q+1:length([activeDevices])

                        activeDevicesAux(5) = activeDevices(w);

                        dens5(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);

                        dens5(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;

                        dens5(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;

                        dens5(t).users(1,3) = activeDevices(k).ID;

                        dens5(t).users(1,4) = activeDevices(q).ID;

                        dens5(t).users(1,5) = activeDevices(w).ID;

```

```

        t++;

    endfor

endfor

endfor

endfor

endfor

[valor, ind] = max([dens5.intensity]);

colliders(4) = dens5(ind);

clear dens5;

valor = 0;

ind = 0;

endif

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% COM 6 USUÁRIOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if( length(activeDevices) > 5)

    clear activeDevicesAux;

    activeDevicesAux = createNullDevices(6);

    dens6 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),6),N);

    t = 1;

```

```

for i = 1:length([activeDevices]) - 5

    activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);

    for j = i+1:length([activeDevices]) - 4

        activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);

        for k = j+1:length([activeDevices]) - 3

            activeDevicesAux(3) = activeDevices(k);

            for q = k+1:length([activeDevices]) - 2

                activeDevicesAux(4) = activeDevices(q);

                for w = q+1:length([activeDevices]) - 1

                    activeDevicesAux(5) = activeDevices(w);

                    for x = w+1:length([activeDevices])

                        activeDevicesAux(6) = activeDevices(x);

                        dens6(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);

                        dens6(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;

                        dens6(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;

                        dens6(t).users(1,3) = activeDevices(k).ID;

                        dens6(t).users(1,4) = activeDevices(q).ID;

                        dens6(t).users(1,5) = activeDevices(w).ID;

                        dens6(t).users(1,6) = activeDevices(x).ID;

                    endfor
                endfor
            endfor
        endfor
    endfor
endfor

t++;

endfor

```

```

        endfor

    endfor

endfor

endfor

endfor

[valor, ind] = max([dens6.intensity]);

colliders(5) = dens6(ind);

clear dens6;

valor = 0;

ind = 0;

endif

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% VERIFICA A MAIOR DENSIDADE CONSIDERANDO UMA COLISÃO
COM 7 USUÁRIOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if( length(activeDevices) > 6)

    clear activeDevicesAux;

    activeDevicesAux = createNullDevices(7);

    dens7 = createDensityVector(nchoosek(length([activeDevices]),7),N);

    t = 1;

    for i = 1:length([activeDevices]) - 6

```

```

activeDevicesAux(1) = activeDevices(i);

for j = i+1:length([activeDevices]) - 5

    activeDevicesAux(2) = activeDevices(j);

    for k = j+1:length([activeDevices]) - 4

        activeDevicesAux(3) = activeDevices(k);

        for q = k+1:length([activeDevices]) - 3

            activeDevicesAux(4) = activeDevices(q);

            for w = q+1:length([activeDevices]) - 2

                activeDevicesAux(5) = activeDevices(w);

                for x = w+1:length([activeDevices]) - 1

                    activeDevicesAux(6) = activeDevices(x);

                    for o = x+1:length([activeDevices])

                        activeDevicesAux(7) = activeDevices(o);

                        dens7(t).intensity = computePDF(activeDevicesAux, N, state, power, p, i);

                        dens7(t).users(1,1) = activeDevices(i).ID;

                        dens7(t).users(1,2) = activeDevices(j).ID;

                        dens7(t).users(1,3) = activeDevices(k).ID;

                        dens7(t).users(1,4) = activeDevices(q).ID;

                        dens7(t).users(1,5) = activeDevices(w).ID;

                        dens7(t).users(1,6) = activeDevices(x).ID;

                        dens7(t).users(1,7) = activeDevices(o).ID;

```

```

        t++;

    endfor

endfor

endfor

endfor

endfor

endfor

endfor

[valor, ind] = max([dens7.intensity]);

colliders(6) = dens7(ind);

clear dens7;

valor = 0;

ind = 0;

endif

[valor, ind] = max([colliders.intensity]);

    StructColliders = colliders(ind);

endfunction

#####VETOR DE DENSIDADES#####

function Den = createDensityVector(T,N)

    for i = 1:T

        Den(i).intensity = 0;
    endfor
endfunction

```

```

    Den(i).users = zeros(1,N);

endfor

endfunction

#####HYPOEXPONENCIAL: FUNÇÃO PRINCIPAL#####

function density = computePDF(dev,N,state,power, p)

    m = length([dev]);

    density = 0;

    for i = 1:m

        ref = dev(i).ID;

        density = density + dev(i).mi*exp(-dev(i).mi*power)*p^m*(1-p)^(N-state-m)
            *funcProdut(dev,ref);

    endfor

endfunction

#####HYPOEXPONENCIAL: FUNÇÃO AUXILIAR #####

function prodt = funcProdut(dev,ref)

    prodt = 1;

    mu = dev([dev.ID] == ref);

    md = dev([dev.ID] != ref);

    m = length(md);

    for i = 1:m

        prodt = prodt*(md(i).mi)/(md(i).mi - mu.mi);

    endfor

endfunction

```

```

endfor

endfunction

#####CRIAR OS DISPOSITIVOS#####

function devs = createNullDevices(n)

for i = 1:n
    dev(i).ID = 0;
    dev(i).battery = 0;
    dev(i).energy = 0;
    dev(i).packet = 0; % 0 não transmite - 1 transmite
    dev(i).distance = 0;
    dev(i).fading = 0; % desvanecimento
    dev(i).averagePower = 0;
    dev(i).mi = 0;
    dev(i).collider = 0; % define se o dispositivo já participou de uma colisão
    dentro do ciclo atual de transmissão
endfor

devs = dev;

endfunction

#####ESTIMAÇÃO DE COLISÃO#####

function [slotReport, device] = collisionEstimation(device,N,state,p)

t = 1;

cont_trans_slot = 0;

f = 900e6;

c = 3e8;

P_tx = 0.0001;% (em Watts) equivalente à -10 dBm

power = 0;

estimationVector = zeros(1,N);

```

```

slotReport = InitiateController(N);

for i = 1:N

    if( device(i).packet == 1)

        device(i).packet = 0;

        device(i).battery = 0;

        device(i).energy = 0;

        slotReport.ID(t) = device(i).ID;

        power = (3.16*3.16*P_tx*((c/(4*pi*f))^2))*((1/device(i).distance)^3)*(-log(rand()))

        slotReport.sumPower = slotReport.sumPower + power;

        power = 0;

        t++;

        slotReport.transmissions++; %número de usuários que transmitiram no slot atual

    endif

endfor

totalPower = slotReport.sumPower;

if(slotReport.transmissions == 0)

    slotReport.estimation = 0;

elseif( slotReport.transmissions == 1)

    slotReport.estimation = 1;

    slotReport.IDestimation = slotReport.ID;

```

```

    device(slotReport.ID(slotReport.ID != 0)).collider = 0;

elseif(slotReport.transmissions > 1)

    vari = findColliders(device, N, state, power, p);

    for l = 1:length(vari.users(vari.users != 0))

        device([device.ID] == vari.users(1,l)).collider = 0;

        slotReport.IDestimation(1,l) = vari.users(1,l);

    endfor

    slotReport.estimation = length(vari.users(vari.users != 0));

endif

endfunction

#####INICIALIZA CONTROLADOR DE DADOS#####

function control = InitiateController(N)

    control.ID = zeros(1,N); %lista de IDs dos usuários que transmitiram no slot atual
    control.IDestimation = zeros(1,N); % lista de ID's dos usuários cujo o HAP identificou
    à partir da estimação
    control.transmissions = 0; %número de usuários que transmitiram no slot atual
    control.sumPower = 0;%soma das potência no receptor do HAP (potência total recebida pelo
    HAP em um slot
    control.estimation = 0;

endfunction

```