Pós-Graduação em Ciência da Computação

BRUNA ALVES DA SILVA

CONSUMO DE ENERGIA ÓTIMO EM REDES *AD HOC* ALOHA E CSMA/CA CONSIDERANDO AS CAMADAS FÍSICA E DE ENLACE

Recife
2019

BRUNA ALVES DA SILVA

CONSUMO DE ENERGIA ÓTIMO EM REDES *AD HOC* ALOHA E CSMA/CA CONSIDERANDO AS CAMADAS FÍSICA E DE ENLACE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Sistemas de Comunicação

Orientador: Renato Mariz de Moraes

Recife
2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

S586c Silva, Bruna Alves da
Consumo de energia ótimo em redes *Ad Hoc* Aloha e Csma/Ca considerando as camadas física e de enlace / Bruna Alves da Silva. – 2019.
87 f.: il., fig., tab.

Orientador: Renato Mariz de Moraes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2019.
Inclui referências e apêndices.

1. Ciência da computação. 2. Redes *Ad Hoc*. 3. Consumo de energia. I. Moraes, Renato Mariz de (orientador). II. Título.

004 CDD (23. ed.) UFPE- MEI 2019-062

Bruna Alves da Silva

“Consumo de Energia Ótimo em Redes Ad Hoc Aloha e Csma/Ca Considerando as Camadas Física e de Enlace”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 15/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Daniel Carvalho da Cunha
Centro de Informática / UFPE

_____

Prof. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Júnior
Escola Politécnica de Pernambuco/UPE

_____

Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes
Centro de Informática / UFPE
(**Orientador**)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelos dons recebidos e graças recebidas ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, Renato Mariz de Moraes, pela parceria, pelo incentivo e por acreditar em minha capacidade e à FACEPE (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo financiamento do projeto proposto.

Agradeço também à minha família, em especial à minha mãe e à minha avó, por toda paciência e suporte durante os períodos mais difíceis.

Ao meu companheiro de vida e estudo, Julio Venâncio, pela parceria, paciência e compreensão por todas as vezes que deixamos que fazer qualquer outra coisa para estudar.

Aos meus amigos, por compreenderem minha falta de tempo, e aos colegas do laboratório de pesquisa que tornaram esses dois anos leves e descontraídos.

RESUMO

Em redes sem fio *ad hoc*, e também de sensores, deseja-se que as estações possam atuar de maneira eficiente, com o mínimo de interferência humana possível durante seu funcionamento, para economizar o máximo de energia de suas baterias. Técnicas para otimizar e reduzir o consumo energético nesses dispositivos vêm sendo desenvolvidas ao longo do tempo a fim proporcionar a longevidade de operação nessas redes. Fazendo uso de uma abordagem *crosslayer*, é apresentado aqui um modelo de consumo de energia em função de parâmetros das camadas física e de enlace, que modela o consumo energético dos dispositivos que operam nessas redes. Em um primeiro momento, é realizado um estudo a partir de uma abordagem que faz uso da realização da comunicação a um salto, ou seja, a comunicação se dá de forma direta do transmissor para o receptor. Um segundo estudo considera a realização da comunicação a múltiplos saltos em um cenário em que os nós estão distribuídos linearmente equidistantes um dos outros. E, a fim de modelar o problema para que este se assemelhasse com casos práticos, é considerado também um cenário em que a rede é formada por nós que estão distribuídos de maneira aleatória. Foram utilizados aqui os protocolos de controle de acesso ao meio*slotted* Aloha e CSMA/CA para modelar a comunicação entre os nós. Como resultado, foram obtidas a potência ótima de transmissão e as faixas de valores de tamanho do pacote de dados e da taxa de transmissão que proporcionaram menor consumo médio de energia para a transmissão de um bit a cada salto.

Palavras-chave: Redes *Ad Hoc*. Consumo de Energia. *Slotted* Aloha. CSMA/CA.

ABSTRACT

In ad hoc and sensor wireless networks, it is desirable that stations can operate efficiently, with less human interference during operation, and save energy from their batteries to extend network lifetime. Techniques to optimize and reduce the energy consumption in these devices have been developed over time in order to provide longevity of operation in these networks. Using a crosslayer approach, we present a model of energy consumption as a function of physic and link layers parameters, which models the energy consumption of devices that operate in these networks. First, a study is carried out from an approach that makes use a single hop communication, that is, the communication takes place directly from transmitter to receiver. A second study considers the multihop communication in a scenario in which nodes are distributed linearly equidistant from one another. In addition, in order to model the problem so that it resembles what happens in practice, it is considered a scenario in which the network is formed by nodes that are randomly distributed. For these scenarios, we used the medium access control protocols *slotted* Aloha and CSMA/CA to model the communication between the nodes. Another contribution of this work is to obtain the optimum transmission power as a function of the data packet size and transmission rate that provide the lowest average power consumption for the transmission of one bit at each communication hop.

Keywords: Ad hoc networks. Energy consumption. Slotted Aloha. CSMA/CA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parâmetros utilizados para modelar o consumo de energia. 16
Figura 2 – Redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Fonte: Acervo pessoal da autora. . 20
Figura 3 – Aplicações práticas de redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Adaptada de: (AGRAWAL, 2017) 22
Figura 4 – Comunicação. Fonte: Acervo pessoal da autora. 23
Figura 5 – Protocolo *Slotted* Aloha. Adaptada de (BENTON, 2010). 25
Figura 6 – Mecanismo de acesso básico. Adaptada de: (BIANCHI, 2000) 25
Figura 7 – Mecanismo de acesso com *Request to Send* (RTS)/*Clear to Send* (CTS). Adaptada de (COMMITTEE et al., 1999) 26
Figura 8 – Funcionamento *Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Adaptada de (PIMENTA; MORAES, 2015) 27
Figura 9 – Rede linear de i saltos equidistantes contendo n nós. 36
Figura 10 – Cadeia de Markov bidirecional. Fonte:(TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010) 40
Figura 11 – Rede aleatória. Adaptada de (GHOBAD; MORAES, 2012). 43
Figura 12 – Potência ótima de transmissão em função de R (4.12(a)) e de N_b (4.12(b)). 47
Figura 13 – $\overline{E}_{1hop}$ em função da taxa de transmissão de dados R. 48
Figura 14 – Taxa de erro de bit (Eq. (3.14)) em função da taxa de transmissão de dados R. 49
Figura 15 – $\overline{E}_{1hop}$ em função do tamanho do pacote N_b. 49
Figura 16 – $\overline{E}_{1hop}$ em função da taxa de transmissão de dados R e em função do tamanho do pacote N_b para $n = 10$ nós na rede e distância $d = 10$ metros entre o par de nós comunicantes. 50
Figura 17 – Energia média por bit em função do tamanho do pacote N_b. 51
Figura 18 – Energia média por bit em função da taxa de transmissão R. 51
Figura 19 – Potência ótima de transmissão P_0 *versus* Taxa de transmissão R para $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$. 52
Figura 20 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} e potência ótima de transmissão P_0 *versus* Tamanho do pacote N_b. 53
Figura 21 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ e potência ótima de transmissão P_0 *versus* distância d entre fonte e destino. 53
Figura 22 – Verificação do tamanho da janela de *backoff* para uma rede linear composta de n nós e um número i de saltos equidistantes, para $\alpha = 4$. . . . 55
Figura 23 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ em função do tamanho do pacote N_b, comparando os protocolos *Medium Access Control* (MAC) CSMA/CA e *slotted* Aloha. 56

Figura 24 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ em função da taxa de transmissão R, comparando os protocolos MAC CSMA/CA e *slotted* Aloha. 57
Figura 25 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função do tamanho do pacote N_b. 58
Figura 26 – Verificação da potência ótima de transmissão P_0 em função do tamanho do pacote N_b. 59
Figura 27 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} *versus* o tamanho do pacote N_b. 60
Figura 28 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função da taxa de transmissão R. 60
Figura 29 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função da taxa de transmissão R. 61
Figura 30 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} *versus* taxa de transmissão R. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros empregados no modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para rede *slotted* Aloha de 1 salto. 36

Tabela 2 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para redes *slotted* Aloha e CSMA com saltos equidistantes. 38

Tabela 3 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para rede aleatória *slotted* Aloha. 45

Tabela 4 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para as redes *slotted* Aloha e CSMA/CA com saltos equidistantes. 54

LISTA DE ACRÔNIMOS

ACK *Acknowledgment* 25

BER *Bit Error Rate* 29

BPSK *Binary Phase Shift Keying* 35

CSMA/CA *Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance* 15

CTS *Clear to Send* 26

CW *Contention Window* 27

DCF *Distributed Coordinator Function* 24

DIFS *Distributed InterFrame Space* 25

$\overline{EDRb}$ *Energy Distance Ratio per Bit* 33

GPS *Global Positioning System* 23

HOL *Head-of-Line* 39

MAC *Medium Access Control* 15

NAV *Network Allocation Vector* 26

RSSF Redes de Sensores sem Fio 14

RTS *Request to Send* 26

SIFS *Short Interframe Space* 26

VANETs *Vehicular Ad hoc Networks* 24

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de atenuação do sinal com a distância
α_m	Constante proveniente do tipo de modulação empregada
α_{amp}	Nível de potência do circuito de amplificação
β_m	Constante proveniente do tipo de modulação empregada
β_{amp}	Constante de proporcionalidade do circuito de amplificação
γ	Relação sinal-ruído
δ	Probabilidade de apenas uma estação transmitir com sucesso (*slotted* Aloha)
ζ	Probabilidade de apenas uma estação transmitir com sucesso (CSMA/CA)
θ	Ângulo máximo de desvio da rota
λ	Comprimento de onda do sinal transmitido
μ	Relação inversa de δ
τ	Probabilidade que uma estação transmita no *slot* a ela destinado (CSMA/CA)
ϕ	Ângulo de busca de nós intermediários que participarão da transmissão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Contextualização e Motivação 14
1.2 Caracterização do Problema 15
1.3 Objetivos e Contribuições 16
1.3.1 Objetivo Geral 16
1.3.2 Objetivos Específicos 16
1.3.3 Contribuições 17
1.3.4 Publicações 17
1.4 Metodologia 18
1.4.1 Escolha de Modelos 18
1.4.2 Otimização 18
1.4.3 Fomentação do Modelo 19
1.4.4 Obtenção de Resultados Numéricos 19
1.4.5 Avaliação dos Resultados 19
1.5 Estrutura da Dissertação 19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 Redes *Ad Hoc* e de Sensores sem Fio 20
2.2 Abordagens e Aplicações 21
2.2.1 Exemplos práticos 22
2.3 Comunicação em redes sem fio *ad hoc* e de sensores 23
2.3.1 Protocolos de Comunicação 24
2.3.1.1* Slotted *Aloha 24
2.3.1.2 CSMA/CA 24
2.4 Trabalhos Relacionados 27
2.4.1 Modelos de Camada Física 28
2.4.2 Modelos de Camada MAC 29
2.5 Conclusão 31
3 CONSUMO DE ENERGIA 32
3.1 Abordagem do Consumo de Energia de Zhang e Gorce (2008) 32
3.2 Redes *Ad hoc slotted* Aloha de um salto 33
3.3 Redes *Ad hoc* lineares *slotted* Aloha com saltos equidistantes 36
3.4 Redes *Ad hoc* lineares CSMA/CA com saltos equidistantes 39
3.5 Redes aleatórias *slotted* Aloha 42
3.6 Conclusão 46

4 RESULTADOS 47
4.1 Redes *Ad hoc slotted* Aloha de um salto 47
4.2 Redes *ad hoc* lineares *slotted* Aloha com saltos equidistantes 50
4.3 Redes *ad hoc* lineares CSMA/CA com saltos equidistantes 54
4.4 Redes aleatórias *slotted* Aloha 57
4.5 Considerações finais 62
5 CONCLUSÃO 63
REFERÊNCIAS 66
APÊNDICE A – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE *SLOTTED* ALOHA DE UM SALTO 71
APÊNDICE B – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE *SLOTTED* LINEAR ALOHA 73
APÊNDICE D – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE LINEAR CSMA/CA 77
APÊNDICE C – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE ALEATÓRIA *SLOTTED* ALOHA 84

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade introduzir o presente trabalho no contexto da importância da minimização do consumo energético dos dispositivos que constituem redes *ad hoc* e de sensores sem fio através de aspectos de camada física e de enlace. Será apresentado inicialmente a motivação contextualizada do trabalho, incluindo o problema do consumo de energia nessas redes. Por conseguinte, serão apresentados os trabalhos relacionados, os objetivos e as contribuições desse trabalho. Por fim, apresentar-se-á a estrutura de distribuição dos capítulos desta dissertação.

1.1 Contextualização e Motivação

Uma rede *ad hoc* é constituída de nós conectados por um canal sem fio e é comumente utilizada para aplicações dedicadas e computação móvel e por, no geral, apresentar natureza descentralizada e fácil implantação (KUMAR; KUMAR; KAIWARTYA, 2017; MA; YANG; KWAK, 2017; XIAO; IBRAHIM; CHRISTIANSON, 2014). Tal afirmação é válida uma vez que não há necessidade de uma infraestrutura muito complexa para a criação dessas redes pois, os denominados nós que as constituem podem ser desde sensores, que são constituídos de circuitos integrados de baixo custo e baixa capacidade computacional (AGRE; CLARE, 2000), até os nossos próprios *smart phones*.

Em Redes *ad hoc* e também nas Redes de Sensores sem Fio (RSSF), deseja-se que os dispositivos consigam se autoajustar às diversas condições de operação, de forma a resultar em seu melhor desempenho funcional (BISPO, 2015). Atrelado ao fator autoajuste, deve-se levar em consideração o conceito de escalabilidade nessas redes, uma vez que estas podem aumentar ou diminuir de tamanho durante o período em que se encontram operantes. Deve-se considerar também que essas redes podem ser móveis e, portanto, devem ser tolerantes a falhas e desconexões.

O consumo energético é visto como ponto crítico em redes *ad hoc* e de sensores sem fio (ANASTASI et al., 2009) visto que os dispositivos operam a bateria. Em GUPTA; SHEKOKAR (2016) e MOBIN; MOHAMMED; MOMEN (2017), foi mostrado que o consumo de energia é uma das principais medidas de desempenho em redes cujos dispositivos funcionam à bateria, uma vez que está diretamente relacionado à longevidade de operação do sistema como um todo. Deste modo, o planejamento e a implantação de tais redes são aspectos importantes, pois impactam significativamente nas aplicações que estarão limitadas pelo consumo de energia (DA SILVA; DE MORAES, 2018a). Vale destacar ainda nesse aspecto que a utilização dos recursos de energia - como baterias - em redes sem fio *ad hoc* e também de sensores, está fortemente relacionada à comunicação. Consequentemente, o consumo de energia é, em geral, correlacionado a diversos parâmetros das camadas física e de enlace destas redes (DA SILVA; DE MORAES, 2018b).

Estratégias a nível de camada física, como, por exemplo, a utilização de modelagens matemáticas que reduzam o consumo energético para se transmitir um bit de dados com sucesso

(ZHANG; GORCE, 2008), vêm sendo utilizadas em redes *ad hoc* e de sensores sem fio. De maneira análoga, abordagens de subcamada de controle de acesso ao meio (do inglês *Medium Access Control* (MAC)), como a aplicação de protocolos de comunicação (SURATY FILHO; MAMAN, 2017; SHRESTHA; HOSSAIN; CAMORLINGA, 2013), têm tido seu destaque no que se refere ao aumento da longevidade de operação dessas redes. E, tendo em vista as informações que são transmitidas, a massa de dados que está sendo gerada constantemente demanda recursos energéticos que degradam a rede (BISPO, 2015), colocando em risco o tempo de operação da mesma.

Deste modo, motivados pela necessidade de explorar novas abordagens que considerem a redução do consumo de energia, aspectos de camada física e de enlace são aqui considerados. Este trabalho, portanto, busca analisar o comportamento do consumo de energia para a realização da comunicação por múltiplos saltos em função do tamanho do pacote e da taxa de transmissão de dados, considerando também os protocolos MAC *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975) e CSMA/CA (do inglês *Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA)) (BIANCHI; FRATTA; OLIVERI, 1996).

1.2 Caracterização do Problema

Como foi mencionado na seção anterior, as redes *ad hoc* e de sensores sem fio apresentam limitações em se tratando de recursos energéticos. O termo *ad hoc* é de origem latina e tem por tradução literal "para esta finalidade". Tratam-se, portanto, de redes com funções dedicadas que são criadas com objetivos pré-definidos. Por este motivo, muitas vezes são implantadas em locais remotos cuja possibilidade de substituição e manutenção podem se tornar inviáveis (BISPO, 2015).

Tendo em vista que essas redes são formadas por dezenas, centenas ou até mesmo milhares de dispositivos, o responsável por projetá-las deve se preocupar em escolher *hardwares* que suportem a aplicação escolhida, bem como aplicações que demandem o mínimo consumo de energia, a fim de que a rede se mantenha ativa pelo máximo período de tempo possível (DÂMASO, 2015).

É sabido que o consumo energético nessas redes é maior durante o processo de comunicação entre os nós (AKYILDIZ et al., 2002a; ALLARD et al., 2006). E, apesar das restrições a nível de *hardware* e de *software* desses dispositivos, essas redes coletam uma grande massa de dados continuamente, podendo processá-los internamente ou não (AKYILDIZ et al., 2002a; BISPO, 2015).

Deste modo, o gerenciamento dos recursos energéticos em redes sem fio continuam sendo uma questão importante. Após a transmissão de dados o nível de energia do nó transmissor pode decair. Se o do nó receptor estiver abaixo do limite requerido, a comunicação pode não ser estabelecida, comprometendo o funcionamento da rede. Se houver um decaimento energético também nos nós intermediários, o tempo de vida da rede como um todo diminui até o ponto em

que a mesma se torne inoperante (GUPTA; SAXENA, 2010).

Pode-se considerar, portanto, a utilização de parâmetros a nível de camada física e de subcamada MAC como um caminho para minimizar o consumo energético em redes *ad hoc* e de sensores sem fio. Neste contexto, o controle de energia impacta na camada física devido à necessidade de manter a qualidade do *link* (NARAYANASWAMY et al., 2002) e da comunicação.

1.3 Objetivos e Contribuições

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar abordagens, fazendo uso do emprego de parâmetros das camadas física e de enlace, que minimizem o consumo energético nos dispositivos em redes *ad hoc* e de sensores sem fio.

1.3.2 Objetivos Específicos

Tal como mostrado na Figura 1, a nível de camada física (PHY), pretende-se reduzir o consumo energético através da realização da comunicação a um salto e a múltiplos saltos (considerando uma rede em que os nós estão dispostos de maneira ou linear equidistante ou uniformemente aleatória), da obtenção de uma faixa de valores de taxa de transmissão e de tamanho do pacote de dados, aceitáveis dentro dos limites do *hardware*, que minimizem os impactos do alto consumo de energia durante o processo de comunicação entre os nós.

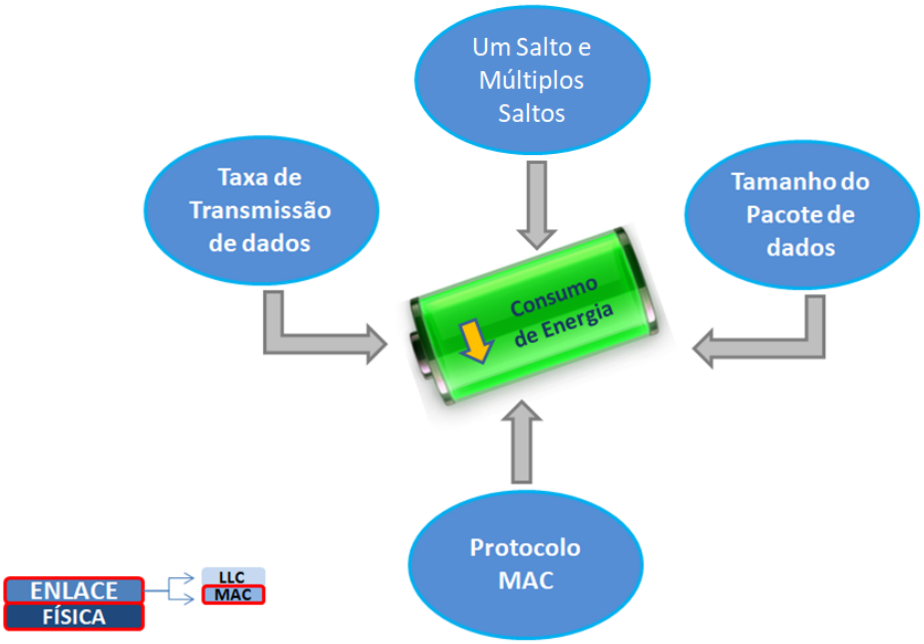


Figura 1 – Parâmetros utilizados para modelar o consumo de energia.

A nível de camada de enlace, pretende-se utilizar protocolos da subcamada MAC a fim de evitar gasto energético pela realização de retransmissões, por consequência de colisão de pacotes

de dados transmitidos ao mesmo tempo pelos nós comunicantes. Nesse sentido serão considerados os protocolos MAC *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975) e o CSMA/CA (TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010).

Para alcançar esses objetivos, modelos de consumo energético e protocolos MAC já existentes foram utilizados a fim de servir como base para o desenvolvimento da pesquisa desse trabalho.

1.3.3 Contribuições

As contribuições deste trabalho são propor uma modelagem híbrida PHY-MAC e que busca reduzir o consumo energético em redes *ad hoc* e de sensores sem fio, a fim de prover maior longevidade de operação para essas redes. Portanto, têm-se por contribuições:

- Definição de *range* (faixa) de taxa de transmissão de dados que proporcione menor consumo energético em função da densidade da rede e do número de saltos realizados durante o processo de comunicação;
- Definição de *range* de tamanho de pacotes de dados que asseguram consumo energético mínimo para a transmissão de um bit com sucesso a um único salto e a múltiplos saltos;
- Obtenção da potência ótima de transmissão em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote de dados (N_b);
- Abordagem que considera o problema do terminal escondido.

1.3.4 Publicações

Foram publicados dois artigos em conferências nacionais que resultaram dos estudos desenvolvidos ao longo da pesquisa.

1. Análise preliminar da energia média gasta para realização da comunicação em redes *ad hoc* Aloha de um salto em função da taxa de transmissão e do tamanho do pacote de dados, que permitiu uma publicação em conferência com *Qualis* B3 em CC:

   SILVA, B.A.; MORAES, R.M. "Consumo de Energia em Função da Taxa de Transmissão e do Tamanho do Pacote em Redes *Ad Hoc* Aloha de um Salto". 17º Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance) em XXXVIII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC). Natal, Brasil, Jul. 2018.

2. Análise da energia média gasta para realização da comunicação em redes *ad hoc* Aloha linear com múltiplos saltos equidistantes em função da taxa de transmissão e

do tamanho do pacote de dados. O referido trabalho gerou o artigo abaixo aceito e apresentado no SBrT2018:

SILVA, B.A.; MORAES, R.M. "Um Estudo sobre o Consumo de Energia em Redes *Ad Hoc* Lineares Aloha com Saltos Equidistantes". XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT'18). Campina Grande, Brasil, Set. 2018.

1.4 Metodologia

1.4.1 Escolha de Modelos

A metodologia desse trabalho consistiu, em um primeiro momento, na seleção de um modelo realista a nível de camada física que fosse rico em parâmetros, de modo que fosse possível a realização de otimização.

A nível de camada física, este trabalho é baseado na modelagem proposta por (ZHANG; GORCE, 2008) para estudo do consumo energético em redes de sensores sem fio por esta apresentar-se de maneira abrangente incorporando os parâmetros de camada física aqui estudados, estar bem definido, permitir sua alteração para considerar os protocolos MAC e a modelagem para múltiplos saltos. Neste contexto, foi desconsiderada a proposta dos autores de encontrar um raio ótimo de transmissão que minimizasse o consumo energético pois, para o caso de redes *ad hoc* e de sensores móveis, a distância é um parâmetro não controlável.

Em termos da abordagem a múltiplos saltos, dois modelos foram considerados. O primeiro deles, proposto por CHEN; O'DEA; CALLAWAY (2002), faz uso de uma topologia linear e dispõe os nós equidistantes uns dos outros. O segundo deles, introduzido por GHOBAD; MORAES (2012), propõe que os nós sejam dispostos uniformemente aleatórios em uma superfície toroidal com base em uma função densidade de probabilidade acumulativa. Nesse aspecto, a estratégia de roteamento utilizada para a comunicação a múltiplos saltos se dá com base em um ângulo θ, que representa o máximo de desvio da rota, e um ângulo ϕ, que representa o desvio da rota em função de uma linha referencial que conecta o nó fonte ao nó destino.

A nível de camada de enlace, foi escolhido em um primeiro momento o protocolo *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975), por sua simplicidade de modelagem. Também foi considerado o protocolo CSMA/CA com modelagem tal como foi proposto por (TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010).

1.4.2 Otimização

Nesta etapa, foi feito o cálculo da potência ótima de transmissão em função do tamanho do pacote de dados e da taxa de transmissão, a fim de que houvesse minimização do consumo energético

1.4.3 Fomentação do Modelo

Nesta etapa, os modelos PHY-MAC foram compostos, desenvolvidos e ajustados para obtenção da proposta deste trabalho.

1.4.4 Obtenção de Resultados Numéricos

A partir da fomentação do modelo, foram gerados resultados numéricos a partir da modelagem proposta com o auxílio do *software* MATLAB.

1.4.5 Avaliação dos Resultados

Por fim, realizou-se a avaliação dos resultados encontrados com base nos cenários implementados. Consideram-se os seguintes coeficientes de atenuação com a distância: $\alpha = 2$, $\alpha = 3$ e $\alpha = 4$ que representam o espaço livre, o canal com média e alta atenuação, respectivamente.

1.5 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, essa dissertação está estruturada em mais 4 capítulos tal como descrito a seguir.

Capítulo 2 - Fundamentação teórica - Apresenta os principais conceitos que baseiam e dão suporte a este trabalho, bem como os trabalhos que fundamentaram o estado da arte e que serviu como base para o desenvolvimento desse trabalho.

Capítulo 3 - Consumo de energia - Apresenta as modelagens que serviram como base para a construção da pesquisa dessa dissertação (ZHANG; GORCE, 2008; BIANCHI; FRATTA; OLIVERI, 1996; TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010; HUNG; MARSIC, 2010), bem como o desenvolvimento da modelagem do consumo de energia que é fruto do estudo dessa dissertação.

Capítulo 4 - Resultados - Este capítulo apresenta os resultados e as respectivas análises realizadas em função do consumo energético em redes *ad hoc* e de sensores sem fio.

Capítulo 5 - Conclusão - Este capítulo apresenta as conclusões, incluindo as principais contribuições, limitações encontradas e trabalhos futuros.

As referências utilizadas para construir a dissertação e apêndices encontram-se no final deste documento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

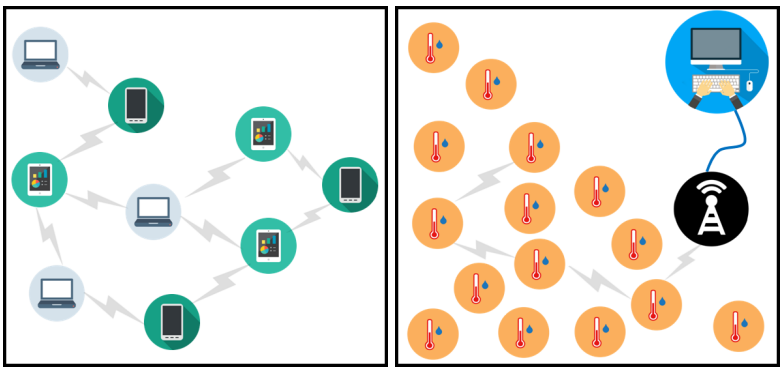
Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão dos estudos relacionados e os conceitos principais que fundamentam este trabalho.

2.1 Redes *Ad Hoc* e de Sensores sem Fio

O termo *ad hoc* é originário do latim e tem por tradução literal “para isto” ou “para esta finalidade” (ROBERT et al., 2009). Uma rede de sensores, por sua vez, é uma subclasse de rede *ad hoc* que consiste de dispositivos autônomos distribuídos espacialmente, os quais utilizam sensores para monitorar condições físicas ou ambientais. A rede *ad hoc*, portanto, trata-se de uma rede com aplicações dedicadas e caracterizadas por apresentarem baixo custo de instalação, facilidade de configuração e por não haver necessidade de um controle central (FERNANDES et al., 2006; FRODIGH; JOHANSSON; LARSSON, 2000). A comunicação entre os dispositivos, por sua vez, se dá através de uma interface sem fio.

Quando se fala em redes sem fio *ad hoc*, e também de sensores, tem-se por ponto crítico a fonte limitada de energia dos dispositivos que as constituem, pois os mesmos operam à bateria (SADIQ et al., 2017; ANASTASI et al., 2009). Outros conceitos críticos comumente vistos quando se fala nessas redes, tal como citado no Capítulo 1, são os de escalabilidade e mobilidade. Por estes motivos, a capacidade de autoajuste da rede deve ser tal que o sistema permaneça disponível pelo máximo tempo possível.

Embora sejam parecidas em termos de conceitos, é importante destacar algumas das principais diferenças entre as redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Como pode ser visto na Figura 2, em uma rede *ad hoc* o número de nós, no geral, é menor do que em uma rede de sensores. Por outro lado, os sensores estão mais propensos a falhas (AKYILDIZ et al., 2002a) pois, além de serem lançados em regiões remotas, suas baterias não são substituídas.



(a) Rede *ad hoc* sem fio. (b) Rede de sensores sem fio.

Figura 2 – Redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Fonte: Acervo pessoal da autora.

Outra característica inerente à Figura 2(b) está no que diz respeito à sua topologia. Tal

como citado anteriormente, como se tratam de redes com recursos energéticos limitados, a topologia de uma rede de sensor é dinâmica. Ou seja, dado que houve falha em um nó, a rede se reorganiza para reestabelecer a conexão. Quando o assunto é comunicação, diferentemente de como ocorre nas redes *ad hoc* (Figura 2(a)) ponto-a-ponto, nas redes de sensores, ela se dá por difusão, ou seja, tem apenas um canal de comunicação compartilhado por todos os dispositivos, os quais recebem todas as mensagens disseminadas na rede.

Em termos de arquitetura, em uma rede sem fio *ad hoc* os nós funcionam ora como cliente, ora como servidor. Em uma rede de sensor, portanto, por questões de limitação de memória e de capacidade computacional, os dispositivos apenas captam as informações do fenômeno que estão monitorando e, através de uma interface sem fio, as encaminham para uma estação-base. Como mostrado na Figura 2(b), através de uma comunicação cabeada, ou via satélite, a estação-base transmite os dados ao usuário para que este interprete-os e tome decisões (AKYILDIZ et al., 2002b).

2.2 Abordagens e Aplicações

Sendo móveis ou não, as redes sem fio *ad hoc* e também de sensores apresentam abordagens tanto no setor comercial como a nível de aplicações pessoais (AKYILDIZ et al., 2002b).

Pode-se citar, como primeiro exemplo de abordagem, as redes subaquáticas. Trata-se de uma área de estudo emergente quando se fala em RSSF. Neste contexto, as particularidades de ter a água como meio de transmissão forçam a existência de compensações tecnológicas para adaptar as RSSFs as mais diversas situações subaquáticas (DAVIS; CHANG, 2012). Neste tipo de rede, os dispositivos ficam imersos, e todo o conteúdo captado é enviado para uma estação base na superfície da água para posterior encaminhamento, através de um *link* via satélite, para uma central de tratamento dos dados.

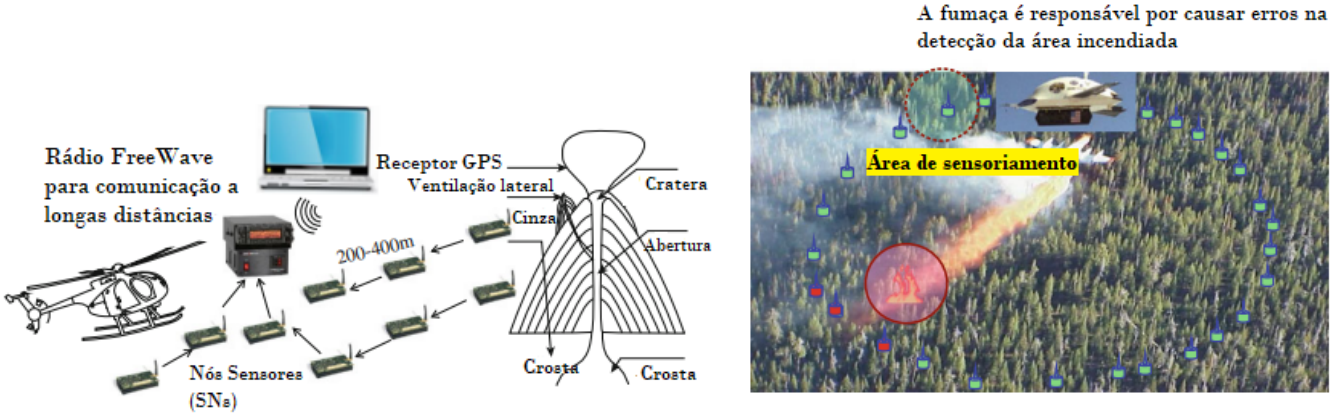
As redes multimídia, *ad hoc* e de sensores, por sua vez, são constituídas dos mais diversos dispositivos, com as mais diversas funcionalidades, conectados através de uma interface sem fio. Elas melhoram o desempenho, bem como a qualidade de serviço de atividade como monitoramento, automação residencial e monitoramento ambiental, permitindo ainda outras aplicações como, por exemplo, assistência médica avançada e controle de processos industriais (SILVA, 2004; AKYILDIZ; MELODIA; CHOWDHURY, 2007).

Outra abordagem são as redes de sensores e atuadores. Nessas redes, como o nome sugere, há a presença de sensores e atuadores. Dado que ocorreu um evento, os sensores detectam e, de forma unidirecional, enviam a informação para os atuadores intervirem no processo (PANNE; FIUME, 1993). Nesse caso, tem-se um sistema automatizado. Outro modo de operação é o sistema semiautomatizado. Nele, os sensores enviam a informação para uma estação central e esta, por sua vez, dispara o comando para os atuadores.

Tem-se ainda as redes de sensores subterrâneas. Seu funcionamento se dá de maneira

similar às redes subaquáticas, diferindo apenas o meio de transmissão que neste caso, é a terra. São comumente utilizadas para monitorar a qualidade do solo para aplicações agrícolas e para monitoramento ambiental por contaminação de substâncias tóxicas (AKYILDIZ; STUNTEBECK, 2006).

Recentemente, abordagens envolvendo veículos, as chamadas redes VANETs (do inglês *Vehicular Ad hoc Networks*), vêm ganhando espaço. Elas incluem comunicações veículo-veículo e veículo-infra-estrutura baseadas em tecnologias de rede local sem fio (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2008). Suas aplicações vão desde avisos de colisão e congestionamento até notificações de emissão de gás carbônico.



(a) Monitoramento de atividades vulcânicas.

(b) Monitoramento de queimadas.

(c) ZebraNet.

Figura 3 – Aplicações práticas de redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Adaptada de: (AGRAWAL, 2017)

2.2.1 Exemplos práticos

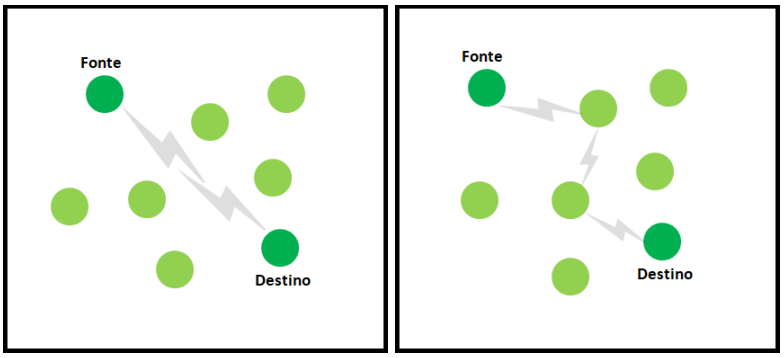
O primeiro exemplo prático, mostrado na Figura 3(a), apresenta uma rede de sensores para monitoramento de atividades vulcânicas. Neste contexto, os sensores são dispostos dentro e nos arredores do vulcão de modo a monitorar as atividades do mesmo. Verificado aumento na temperatura, por exemplo, uma notificação é enviada para que sejam tomadas as devidas providências de modo a evitar maiores desastres.

De maneira análoga, sensores são dispostos em florestas para monitorar possíveis queimadas, tal como mostrado na Figura 3(b). Detectado aumento de calor e/ou a presença de fumaça, autoridades ambientais são acionadas para combater o incêndio.

Por fim, representando o monitoramento de espécies, tem-se na Figura 3(c) o sistema ZebraNet. Esse sistema consiste no monitoramento de zebras, no qual um colar com um sistema especial de posicionamento global (do inglês *Global Positioning System* (GPS)) é posto nas zebras e as informações são passadas de uma para outra. A captação dos dados se dá mediante a aproximação de uma zebra que contenha o colar.

2.3 Comunicação em redes sem fio *ad hoc* e de sensores

Nas redes sem fio *ad hoc*, e também de sensores, a maior parte dos recursos energéticos dos dispositivos é consumida durante o processo de comunicação (DA SILVA; DE MORAES, 2018b). Por esse motivo, os nós que compõem essas redes se comunicam através da realização de saltos.



(a) Comunicação por um salto. (b) Comunicação por múltiplos saltos.

Figura 4 – Comunicação. Fonte: Acervo pessoal da autora.

Na Figura 4(a), tem-se a representação da comunicação por um salto. Nesse tipo de comunicação, os dados são encaminhados diretamente da fonte para o destino. Na comunicação por múltiplos saltos, representada na Figura 4(b), a informação é transmitida do nó fonte para o nó destino através da realização de saltos entre os nós intermediários.

Se comparada à comunicação a um salto, a comunicação por múltiplos saltos possui algumas restrições, ou seja, sua aplicação depende de fatores como a densidade da rede e o modo como os nós estão distribuídos (FRODIGH; JOHANSSON; LARSSON, 2000). Por outro lado, a sua utilização é necessária para prover conectividade entre dois terminais distantes um do outro, bem como a redução do consumo de energia do sistema.

2.3.1 Protocolos de Comunicação

Conhecido por ser o padrão designado para comunicações sem fio através de ondas eletromagnéticas, *Wi-fi*, o padrão IEEE 802.11 tem sido responsável por revolucionar as redes de comunicação locais, pois a difusão da tecnologia vem promovendo a acessibilidade nos mais diversos ambientes (ADAUTO; MORAES, 2018). Esse padrão apresenta a denominada função de coordenação distribuída (do inglês *Distributed Coordinator Function* (DCF)) (COMMITTEE et al., 1999), onde estão incluídas as redes sem fio *ad hoc* e também de sensores. Atrelado ao padrão IEEE 802.11, alguns protocolos de controle de acesso ao meio são utilizados para prover comunicação eficiente. Esta subseção abordará, portanto, os dois protocolos que serão utilizados neste trabalho.

O primeiro deles, *slotted* Aloha, foi escolhido pela simplicidade da modelagem, para representar a probabilidade de uma estação transmitir com sucesso. Afinal, sua utilização ainda é requerida em casos em que haja dificuldade de detectar portadora, como é o caso de redes subaquáticas, e em redes cuja finalidade é o envio de mensagens de emergências, como acontece em algumas aplicações das redes veiculares (do inglês *Vehicular Ad hoc Networks* (VANETs)).

A escolha do protocolo CSMA/CA, por sua vez, se deu por apresentar riqueza de parâmetros e detalhes que minimizam o consumo energético de maneira mais sofisticada do que o *slotted* Aloha. Considerou-se ainda, como diferencial para sua escolha, o fato de abordar a problemática de terminal escondido que é responsável por ocasionar erros na transmissão de pacotes de dados e consequente aumento no consumo energético em decorrência das retransmissões.

2.3.1.1 **Slotted *Aloha***

Por volta de 1975, o protocolo *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975) foi desenvolvido com a finalidade de duplicar o sistema Aloha (ROBERTS, 1972) através da divisão do tempo em *slots*. Portanto, nesse protocolo a estação transmite no início disponível de cada *slot*. Quando duas estações transmitem ao mesmo tempo em um mesmo *slot*, tal como mostrado na Figura 5, há o que chamamos de colisão. Vale ressaltar que A, B, C e D representam os nós transmissores.

Aplica-se ainda a este protocolo alguns métodos para transmissão de dados que incluem um mecanismo denominado obstrução. Através dele, um novo pacote só é gerado após haver a verificação de que houve uma transmissão bem-sucedida. A fim de manter a ordem dos pacotes, o protocolo permite ainda, dado que houve uma colisão, que os pacotes sejam transmitidos do ponto em que colidiram.

Outra diferença do *slotted* Aloha em comparação ao Aloha puro está no que diz respeito à sua vazão que é limitada a cerca de 36% e 18%, respectivamente (WARD; COMPTON, 1993).

2.3.1.2 CSMA/CA

Como citado no início da seção, as redes sem fio *ad hoc* e de sensores têm seu funcionamento baseado no protocolo IEEE 802.11 DCF. No entanto, como as transmissões nessas redes

são feitas utilizando como canal de comunicação o ar, o funcionamento do IEEE 802.11 DCF se dá com base na técnica do CSMA/CA (ADAUTO; MORAES, 2018), que tem por princípio evitar colisão de pacotes de dados.

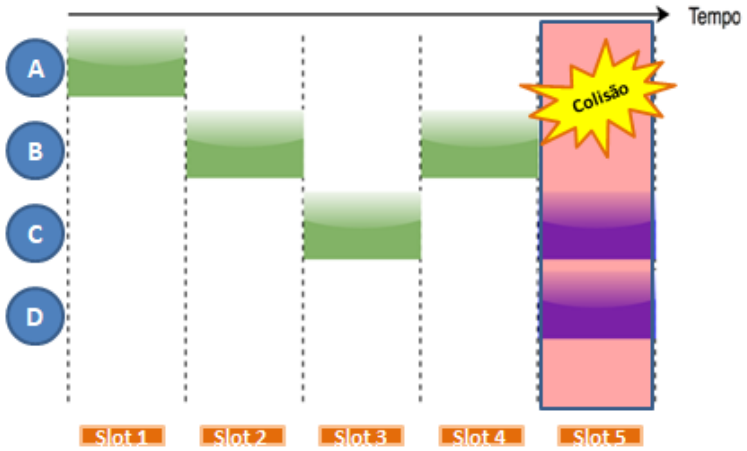


Figura 5 – Protocolo *Slotted* Aloha. Adaptada de (BENTON, 2010).

No CSMA/CA, para que um nó possa transmitir dados, primeiramente é verificado se o canal está livre por um período de tempo distribuído (do inglês *Distributed InterFrame Space* (DIFS)). Uma vez ocorrida uma colisão, espera-se por um período de *backoff* aleatório para tentar transmitir novamente.

Um método padrão para envio de pacotes de dados, denominado de acesso básico, é uma técnica de *handshake* bidirecional no DCF. Ela é caracterizada pela transmissão de um bit de confirmação imediata (do inglês *Acknowledgment* (ACK)), enviado pela estação destino para a estação fonte, após recepção bem sucedida de um pacote de dados enviado pela estação fonte (BIANCHI, 2000).

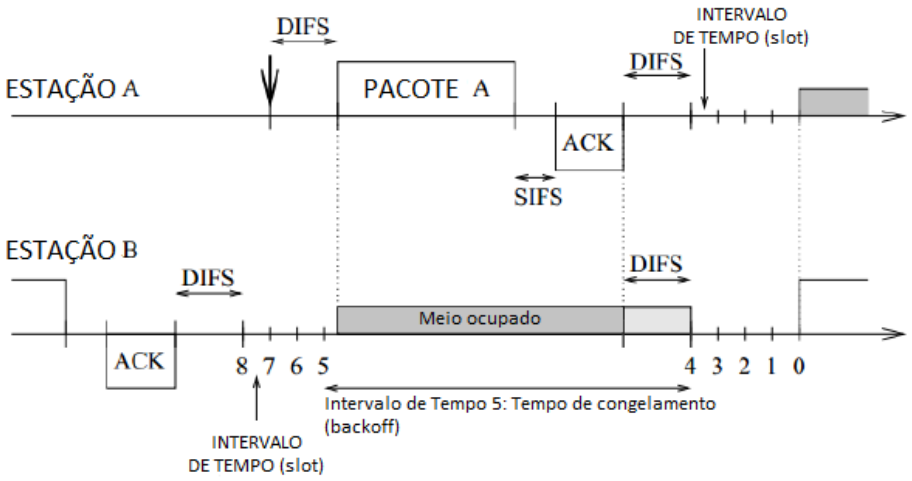


Figura 6 – Mecanismo de acesso básico. Adaptada de: (BIANCHI, 2000)

A Figura 6 representa o mecanismo de acesso básico. Neste cenário, ao final da transmis-

são de um pacote, a estação B aguarda por um período DIFS e escolhe um *backoff* igual a oito antes de transmitir seu próximo pacote. Supondo que o primeiro pacote da estação A chegue no intervalo indicado pela seta, ele só será transmitido após um período DIFS. É possível inferir ainda que o pacote de dados da estação A é transmitido durante o período de congelamento do *backoff* da estação B e isso se deve ao fato da estação B ter detectado que o canal encontrava-se ocupado. Contudo, ao verificar que o canal ficou ocioso, o *backoff* voltou a ser decrementado. Considerando que o pacote transmitido pela estação A chegou no tempo previsto, após um período DIFS, a estação B transmite seu próximo pacote.

Uma outra alternativa de acesso é a que utiliza o *handshake* de quatro direções. Característica do CSMA/CA, a técnica apresenta os mecanismos de envio de requisição para envio de pacote de dados (do inglês *Request to Send* (RTS)) e liberação para envio do pacote de dados (do inglês *Clear to Send* (CTS)).

Como mostrado na Figura 7, quando uma estação deseja transmitir um pacote ela espera por um período de inatividade do canal sentido pelo DIFS. Constatando que o canal está inativo, a estação envia um RTS, que representa a solicitação de permissão para enviar o pacote. A partir do momento que a estação receptora detecta o quadro RTS, após um espaço de *interframe* curto (do inglês *Short Interframe Space* (SIFS)), ela responde enviando um quadro CTS. Tendo recebido o quadro CTS com sucesso, a estação transmissora pode transmitir o pacote de dados.

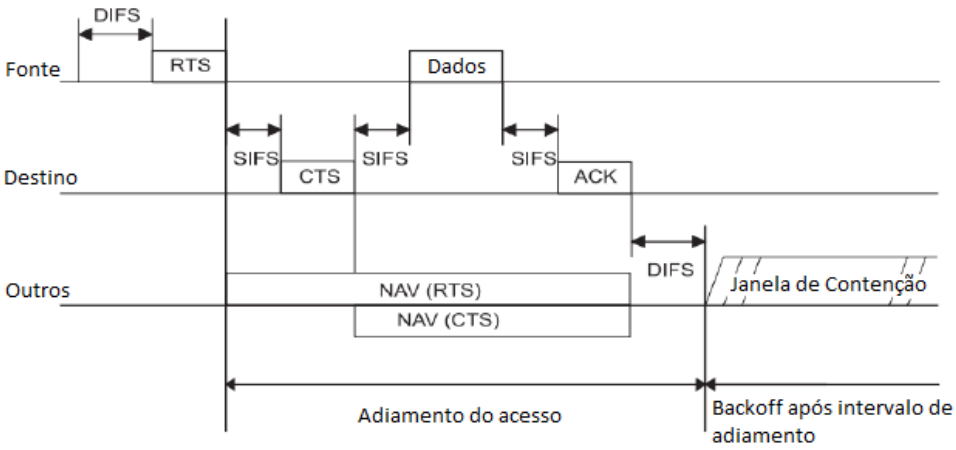


Figura 7 – Mecanismo de acesso com RTS/CTS. Adaptada de (COMMITTEE et al., 1999)

Uma vez que os quadros RTS e CTS carregam consigo informações do comprimento do pacote a ser transmitido, essas informações podem ser lidas por qualquer estação de modo que seja capaz de atualizar o denominado vetor de alocação da rede (do inglês *Network Allocation Vector* (NAV)). O NAV, por sua vez, guarda a informação do tempo em que o canal permanecerá ocupado. Deste modo, uma estação escondida das estações transmissora e receptora, detectando apenas um entre os quadros RTS ou CTS, pode atrasar adequadamente a transmissão adicional e, assim, evitar a colisão (COMMITTEE et al., 1999; BIANCHI, 2000).

De maneira simplificada, o funcionamento do CSMA/CA baseado em contenção pode

ser descrito conforme o fluxograma apresentado na Figura 8. A partir dessa representação, pode ser verificado o fluxo de informação para envio do pacote de dados. Como citado anteriormente, dado que o canal esteja ocupado, espera-se por um período de *backoff* aleatório para tentar enviar o pacote novamente. Quanto à contenção, esta depende do número de transmissões falhas por pacote. Na primeira transmissão, a contenção é setada para o mesmo valor da janela mínima de contenção, CW_{min} (do inglês *Contention Window* (CW)). Após cada transmissão malsucedida, o valor da janela de contenção é dobrado até o valor máximo da janela de contenção $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ (BIANCHI, 2000), como mencionado no padrão (COMMITTEE et al., 1999), onde m é o número de retransmissões.

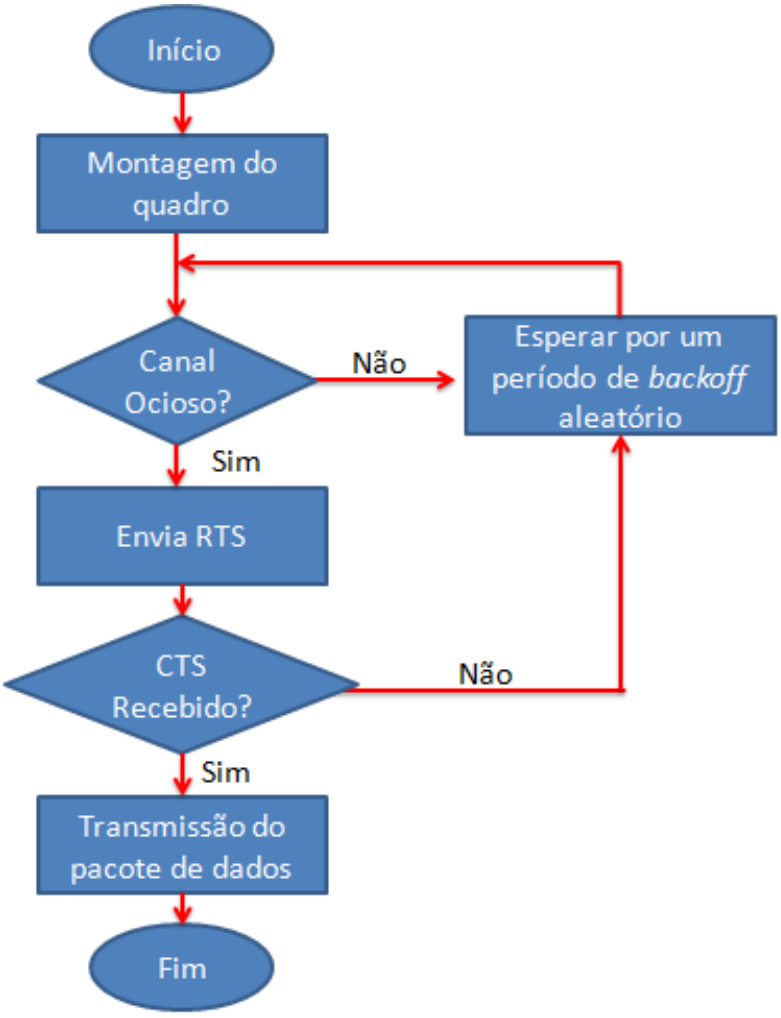


Figura 8 – Funcionamento CSMA/CA. Adaptada de (PIMENTA; MORAES, 2015)

2.4 Trabalhos Relacionados

Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos relacionados que têm por foco otimizações energéticas a nível de camada física e MAC, ou seja, modelos consumo de energia que buscam modelar e minimizar o consumo energético em redes *ad hoc* e de sensores sem fio.

2.4.1 Modelos de Camada Física

Tendo em vista que, no geral, a distribuição dos nós em redes *ad hoc* e de sensores sem fio são nos mais variados ambientes e que lá permanecerão por tempo indeterminado, sem que ocorra recarga de suas baterias, é de fundamental importância que possuam um consumo de energia mínimo a fim de que as redes se conservem ativas pelo máximo tempo possível. Uma vez que esses nós sejam utilizados, por exemplo, para aplicações de monitoramento e sensoriamento, é primordial a realização de estudos do consumo de energia de cada um dos componentes dessas redes (RANA; ZAVERI, 2011; STANKOVIC; HE, 2012; YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2002; FEENEY; NILSSON, 2001). Uma gama de trabalhos, a nível de camada física e de subcamada MAC, têm sido desenvolvidos de modo a buscar a redução do consumo energético em redes sem fio *ad hoc* e em RSSF.

Em GUPTA; SHEKOKAR (2016), um novo modelo é proposto a fim de proporcionar maior tempo de operação de um nó sensor por otimização do tamanho do pacote, de modo que não haja perdas. Considerando que o consumo de energia é diretamente proporcional ao tamanho do pacote e à distância entre os vários nós participantes no processo de comunicação, os autores propuseram um algoritmo que consiste de quatro fases. Nesse contexto, o tempo de vida da rede é usado como um parâmetro para analisar e mostrar que a rede pode ser energeticamente eficiente. Porém, esse trabalho focou apenas no tamanho do pacote.

Para ABDULHADI et al. (2013), a eficiência energética é usada como uma métrica de otimização cujo problema é formulado como não linear, ou seja, cuja definição consiste em um sistema de equações e desigualdades, coletivamente denominadas restrições, por meio de um conjunto desconhecido de variáveis reais que, juntamente a uma função objetivo, podem ser maximizadas ou minimizadas. Em seu trabalho o autor formula a eficiência energética e o problema da otimização do pacote, buscando um tamanho de pacote ótimo que maximiza a eficiência energética em redes sem fio *ad hoc* de comunicação cooperativa. Novamente, o foco do estudo foi o tamanho do pacote.

Diante do estudo desenvolvido por AKBAS et al. (2016), mostrou-se que há um tamanho de pacote ótimo para cada cenário especificado onde o tempo de vida da rede é maior. No entanto, este resultado é observado apenas se o nível de sensibilidade do receptor é baixo a ponto de permitir que transceptores sejam capazes de operar em uma parcela significativa da região de transição tal como especificado em ZUNIGA; KRISHNAMACHARI (2004). O principal objetivo do trabalho foi caracterizar o impacto do tamanho do pacote e dos níveis da potência de transmissão no que diz respeito ao tempo de vida da rede.

Em SADIQ et al. (2017), utilizam-se informações da camada física e da camada de enlace a fim de encontrar um caminho para o envio de dados que promova uma comunicação energeticamente eficiente. Foram considerados parâmetros como o número de nós, a distância entre os nós, a taxa de erro de bit, o consumo de energia de cada nó, a potência de transmissão, dentre outros. É empregada uma análise em termos da taxa de transmissão de dados e do

consumo de energia por bit. No entanto, não conduz nenhum estudo detalhado em termos do tamanho do pacote, bem como da energia gasta para a realização de cada salto.

Um estudo é desenvolvido por TANG et al. (2017) com base em métodos de redução do consumo de energia de protocolos de roteamento geográficos. Esses tipos de protocolo roteiam um pacote salto-a-salto até que se chegue ao destino. Neste contexto, o nó transmissor precisa obter a informação de sua posição geográfica, da posição de seus vizinhos de um salto e do nó receptor. Destaca, ainda, o consumo de energia na transmissão de um pacote de dados, a um salto, do nó transmissor para o nó receptor, incluindo as retransmissões. Contudo, o trabalho não considera a taxa de erro de bit (do inglês *Bit Error Rate* (BER)) e nem a energia gasta para enviar um bit com sucesso. Também não faz análises referentes ao tamanho do pacote de dados e nem à taxa de transmissão.

Por outro lado, a otimização do consumo de energia proposta por LIU et al. (2015) é feita em função da BER, da distância de referência em transmissão de sinais sem fio, do número de nós, dos pacotes codificados na rede e do consumo de energia para enviar ou receber um bit. Contudo, não é explorada a probabilidade de sucesso na entrega dos dados e nem faz uso de nenhum protocolo de camada de enlace.

Em GAO (2002); GORCE; ZHANG; PARVERY (2007); ZHANG; GORCE (2008), foi desenvolvido um modelo de consumo de energia completo a nível de parâmetros para redes *ad hoc* e de sensores, em que foram levados em consideração diversos parâmetros reais da camada física. A eficiência energética expressa na métrica proposta pelos autores traz consigo o embasamento necessário para estudo e análise de parâmetros como o raio de transmissão ótimo, cuja definição representa a distância ideal no qual um nó possa enviar informação e esta ser recebida com êxito.

2.4.2 Modelos de Camada MAC

Em GORATTI et al. (2014), o consumo de energia é investigado empregando o protocolo *slotted* Aloha, que toma como variáveis a potência e a taxa de transmissão. No entanto, não consideram parâmetros como o tamanho do pacote e nem a comunicação por múltiplos saltos como parâmetros que reduzem o consumo energético. No entanto, não há diversidade de parâmetros a nível de camada física que possa, juntamente à camada MAC, minimizar o consumo energético nessas redes.

Para LI et al. (2015), o protocolo MAC *slotted* Aloha é usado como objeto de comparação em redes de sensores. É feita a análise do consumo de energia baseada apenas na densidade da rede, não considerando a influência de parâmetros como a taxa de transmissão e a taxa de erro de bit.

Partindo do estudo de PANICHPAPIBOON; FERRARI; TONGUZ (2004), que propõe a extensão de um *framework* para analisar o desempenho de uma rede sem fio *ad hoc* com topologia aleatória, GHOBAD; MORAES (2012) investiga a BER, fim a fim, em redes *ad hoc*

cujo os nós são distribuídos uniformemente de maneira aleatória, considerando o protocolo MAC *slotted* Aloha em uma abordagem em que há a realização de comunicação a múltiplos saltos. No entanto, as análises só são feitas em função da densidade da rede.

SURATY FILHO; MAMAN (2017) em sua abordagem faz uso do protocolo MAC CSMA/CA a fim de obter um excelente *trade-off* entre o consumo de energia e a taxa média de entrega de pacotes. Suas análises são feitas a nível de camada de enlace e não consideram parâmetros de camada física como a taxa de transmissão e o tamanho do pacote.

HUNG; MARSIC (2010), baseado no protocolo CSMA/CA, desenvolveu sua pesquisa no que se refere à questão da problemática do terminal escondido (TOBAGI; KLEINROCK, 1975; TANENBAUM, 2004). Através de uma cadeia de Markov, os autores modelaram o efeito do terminal escondido em redes sem fio, tal como está descrito no padrão IEEE 802.11. Contudo, não consideram aspectos de camada física como foco da pesquisa e suas análises possuem ênfase no que diz respeito à vazão da rede.

Fazendo uso de uma abordagem a múltiplos saltos, SHRESTHA; HOSSAIN; CAMORLINGA (2013) realizaram seu estudo com o objetivo de mitigar o problema do terminal oculto através do protocolo CSMA/CA e reduzir o consumo de energia na rede. Consideram em suas análises parâmetros como o número de nós, o número de saltos e o tamanho do pacote que é definido de acordo com os períodos de *backoff*. No entanto, não faz considerações referentes ao número de retransmissões.

Uma abordagem de comunicação por múltiplos saltos, para redução do consumo de energia, é proposta por SINGH et al. (2017) considerando parâmetros como o número de nós na rede, a energia necessária para transmitir uma determinada quantidade de bits e a distância entre os nós. Contudo, não é feita uma análise considerando a subcamada MAC. Analogamente, a abordagem presente em SHELBY et al. (2005) considera, em suas análises para uma rede linear, apenas parâmetros de camada física como a taxa de transmissão e o coeficiente de atenuação com a distância.

A partir dos trabalhos citados, observa-se que não há uma modelagem que trabalhe a nível de camada física e MAC com seus respectivos parâmetros de modo detalhado. Esta dissertação, portanto, traz uma investigação do efeito conjunto em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote (N_b), empregando a potência de transmissão (P_t) ótima, levando em consideração protocolos MAC, e a realização de comunicação por um salto e por múltiplos saltos.

Considerar-se-á a possibilidade da variação da distância entre os nós comunicantes, com os mesmos dispostos de maneira aleatória e linearmente equidistantes uns dos outros. A probabilidade de sucesso do nó transmitir, por sua vez, é dada de forma conjunta através do uso dos protocolos de controle de acesso ao meio *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975) e CSMA/CA (BIANCHI; FRATTA; OLIVERI, 1996; TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010). Entretanto, a metodologia aqui empregada pode ser estendida para outros protocolos de acesso ao meio que sejam compatíveis com o modelo proposto.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foi realizada uma revisão da literatura dos tópicos relevantes abordados neste trabalho. Foi feita uma análise a nível de comparação no que se refere à temática de redes sem fio *ad hoc* e de sensores. Com base nesse estudo, foi possível inferir que os dispositivos que compõem essas redes possuem recursos energéticos limitados. Por este motivo, a utilização de estratégias que minimizem o consumo energético nos dispositivos é de extrema importância para garantir a longevidade de operação dessas redes. E, uma vez que o maior consumo energético se dá durante o processo de comunicação entre os nós, a nível de camada MAC, foram apresentados dois protocolos que estão sendo utilizados neste trabalho, *slotted* Aloha e CSMA/CA. Foram apresentados ainda neste capítulo os trabalhos relacionados ao estado da arte que buscam minimizar o consumo energético a nível de camada física e de camada MAC. Verificou-se ainda que não há muitas abordagens que apresentem, com riqueza de parâmetros, uma avaliação conjunta de fatores dessas camadas que otimizem o consumo energético.

3 CONSUMO DE ENERGIA

Este capítulo tem por finalidade apresentar a modelagem do consumo energético presente nos trabalhos relacionados, bem como a modelagem proposta para consumo de energia a um salto e a múltiplos saltos, considerando redes lineares e aleatórias, utilizando os protocolos de camada MAC *slotted* Aloha e CSMA/CA.

3.1 Abordagem do Consumo de Energia de Zhang e Gorce (2008)

Utilizamos como ponto de partida a formulação da energia consumida para a realização de um salto com retransmissão desenvolvida em ZHANG; GORCE (2008) que atualizou a descrição de KARL; WILLIG (2007) e empregou as propostas de GAO (2002) e GORCE; ZHANG; PARVERY (2007). Trata-se, portanto, de um modelo robusto e optou-se partir deste por verificar que o mesmo está bem definido, incorpora vários outros parâmetros de camada física e permitiu sua alteração para considerar o protocolo MAC.

A partir dos estudos propostos por (ZHANG; GORCE, 2008), o consumo de energia (E_p) para o envio de um pacote é a soma entre a energia empregada na transmissão E_{Tx} e a energia gasta para recepção E_{Rx}. Assim, resulta que

$$E_p = E_{Tx} + E_{Rx}. \tag{3.1}$$

E_{Tx} e E_{Rx} são descritas, respectivamente, de acordo com KARL; WILLIG (2007) por

$$E_{Tx} = T_{start}P_{start} + \frac{N_b}{R}(P_{txElec} + P_{amp}) \tag{3.2}$$

e

$$E_{Rx} = T_{start}P_{start} + \frac{N_b}{R}P_{rxElec}, \tag{3.3}$$

em que N_b é o número de bits por pacote medido em $bits$, R é a taxa de transmissão de dados em $bits/segundo$, P_{txElec} é a potência para alimentação do circuito de transmissão em mW, P_{rxElec} é a potência para alimentação do circuito de recepção em mW, T_{start} é o tempo de inicialização do circuito em μs e P_{start} é a potência requerida para inicialização em mW. P_{amp} é definida como a potência para amplificação do sinal na transmissão em mW, e é dada por

$$P_{amp} = \alpha_{amp} + \beta_{amp}P_t, \tag{3.4}$$

em que α_{amp} é o nível constante de potência em mW e β_{amp} é uma constante de proporcionalidade da potência de transmissão P_t.

A fim de obter o consumo médio de energia por bit para uma transmissão a um salto com sucesso, deve-se dividir o consumo para transmissão de um pacote pelo número de bits N_b deste

pacote. Consequentemente, define-se o consumo de energia por bit E_b (expresso em Joules por bit (J/bit)) como sendo

$$E_b = \frac{E_p}{N_b} = E_c + K_1 P_t, \tag{3.5}$$

em que E_c e K_1 são dados, respectivamente, por

$$E_c = \frac{2T_{start}P_{start}}{N_b} + \frac{P_{txElec} + P_{rxElec} + \alpha_{amp}}{R}, \tag{3.6}$$

$$K_1 = \frac{\beta_{amp}}{R}. \tag{3.7}$$

A partir das equações 3.1 a 3.7, deu-se início ao estudo proposto neste trabalho.

3.2 Redes *Ad hoc slotted* Aloha de um salto

Em seu trabalho, ZHANG; GORCE (2008) fez otimizações na métrica *Energy Distance Ratio per Bit* ($\overline{EDRb}$) (GAO, 2002) alegando torná-la mais próxima do que acontece na prática. Buscou uma potência ótima de transmissão (P_0) em função de um raio ótimo de transmissão (d_0) que minimizasse o consumo energético em RSSF através de sua métrica.

Analisando a proposta de ZHANG; GORCE (2008), verificou-se que não fazia muito sentido buscar um raio de transmissão ótimo (d_0). Isso se deve ao fato de não haver como controlar as distâncias entre os terminais, considerando cenários em que redes *ad hoc* sejam móveis. Diante desse obstáculo, decidiu-se estudar, no primeiro momento, o consumo de energia em função da taxa de transmissão (R) e do tamanho do pacote (N_b) em redes *ad hoc slotted* Aloha de um salto.

Nessa análise, é considerada uma rede sem fio contendo n nós e se parte do pressuposto que todos os nós estão ao alcance uns dos outros, caracterizando uma rede *ad hoc* sem fio de um único salto. Isso permite simplificar a análise, pois não será considerado neste primeiro momento o efeito do terminal oculto.

Partindo da modelagem proposta por (ZHANG; GORCE, 2008) citada na Seção 3.1, para um canal com perdas, a probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote contendo N_b bits é $p_l(\gamma) = (1 - BER(\gamma))^{N_b}$ em que $BER(\gamma)$ é a taxa de erro de bits em função da relação sinal-ruído (γ) (GORCE; ZHANG; PARVERY, 2007). Aqui modificamos essa probabilidade para incluir o efeito do protocolo *slotted* Aloha, em que a probabilidade de acesso ao meio com sucesso de um nó é dada por $\delta(n) = \frac{1}{n}\left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-2}$ para n nós na rede. Logo, resulta que a probabilidade de transmissão com sucesso de um pacote com N_b bits é

$$P_s = p_l(\gamma)\delta(n) = \frac{(1 - BER(\gamma))^{N_b}\left(\frac{n-1}{n}\right)^{n-2}}{n}. \tag{3.8}$$

A relação sinal-ruído é definida como sendo

$$\gamma = C_2 P_t d^{-\alpha} R^{-1} \tag{3.9}$$

em que d indica a distância entre dois nós comunicantes, sendo α o coeficiente de atenuação do sinal com a distância e P_t, a potência de transmissão. A constante C_2 é expressa por

$$C_2 = \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 N_0} \tag{3.10}$$

em que G_T e G_R representam, respectivamente, os ganhos das antenas no transmissor e no receptor, N_0 é a densidade espectral de potência de ruído no canal de comunicação em dBm/Hz, λ é o comprimento de onda do sinal transmitido em *metros* e é igual a $\frac{c}{f_c}$ em que c é a velocidade da luz em m/s e f_c é a frequência da onda portadora em Hz.

É importante notar que a relação sinal-ruído não deve considerar a interferência causada pelos demais nós da rede visto que isto é tratado no protocolo de controle de acesso ao meio. Assim, se houver transmissão simultânea de dois ou mais nós, os pacotes de dados colidem entre si e a informação é perdida ocasionando necessariamente a retransmissão. Tal efeito é incorporado aqui no protocolo *slotted* Aloha.

A partir de então, podemos definir o consumo médio de energia por bit para um único salto, em unidades de Joules/bit, como

$$\overline{E}_{1hop} = E_b(P_t) \sum_{k=1}^{\infty} k P_s (1-P_s)^{k-1} = \frac{E_b(P_t)}{P_s} \tag{3.11}$$

em que k é o número de transmissões necessárias para o envio do pacote de dados com sucesso. Sendo assim, o consumo médio de energia por bit para uma transmissão bem sucedida a um salto resulta

$$\overline{E}_{1hop} = \frac{(E_c + K_1 P_t)}{(1 - BER(\gamma))^{Nb}} \cdot \mu, \tag{3.12}$$

em que

$$\mu = \frac{n}{\left(\frac{n-1}{n}\right)^{n-2}}. \tag{3.13}$$

O canal de comunicação que este trabalho considera é o que emprega o desvanecimento Rayleigh, que é amplamente utilizado na literatura em casos de redes *ad hoc* e de sensores para modelar canais sem fio e sem linha de visada direta entre as antenas comunicantes. Para uma relação sinal-ruído maior que 5, que é o caso para os valores de parâmetros aqui empregados, pode-se aproximar taxa de erro de bit por (GOLDSMITH, 2005)

$$BER(\gamma) \approx \frac{\alpha_m}{2\beta_m \gamma} \tag{3.14}$$

em que α_m e β_m são constantes que dependem da modulação empregada. Será considerada

a modulação binária por chaveamento de fase (*Binary Phase Shift Keying* (BPSK)), que é comumente encontrada nos dispositivos de comunicação sem fio, e nesse caso $\alpha_m = 1$ e $\beta_m = 2$. Substituindo as Eqs. (3.9) e (3.14) em (3.12), resulta que

$$\overline{E}_{1hop} = \frac{E_c + K_1 P_t}{\left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_t d^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \mu. \tag{3.15}$$

É possível, ainda, determinar a potência de transmissão ótima (P_0), para posterior ajuste conforme as variações da taxa de transmissão (R) e do tamanho do pacote (N_b), através da resolução da derivada parcial a seguir

$$\left.\frac{\partial \overline{E}_{1hop}}{\partial P_t}\right|_{P_t = P_0} = 0. \tag{3.16}$$

Desenvolvendo essa equação, obtém-se a potência de transmissão ótima em função da taxa de transmissão (R) e em função do tamanho do pacote (N_b), ou seja,

$$P_0(R, N_b) = \frac{d^\alpha \alpha_m (1+N_b)}{4C_2 \beta_m R^{-1}} + \frac{\sqrt{d^\alpha \beta_{amp} \alpha_m (d^\alpha \beta_{amp} \alpha_m (1+N_b)^2 + 8\beta_m C_2 R^{-1} (C_3 R + C_4 N_b))}}{4C_2 \beta_{amp} \beta_m R^{-1}}. \tag{3.17}$$

As constantes C_3, C_4 são oriundas do desmembramento de E_c, para representação em função de R e N_b, e são dadas, respectivamente, por

$$C_3 = 2T_{start} P_{start}, \tag{3.18}$$

$$C_4 = P_{txElec} + P_{rxElec} + \alpha_{amp}. \tag{3.19}$$

Diante das equações (3.15) e (3.17) apresentadas se propõe, portanto, avaliar o consumo médio de energia por bit para transmissão bem sucedida em um salto em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote (N_b) empregando-se a potência ótima de transmissão em função destes parâmetros (isto é, $P_t = P_0(R, N_b)$).

Assim, R e N_b podem ser variados a fim de atingir valores ótimos de desempenho fixando os demais parâmetros de projeto que estão descritos na Tabela 1. Desta forma, das Eqs. (3.15) e (3.17), tem-se que $\overline{E}_{1hop}$ pode ser dado em função de R e de N_b para os valores ótimos de $P_0(R, Nb)$, da seguinte forma

$$\overline{E}_{1hop}(P_t = P_0(R, N_b)) = \frac{C_3 R + (C_4 + \beta_{amp} P_0(R, N_b)) N_b}{R N_b \left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_0(R, N_b) d^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \mu, \tag{3.20}$$

em que $P_0(R, N_b)$ é dado pela Eq. (3.17).

Tabela 1 – Parâmetros empregados no modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para rede *slotted* Aloha de 1 salto.

Variável	Descrição	Valor
P_{rxElec}	Potência para recepção	$279mW$
P_{start}	Potência para inicialização	$58,7mW$
T_{start}	Tempo de inicialização	$446\mu s$
P_{txElec}	Potência para transmissão	$151mW$
n	Número de nós	2 ou 10
α_{amp}	Nível de potência Eq. (3.4)	$174mW$
β_{amp}	Constante de proporcionalidade Eq. (3.4)	5
N_0	Densidade espetral de ruído	$-154dBm/Hz$
f_c	Frequência da portadora	$2,4GHz$
c	Velocidade da luz	$3 \times 10^8 m/s$
G_T	Ganho da antena na transmissão	1
G_R	Ganho da antena na recepção	1
α	Coeficiente de atenuação com a distância	3
d	Distância entre o par de nós comunicantes	$10m, 30m, 50m$

3.3 Redes *Ad hoc* lineares *slotted* Aloha com saltos equidistantes

Avançando nos estudos que auxiliaram na construção deste trabalho, realizou-se nesta etapa a modelagem de redes *ad hoc* Aloha, em topologia linear, com a realização da comunicação através saltos equidistantes.

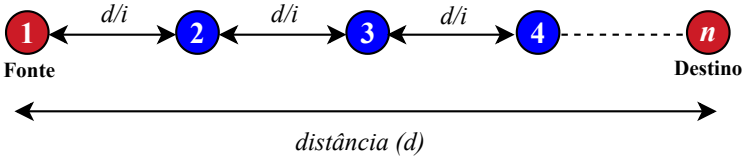


Figura 9 – Rede linear de i saltos equidistantes contendo n nós.

A topologia proposta na Figura 9 representa uma rede composta de n nós. A análise neste trabalho parte do pressuposto que todos os nós estão ao alcance uns dos outros e dispostos geograficamente de maneira linear e equidistante, caracterizando um tipo de rede *ad hoc* sem fio de múltiplos saltos, em que o nó fonte e o nó destino estão separados por uma distância d. Portanto, a fim de simplificar a análise, não está sendo considerado aqui ainda o efeito do terminal oculto. Vale destacar ainda, neste contexto, que aumentar o número de saltos implica aumentar o número de nós interferentes na rede.

Assim como na Seção 3.2, para um canal com perdas, a probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote contendo N_b bits é $pr_s(\gamma) = (1 - BER(\gamma))^{N_b}$ em que $BER(\gamma)$ é a taxa

de erro de bits em função da relação sinal-ruído (γ) (GORCE; ZHANG; PARVERY, 2007). Aqui se modifica essa probabilidade para incluir o efeito do protocolo MAC *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975), em que a probabilidade de acesso ao meio com sucesso de um nó é dada por $\delta = \frac{1}{n}\left(1-\frac{1}{n}\right)^{n-2}$ para n nós na rede. Da Figura 9, tem-se que $n = i+1$. Logo, resulta que a probabilidade de transmissão com sucesso de um pacote em um salto é

$$Pr_s = pr_s(\gamma)\delta = \frac{(1-BER(\gamma))^{N_b}\left(\frac{i}{i+1}\right)^{i-1}}{i+1}. \tag{3.21}$$

A relação sinal-ruído é definida como sendo

$$\gamma = C_2 P_t \left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} R^{-1}, \tag{3.22}$$

em que $\left(\frac{d}{i}\right)$ indica a distância do salto, α é o coeficiente de atenuação do sinal com a distância, R é a taxa de transmissão de dados e P_t é a potência de transmissão. A constante C_2 é dada também pela Eq.3.10.

É importante notar que a relação sinal-ruído não deve considerar a interferência causada pelos demais nós da rede visto que isto é tratado no protocolo de controle de acesso ao meio. Assim, se houver transmissão simultânea de dois ou mais nós, os pacotes de dados colidem entre si e a informação é perdida ocasionando necessariamente a retransmissão. Tal efeito é incorporado aqui no protocolo *slotted* Aloha.

Como se trata de uma transmissão por múltiplos saltos em uma rede linear com os nós equidistantes, primeiro define-se o consumo médio de energia por bit para realizar um único salto, em unidades de Joules/bit, como

$$\overline{E}_{1hop} = E_b(P_t)\sum_{k=1}^{\infty} kPr_s(1-Pr_s)^{k-1} = \frac{E_b(P_t)}{Pr_s}, \tag{3.23}$$

em que k é o número de transmissões necessárias para o envio do pacote de dados com sucesso no salto. Usando os resultados das Eqs. (3.5) e (3.21) em (3.23) obtém-se a energia média total por bit para realizar i saltos entre o par de nós comunicantes (fonte e destino)

$$\overline{E}_{ihop} = \overline{E}_{1hop}\cdot i = \frac{(E_c + K_1 P_t)}{(1-BER(\gamma))^{N_b}}\cdot\frac{(i+1)^i}{i^{i-2}}. \tag{3.24}$$

O canal de comunicação que este trabalho considera também é o que emprega o desvanecimento Rayleigh. Assim, para uma relação sinal-ruído maior que 5, que é o caso para os valores de parâmetros aqui empregados, pode-se aproximar a taxa de erro de bits tal como na Eq.3.14. Nesse caso os valores de α_m e β_m permanecem, respectivamente, 1 e 2.

Das Eqs. (3.22), (3.24) e (3.14), resulta que

$$\overline{E}_{ihop} = \frac{E_c + K_1 P_t}{\left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_t \left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \frac{(i+1)^i}{i^{i-2}}. \tag{3.25}$$

É possível, ainda, determinar a potência de transmissão ótima (P_0) para uso posterior como uma função da taxa de transmissão (R) e do tamanho do pacote (N_b). Para isso, primeiramente se resolve

$$\left.\frac{\partial \overline{E}_{ihop}}{\partial P_t}\right|_{P_t = P_0} = 0. \tag{3.26}$$

Desenvolvendo a Eq. (3.26), obtém-se a potência de transmissão ótima em função da taxa de transmissão (R), do tamanho do pacote (N_b) e também demais parâmetros, ou seja,

$$P_0(R, N_b) = \frac{\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \alpha_m (1+N_b)}{4C_2\beta_m R^{-1}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \beta_{amp} \alpha_m \left[\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \beta_{amp} \alpha_m (1+N_b)^2 + 8\beta_m C_2 R^{-1} (C_3 R + C_4 N_b)\right]}}{4C_2 \beta_{amp} \beta_m R^{-1}}. \tag{3.27}$$

As constantes C_3, C_4 são representadas, respectivamente, pelas Eqs. (3.18) e (3.19).

Tabela 2 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para redes *slotted* Aloha e CSMA com saltos equidistantes.

Parâmetro	Descrição	Valor
P_{rxElec}	Potência do circuito de recepção	$279mW$
P_{start}	Potência para inicialização	$58,7mW$
T_{start}	Tempo de inicialização	$446\mu s$
P_{txElec}	Potência do circuito de transmissão	$151mW$
α_{amp}	Nível de potência Eq. (3.4)	$174mW$
β_{amp}	Constante de proporcionalidade Eq. (3.4)	5
N_0	Densidade espetral de ruído	$-154dBm/Hz$
f_c	Frequência da portadora	$2,4GHz$
c	Velocidade da luz	$3 \times 10^8 m/s$
G_T	Ganho da antena de transmissão	1
G_R	Ganho da antena de recepção	1
α	Coeficiente de atenuação com a distância	2 e 4
d	Distância entre fonte e destino	$80m$
i	Número de saltos até o destino	$1,2,4,8$

Diante dos resultados anteriormente apresentados, se propõe, portanto, avaliar o consumo

médio de energia por bit para uma transmissão bem sucedida, por múltiplos saltos, em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote (N_b), empregando-se a potência ótima de transmissão (isto é, $P_t = P_0(R,N_b)$). Assim, R e N_b podem ser variados para atingir valores mínimos de consumo de energia fixando os demais parâmetros que estão descritos na Tabela 2, que representam as características físicas do transceptor μAMPS-1 (KARL; WILLIG, 2007).

Deste modo, e fazendo uso das Eqs. (3.25) e (3.27), tem-se que a energia média consumida por bit para realizar a transmissão da fonte até o destino, considerando i saltos, pode ser dada em função de R e de N_b, para o valor ótimo de $P_0(R,N_b)$, da seguinte forma

$$\begin{aligned}\overline{E}_{ihop}(P_t = P_0(R,N_b)) \\ = \frac{C_3R+(C_4+\beta_{amp}P_0(R,N_b))N_b}{RN_b\left(1-\frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_0(R,N_b)(\frac{d}{i})^{-\alpha}R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \frac{(i+1)^i}{i^{i-2}},\end{aligned} \tag{3.28}$$

em que $P_0(R,N_b)$ é dado pela Eq. (3.27).

3.4 Redes *Ad hoc* lineares CSMA/CA com saltos equidistantes

Também partindo da proposta de ZHANG; GORCE (2008), foi realizada uma aproximação do modelo proposto por TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010) para inserir o protocolo MAC CSMA/CA.

A modelagem proposta por TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010) parte da cadeia de Markov ilustrada na Figura 10. Ela foi adaptada de BIANCHI (2000) para que modelasse o congelamento de resguardo, que é o tempo de espera para se transmitir um pacote, e os comportamentos anômalos dos *slots*, que aparecem após uma transmissão bem sucedida ou quando ocorre uma colisão. Neste contexto, só terá direito de transmitir em um *slot* anômalo a estação que participou da transmissão anterior (ADAUTO, 2017).

Portanto, foi adotada pelos autores uma metodologia com maior precisão em relação ao padrão DCF. Nela, o estágio zero do resguardo poderá ser atingido em duas situações, a saber, quando houver uma transmissão bem sucedida (representada por 0^+ na cadeia de Markov) ou quando o número máximo de tentativas de retransmissão (*Ret*) for atingido, resultando no descarte do denominado pacote *Head-of-Line* (HOL) (representado por 0^-).

A partir da modelagem proposta por TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010), as proba-

bilidades de transição presentes em sua cadeia de Markov adaptada são dadas por

$$\begin{cases} P\{i,\, k \mid i,\, k+1\} = 1 & k \in [0,\, W_i - 2] & i \in [1,\, Ret] \\ P\{0^-,\, k \mid 0^-,\, k+1\} = 1 & k \in [0,\, W_0 - 2] & \\ P\{0^+,\, k \mid 0^+,\, k+1\} = 1 & k \in [0,\, W_0 - 3] & \\ P\{0^-,\, k \mid R,\, 0\} = p/W_0 & k \in [0,\, W_0 - 1] & \\ P\{0^+,\, k \mid i,\, 0\} = (1-p)/(W_0 - 1) & k \in [0,\, W_0 - 2] & \forall i \\ P\{i,\, k \mid i-1,\, 0\} = p/W_i & k \in [0,\, W_i - 1] & i \in [1,\, Ret], \end{cases} \tag{3.29}$$

em que W_0 e W_i representam o tamanho da janela de *backoff* no estágio zero e no i-ésimo estágio, respectivamente. O índice k representa o atraso de *backoff* e recebe valores compreendidos no intervalo [0, W_j - 1].

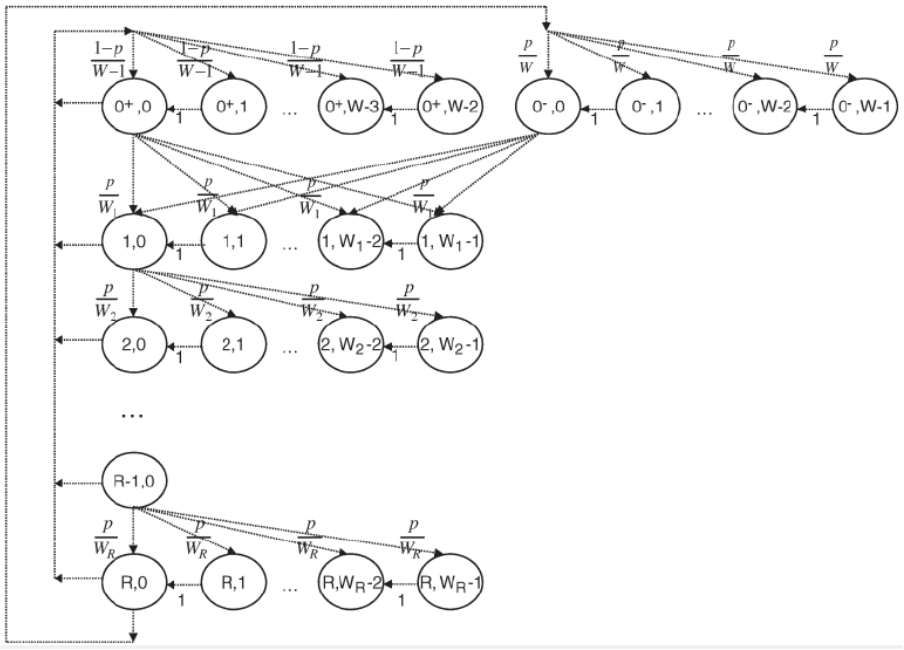


Figura 10 – Cadeia de Markov bidirecional. Fonte:(TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010)

Para esses casos, uma vez que houve uma transmissão bem sucedida, é escolhido um novo valor para o contador de resguardo, de maneira aleatória, entre 0 e CW_{min}. Para um valor sorteado igual a zero, mais uma transmissão deverá ser realizada, pois, não há transição de estado. Dado que houve uma transmissão bem sucedida, o contador deverá ser decrementado e um *slot* de tempo extra deverá ser transcorrido (TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010). Deste modo, os estados zero a serem alcançados após uma transmissão com sucesso, considerando as transições, serão dados na faixa compreendida entre 1 e CW_{min}-1. Porém, se o número de retransmissões (*Ret*) atingir seu valor máximo, não terá mais como haver uma transmissão consecutiva, tal como

ocorre quando há uma transmissão bem sucedida. A transição para o estágio zero, e para os casos de colisão que aconteçam em diferentes estados de *Ret*, ocorrerá para um valor de contador de resguardo entre 0 e CW_{min}.

Assim, considerando a cadeia de Markov proposta por TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010), a probabilidade de que uma estação transmita em um determinado *slot* é dada por

$$\tau = \frac{1}{1+\frac{1-p}{2(1-p^{Ret+1})}\left[\sum_{j=0}^{Ret} p^j(2^jW-1)-(1-p^{Ret+1})\right]}, \tag{3.30}$$

em que j é o j-ésimo estágio de *backoff* e p é a probabilidade de colisão do pacote expressa por (BIANCHI, 2000)

$$p = 1-(1-\tau)^{n-1}, \tag{3.31}$$

sendo n o número de estações.

Deste modo, a probabilidade que ocorra uma transmissão bem sucedida, com pelo menos uma estação transmitindo dados em um *slot*, será dada tal como em BIANCHI (2000) por

$$Ptr = 1-(1-\tau)^n. \tag{3.32}$$

A probabilidade, portanto, de se transmitir com sucesso através do modelo proposto por (TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010) é

$$P_S = \zeta = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}. \tag{3.33}$$

Para um canal ruidoso, a probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote contendo N_b bits também é dada aqui por $pr_s(\gamma) = (1-BER(\gamma))^{N_b}$ em que $BER(\gamma)$ é a taxa de erro de bits em função da relação sinal-ruído (γ) (GORCE; ZHANG; PARVERY, 2007). Aqui se modifica essa probabilidade para incluir o efeito do protocolo CSMA/CA (TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO, 2010), em que a probabilidade de acesso ao meio com sucesso de um nó é dada por ζ para n nós na rede.

Da Figura 9, tem-se que $n = i+1$. Então, a probabilidade de transmitir um pacote com sucesso para um salto no CSMA/CA é dada por

$$Pr_s = pr_s(\gamma)\zeta = \frac{(1-BER(\gamma))^{N_b}\tau(i+1)(1-\tau)^i}{1-(1-\tau)^{i+1}}. \tag{3.34}$$

O consumo médio de energia por bit, em unidades de $Joules/bits$, para realizar um único salto, através da utilização do protocolo CSMA/CA, é definido de maneira aproximada como um *upper bound* visto que aqui se consideram infinitas tentativas de transmissão, isto é,

$$\overline{E}_{1hop} \approx E_b(P_t)\sum_{k=1}^{\infty} kPr_s(1-Pr_s)^{k-1} = \frac{E_b(P_t)}{Pr_s}, \tag{3.35}$$

em que k é o número de transmissões necessárias para enviar um pacotes de dados com sucesso a um salto. Note que, na prática, o protocolo CSMA só tenta transmitir até sete vezes.

O canal de comunicação que esta abordagem considera também é o que emprega o desvanecimento Rayleigh. Deste modo, pode-se aproximar a BER tal como na Eq. (3.14), para $\alpha_m = 1$ e $\beta_m = 2$, por se empregar a modulação BPSK.

Tal como mencionado na Seção 3.3, a constante C_2 e a relação sinal-ruído (γ) aqui utilizada, estão representadas, respectivamente, nas Eqs. (3.10) e (3.22).

Das Eqs. (3.5), (3.34), (3.14) e (3.35), a energia média total por bit para que um pacote seja entregue através da realização de i saltos entre o par de nós comunicantes (fonte e destino) é dada por

$$\overline{E}_{ihop} = \overline{E}_{1hop} \cdot i = \frac{E_c + K_1 P_t}{\left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_t \left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot i \cdot \frac{1-(1-\tau)^{i+1}}{\tau(i+1)(1-\tau)^i}. \tag{3.36}$$

A potência ótima de transmissão (P_0), que atinge o menor consumo energético, é obtida como função da taxa de transmissão (R) e do tamanho do pacote (N_b), junto com os demais parâmetros. Assim,

$$\left.\frac{\partial \overline{E}_{ihop}}{\partial P_t}\right|_{P_t = P_0} = 0. \tag{3.37}$$

Da Eq. (3.37), resulta que

$$P_0(R,N_b) = \frac{\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \alpha_m (1+N_b)}{4C_2\beta_m R^{-1}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \beta_{amp} \alpha_m \left[\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} \beta_{amp} \alpha_m (1+N_b)^2 + 8\beta_m C_2 R^{-1}(C_3 R + C_4 N_b)\right]}}{4C_2\beta_{amp}\beta_m R^{-1}}. \tag{3.38}$$

Finalmente, das Eqs. (3.36) e (3.38), o consumo médio de energia para transmitir um bit de dados com sucesso da fonte para o destino pode ser dada como uma função de R e N_b, para i saltos, considerando a potência ótima de transmissão $P_0(R,N_b)$. Assim, para o CSMA/CA

$$\overline{E}_{ihop}(P_t = P_0(R,N_b)) = \frac{C_3 R + (C_4 + \beta_{amp} P_0(R,N_b))N_b}{RN_b\left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_0(R,N_b)\left(\frac{d}{i}\right)^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \frac{i\left[1-(1-\tau)^{i+1}\right]}{\tau(i+1)(1-\tau)^i}, \tag{3.39}$$

C_3 e C_4 são as mesmas constantes representadas pelas Eq. (3.18) e (3.19).

3.5 Redes aleatórias *slotted* Aloha

Para modelar uma rede aleatória *slotted* Aloha que se aproximasse do que acontece na prática, e tendo em vista que a modelagem principal deste trabalho é baseada em valores médios, utilizou-se a distância média do salto aproximada para uma rede aleatória proposta por

PANICHPAPIBOON; FERRARI; TONGUZ (2004). Foi reproduzido um cenário em que os nós estão distribuídos uniformemente de maneira aleatória em uma superfície toroidal (GHOBAD; MORAES, 2012), cuja área pode ser mapeada num quadrado de lado D tal como na Figura 11, em que um par de nós fonte e destino desejam se comunicar considerando como ângulo máximo de desvio da rota, a linha reta que liga os dois nós, o ângulo θ. Esse ângulo define o menor caminho entre os nós fonte e destino. No entanto, para uma comunicação a múltiplos saltos, deseja-se que mais nós participem desta comunicação. Neste contexto, o ângulo ϕ toma como referência θ para selecionar os nós no decorrer do estabelecimento da rota.

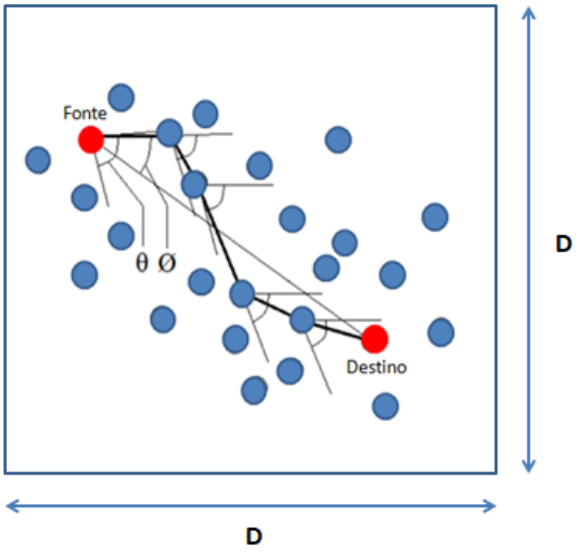


Figura 11 – Rede aleatória. Adaptada de (GHOBAD; MORAES, 2012).

A modelagem aqui empregada também parte das equações de ZHANG; GORCE (2008) apresentadas na Seção 3.1. Assim como nas Seções 3.2 e 3.3, para um canal ruidoso, a probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote contendo N_b bits é $pr_s(\gamma) = (1 - BER(\gamma))^{N_b}$ em que $BER(\gamma)$ é a taxa de erro de bits em função da relação sinal-ruído (γ) (GORCE; ZHANG; PARVERY, 2007). Essa probabilidade também é modificada para incluir o efeito do protocolo MAC *slotted* Aloha (ROBERTS, 1975). No entanto, como se trata agora de um cenário em que os nós estão dispostos de maneira aleatória, resulta que a probabilidade de transmissão com sucesso de um pacote a cada salto é dada em função do número de nós n como

$$Pr_s = pr_s(\gamma)\delta(n) = \frac{(1 - BER(\gamma))^{N_b}\left(\frac{n-1}{n}\right)^{n-2}}{n}. \tag{3.40}$$

A relação sinal-ruído é definida como sendo

$$\gamma = C_2 P_t \overline{w}^{-\alpha} R^{-1}, \tag{3.41}$$

em que α é o coeficiente de atenuação do sinal com a distância, R é a taxa de transmissão de dados e P_t é a potência de transmissão. A constante C_2 é dada também pela Eq. (3.10) e $\overline{w}$ indica

a distância média do salto representada em PANICHPAPIBOON; FERRARI; TONGUZ (2004) por

$$\overline{w} = \sqrt{\frac{\pi}{2\theta \frac{n}{D^2}}}, \tag{3.42}$$

onde D^2 é a área ao qual os nós estão uniformemente distribuídos de maneira aleatória.

É importante notar também neste contexto, por limitação do protocolo MAC aqui empregado, que a relação sinal-ruído não deve considerar a interferência causada pelos demais nós da rede. Assim, se houver transmissão simultânea de dois ou mais nós, os pacotes de dados colidem entre si e a informação é perdida ocasionando necessariamente a retransmissão. Tal efeito também é incorporado aqui no protocolo *slotted* Aloha.

Como se trata de uma transmissão por múltiplos saltos em uma rede aleatória, o número médio de saltos agora passa a ser calculado em função do número de nós n através de (GHOBAD; MORAES, 2012)

$$i = \frac{(\sqrt{2} + \ln(1+\sqrt{2}))^2}{3\left(\sqrt{\frac{\pi}{2n\theta}}\right)\frac{2}{\theta} sen(\frac{\theta}{2})}. \tag{3.43}$$

O número de nós n é obtido de tal modo a gerar os números de saltos $i = 1$, 2, 4 e 8 para que se possa haver coerência com a modelagem proposta na Seção 3.3. A partir de então, o consumo médio de energia por bit para realizar um único salto também é definido, em unidades de Joules/bit, como na Eq. (3.23).

Usando os resultados das Eqs. (3.5), (3.40) e (3.43), em (3.23) obtém-se a energia média total por bit para realizar i saltos entre o par de nós comunicantes (fonte e destino)

$$\overline{E}_{ihop} = \overline{E}_{1hop} \cdot i = \frac{(E_c + K_1 P_t)}{(1 - BER(\gamma))^{N_b}} \cdot \frac{n}{(\frac{n-1}{n})^{n-2}} \cdot \frac{(\sqrt{2} + \ln(1+\sqrt{2}))^2}{3\left(\sqrt{\frac{\pi}{2n\theta}}\right)\frac{2}{\theta}\sin(\frac{\theta}{2})}. \tag{3.44}$$

O canal de comunicação que esta modelagem considera também é o que emprega o desvanecimento Rayleigh. Nesse caso, os valores de α_m e β_m permanecem, respectivamente, 1 e 2.

Das Eqs. (3.41), (3.24) e (3.14), resulta que

$$\overline{E}_{ihop} = \frac{E_c + K_1 P_t}{\left(1 - \frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_t (\overline{w})^{-\alpha} R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \frac{n}{(\frac{n-1}{n})^{n-2}} \cdot \frac{(\sqrt{2} + \ln(1+\sqrt{2}))^2}{3\left(\sqrt{\frac{\pi}{2n\theta}}\right)\frac{2}{\theta}\sin(\frac{\theta}{2})}. \tag{3.45}$$

É possível, ainda, determinar a potência de transmissão ótima (P_0) para uso posterior como uma função da taxa de transmissão (R) e do tamanho do pacote (N_b). Para isso, primeiramente se resolve

$$\left.\frac{\partial \overline{E}_{ihop}}{\partial P_t}\right|_{P_t = P_0} = 0. \tag{3.46}$$

A partir do desenvolvimento da Eq. (3.46), obtém-se a potência de transmissão ótima em função da taxa de transmissão (R), do tamanho do pacote (N_b) e também dos demais parâmetros, ou seja,

$$P_0(R,N_b) = \frac{(\overline{w})^{-\alpha}\alpha_m(1+N_b)}{4C_2\beta_m R^{-1}} + \frac{\sqrt{(\overline{w})^{-\alpha}\beta_{amp}\alpha_m\left[(\overline{w})^{-\alpha}\beta_{amp}\alpha_m(1+N_b)^2+8\beta_m C_2 R^{-1}(C_3R+C_4N_b)\right]}}{4C_2\beta_{amp}\beta_m R^{-1}}. \quad (3.47)$$

As constantes C_3, C_4 são representadas, respectivamente, pelas Eqs. (3.18) e (3.19).

Diante dos resultados anteriormente apresentados, se propõe avaliar o consumo médio de energia por bit para uma transmissão bem sucedida, por múltiplos saltos, em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote (N_b) empregando-se a potência ótima de transmissão (isto é $P_t = P_0(R,N_b)$). Assim, R e N_b podem ser variados para atingir valores mínimos de consumo de energia fixando os demais parâmetros que estão descritos na Tabela 3, que também representam as características físicas do transceptor μAMPS-1 (KARL; WILLIG, 2007).

Tabela 3 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para rede aleatória *slotted* Aloha.

Parâmetro	Descrição	Valor
P_{rxElec}	Potência do circuito de recepção	$279mW$
P_{start}	Potência para inicialização	$58,7mW$
T_{start}	Tempo de inicialização	$446\mu s$
P_{txElec}	Potência do circuito de transmissão	$151mW$
α_{amp}	Nível de potência Eq. (3.4)	$174mW$
β_{amp}	Constante de proporcionalidade Eq. (3.4)	5
N_0	Densidade espetral de ruído	$-154dBm/Hz$
f_c	Frequência da portadora	$2,4GHz$
c	Velocidade da luz	$3\times10^8 m/s$
G_T	Ganho da antena de transmissão	1
G_R	Ganho da antena de recepção	1
α	Coeficiente de atenuação com a distância	2 e 3
D	Comprimento Lateral	$80m$
n	Número de nós	$2,5,20,70$
θ	Ângulo máximo de desvio da rota	$\frac{3\pi}{20}$

Deste modo, e fazendo uso das Eqs. (3.45) e (3.47), tem-se que a energia média consumida por bit para realizar a transmissão da fonte até o destino, considerando i saltos, pode

ser dada em função de R e de N_b, para o valor ótimo de $P_0(R,N_b)$, da seguinte forma

$$\begin{aligned}\overline{E}_{ihop}(P_t = P_0(R,N_b)) \\ = \frac{C_3R+(C_4+\beta_{amp}P_0(R,N_b))N_b}{RN_b\left(1-\frac{\alpha_m}{2\beta_m C_2 P_0(R,N_b)(\overline{w})^{-\alpha}R^{-1}}\right)^{N_b}} \cdot \frac{n}{(\frac{n-1}{n})^{n-2}} \cdot \frac{(\sqrt{2}+\ln(1+\sqrt{2}))^2}{3\left(\sqrt{\frac{\pi}{2n\theta}}\right)\frac{2}{\theta}\sin(\frac{\theta}{2})},\end{aligned} \tag{3.48}$$

em que $P_0(R,N_b)$ é dado pela Eq. (3.47).

3.6 Conclusão

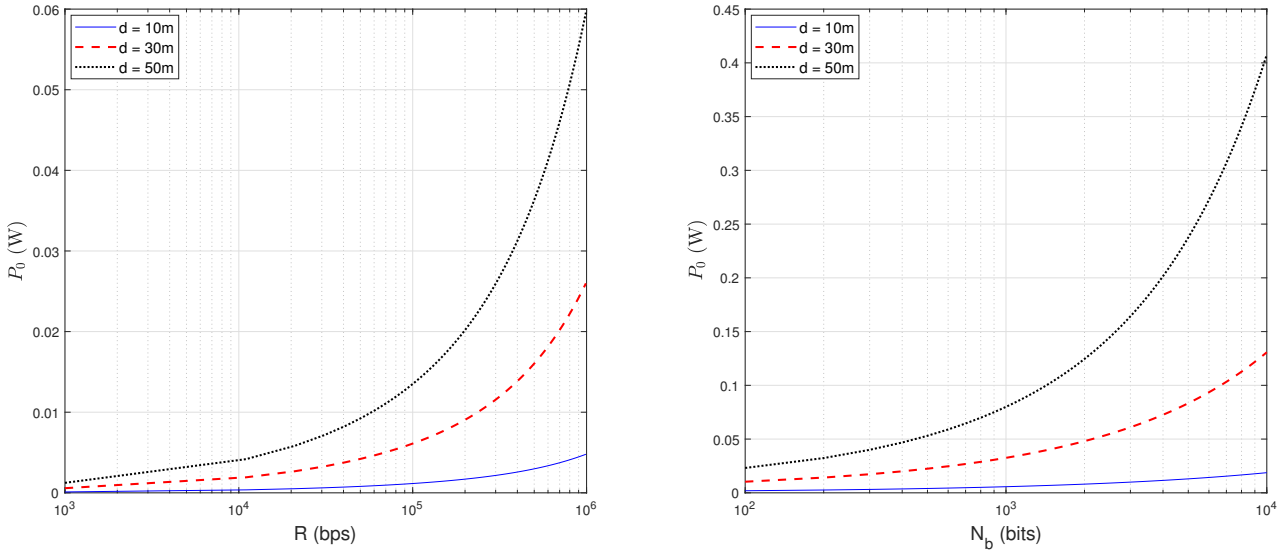
Neste capítulo, foram apresentadas as modelagens que deram origem aos resultados obtidos neste trabalho. Partido do modelo proposto por ZHANG; GORCE (2008) para um par de nós, escolhido por sua simples modelagem e riqueza de parâmetros, foi possível realizar as devidas adaptações para considerar uma rede linear contendo vários nós e inserir protocolos de controle de acesso ao meio *slotted* Aloha e CSMA/CA. Parte das modelagens propostas por TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010), PANICHPAPIBOON; FERRARI; TONGUZ (2004) e GHOBAD; MORAES (2012) também foram consideradas para uma rede composta por nós distribuídos de maneira aleatória.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados numéricos encontrados através das modelagens propostas no Capítulo 3. Os resultados expostos neste capítulo foram obtidos por meio do *software* MATLAB através dos códigos que encontram-se nos Apêndices A, B, C e D.

4.1 Redes *Ad hoc slotted* Aloha de um salto

A partir da simulação numérica do código descrito no Apêndice A, e utilizando os parâmetros da Tabela 1 que representam as características físicas do transceptor μAMPS-1 KARL; WILLIG (2007), foi realizada uma análise do modelo de consumo de energia proposto na Seção 3.2 para transmissão de um salto. Os resultados aqui apresentados são para as Eqs. (3.14), (3.17) e (3.20).



(a) $N_b = 100$ bits e $n = 10$ nós.

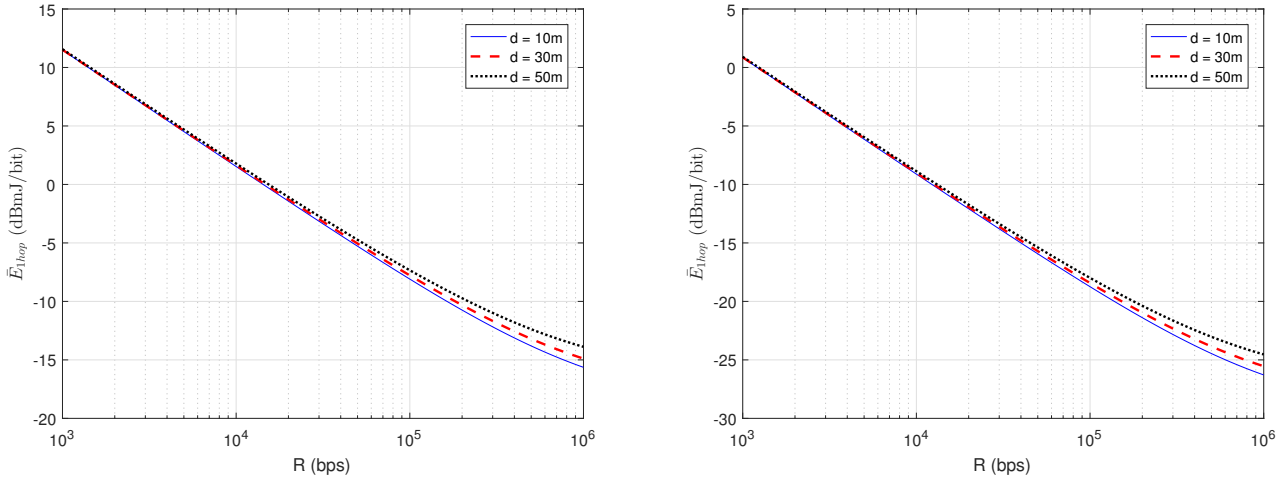
(b) $R = 250$ kbps e $n = 10$ nós.

Figura 12 – Potência ótima de transmissão em função de R (4.12(a)) e de N_b (4.12(b)).

As Figuras 12(a) e 12(b) mostram o desempenho da potência de transmissão ótima (Eq. (3.17)), em Watts (W), em função da taxa de transmissão R e do tamanho do pacote N_b, respectivamente. O número de nós n foi escolhido como sendo 10 por se tratar de um número comumente utilizado para a realização de estudos nesses tipos de redes. Neste sentido, aumentar o número de nós implica em aumentar aumentar a potência de transmissão requerida em decorrência dos prováveis erros na transmissão pela presença de um número maior de nós interferentes. Em ambos os casos observa-se que a potência ótima necessária para envio de um pacote aumenta com a taxa de transmissão, com o tamanho do pacote e também com a distância entre o par de nós comunicantes.

Nas Figuras 13(a) e 13(b) é possível verificar o consumo médio de energia por bit (medido em unidades de dBmJoules por bit (dBmJ/bit)) para uma transmissão bem sucedida em um salto (Eq. (3.20)). A análise de ambas as figuras difere na quantidade de nós que constitui a rede em questão.

Na Figura 13(a), observa-se que a energia necessária para transmitir um bit diminui com o aumento da taxa de transmissão e com a redução da distância entre os nós. Porém, transmitir a altas taxas demandará um aumento na potência de transmissão ótima requerida. Deve-se, portanto, respeitar o limite da taxa de transmissão de modo que não resulte uma potência acima do permitido pelo hardware do nó transmissor.



(a) $N_b = 100$ bits e $n = 10$ nós.

(b) $N_b = 100$ bits e $n = 2$ nós.

Figura 13 – $\overline{E}_{1hop}$ em função da taxa de transmissão de dados R.

Para efeito de comparação, a Figura 13(b) mostra o consumo de energia, no cenário em que há apenas dois nós se comunicando ($n = 2$) onde um desses nós transmite e o outro recebe. Como esperado, devido a ausência de nós interferentes na rede, observa-se um menor consumo de energia em função da taxa de transmissão quando se compara com a Figura 13(a).

Outro aspecto importante de projeto é se empregar uma taxa de transmissão que resulte em uma taxa de erros de bit aceitável, pois a BER é uma função direta de R conforme as Eqs. (3.9) e (3.14). A Figura 14 ilustra o comportamento da taxa de erros de bit em função da taxa de transmissão de dados e percebe-se que o desempenho do sistema nesse quesito piora com o aumento de R. Portanto, deve haver um compromisso no uso deste parâmetro.

As Figuras 15(a) e 15(b) retratam o consumo médio de energia por bit para um salto em função do tamanho do pacote de dados (Eq. (3.20)). Observa-se que o consumo mínimo de energia se dá para N_b entre 100 e 1000 bits, dependendo da distância entre os nós.

Comparando a Figura 15(a) para uma rede com $n = 10$ nós e a Figura 15(b) para um cenário com apenas $n = 2$ nós comunicantes, observa-se no cenário de dois nós um melhor desempenho, pois neste caso resulta menor probabilidade de erro na transmissão devido à

ausência de interferência dos outros nós da rede e consequente menor consumo de energia.

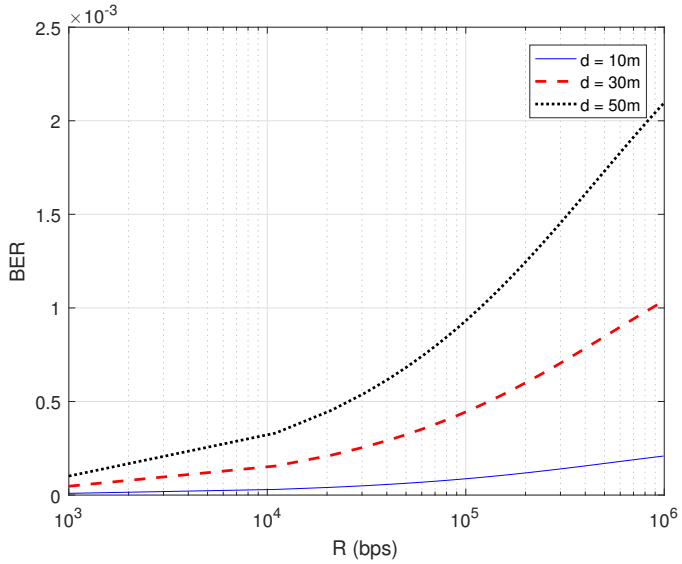
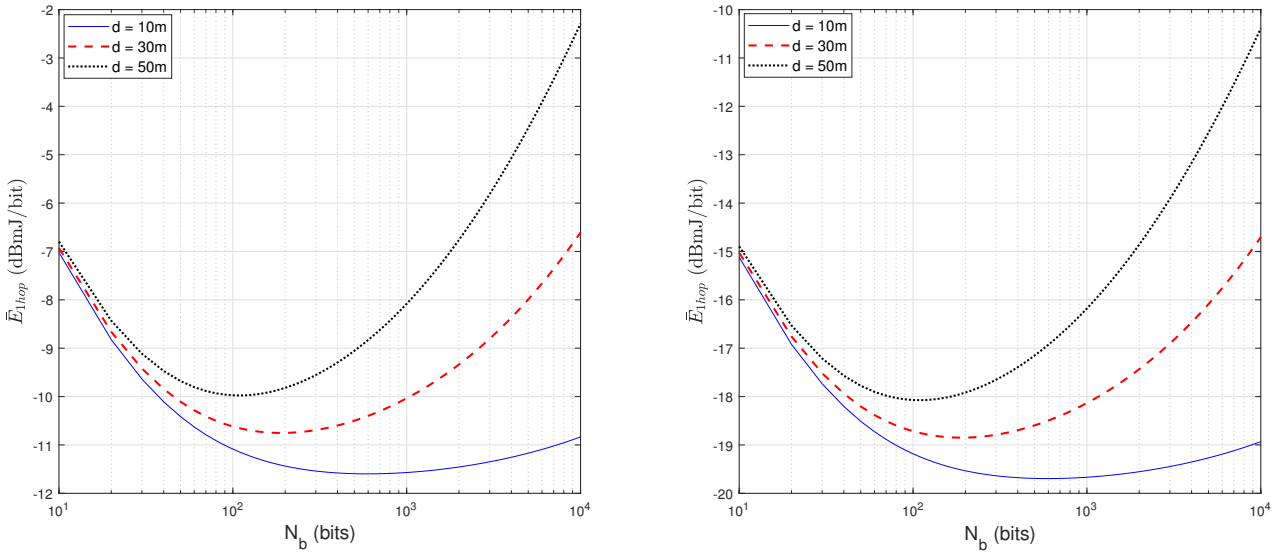


Figura 14 – Taxa de erro de bit (Eq. (3.14)) em função da taxa de transmissão de dados R.



(a) $R = 250$ kbps e $n = 10$ nós.

(b) $R = 250$ kbps e $n = 2$ nós.

Figura 15 – $\overline{E}_{1hop}$ em função do tamanho do pacote N_b.

Por fim, para uma completa visualização da variação da energia consumida em um salto, a Figura 16 ilustra o comportamento como uma função simultânea da taxa de transmissão de dados e do tamanho do pacote. Foi escolhido o cenário com 10 nós comunicantes para representar a presença de nós interferentes e a distância mínima de 10 metros um do outro uma vez que essa distância representou menor consumo energético em todos os resultados apresentados anteriormente.

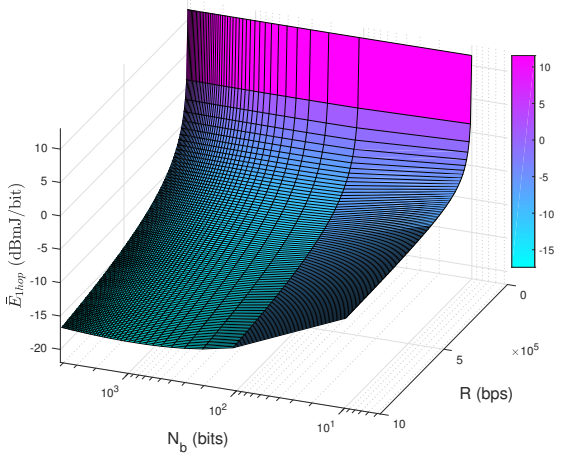


Figura 16 – $\overline{E}_{1hop}$ em função da taxa de transmissão de dados R e em função do tamanho do pacote N_b para $n = 10$ nós na rede e distância $d = 10$ metros entre o par de nós comunicantes.

4.2 Redes *ad hoc* lineares *slotted* Aloha com saltos equidistantes

Com o objetivo de explorar o comportamento do consumo de energia médio por bit da rede *ad hoc* sem fio aqui considerada, esta seção apresenta os resultados numéricos para comunicação por múltiplos saltos empregando a Eq. (3.28). Os valores dos parâmetros utilizados encontram-se descritos na Tabela 2 da Seção 3.3. Foram considerados dois valores para o coeficiente de atenuação com a distância ($\alpha = 2$ e 4) que resultam cenários distintos para comunicação sem fio. O código referente a esta etapa encontra-se no Apêndice B.

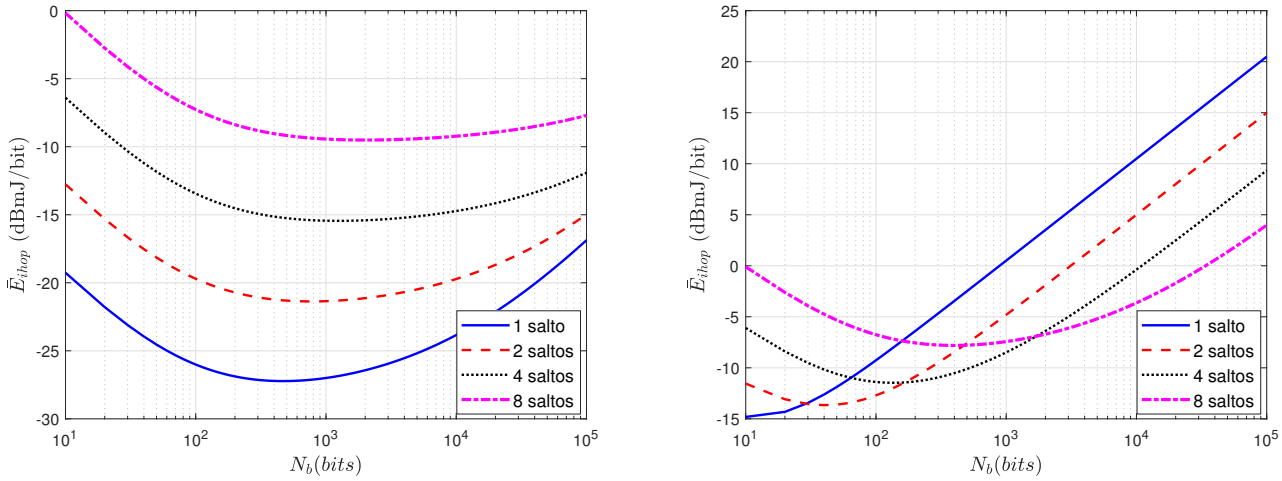
Como a distância entre fonte e destino empregada foi $d = 80m$ e testou-se o número de saltos $i = 1, 2, 4$ e 8, então a distância do salto (d/i) assumiu os valores 80, 40, 20 e 10 metros, respectivamente.

A Figura 17(a), para $\alpha = 2$ e $R = 1$Mbps, ilustra o comportamento do consumo de energia (em unidades de dBmJ/bit) em função do tamanho do pacote. Observa-se que o menor consumo dentre as curvas acontece para comunicação em um único salto com tamanho de pacote ótimo de aproximadamente 500 bits. Para dois saltos, N_b ótimo é de aproximadamente 800 bits; para quatro saltos é de 1000 bits; e para oito saltos é de 2000 bits. Consequentemente, à medida que o número de saltos aumenta, o tamanho ideal do pacote e o consumo de energia também aumentam.

Tal comportamento é justificado pelo fato de que, para saltos mais longos (i.e. maiores distâncias), a relação sinal-ruído é menor no receptor; portanto, é vantajoso enviar pacotes mais curtos a fim de reduzir a probabilidade de erro na recepção devido ao ruído do canal, o que diminui o número necessário de retransmissões causando menor consumo de energia.

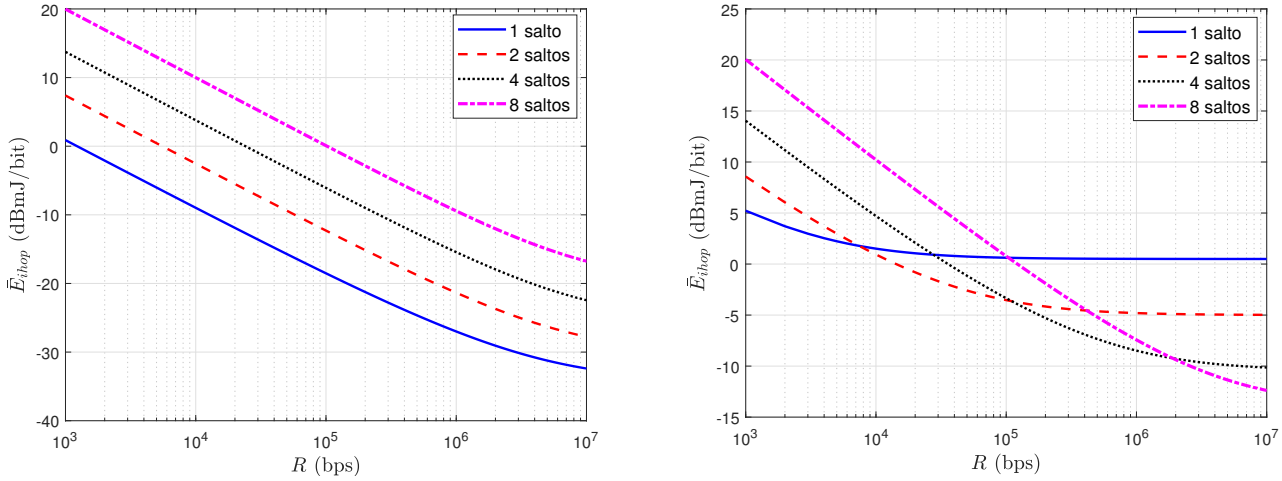
Na Figura 17(b), para $\alpha = 4$ e $R = 1$Mbps, com o aumento da atenuação do sinal recebido, devido ao maior valor do coeficiente de atenuação com a distância, resulta diminuição

da relação sinal-ruído no receptor se tornando vantajoso enviar pacotes no geral curtos (N_b ótimo aproximadamente entre 10 e 400 bits), em comparação com o caso em que $\alpha = 2$. Além disso, para a redução do consumo de energia, para tamanhos de pacotes menores que 30 bits, é melhor enviar dados em um salto. Para tamanhos de pacote entre 30 e 200 bits, é mais vantajoso enviar dados em dois saltos, enquanto para tamanhos de pacotes entre 200 e 2000 bits é mais benéfico enviar dados em quatro saltos. Finalmente, para pacotes de dados com mais de 2000 bits, vale mais a pena enviar em 8 saltos.



(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$. (b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 4$.

Figura 17 – Energia média por bit em função do tamanho do pacote N_b.



(a) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$. (b) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 4$.

Figura 18 – Energia média por bit em função da taxa de transmissão R.

As Figuras 18(a) e 18(b) apresentam o consumo médio de energia por bit para $\alpha = 2$ e 4, respectivamente, e com $N_b = 1000bits$, em função da taxa de transmissão. Observa-se em todas as curvas que os menores consumos acontecerão para as maiores taxas e, em um dado

momento, as curvas apresentam-se em estado de saturação. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior for o valor de R, menor é o tempo de transmissão do pacote que, por sua vez, reduz o intervalo de vulnerabilidade do mesmo, diminuindo as chances de colisões de pacotes e a ocorrência de erros no canal sem fio.

Infere-se que para uma rede *slotted* Aloha com múltiplos saltos, e para o conjunto de parâmetros empregados, a melhor taxa de dados R para reduzir o consumo médio de energia por bit transmitido com sucesso é a maior possível de ser utilizada. Por outro lado, transmitir a altas taxas aumenta a potência de transmissão ótima necessária, como ilustra a Figura 19. Portanto, a taxa de transmissão empregada é limitada pela potência de transmissão de hardware permitida.

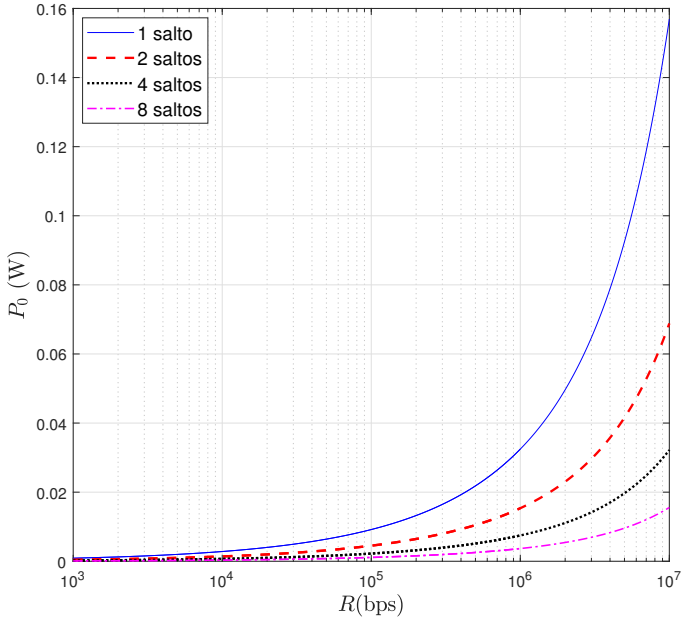


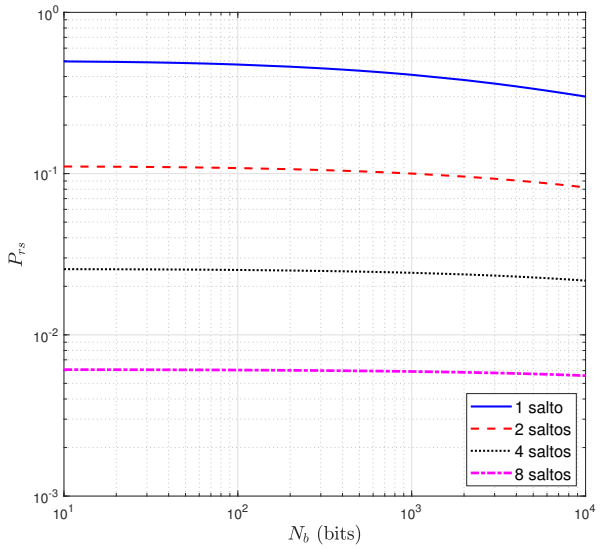
Figura 19 – Potência ótima de transmissão P_0 *versus* Taxa de transmissão R para $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$.

A Figura 20(a) fornece uma visão complementar do comportamento geral ilustrando que a probabilidade de transmissão bem-sucedida de pacotes (P_{rs} da Eq.(3.21)) diminui com o aumento do tamanho do pacote. A Figura 20(b), por sua vez, mostra que a potência de transmissão ótima necessária também aumenta com o aumento do tamanho do pacote N_b. Neste contexto, quanto maior o pacote para uma dada taxa de transmissão, maior é o período vulnerável, exigindo mais energia para lidar com erros no canal sem fio durante todo o período de transmissão.

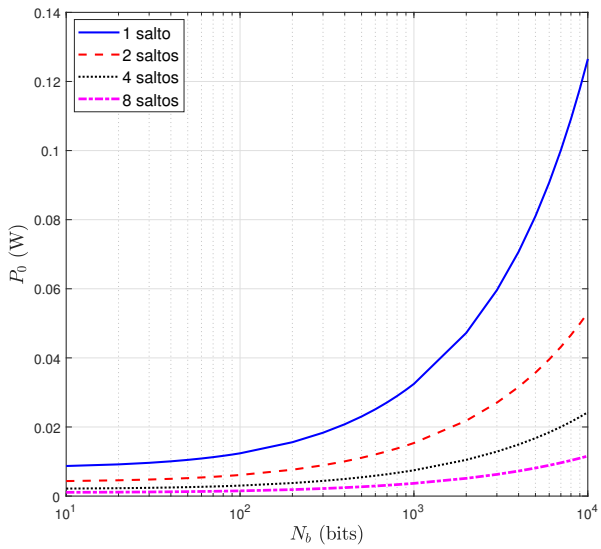
A Figura 21(a) descreve o consumo de energia como uma função da distância (d) entre a origem e o destino através da realização de um e de múltiplos saltos. Uma vez que d aumenta, a potência de transmissão ideal necessária para estabelecer uma comunicação bem sucedida também aumenta (ver Figura 21(b)), causando aumento no consumo de energia.

Os resultados para os cenários e conjunto de parâmetros aqui investigados mostram que é possível adaptar a potência de transmissão ao valor ótimo como uma função do tamanho do

pacote e da taxa de transmissão, a fim de reduzir o consumo médio de energia por bit para redes *ad hoc* lineares *slotted* Aloha. Também é possível determinar se a transmissão da origem para o destino em uma topologia linear é mais vantajosa empregando um ou vários saltos considerando os parâmetros da camada física e o protocolo de controle de acesso ao meio.

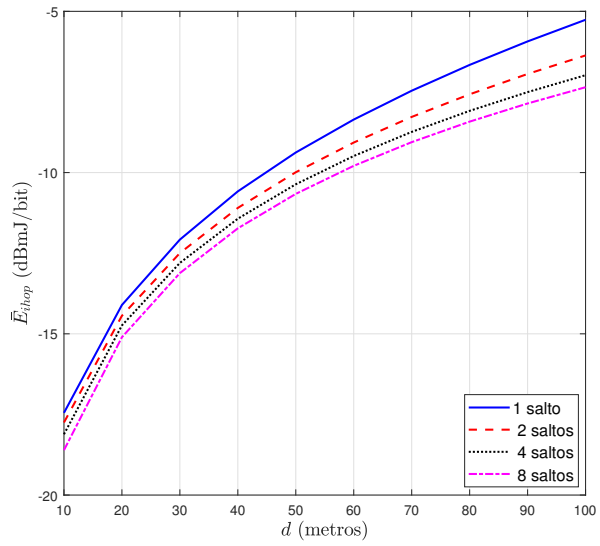


(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

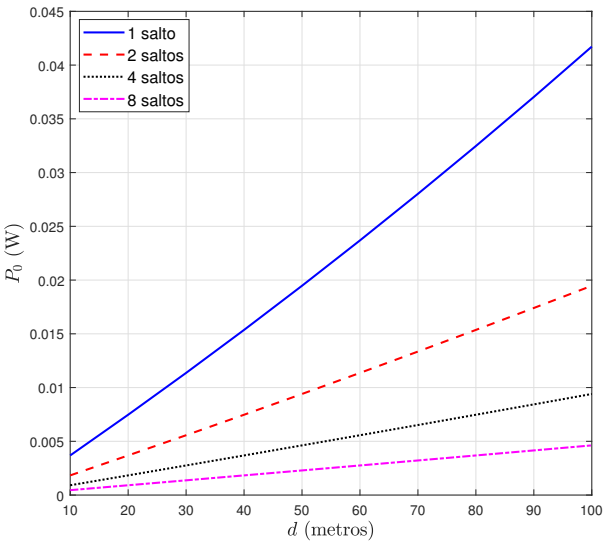


(b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

Figura 20 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} e potência ótima de transmissão P_0 *versus* Tamanho do pacote N_b.



(a) $N_b = 1000$ bits, $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.



(b) $N_b = 1000$ bits, $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

Figura 21 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ e potência ótima de transmissão P_0 *versus* distância d entre fonte e destino.

4.3 Redes *ad hoc* lineares CSMA/CA com saltos equidistantes

Esta seção apresenta os resultados numéricos da comunicação por múltiplos saltos obtidos através das Eqs. (3.38) e (3.39), com auxílio do *software* MATLAB (vide Apêndice C), para o caso do protocolo CSMA/CA. Os valores dos parâmetros estão descritos na Tabela 4. Dois valores para o coeficiente de atenuação com a distância foram considerados(α = 2 e 4), resultando em cenários distintos para a comunicação sem fio.

Tabela 4 – Parâmetros para o modelo de consumo de energia adaptada de (KARL; WILLIG, 2007), (ZHANG; GORCE, 2008) para as redes *slotted* Aloha e CSMA/CA com saltos equidistantes.

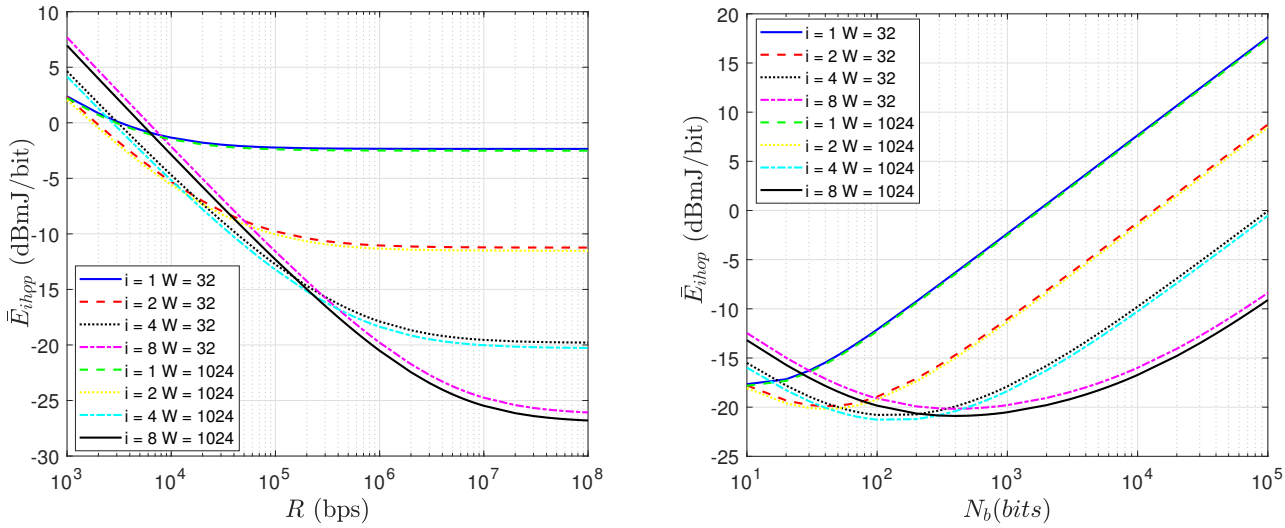
Parâmetro	Descrição	Valor
P_{rxElec}	Potência do circuito de recepção	$279mW$
P_{start}	Potência para inicialização	$58,7mW$
T_{start}	Tempo de inicialização	$446\mu s$
P_{txElec}	Potência do circuito de transmissão	$151mW$
α_{amp}	Nível de potência Eq. (3.4)	$174mW$
β_{amp}	Constante de proporcionalidade Eq. (3.4)	5
N_0	Densidade espetral de ruído	$-154dBm/Hz$
f_c	Frequência da portadora	$2,4GHz$
c	Velocidade da luz	$3 \times 10^8 m/s$
G_T	Ganho da antena de transmissão	1
G_R	Ganho da antena de recepção	1
α	Coeficiente de atenuação com a distância	2 e 4
d	Distância entre fonte e destino	$80m$
i	Número de saltos até o destino	$1,2,4,8$
W	Tamanho da Janela de *backoff*	32
i	Número de Retransmissões (CSMA/CA)	7

O número de retransmissões (*Ret*) usado para calcular τ foi obtido de TINNIRELLO; BIANCHI; XIAO (2010). Para análises que envolvem o protocolo CSMA/CA, o tamanho da janela de *backoff* (ou janela de contenção) W, por conveniência, é o mesmo da janela de congestionamento (CW).

Foram realizados testes com valores de CW_{max} e CW_{min} que estão no padrão IEEE 802.11b CHOI et al. (May. 2003), para um cenário com elevada atenuação (i.e. $\alpha = 4$) e para variações de R e N_b, como mostrado nas Figuras 22(a) e 22(b), respectivamente. Pode-se inferir que o consumo médio de energia é praticamente o mesmo comparando cada curva de mesmo salto, mas com W distinto. Portanto, foi escolhido usar $W = CW_{min} = 32$ já que o *throughput* é praticamente constante para este valor, como comprovado em BIANCHI (2000).

Como a distância entre fonte e destino é $d = 80m$ e os números de saltos testados

são $i = 1, 2, 4$ e 8, então a distância do salto (d/i) assume os valores 80, 40, 20 e 10 metros, respectivamente.



(a) Variação de R para $N_b = 1000$ bits.

(b) Variação de N_b para $R = 1$Mbps.

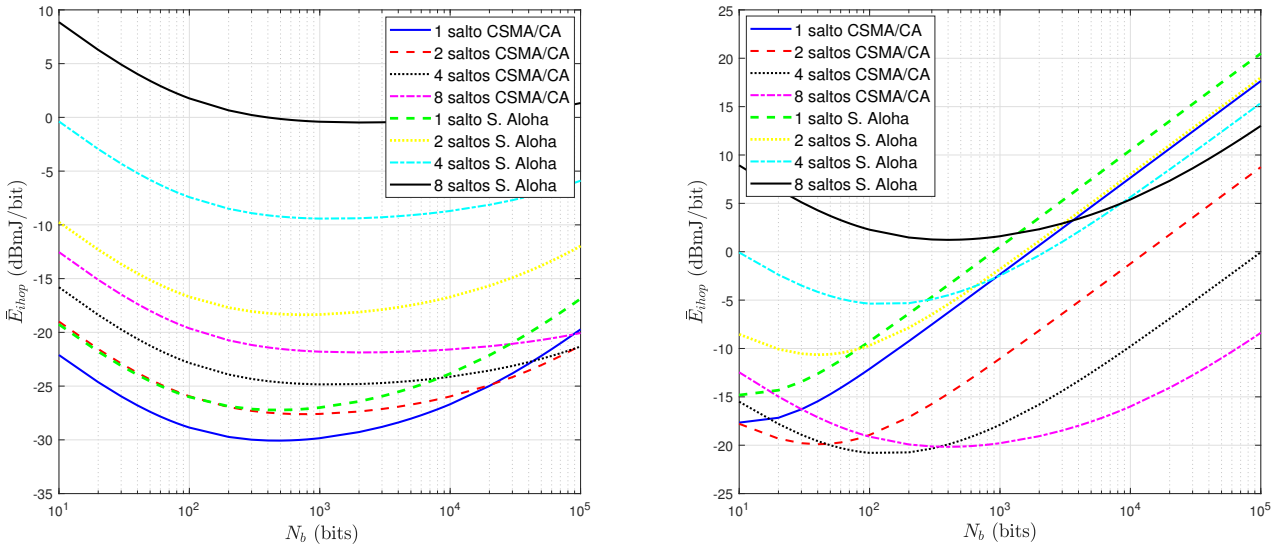
Figura 22 – Verificação do tamanho da janela de *backoff* para uma rede linear composta de n nós e um número i de saltos equidistantes, para $\alpha = 4$.

Para $\alpha = 2$ e $R = 1$Mbps, a Figura 23(a) mostra o comportamento do consumo de energia como uma função do tamanho do pacote em cenários que consideram os protocolos MAC CSMA/CA e *slotted* Aloha. Fazendo uma comparação salto a salto, observa-se que os menores consumos de energia entre as curvas plotadas são para as que fazem uso do protocolo CSMA/CA.

Contudo, no geral, o menor consumo de energia se dá para uma comunicação realizada a um único salto, com um tamanho de pacote ideal de 500 bits, utilizando o protocolo MAC CSMA/CA.

A medida que o número de saltos aumenta, o consumo de energia também aumenta, aumentando o tamanho ótimo do pacote. Um fato que justifica este comportamento é que, quando o salto é grande, a relação sinal-ruído diminui e o envio de pacotes, no geral, mais curtos diminui a probabilidade de erro na recepção em decorrência do ruído no canal. Também é observado que o consumo de energia necessário para enviar um pacote de até 200 bits é aproximadamente o mesmo para executar tanto um único salto com *slotted* Aloha quanto dois saltos com CSMA/CA.

Uma análise similar pode ser feita para transmissões de pacotes acima de 400 bits, uma vez que o consumo de energia para executar oito saltos com CSMA/CA e dois saltos com *slotted* Aloha é praticamente o mesmo. No entanto, para tamanhos de pacotes maiores que 400 bits torna-se mais vantajoso realizar comunicação a múltiplos saltos com o CSMA/CA, pois os mecanismos de *backoff* empregados neste protocolo reduzem a probabilidade de colisão de pacotes e consequente perda de energia causada por retransmissões.



(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

(b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 4$.

Figura 23 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ em função do tamanho do pacote N_b, comparando os protocolos MAC CSMA/CA e *slotted* Aloha.

Na Figura 23(b), para $\alpha = 4$ e $R = 1Mbps$, com o aumento da atenuação do sinal devido ao maior valor do coeficiente de atenuação com a distância, há uma redução da relação sinal-ruído, tornando-se vantajosa as transmissões a múltiplos saltos. Os mecanismos de *backoff* utilizados pelo protocolo MAC CSMA/CA permitem uma melhor utilização dos recursos energéticos devido à redução nos índices de perdas dos pacotes de dados, o que explica mais uma vez o seu melhor desempenho em comparação ao *slotted* Aloha.

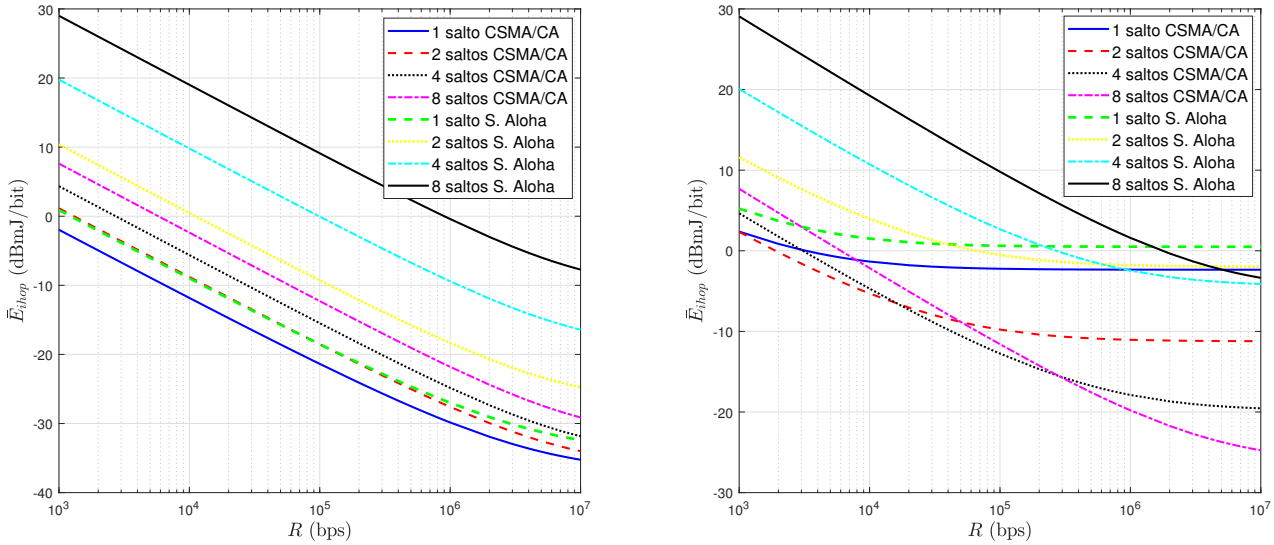
Para tamanhos de pacotes de até 10 bits, o consumo de energia é o mesmo para um ou dois saltos com o CSMA/CA. Para este mesmo protocolo, tamanhos de pacotes que variam entre 40 e 300 bits, as transmissões feitas com 4 saltos garantem menor consumo de energia. Finalmente, para o desempenho de 8 saltos, o consumo de energia é mínimo para tamanhos de pacotes entre 350 e 3000 bits.

As Figuras 24(a) e 24(b) mostram a energia consumida por bit, para $\alpha = 2$ e 4, respectivamente, e $N_b = 1000$ bits, variando a transmissão taxa de R. Observa-se em todas as curvas que os menores consumos acontecerão para as maiores taxas de transmissão e isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o valor de R, menor será o tempo de transmissão do pacote, que, por sua vez, reduz sua vulnerabilidade, reduzindo as chances de erros no canal, bem como colisões.

Verifica-se, na maioria dos casos apresentados, que o menor consumo de energia está registrado para o uso do protocolo CSMA/CA. Tal como no protocolo *slotted* Aloha, o menor consumo está vinculado às taxas de transmissão mais altas. No entanto, isso não se deve apenas à redução do intervalo de vulnerabilidade, mas também à redução no número de colisão de pacotes, já que o CSMA/CA combate o problema do terminal oculto e seus mecanismos de

backoff contribuem para o melhor desempenho do protocolo.

Fazendo uma análise mais detalhada da Figura 24(b), infere-se que, embora o menor consumo de energia seja dado para taxas mais altas, existem faixas de R ótimas (mínimo consumo) para cada salto. Por exemplo, para uma taxa de 1kbps, o consumo de energia será o mesmo para um ou dois saltos usando o protocolo CSMA/CA. Também para este protocolo, para taxas que variam de 5 a 50 kbps, a transmissão com quatro saltos retorna menor consumo de energia. Finalmente, como mencionado acima, para este mesmo protocolo, com transmissão a oito saltos e taxas acima de 100 kbps, o consumo de energia é ligeiramente menor se comparado a todos os cenários simulados de R.



(a) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$.

(b) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 4$.

Figura 24 – Energia média por bit $\overline{E}_{ihop}$ em função da taxa de transmissão R, comparando os protocolos MAC CSMA/CA e *slotted* Aloha.

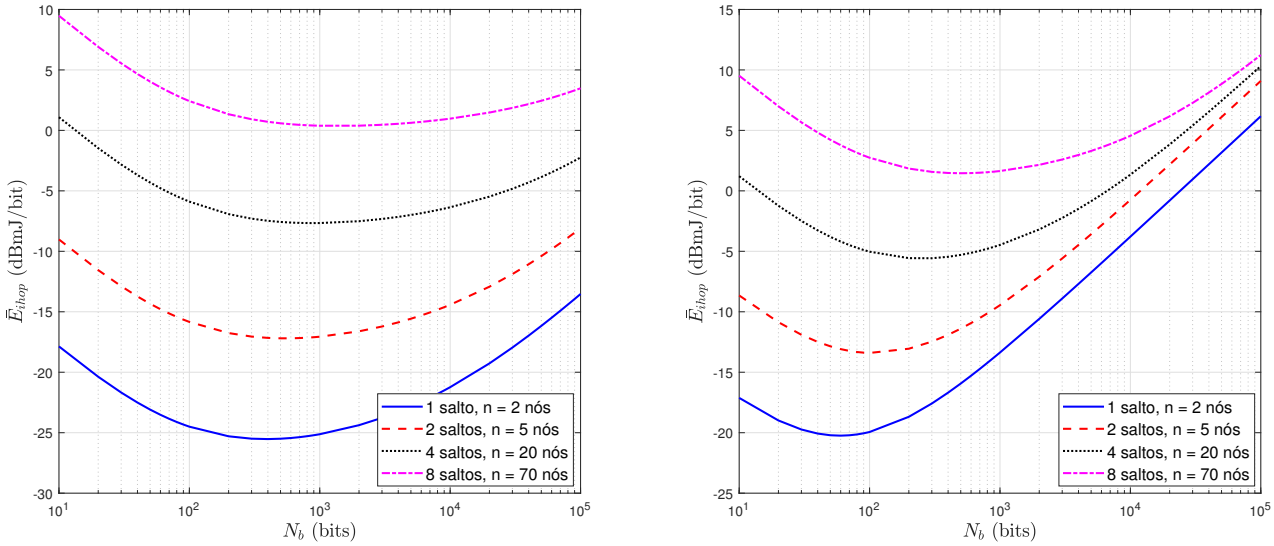
4.4 Redes aleatórias *slotted* Aloha

Para obtenção dos resultados apresentados nessa seção, utilizaram-se os parâmetros contidos na Tabela 3. O número de nós escolhido para essa análise se deu com base na quantidade de saltos que se desejava obter através da Eq. (3.43). Buscou-se, portanto, valores de n que resultassem nos saltos 1, 2, 4 e 8 tal como nas análises para saltos equidistantes. Para alcançar este objetivo, foi utilizado como ângulo máximo de desvio de rota, para todos os casos, $\theta = \frac{3\pi}{20}$. Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através do código apresentado no Apêndice D.

Foram considerados dois valores para o coeficiente de atenuação com a distância ($\alpha = 2$ e 3) que resultam cenários distintos para comunicação sem fio. Ao utilizar $\alpha = 2$, modelamos a atenuação no espaço livre. Para valores de $\alpha > 3$ (i.e. $\alpha = 4$), verificamos que resultam

consumos de energia proibitivos. Por este motivo, para modelar um canal com perdas, foi utilizado $\alpha = 3$.

A Figura 25(a), para $\alpha = 2$ e $R = 1$Mbps, ilustra o comportamento do consumo de energia em função do tamanho do pacote. Observa-se que o menor consumo dentre as curvas acontece para comunicação em um único salto com tamanho de pacote ótimo de aproximadamente 400 bits. Para dois saltos, N_b ótimo é de aproximadamente 600 bits, para quatro saltos é de 1000 bits e para oito saltos é de 3000 bits. Consequentemente, à medida que o número de saltos aumenta, o tamanho ideal do pacote e o consumo de energia também aumentam.



(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

(b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 3$.

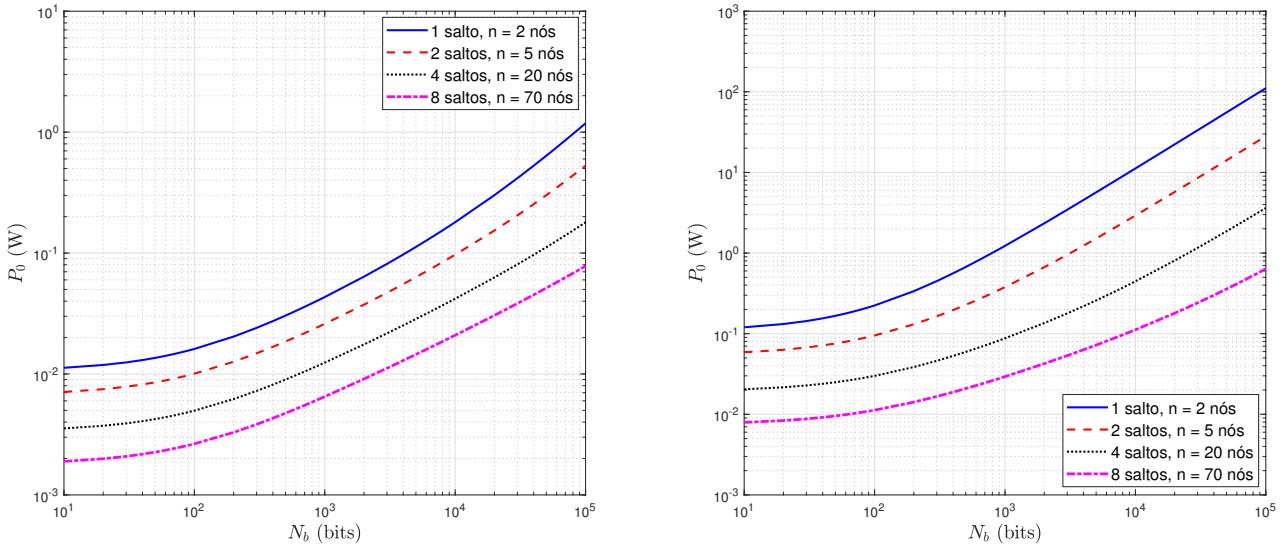
Figura 25 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função do tamanho do pacote N_b.

Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de que, para saltos mais longos (i.e. distâncias maiores entre fonte e destino), a relação sinal-ruído é menor no receptor. Por este motivo, torna-se vantajoso enviar pacotes mais curtos a fim de reduzir a probabilidade de erro na recepção devido ao ruído do canal. Deste modo, o número necessário de retransmissões é reduzido e tem-se menor consumo energético.

Na Figura 25(b), para $\alpha = 3$ e $R = 1$Mbps, com o aumento da atenuação do sinal recebido, devido ao maior valor do coeficiente de atenuação com a distância, resulta diminuição da relação sinal-ruído no receptor, se tornando vantajoso enviar pacotes no geral curtos (N_b ótimo aproximadamente entre 10 e 200 bits), em comparação com o caso em que $\alpha = 2$. Além disso, para reduzir o consumo de energia no cenário em que se tem tamanhos de pacotes menores que 1000 bits, é melhor enviar dados em um salto. Nos cenários cujo número de nós é maior, tem-se maior interferência de nós adjacentes e isso justifica aumento no consumo energético mediante realização de múltiplos saltos.

No entanto, deve-se tomar cuidado na hora de escolher o tamanho do pacote a ser

transmitido pois, tal como pode ser visto nas Figuras 26(a) e 26(b), para valores de $\alpha = 2$ e 3, a potência ótima de transmissão necessária aumenta com o aumento de N_b. Isso se deve ao fato de que maiores tamanhos de pacotes exigem maiores potências para lidar com os erros do canal sem fio durante o período de transmissão.



(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$.

(b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 3$.

Figura 26 – Verificação da potência ótima de transmissão P_0 em função do tamanho do pacote N_b.

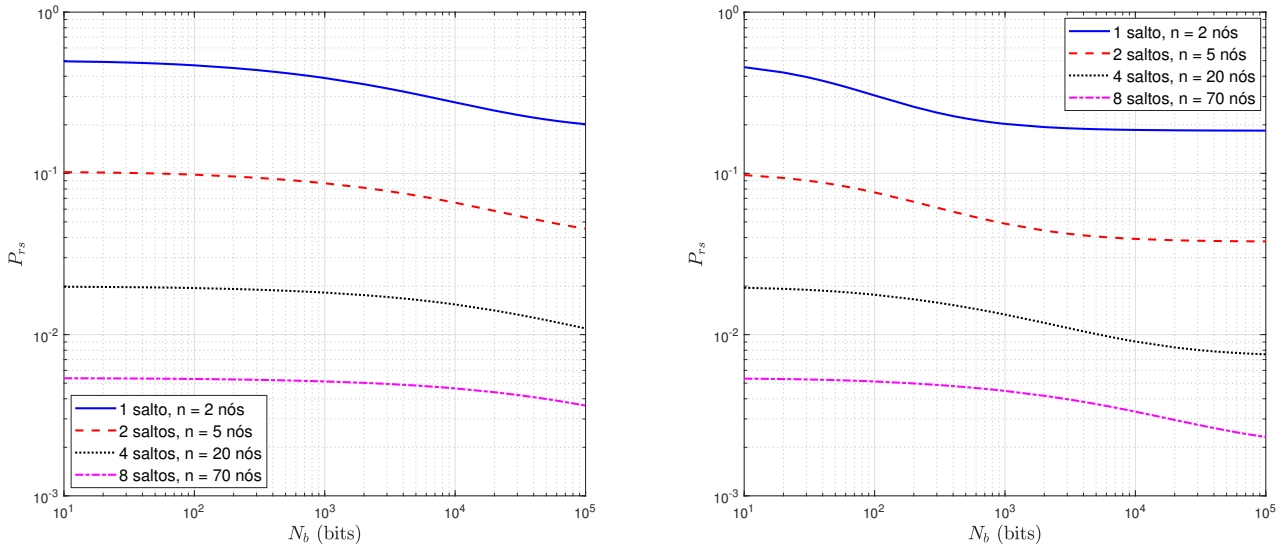
Nas Figuras 27(a) e 27(b), são apresentados os resultados referentes à Eq. (3.40), que representa a probabilidade de uma estação transmitir com sucesso. Observa-se em ambos os cenários que a probabilidade de transmitir um pacote com sucesso diminui com o aumento do tamanho do pacote. Isso se deve aos erros no canal de transmissão decorrentes do tempo de vulnerabilidade sofrido por um pacote de tamanho relativamente grande.

As Figuras 28(a) e 28(b) apresentam, respectivamente, a energia consumida por bit para $\alpha = 2$ e 3, com $N_b = 1000bits$, em função da taxa de transmissão. Observa-se em todas as curvas que os menores consumos acontecerão para as maiores taxas. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior for o valor de R, menor será o tempo de transmissão do pacote que, por sua vez, resultará na diminuição de seu intervalo de vulnerabilidade no canal, diminuindo as chances de erro e também as colisões por consequência do protocolo *slotted* Aloha.

Portanto, para tais redes, e para o conjunto de parâmetros aqui considerados, o melhor ponto de operação de R, ou seja, o que reduz o consumo de energia, é o que apresenta o maior valor possível. No entanto, deve-se respeitar os limites do rádio e ter a consciência de que aumentar demais a taxa de transmissão pode também aumentar a taxa de erro de bit, uma vez que a BER é função direta de R tal como indicado na Eq. (3.14).

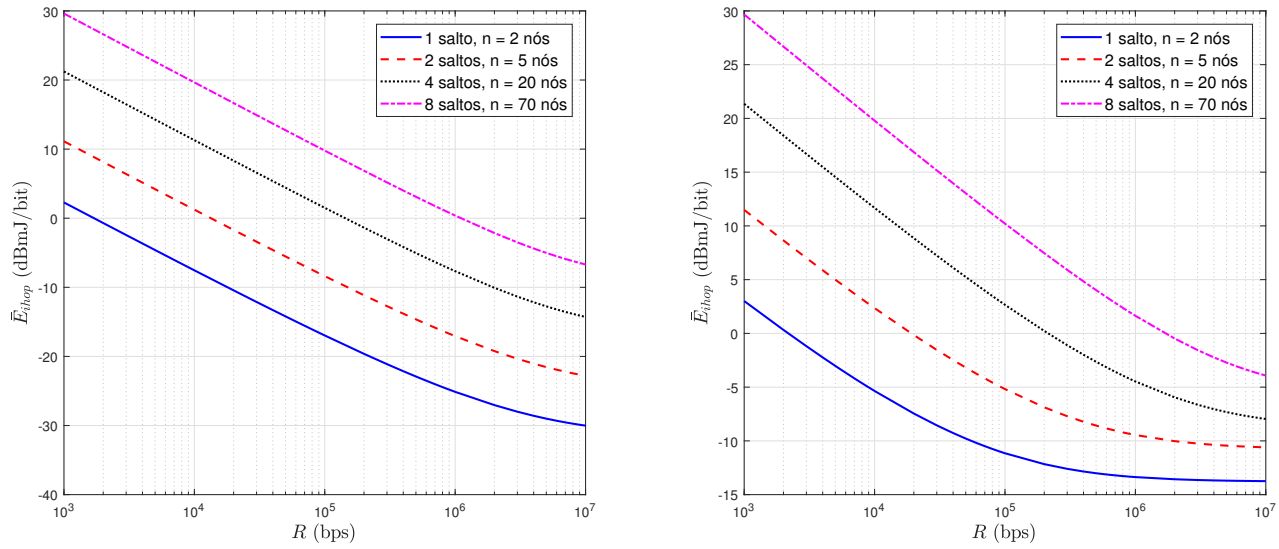
Outro ponto que deve ser levado em consideração na escolha de R é a potência de transmissão. Como ilustrado nas Figuras 29(a) e 29(b), transmitir a altas taxas demanda maior

potência de transmissão e, por consequência, acaba por reduzir os recursos energéticos do dispositivo transmissor durante o processo de comunicação.



(a) $R = 1$Mbps e $\alpha = 2$. (b) $R = 1$Mbps e $\alpha = 3$.

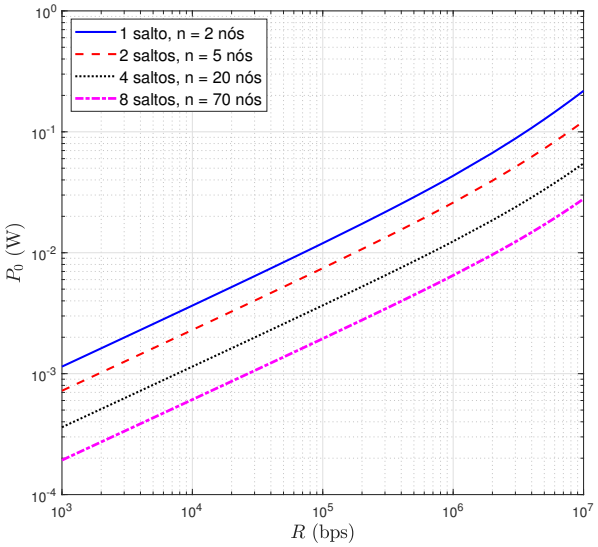
Figura 27 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} *versus* o tamanho do pacote N_b.



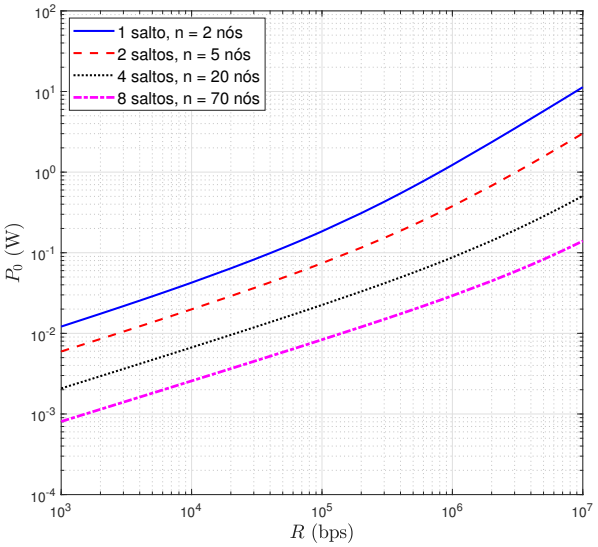
(a) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$. (b) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 3$.

Figura 28 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função da taxa de transmissão R.

Por fim, também partindo da Eq. (3.40), as Figuras 30(a) e 30(b) representam as probabilidades de sucesso na entrega de um pacote em função da taxa de transmissão para $\alpha = 2$ e 3, respectivamente.

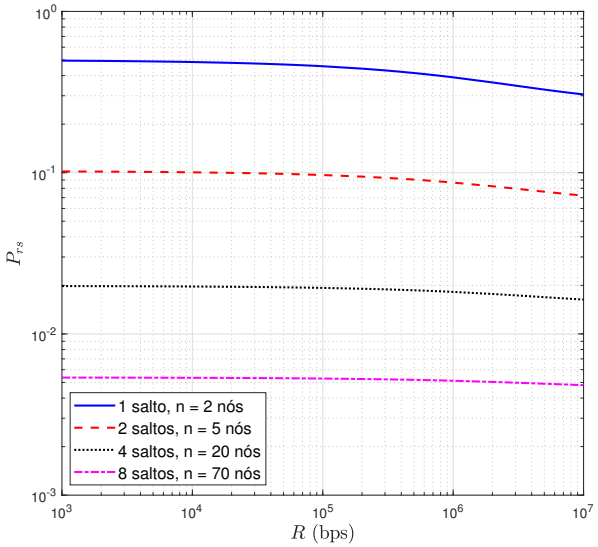


(a) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$.

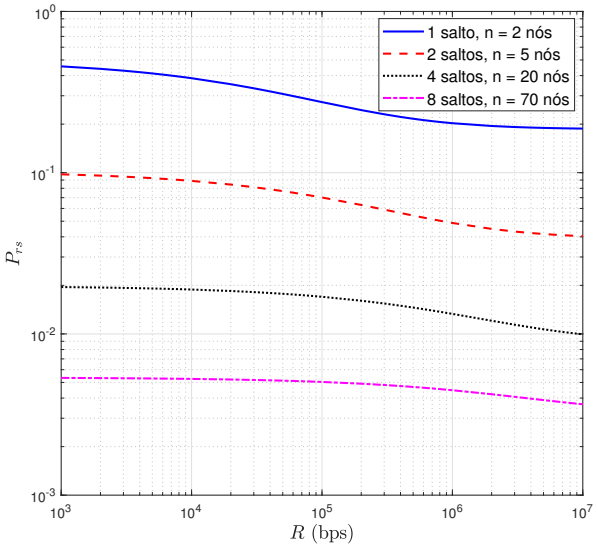


(b) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 3$.

Figura 29 – Energia média por bit da rede aleatória $\overline{E}_{ihop}$, em função da taxa de transmissão R.



(a) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 2$.



(b) $N_b = 1000$ bits e $\alpha = 3$.

Figura 30 – Probabilidade de transmitir um pacote com sucesso P_{rs} *versus* taxa de transmissão R.

Assim como verificado para o aumento no valor de N_b, à medida que a taxa de transmissão aumenta, verifica-se que há uma pequena redução na probabilidade de uma estação transmitir um pacote com sucesso. Isso pode ser justificado através aumento da potência ótima requerida na transmissão que provoca perdas em termos energéticos para o sistema. As perdas aqui mencionadas se referem ao fato de, dado que ocorreu uma falha na transmissão, novos pacotes

têm que ser retransmitidos, demandando mais energia do sistema.

Outro fator de impacto para o indicador é a taxa de erro de bit. Como mostrado anteriormente, transmitir a altas taxas aumenta a probabilidade de erro no sistema, e consequente falha na transmissão de pacotes, pelo fato de a taxa de transmissão de dados ser função direta do BER.

4.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados os resultados numéricos encontrados a partir da simulação das modelagens propostas no Capítulo 3. Verificou-se para ambas as propostas os intervalos da taxa de transmissão R e do tamanho do pacote N_b que minimizam o consumo energético em redes *ad hoc* Aloha e CSMA/CA. Destacou-se ainda que deve-se ter cuidado ao escolher os valores de R e N_b empregados, uma vez que estes podem impactar negativamente na probabilidade de sucesso da transmissão em decorrência dos erros no canal ocasionados pelo tempo de vulnerabilidade do pacote no mesmo. Por fim, mostrou-se que é possível se obter níveis ótimos (mínimos) de redução do consumo de energia considerando-se conjuntamente os parâmetros das camadas física e de enlace numa abordagem *crosslayer*.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por finalidade investigar o comportamento do consumo médio de energia por bit para uma transmissão bem sucedida em uma rede *ad hoc* sem fio. Um modelo inicial já existente que considerava apenas a camada física foi ampliado para considerar a potência de transmissão ótima em função do tamanho do pacote e da taxa de transmissão de dados a fim de buscar os intervalos de valores desses parâmetros que minimizassem o consumo de energia nessas redes, adicionando o protocolo MAC de comunicação da camada de enlace. A escolha de partir desse modelo já existente se deu por sua riqueza de parâmetros e possível manipulação para inserção do protocolo MAC.

Com base no estudo realizado em (ZHANG; GORCE, 2008), as modelagens aqui propostas focaram em minimizar o consumo de energia na transmissão de N_b, a um salto e a múltiplos saltos, considerando os protocolos MAC *slotted* Aloha e CSMA/CA.

Na primeira modelagem proposta, foi contemplada a temática de redes *ad hoc slotted* Aloha de um salto. Neste contexto, dois cenários foram investigados, uma rede com dois nós e outra com dez nós, considerando que a comunicação se dava da fonte (transmissor) para o destino (receptor) diretamente por um único salto. As análises foram feitas em função dos vários parâmetros do coeficiente de atenuação com a distância igual a três que, em termos gerais, representa um cenário moderadamente atenuado, e dos demais parâmetros do transceptor μAMPS-1 e das camadas física e de enlace.

Foi determinada a potência ótima de transmissão em função da taxa de transmissão de dados e do tamanho do pacote que resultasse reduzido consumo de energia. Uma vez que essa abordagem trabalha com o protocolo *slotted* Aloha, um fator multiplicativo foi inserido à fórmula original (sem outros nós interferentes) que representa, matematicamente, a probabilidade de sucesso de um único nó transmitir por vez nos casos em que há a presença de nós interferentes, como ocorre no cenário aqui implementado em que a rede possui vários nós.

Com esse estudo, foi verificado que para um consumo mínimo de energia média gasta por bit na realização de um salto, faz-se necessário a maior taxa de transmissão permitida pelo *hardware* do sistema, e com um tamanho de pacote que varie entre 100 e 1000 bits, para que haja uma redução na probabilidade de erro na transmissão. Contudo, deve-se tomar cuidado ao escolher o valor da taxa de transmissão, pois ela é função direta da taxa de erro de bit.

A segunda modelagem aqui apresentada teve por finalidade investigar o comportamento do consumo médio de energia por bit para transmissão bem sucedida, em uma rede *ad hoc slotted* Aloha sem fio linear, empregando múltiplos saltos equidistantes. Nesta abordagem, faixas de valores da taxa de transmissão e do tamanho do pacote, para diferentes números de saltos, foram investigadas para obter o mínimo consumo de energia para a transmissão de um bit. Foram estudados dois casos: um com coeficiente (α) de atenuação com a distância igual a dois e outro igual a quatro, os quais modelam distintos cenários de comunicação sem fio.

Verificou-se que, para $\alpha = 2$, a taxa de transmissão e o tamanho do pacote retornaram

menor consumo energético para o cenário em que a comunicação se dá a um único salto. Contudo, observa-se que para cada salto há um valor da taxa de transmissão e do tamanho do pacote que minimiza o consumo médio de energia para envio de um bit.

Para $\alpha = 4$, entretanto, há um valor ótimo do tamanho do pacote que minimiza o consumo de energia em função do número de saltos realizados. O mesmo acontece para a variação da taxa de transmissão. No entanto, o menor consumo de energia, para um cenário em que há alto índice de atenuação, se dá para a maior taxa de transmissão possível dentro dos limites do *hardware*.

Na terceira abordagem aqui apresentada, foi considerado o protocolo MAC CSMA/CA por este ser mais sofisticado e tratar problemas como o de terminal escondido. No entanto, para este caso, utilizou-se uma aproximação da equação da energia média para a transmissão de N_b bits com sucesso em um salto, em que foi considerado um número de retransmissões infinitas.

Foi realizado ainda um estudo comparativo entre os protocolos *slotted* Aloha e CSMA/CA, considerando coeficientes de atenuação de percurso iguais a 2 e 4, e tamanho de janela de *backoff* 32 bits. Assim como no Aloha, foi considerada uma rede linear cujos nós estão dispostos linearmente equidistantes uns dos outros.

Em ambos os cenários implementados, verificou-se que o protocolo CSMA/CA apresentou menor consumo energético por bit para cada salto, mesmo com a utilização de uma aproximação da fórmula, se comparado ao *slotted* Aloha. Infere-se ainda que, dependendo do caso, existe um valor ótimo do tamanho do pacote que minimiza o consumo de energia. Também foi observado que a taxa de transmissão que resulta o menor consumo de energia é a maior possível aceitável pelo *hardware* transceptor.

Com o objetivo de modelar uma rede que mais se aproximasse do que acontece na prática, foi realizada uma abordagem considerando redes *slotted* Aloha com os nós dispostos uniformemente de maneira aleatória na rede. Nesse contexto, o número de saltos da fonte para o destino foi obtido em função da densidade de nós da rede e de um ângulo (θ) de desvio de rota. Pelo fato deste trabalho ter sido fundamentado em valores médios, foi considerado para efeito de cálculo a distância média do salto.

Foram utilizados por coeficientes de atenuação com a distância $\alpha = 2$ e 3. O número de nós na rede foi escolhido de modo que resultasse no número de saltos que está sendo utilizado nas demais modelagens propostas para múltiplos saltos neste trabalho. Pôde-se inferir neste estudo que com o aumento da atenuação do sinal recebido, resulta na diminuição da relação sinal-ruído, tornando-se vantajoso enviar pacotes no geral mais curtos a altas taxas, respeitando a limitação física do dispositivo.

Deste modo, diante do exposto, pode-se dizer que, a partir de parâmetros de camada física e MAC, e de modelos de consumo de energia e protocolos já existentes, foram obtidas novas modelagens que minimizam o consumo de energia em redes sem fio *ad hoc*, realizando comunicação a um salto e a múltiplos saltos.

No entanto, algumas dificuldades foram encontradas no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa. A utilização de um modelo de energia complexo impossibilitou a obtenção de

funções que representassem o consumo energético em redes CSMA/CA de maneira exata. Para realizar este estudo, foi feita uma aproximação para poder inserir o protocolo MAC destacado.

Outra dificuldade encontrada foi na adaptação do modelo para o cenário em que os nós estão uniformemente distribuídos de maneira aleatória. Neste contexto, teve que ser utilizada a distância média do salto. Por fim, por questões de limitação de tempo, não foi possível realizar simulações de redes para confrontar os resultados numéricos.

Em termos de contribuições, foram obtidos intervalos de valores de taxa de transmissão (R) e de tamanhos de pacote (N_b) que minimizam o consumo energético em redes sem fio *ad hoc* e de sensores nas mais diversas situações aqui apresentadas. Foram obtidas também equações para a potência ótima de transmissão em função de R e N_b que proporcionam menor gasto energético durante o processo de comunicação entre os nós.

Tendo em vista as dificuldades e os resultados encontrados, pretende-se como trabalhos futuros, primeiramente, a obtenção de um modelo que seja compatível de maneira integral com o protocolo CSMA/CA tal como descrito no padrão IEEE 802.11b em que o número de retransmissões é finito. Outro ponto a ser estudado no futuro são as redes aleatórias. Pretende-se obter um modelo matemático em que não seja utilizado valores médios para modelar um cenário aleatório. Buscar-se-á a obtenção de uma abordagem multiobjetiva em função dos parâmetros aqui estudados (i.e. taxa de transmissão, tamanho do pacote e potência de transmissão simultaneamente) de modo a encontrar um mínimo global que otimize o consumo de energia em redes *ad hoc* e de sensores sem fio. Outros modelos de desvanecimento e de modulação mais sofisticados serão estudados para serem implementados a fim de modelar melhor o canal de transmissão e o sinal transmitido, respectivamente. Por fim, considera-se ainda a implementação em simuladores de redes e em kits de sensores práticos para que haja maior aderência entre a teoria e o que acontece na prática.

REFERÊNCIAS

ABDULHADI, S. et al. Optimized packet size for energy efficient cooperative wireless ad-hoc networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS WORKSHOPS (ICC), Budapest, Hungary. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013.

ADAUTO, D. A. R. **H-M2MMAC**: Uma nova abordagem híbrida de protocolo MAC multicanal para comunicação muitos-para-muitos. 2017. Trabalho de Graduação — Universidade Federal de Pernambuco.

ADAUTO, D. A. R.; MORAES, R. M. de. H-M2MMAC: Uma nova abordagem híbrida de protocolo MAC multicanal para comunicação muitos-para-muitos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC). **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. v.36.

AGRAWAL, D. P. **Embedded sensor systems**. [S.l.]: Springer, 2017.

AGRE, J.; CLARE, L. An integrated architecture for cooperative sensing networks. **Computer**, [S.l.], v.33, n.5, p.106–108, 2000.

AKBAS, A. et al. Joint optimization of transmission power level and packet size for WSN lifetime maximization. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v.16, n.12, p.5084–5094, 2016.

AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, [S.l.], v.38, n.4, p.393–422, 2002.

AKYILDIZ, I. F. et al. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v.40, n.8, p.102–114, 2002.

AKYILDIZ, I. F.; MELODIA, T.; CHOWDHURY, K. R. A survey on wireless multimedia sensor networks. **Computer Networks**, [S.l.], v.51, n.4, p.921–960, 2007.

AKYILDIZ, I. F.; STUNTEBECK, E. P. Wireless underground sensor networks: research challenges. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v.4, n.6, p.669–686, 2006.

ALLARD, G. et al. Evaluation of the energy consumption in MANET. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AD-HOC NETWORKS AND WIRELESS. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. p.170–183.

ANASTASI, G. et al. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey. **Ad hoc networks**, [S.l.], v.7, n.3, p.537–568, 2009.

BENTON, K. The evolution of 802.11 wireless security. **Journal, UNLV Informatics-Spring, n. INF**, [S.l.], v.795, p.1–56, 2010.

BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [S.l.], v.18, n.3, p.535–547, 2000.

BIANCHI, G.; FRATTA, L.; OLIVERI, M. Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs. In: PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, 1996. PIMRC'96., SEVENTH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1996. v.2, p.392–396.

BISPO, K. A. **Uma infraestrutura semântica para economizar energia em rede de sensores sem fio**. 2015. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Pernambuco.

CHEN, P.; O'DEA, B.; CALLAWAY, E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks. In: COMMUNICATIONS, 2002. ICC 2002. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v.2, p.945–952.

CHOI, S. et al. IEEE 802.11 e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC'03), Anchorage, USA. **Anais...** [S.l.: s.n.], May. 2003.

COMMITTEE, L. S. et al. ANSI/IEEE Std 802.11: wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. **IEEE Computer Society**, [S.l.], 1999.

DA SILVA, B. A.; DE MORAES, R. M. Um estudo sobre o consumo de energia em redes ad hoc lineares aloha com saltos equidistantes. In: XXXVI SIMPóSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAçõES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, Campina Grande, PB. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018.

DA SILVA, B. A.; DE MORAES, R. M. Consumo de Energia em Função da Taxa de Transmissão e do Tamanho do Pacote em Redes Ad Hoc Aloha de um Salto. In: CSBC2018, 17º WPERFORMANCE – WORKSHOP EM DESEMPENHO DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS E DE COMUNICAÇÃO, Natal, RN. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018.

DAVIS, A.; CHANG, H. Underwater wireless sensor networks. In: IEEE OCEANS. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1–5.

DÂMASO, A. V. L. **Avaliação integrada de consumo de energia e confiabilidade em rede sensores sem fio usando modelos**. 2015. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Pernambuco.

FEENEY, L. M.; NILSSON, M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. In: TWENTIETH ANNUAL JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES (INFOCOM). PROCEEDINGS, Anchorage, USA. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2001. v.3.

FERNANDES, N. C. et al. Ataques e mecanismos de segurança em redes ad hoc. **Minicursos do Simpósio Brasileiro em Segurança da Informaçao e de Sistemas Computacionais (SBSeg'2006)**, [S.l.], p.49–102, 2006.

FRODIGH, M.; JOHANSSON, P.; LARSSON, P. Wireless ad hoc networking: the art of networking without a network. **Ericsson review**, [S.l.], v.4, n.4, p.249, 2000.

GAO, J. Analysis of energy consumption for ad hoc wireless sensor networks using a bit-meter-per-joule metric. **IPN Progress Report**, [S.l.], v.42, n.150, p.1–19, 2002.

GHOBAD, P. C.; MORAES, R. M. de. BER Analysis with an Appropriate Friis Formula for Multi-hop ALOHA Dense Ad Hoc Networks. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC FALL), 2012 IEEE. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1–5.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

GORATTI, L. et al. An urn occupancy approach for modeling the energy consumption of distributed beaconing. **IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)**, [S.l.], v.22, n.1, p.203–216, 2014.

GORCE, J.-M.; ZHANG, R.; PARVERY, H. Impact of radio link unreliability on the connectivity of wireless sensor networks. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, [S.l.], n.1, p.1–16, 2007.

GUPTA, A. L.; SHEKOKAR, N. A novel approach to improve network lifetime in WSN by energy efficient packet optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ICETECH), Coimbatore, India. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016.

GUPTA, P.; SAXENA, P. Energy Consumption in Wireless Ad Hoc Network. In: EMERGING TRENDS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ICETET), 2010 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.831–835.

HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, L. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. **IEEE Communications Magazine**, [S.l.], v.46, n.6, p.164–171, 2008.

HUNG, F.-Y.; MARSIC, I. Performance analysis of the IEEE 802.11 DCF in the presence of the hidden stations. **Computer Networks**, [S.l.], v.54, n.15, p.2674–2687, 2010.

KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

KUMAR, A.; KUMAR, S.; KAIWARTYA, O. Optimizing energy consumption with global load balance in mobile ad hoc networks using NSGA-II and random waypoint mobility. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND AUTOMATION (ICCCA), Greater Noida, India. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

LI, N. et al. Design and implementation of a MAC protocol for a wearable monitoring system on human body. In: IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIC (ASICON), Chengdu, China. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015.

LIU, X. et al. An optimization scheme of adaptive dynamic energy consumption based on joint network-channel coding in wireless sensor networks. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v.15, n.9, p.5158–5168, 2015.

MA, Y.; YANG, Q.; KWAK, K. S. Impact of mobility on energy consumption in mobile ad hoc networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING (WCSP), Nanjing, China. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

MOBIN, I.; MOHAMMED, N.; MOMEN, S. Optimal range estimation for energy efficient dynamic packet size. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ECCE), Cox's Bazar, Bangladesh. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

NARAYANASWAMY, S. et al. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the compow protocol. In: EUROPEAN WIRELESS CONFERENCE. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v.2002, p.156162.

PANICHPAPIBOON, S.; FERRARI, G.; TONGUZ, O. K. Sensor networks with random versus uniform topology: mac and interference considerations. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2004. VTC 2004-SPRING. 2004 IEEE 59TH. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. v.4, p.2111–2115.

PANNE, M. Van de; FIUME, E. Sensor-actuator networks. In: COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 20. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1993. p.335–342.

PIMENTA, R. G.; MORAES, R. L. R. d. **Implementação e avaliação de desempenho do protocolo CSMA/CA IEEE 802.15. 4 sobre a plataforma SimpliciTI e microcontroladores MSP430**. 2015.

RANA, K.; ZAVERI, M. A-star algorithm for energy efficient routing in wireless sensor network. **Trends in Network and Communications**, [S.l.], p.232–241, 2011.

ROBERT, T. et al. Ad-hoc hypothesis. **The Skeptic's Dictionary**, [S.l.], 2009.

ROBERTS, L. **ARPANET Satellite System Notes 8 (NIC Document# 11290) and 9 (NIC Document# 11291), available from the ARPA Network Information Center**. [S.l.]: Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, 1972.

ROBERTS, L. ALOHA packet system with and without slots and capture. **ACM SIGCOMM Computer Commun. Review**, [S.l.], v.5, n.2, p.28–42, 1975.

SADIQ, A. S. et al. An Energy-Efficient Cross-Layer approach for cloud wireless green communications. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOG AND MOBILE EDGE COMPUTING (FMEC), Valencia, Spain. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

SHELBY, Z. et al. Energy optimization in multihop wireless embedded and sensor networks. **International Journal of Wireless Information Networks**, [S.l.], v.12, n.1, p.11–21, 2005.

SHRESTHA, B.; HOSSAIN, E.; CAMORLINGA, S. Hidden node collision mitigated CSMA/CA-based multihop wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), Budapest, Hungary. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013.

SILVA, M. P. **Análise de desempenho e diferenciação de serviços no sub nível MAC do padrão IEEE 802.11 em redes ad hoc**. 2004. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Santa Catarina.

SINGH, S. K. et al. An energy efficient routing using multi-hop intra clustering technique in WSNs. In: TENCON IEEE REGION 10 CONFERENCE, Penang, Malaysia. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

STANKOVIC, J. A.; HE, T. Energy management in sensor networks. **Phil. Trans. R. Soc. A**, [S.l.], v.370, n.1958, p.52–67, 2012.

SURATY FILHO, L.; MAMAN, M. Energy efficient advertisement protocol for cooperative body area networks. In: PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC) ON 28TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1–7.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.

TANG, Y.-J. et al. Energy consumption reduction methods of geographic routing protocols with out-of-date location information in mobile ad hoc networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), Paris, France. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.

TINNIRELLO, I.; BIANCHI, G.; XIAO, Y. Refinements on IEEE 802.11 distributed coordination function modeling approaches. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v.59, n.3, p.1055–1067, 2010.

TOBAGI, F.; KLEINROCK, L. Packet switching in radio channels: part ii–the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution. **IEEE Transactions on communications**, [S.l.], v.23, n.12, p.1417–1433, 1975.

WARD, J.; COMPTON, R. T. High throughput slotted ALOHA packet radio networks with adaptive arrays. **IEEE Transactions on Communications**, [S.l.], v.41, n.3, p.460–470, 1993.

XIAO, H.; IBRAHIM, D. M.; CHRISTIANSON, B. Energy consumption in mobile ad hoc networks. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (WCNC), Istanbul, Turkey. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014.

YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: TWENTY-FIRST ANNUAL JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES (INFOCOM). PROCEEDINGS, New York, USA. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2002. v.3.

ZHANG, R.; GORCE, J.-M. Optimal transmission range for minimum energy consumption in wireless sensor networks. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (WCNC), Las Vegas, USA. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008.

ZUNIGA, M.; KRISHNAMACHARI, B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: FIRST ANNUAL IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY CONFERENCE ON SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS (SECON), Santa Clara, USA. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004.

APÊNDICE A – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE *SLOTTED* ALOHA DE UM SALTO

```
clc;
clear all;

%%Carregando Parâmetros
PrxElec = 279*(10^-3);
PtxElec = 151*(10^-3);
Pstart  = 58.7*(10^-3);
Tstart  = 446*(10^-6);
R       = [1000:1000:1e6];
%R      = 1e6; %bps
aamp    = 174*(10^-3);
bamp    = 5;
N0      = (10^(-15.4)) * (10^-3); %Watt
fc      = 2.4*(10^9);
Gtant   = 1;
Grant   = 1;
%Nb     = [10:10:1e4];
Nb      = 1000; %bits
a       = 3;
L       = 1;
c       = 3*10^8;
lambda  = c/fc;
am      = 1;
bm      = 2;
n       = 2; %ou n = 10 nós

%%Constantes Calculadas
mu = n/(((n-1)/n)^(n-2)); %slotted aloha
C3 = (2*Tstart*Pstart)/Nb
C4 = PtxElec+PrxElec+aamp
C2 = (Gtant*Grant*(lambda^2))/( N0*L*((4*pi)^2))

%%Distancia = 10m
d1      = 10;
c1      = am*d1^3*R*(1+Nb)
c2      = 4*bm*C2
```

```
c3      = (bamp^2)*(am^2)*(d1^6)*((1+Nb)^2)
c4      = 8*bm*C2*(R^-1)*Nb*((C3*R)+C4)*bamp*am*d1^3
c5      = 4*bm*C2*bamp

P0_1            = (c1/c2)+ R*(sqrt(c3+c4))/c5
numerador_1     = C3*R + (C4 + bamp*P0_1);
denominador_1   = R*(1 - ((am*d1^3*R)/(2*bm*C2*P0_1)))^Nb;
E1h             = (numerador_1/denominador_1)*mu;
E1h_dbm         = 10*log10(E1h/0.001);

%%Distancia = 30m
d2          = 30;
c6          = am*d2^3*R*(1+Nb)
c7          = 4*bm*C2
c8          = (bamp^2)*(am^2)*(d2^6)*((1+Nb)^2)
c9          = 8*bm*C2*(R^-1)*Nb*((C3*R)+C4)*bamp*am*d2^3
c10         = 4*bm*C2*bamp

P0_2            = (c6/c7)+ R*(sqrt(c8+c9))/c10
numerador_2     = C3*R + (C4 + bamp*P0_2);
denominador_2   = R*(1 - ((am*d2^3*R)/(2*bm*C2*P0_2)))^Nb;
E1h_2           = (numerador_2/denominador_2)*mu; %J/bit
E1h_dbm2        = 10*log10(E1h_2/0.001); %dBmJ/bit

%%Distancia = 50m
d3          = 50;
c11         = am*d3^3*R*(1+Nb)
c12         = 4*bm*C2
c13         =(bamp^2)*(am^2)*(d3^6)*((1+Nb)^2)
c14         = 8*bm*C2*(R^-1)*Nb*((C3*R)+C4)*bamp*am*d3^3
c15         = 4*bm*C2*bamp

P0_3            = (c11/c12)+ R*(sqrt(c13+c14))/c15
numerador_3     = C3*R + (C4 + bamp*P0_3);
denominador_3   = R*(1 - ((am*d3^3*R)/(2*bm*C2*P0_3)))^Nb;
E1h_3           = (numerador_3/denominador_3)*mu;
E1h_dbm3        = 10*log10(E1h_3/0.001);
```

APÊNDICE B – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE *SLOTTED* LINEAR ALOHA

```
clc;
clear all;

PrxElec     = 279*(10^-3);
PtxElec     = 151*(10^-3);
Pstart      = 58.7*(10^-3);
Tstart      = 446*(10^-6);
R           = 1e6;
% r1        = [10^3:10^3:9e3];
% r2        = [10^4:10^4:9e4];
% r3        = [10^5:10^5:9e5];
% r4        = [10^6:10^6:9e6];
% r5        = [10^7:10^7:10^8];
% R         = [r1,r2,r3,r4,r5];
aamp        = 174*(10^-3);
bamp        = 5;
N0          = (10^(-15.4)) * (10^-3); %Watt
fc          = 2.4*(10^9);
Gtant       = 1;
Grant       = 1;
nb1         = [10^1:10^1:9e1];
nb2         = [10^2:10^2:9e2];
nb3         = [10^3:10^3:9e3];
nb4         = [10^4:10^4:9e4];
nb5         = [10^5:10^5:10^6];
Nb          = [nb1,nb2,nb3,nb4,nb5];
%Nb         = 1000;
a           = 4; %ou a = 2
L           = 1;
c           = 3*10^8;
lambda      = c/fc;
am          = 1;
bm          = 2;
%n          = 10;
h1          = 1  %numero de saltos
h2          = 2; %numero de saltos
h3          = 4; %numero de saltos
```

```
h4          = 8; %numero de saltos
dist        = 80;

%%Constantes Calculadas
C3 = (2*Tstart*Pstart)
C4 = PtxElec+PrxElec+aamp
C2 = (Gtant*Grant*(lambda^2))/( N0*L*((4*pi)^2))

%Distancia = d
d1      = dist;
n       = 2
mu      = (h1^(h1-2))/((h1+1)^h1); %slotted aloha
c1      = am*d1^a*R*(1+Nb)
c2      = 4*bm*C2
c3      = (bamp^2)*(am^2)*(d1^(2*a))*((1+Nb)^2)
c4      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d1^a
c5      = 4*bm*C2*bamp

P0_1            = (c1/c2)+ R*(sqrt(c3+c4))/c5
Prs1            = ((1 - ((am*d1^a*R)/(2*bm*C2*P0_1)))^Nb)*mu
numerador_1     = C3*R + (C4 + bamp*P0_1)*Nb;
denominador_1   = R*Nb*Prs1;
Enh             = (numerador_1/denominador_1); %J/bit
Enh_dbm         = 10*log10(Enh/0.001) ;%dBmJ/bit


%%Distancia = d/h2
d2      = dist/h2;
n2      = 3
mu2     = (h2^(h2-2))/((h2+1)^h2); %slotted aloha
c6      = am*d2^a*R*(1+Nb)
c7      = 4*bm*C2
c8      = (bamp^2)*(am^2)*(d2^(2*a))*((1+Nb)^2)
c9      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d2^a
c10     = 4*bm*C2*bamp

P0_2            = (c6/c7)+ R*(sqrt(c8+c9))/c10
Prs2            = ((1 - ((am*d2^a*R)/(2*bm*C2*P0_2)))^Nb)*mu2
numerador_2     = C3*R + (C4 + bamp*P0_2)*Nb;
```

```
denominador_2   = R*Nb*Prs2;
Enh2            = (numerador_2/denominador_2)*h2; %J/bit
Enh_dbm2        = 10*log10(Enh2/0.001); %dBmJ/bit

%%Distancia = d/h3
d3          = dist/h3;
n3          = 5
mu3         = (h3^(h3-2))/((h3+1)^h3); %slotted aloha
c11         = am*d3^a*R*(1+Nb)
c12         = 4*bm*C2
c13         = (bamp^2)*(am^2)*(d3^(2*a))*((1+Nb)^2)
c14         = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d3^a
c15         = 4*bm*C2*bamp

P0_3            = (c11/c12)+ R*(sqrt(c13+c14))/c15
P0_3dbm         = 10*log10( P0_3/0.001 ) ;
Prs3            = ((1 - ((am*d3^a*R)/(2*bm*C2*P0_3)))^Nb)*mu3
numerador_3     = C3*R + (C4 + bamp*P0_3)*Nb;
denominador_3   = R*Nb*Prs3;
Enh3            = (numerador_3/denominador_3)*h3;  %J/bit
Enh_dbm3        = 10*log10(Enh3/0.001);       %dBmJ/bit


%%Distancia = 30m
d4              = dist/h4;
n4              = 9
mu4             = (h4^(h4-2))/((h4+1)^h4); %slotted aloha
c16             = am*d4^a*R*(1+Nb)
c17             = 4*bm*C2
c18             = (bamp^2)*(am^2)*(d4^(2*a))*((1+Nb)^2)
c19             = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d4^a
c20             = 4*bm*C2*bamp

P0_4            = (c16/c17)+ R*(sqrt(c18+c19))/c20
P0_4dbm         = 10*log10( P0_4/0.001 ) ;
Prs4            = ((1 - ((am*d4^a*R)/(2*bm*C2*P0_4)))^Nb)*mu4
numerador_4     = C3*R + (C4 + bamp*P0_4)*Nb;
denominador_4   = R*Nb*Prs4;
Enh4            = (numerador_4/denominador_4)*h4; %J/bit
```

```
Enh_dbm4          = 10*log10(Enh4/0.001); %dBmJ/bit
```

APÊNDICE D – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE LINEAR CSMA/CA

```
clc;
clear all;

PrxElec = 279*(10^-3);
PtxElec = 151*(10^-3);
Pstart  = 58.7*(10^-3);
Tstart  = 446*(10^-6);
R       = 1e6;
% r1 = [10^3:10^3:9e3];
% r2 = [10^4:10^4:9e4];
% r3 = [10^5:10^5:9e5];
% r4 = [10^6:10^6:9e6];
% r5 = [10^7:10^7:10^8];
% R = [r1,r2,r3,r4,r5];
aamp    = 174*(10^-3);
bamp    = 5;
N0      = (10^(-15.4)) * (10^-3); %Watt
fc      = 2.4*(10^9);
Gtant   = 1;
Grant   = 1;
nb1 = [10^1:10^1:9e1];
nb2 = [10^2:10^2:9e2];
nb3 = [10^3:10^3:9e3];
nb4 = [10^4:10^4:9e4];
nb5 = [10^5:10^5:10^5];
Nb = [nb1,nb2,nb3,nb4,nb5];
%Nb      = 1000;
a       = 4;
L       = 1;
c       = 3*10^8;
lambda  = c/fc;
am      = 1;
bm      = 2;
i1      = 1;%numero de saltos
i2      = 2;%numero de saltos
i3      = 4;%numero de saltos
i4      = 8;%numero de saltos
```

```
dist    = 80; %metros

C3 = (2*Tstart*Pstart)
C4 = PtxElec+PrxElec+aamp
C2 =(Gtant*Grant*(lambda^2))/( N0*L*((4*pi)^2))

% 1 SALTO E 2 NÓS
d1      = dist/i1;
n       = i1+1

%%Probabilidade de sucesso CSMA/CA
tau     = findTau(n);
Ptr     = 1 - (1 - tau)^n; %Bianchi(10)
ps      = (n*tau*(1-tau)^(n - 1))/Ptr;
        %Bianchi - probabilidade de sucesso csma/ca

c1      = am*d1^a*R*(1+Nb)
c2      = 4*bm*C2
c3      = (bamp^2)*(am^2)*(d1^(2*a))*((1+Nb)^2)
c4      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d1^a
c5      = 4*bm*C2*bamp

P0_1            = (c1/c2)+ R*(sqrt(c3+c4))/c5
numerador_1     = C3*R + (C4 + bamp*P0_1)*Nb;
denominador_1   = R*Nb*(1 - ((am*d1^a*R)/(2*bm*C2*P0_1)))^Nb;
Enh             = (numerador_1/denominador_1)*(1/ps)*i1; %J/bit
Enh_dbm =        10*log10( Enh/0.001 ) ;%dBmJ/bit


% %% 2 SALTOS E 3 NÓS
d2       = dist/i2
n2       = i2+1

%%Probabilidade de sucesso CSMA/CA
tau2    = findTau2(n2);
Ptr2    = 1 - (1 - tau2)^n2; %Bianchi
ps2     = (n2*tau2*(1-tau2)^(n2 - 1))/Ptr2;
        %Bianchi - probabilidade de sucesso csma/ca
```

```
c6      = am*d2^a*R*(1+Nb)
c7      = 4*bm*C2
c8      = (bamp^2)*(am^2)*(d2^(2*a))*((1+Nb)^2)
c9      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d2^a
c10     = 4*bm*C2*bamp

P0_2            = (c6/c7)+ R*(sqrt(c8+c9))/c10
numerador_2     = C3*R + (C4 + bamp*P0_2)*Nb;
denominador_2   = R*Nb*(1 - ((am*d2^a*R)/(2*bm*C2*P0_2)))^Nb;
Enh2            = (numerador_2/denominador_2)*(1/ps2)*i2;%J/bit
Enh_dbm2        = 10*log10( Enh2/0.001 ) ;%dBmJ/bit

%% 4 SALTOS E 5 NÓS
d3       = dist/i3
n3       = i3+1

%%Probabilidade de sucesso CSMA/CA
tau3    = findTau3(n3);
Ptr3    = 1 - (1 - tau3)^n3; %Bianchi
ps3     = (n3*tau3*(1-tau3)^(n3 - 1))/Ptr3;
        %Bianchi - probabilidade de sucesso csma/ca

c11      = am*d3^a*R*(1+Nb)
c12      = 4*bm*C2
c13      =(bamp^2)*(am^2)*(d3^(2*a))*((1+Nb)^2)
c14      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d3^a
c15      = 4*bm*C2*bamp

P0_3            = (c11/c12)+ R*(sqrt(c13+c14))/c15
numerador_3     = C3*R + (C4 + bamp*P0_3)*Nb;
denominador_3   = R*Nb*(1 - ((am*d3^a*R)/(2*bm*C2*P0_3)))^Nb;
Enh3            = (numerador_3/denominador_3)*(1/ps3)*i3;%J/bit
Enh_dbm3        = 10*log10( Enh3/0.001 ) ;%dBmJ/bit

%% 8 SALTOS E 9 NÓS
d4       = dist/i4
n4       = i4+1

%%Probabilidade de sucesso CSMA/CA
```

```
tau4    = findTau4(n4);
Ptr4    = 1 - (1 - tau4)^n4; %Bianchi
ps4     = (n4*tau4*(1-tau4)^(n4 - 1))/Ptr4;
        %Bianchi - probabilidade de sucesso csma/ca

c16      = am*d4^a*R*(1+Nb)
c17      = 4*bm*C2
c18      =(bamp^2)*(am^2)*(d4^(2*a))*((1+Nb)^2)
c19      = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*d4^a
c20      = 4*bm*C2*bamp

P0_4            = (c16/c17)+ R*(sqrt(c18+c19))/c20
numerador_4     = C3*R + (C4 + bamp*P0_4)*Nb;
denominador_4   = R*Nb*(1 - ((am*d4^a*R)/(2*bm*C2*P0_4)))^Nb;
Enh4            = (numerador_4/denominador_4)*(1/ps4)*i4;%J/bit
Enh_dbm4        = 10*log10( Enh4/0.001 ) ;%dBmJ/bit


%% RESOLUCAO DE FUNCOES MATEMATICAS PARA OBTENCAO DE TAU
%1 SALTO E 2 NÓS
function [thistau] = findTau(n)
    syms p thistau R
    sym thistau
    CWin_Min = 32 ; %IEEE Draft Standard for
                    %Wireless LAN Medium Access
                    %Control(MAC) and Physical Layer (PHY)
                    %Specifications;
    Ret = 7; %Estágios de backoff
    [sol_p, sol_tau] = vpasolve([p == 1 - (1-thistau)^(n-1),
    thistau == 1/(1 + ((1-p)/(2*(1-p^(Ret+1))))
    *(findSomatorio(Ret)))],[p, thistau],[0.1 0.1]);
    thistau = sol_tau(sol_tau==real(sol_tau))
    thistau = thistau(thistau>=0)
    thistau = thistau(thistau<=1)
end
function [somatorio] = findSomatorio(Ret)
    syms p thistau somatorio
    somatorio = 0;
    W = 32; %Função do tamanho da janela de backoff
```

```
            %(2^5) - throughput é praticamente constante;
    for j=0:Ret
        somatorio = somatorio + (p^j)*((2^j)*W-1) - (1-p^(Ret+1))
    end
end
%2 SALTOS E 3 NÓS
function [thistau2] = findTau2(n2)
    syms p2 thistau2
    sym thistau2
    CWin_Min = 32 ; %IEEE Draft Standard for
                    %Wireless LAN Medium Access
                    %Control(MAC) and Physical Layer (PHY)
                    %Specifications;
    Ret = 7; %Estágios de backoff
    [sol_p2, sol_tau2] = vpasolve([p2 == 1 - (1-thistau2)^(n2-1),
    thistau2 == 1/(1 + ((1-p2)/(2*(1-p2^(Ret+1))))
    *(findSomatorio2(Ret)))],[p2, thistau2],[0.1 0.1]);
    thistau2 = sol_tau2(sol_tau2==real(sol_tau2))
    thistau2 = thistau2(thistau2>=0)
    thistau2 = thistau2(thistau2<=1)
end
function [somatorio2] = findSomatorio2(Ret)
    syms p2 thistau2 somatorio2
    somatorio2 = 0;
    W = 32; %Função do tamanho da janela de backoff
            %(2^5) - throughput é praticamente constante;
    for j2=0:Ret
        somatorio2 = somatorio2 + (p2^j2)*((2^j2)*W-1) - (1-p2^(Ret+1))
    end
end
% 4 SALTOS E 5 NÓS
function [thistau3] = findTau3(n3)
    syms p3 thistau3 R
    sym thistau3
    CWin_Min = 32 ; %IEEE Draft Standard for
                    %Wireless LAN Medium Access
                    %Control(MAC) and Physical Layer (PHY)
    Ret =7; %Estágios de backoff
    [sol_p3, sol_tau3] = vpasolve([p3 == 1 - (1-thistau3)^(n3-1),
```

```
    thistau3 == 1/(1 + ((1-p3)/(2*(1-p3^(Ret+1))))
    *(findSomatorio3(Ret)))],[p3, thistau3],[0.1 0.1]);
    thistau3 = sol_tau3(sol_tau3==real(sol_tau3))
    thistau3 = thistau3(thistau3>=0)
    thistau3 = thistau3(thistau3<=1)
end
function [somatorio3] = findSomatorio3(Ret)
    syms p3 thistau3 somatorio3
    somatorio3 = 0;
    W = 32; %Função do tamanho da janela de backoff
            %(2^5) - throughput é praticamente constante;
    for j3=0:Ret
        somatorio3 = somatorio3 + (p3^j3)*((2^j3)*W-1)
        - (1-p3^(Ret+1))
    end
end
% 8 SALTOS E 9 NÓS
function [thistau4] = findTau4(n4)
    syms p4 thistau4 R
    sym thistau4
    CWin_Min = 32 ; %IEEE Draft Standard for
                    %Wireless LAN Medium Access
                    %Control(MAC) and Physical Layer (PHY)
    Ret = 7; %Estágios de backoff
    [sol_p4, sol_tau4] = vpasolve([p4 == 1 - (1-thistau4)^(n4-1),
    thistau4 == 1/(1 + ((1-p4)/(2*(1-p4^(Ret+1))))
    *(findSomatorio4(Ret)))],[p4, thistau4],[0.1 0.1]);
    thistau4 = sol_tau4(sol_tau4==real(sol_tau4))
    thistau4 = thistau4(thistau4>=0)
    thistau4 = thistau4(thistau4<=1)
end
function [somatorio4] = findSomatorio4(Ret)
    syms p4 thistau4 somatorio4
    somatorio4 = 0;
    W = 32; %Função do tamanho da janela de backoff
            %(2^5) - throughput é praticamente constante;
    for j4=0:Ret
        somatorio4 = somatorio4 + (p4^j4)*((2^j4)*W-1) - (1-p4^(Ret+1))
    end
```

```
end
```

APÊNDICE C – SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA REDE ALEATÓRIA *SLOTTED* ALOHA

```
clc;
clear all;

PrxElec = 279*(10^-3);
PtxElec = 151*(10^-3);
Pstart  = 58.7*(10^-3);
Tstart  = 446*(10^-6);
R       = 1e6;
% r1    = [10^3:10^3:9e3];
% r2    = [10^4:10^4:9e4];
% r3    = [10^5:10^5:9e5];
% r4    = [10^6:10^6:9e6];
% r5    = [10^7:10^7:10^7];
% R     = [r1,r2,r3,r4,r5];
aamp    = 174*(10^-3);
bamp    = 5;
N0      = (10^(-15.4)) * (10^-3); %Watt
fc      = 2.4*(10^9);
Gtant   = 1;
Grant   = 1;
nb1     = [10^1:10^1:9e1];
nb2     = [10^2:10^2:9e2];
nb3     = [10^3:10^3:9e3];
nb4     = [10^4:10^4:9e4];
nb5     = [10^5:10^5:10^5];
Nb      = [nb1,nb2,nb3,nb4,nb5];
%Nb     = 1000;
a       = 3;
L       = 1;
c       = 3*10^8;
lambda  = c/fc;
am      = 1;
bm      = 2;
%n      = 10;
teta    = (3/20)*(pi)
D       = 80 %metros
```

```
%%Constantes Calculadas
C3 = (2*Tstart*Pstart)
C4 = PtxElec+PrxElec+aamp
C2 = (Gtant*Grant*(lambda^2))/( N0*L*((4*pi)^2))


%Distancia = d
n1          =  2
i1          = ((D/3)*((sqrt(2)+log(1+sqrt(2)))^2))/
            /((sqrt((pi*D^2)/(2*n1*teta)))*(2/teta)*(sin(teta/2)))
w1          = (sqrt(pi/(2*(n1/(D^2))*teta)));
mu          = (1/n1)*(((n1-1)/n1)^(n1-2)); %slotted aloha
c1          = am*w1^a*R*(1+Nb)
c2          = 4*bm*C2
c3          = (bamp^2)*(am^2)*(w1^(2*a))*((1+Nb)^2)
c4          = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*w1^a
c5          = 4*bm*C2*bamp

P0_1            = (c1/c2)+ R*(sqrt(c3+c4))/c5
Prs1            = ((1 - ((am*w1^a*R)/(2*bm*C2*P0_1)))^Nb)*mu
numerador_1     = C3*R + (C4 + bamp*P0_1)*Nb;
denominador_1   = R*Nb*Prs1;
Enh             = (numerador_1/denominador_1)*i1; %J/bit
Enh_dbm         = 10*log10(Enh/0.001); %dBmJ/bit


%%Distancia = d/h2
n2          = 5
i2          = (D/3*((sqrt(2)+log(1+sqrt(2)))^2))/
            /((sqrt((pi*D^2)/(2*n2*teta)))*(2/teta)*(sin(teta/2)))
w2          = (sqrt(pi/(2*(n2/(D^2))*teta)));
mu2         = (1/n2)*(((n2-1)/n2)^(n2-2)); %
c6          = am*w2^a*R*(1+Nb)
c7          = 4*bm*C2
c8          = (bamp^2)*(am^2)*(w2^(2*a))*((1+Nb)^2)
c9          = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*w2^a
c10         = 4*bm*C2*bamp
```

```
P0_2            = (c6/c7)+ R*(sqrt(c8+c9))/c10
Prs2            = ((1 - ((am*w2^a*R)/(2*bm*C2*P0_2)))^Nb)*mu2
numerador_2     = C3*R + (C4 + bamp*P0_2)*Nb;
denominador_2   = R*Nb*Prs2;
Enh2            = (numerador_2/denominador_2)*i2; %J/bit
Enh_dbm2        = 10*log10(Enh2/0.001); %dBmJ/bit


%%Distancia = d/h3
n3      =  20
i3      = (D/3*((sqrt(2)+log(1+sqrt(2)))^2))/
        /((sqrt((pi*D^2)/(2*n3*teta)))*(2/teta)*(sin(teta/2)))
w3      = (sqrt(pi/(2*(n3/(D^2))*teta)));
mu3     = (1/n3)*(((n3-1)/n3)^(n3-2))
c11     = am*w3^a*R*(1+Nb)
c12     = 4*bm*C2
c13     = (bamp^2)*(am^2)*(w3^(2*a))*((1+Nb)^2)
c14     = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*w3^a
c15     = 4*bm*C2*bamp

P0_3            = (c11/c12)+ R*(sqrt(c13+c14))/c15
Prs3            = ((1 - ((am*w3^a*R)/(2*bm*C2*P0_3)))^Nb)*mu3
numerador_3     = C3*R + (C4 + bamp*P0_3)*Nb;
denominador_3   = R*Nb*Prs3;
Enh3            = (numerador_3/denominador_3)*i3;  %J/bit
Enh_dbm3        = 10*log10(Enh3/0.001); %dBmJ/bit


%%Distancia = 30m
n4          =  70
i4          = (D/3*((sqrt(2)+log(1+sqrt(2)))^2))/
            /((sqrt((pi*D^2)/(2*n4*teta)))*(2/teta)*(sin(teta/2)))
w4          = (sqrt(pi/(2*(n4/(D^2))*teta)));
mu4         = (1/n4)*(((n4-1)/n4)^(n4-2))
c16         = am*w4^a*R*(1+Nb)
c17         = 4*bm*C2
c18         = (bamp^2)*(am^2)*(w4^(2*a))*((1+Nb)^2)
c19         = 8*bm*C2*(R^-1)*((C3*R)+C4*Nb)*bamp*am*w4^a
c20         = 4*bm*C2*bamp
```

```
P0_4            = (c16/c17)+ R*(sqrt(c18+c19))/c20
P0_4dbm         = 10*log10( P0_4/0.001 ) ;
Prs4            = ((1 - ((am*w4^a*R)/(2*bm*C2*P0_4)))^Nb)*mu4
numerador_4     = C3*R + (C4 + bamp*P0_4)*Nb;
denominador_4   = R*Nb*Prs4;
Enh4            = (numerador_4/denominador_4)*i4;  %J/bit
Enh_dbm4        = 10*log10(Enh4/0.001); %dBmJ/bit
```