

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

FÁBIO ALEXANDRE DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE  
COMUNICAÇÃO ACÚSTICA SUBAQUÁTICA PARA MINIMIZAR O  
CONSUMO ENERGÉTICO**

TESE

CURITIBA

2016

FÁBIO ALEXANDRE DE SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE  
COMUNICAÇÃO ACÚSTICA SUBAQUÁTICA PARA MINIMIZAR O  
CONSUMO ENERGÉTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

CURITIBA  
2016

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

S729o Souza, Fábio Alexandre de  
2016 Otimização dos parâmetros de um sistema de comunicação  
acústica subaquática para minimizar o consumo energético  
/ Fábio Alexandre de Souza.-- 2016.  
76 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
e Informática Industrial. Área de Concentração:  
Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2016.

Bibliografia: f. 72-76.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Acústica subaquática.  
3. Códigos corretores de erros (Teoria da informação).  
4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Redes de sensores  
sem fio. 6. Sistemas de transmissão de dados. 7. Modem.  
8. Otimização matemática. 9. Métodos de simulação. 10.  
Engenharia elétrica - Teses. I. Souza, Richard Demo, orient.  
II. Brante, Glauber Gomes de Oliveira, coorient. III.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.  
IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Título da Tese Nº. 145

# **Otimização dos Parâmetros de um Sistema de Comunicação Acústica Subaquática para Minimizar o Consumo Energético**

por

**Fabio Alexandre de Souza**

**Orientador:** Prof. Dr. Richard Demo Souza (UTFPR)

**Coorientador:** Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13h do dia 09 de dezembro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

---

Prof. Dr. Richard Demo Souza  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz  
(PUCPR)

---

Prof. Dr. Mario de Noronha Neto  
(IFSC)

---

Prof. Dr. Bruno Sens Chang  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Hermes Irineu Del Monego  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

Este trabalho é dedicado à minha família. Meu pai, Seu João, que com seu árduo trabalho proporcionou a melhor educação possível a mim e aos meus irmãos, Franco, Fernando, Fredy e Fernanda. Minha mãe, Dona Lete, a maior guerreira que conheço. Minha esposa Lis e minha filha Maria Isabel, que são minha razão de viver e que se tornaram o suporte da casa durante o meu doutorado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente ao IFSC, UTFPR e CAPES pela oferta do Dinter, que possibilitou a mim e outros colegas a realização do doutorado. Aos professores Noronha, Hermes, Marcelo e Bruno por terem participado da banca. Agradeço ainda ao Marcelo e Bruno pelas contribuições no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de laboratório, Guilherme, Ohara, Marcos e Zaqueu pela convivência e troca de experiências durante o doutorado.

Ao meu querido amigo cubano Arnaldo, obrigado pela visita.

Finalmente, aos meus orientadores Richard e Glauber. Dois dos melhores profissionais com quem já trabalhei, pesquisadores excepcionais e pessoas maravilhosas. Agradeço pelo suporte desde os primeiros contatos para a elaboração do projeto, pela paciência e pelo apoio ao longo de todo o doutorado. Vocês são pessoas especiais, que engrandecem a educação e a pesquisa em nossas instituições e no Brasil.

*O primeiro passo é o mais longo.*

## RESUMO

SOUZA, Fábio Alexandre de. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO ACÚSTICA SUBAQUÁTICA PARA MINIMIZAR O CONSUMO ENERGÉTICO. 76 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Nesta Tese de Doutorado propõe-se um modelo de consumo de energia para redes acústicas subaquáticas que leva em consideração as especificidades do ambiente subaquático, como a comunicação utilizando ondas acústicas, a dependência da largura de banda do canal com a perda de percurso, que varia tanto com a distância quanto com a frequência, e o ruído. O desvanecimento, resultado do multipercurso, normalmente modelado pelas distribuições Rayleigh e Rice nas transmissões terrestres, é modelado pela distribuição K, que melhor representa a severidade do ambiente subaquático.

O modelo considera uma rede subaquática linear de múltiplos saltos e a possibilidade de retransmissões para calcular a energia total consumida para cada bit de informação transmitido com sucesso entre a fonte e o destino. A fim de obter o menor consumo de energia, a SNR e a frequência de operação também são otimizadas, sendo considerado o uso de códigos convolucionais, cuja taxa ótima que leva ao menor consumo é determinada.

Uma análise teórica é desenvolvida para cenários com e sem limitação de atraso. No primeiro caso avalia-se o consumo de energia quando retransmissões não são permitidas ou devem ser limitadas e, portanto, uma FER residual deve ser tolerada. No segundo caso infinitas retransmissões são permitidas até que um pacote seja recebido sem erros. Para ambos cenários o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia é determinado, e na sequência o impacto do número de tentativas de transmissão é considerado.

Resultados numéricos são apresentados, mostrando que o esquema de múltiplos saltos é mais eficiente em termos de consumo de energia que a transmissão direta. Além disso, os resultados mostram que um número pequeno de tentativas de transmissão é suficiente para alcançar uma redução considerável no consumo de energia em redes de múltiplos saltos, limitando o atraso médio por pacote transmitido, o que é muito interessante em aplicações reais.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Redes Acústicas Subaquáticas, Códigos Corretores de Erros.



## ABSTRACT

SOUZA, Fábio Alexandre de. PARAMETERS OPTIMIZATION OF AN UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEM FOR MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION. 76 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

In this Thesis, an energy consumption model for underwater acoustic networks is proposed. The model takes into account the specificities of the underwater environment, such as the use of acoustic waves for communication, dependence of the underwater acoustic channel bandwidth with the path loss, which varies with both the distance and frequency, and noise. The fading, usually modeled by Rayleigh and Rice distributions on terrestrial communications, in this work, is modeled by the K distribution, which best represents the severity of the underwater environment.

The model considers a linear multi-hop underwater network and the possibility of retransmissions to calculate the total energy consumed for each bit of information successfully transmitted between the source and the destination. In order to obtain the minimum energy, the SNR and the operating frequency are also optimized. The use of convolutional codes is considered and the optimal code rate, which leads to the minimum energy consumption, is determined.

A theoretical analysis was developed for two scenarios: delay constrained and delay unconstrained networks, indicating the optimal number of hops which minimizes energy consumption. Next, the impact of the number of transmission trials was considered.

A numerical analysis was also performed for both the scenarios. The numerical results validate the theoretical analysis, showing that the multi-hop scheme is more efficient in terms of energy consumption when compared to direct transmission. Furthermore, the results show that a small number of transmission trials is sufficient to achieve a considerable reduction in energy consumption in multi-hop networks, limiting the average delay per packet transmitted, which is very interesting in real applications.

**Keywords:** Energy Efficiency, Underwater Acoustic Networks, Error Correcting Codes.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Rede Acústica Subaquática com Enlaces Sem Fio. ....	17
FIGURA 2	– Rede Acústica Subaquática com Veículos Autônomos. ....	18
FIGURA 3	– Rede Acústica Subaquática com Múltiplos Sistemas. ....	23
FIGURA 4	– Rede Acústica Subaquática com Comunicação Embarcação-Veículo Autônomo. ....	23
FIGURA 5	– Modem Acústico AquatecAquamodem1000 ....	31
FIGURA 6	– Modem Acústico LinkQuest UVM10000 ....	32
FIGURA 7	– Modem Acústico WHOI ....	32
FIGURA 8	– Modem Acústico WHOI. Da esquerda para a direita: amplificador, DSP, coprocessador e interface analógica. ....	33
FIGURA 9	– Coeficiente de absorção, $a(f)$ , em [dB/km]. ....	34
FIGURA 10	– Produto $AN$ , com $k = 1.5$ , $s = 0$ e $w = 0$ . ....	35
FIGURA 11	– Taxa de erros de bits da modulação BFSK para canais Rayleigh e K. ....	37
FIGURA 12	– Energia total consumida para diferentes números de saltos ( $M$ ). Para cada distância total de enlace considera-se $M$ saltos igualmente espaçados. O número ótimo de saltos, obtido pela solução numérica de (36), também é mostrado. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-2}$ . ....	50
FIGURA 13	– Energia total consumida para diferentes números de saltos ( $M$ ). Para cada distância total de enlace considera-se $M$ saltos igualmente espaçados. O número ótimo de saltos, obtido pela solução numérica de (36), também é mostrado. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-3}$ . ....	51
FIGURA 14	– Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ) quando $M = 1$ . O $\tau_{\max}$ ótimo, obtido pela solução numérica de (37), também é mostrado. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-2}$ . ....	52
FIGURA 15	– Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ). O $\tau_{\max}$ ótimo, obtido pela solução numérica de (37), também é mostrado. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-3}$ . ....	53
FIGURA 16	– Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ) e diferentes números de saltos ( $M$ ), em função da distância do enlace. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-2}$ . ....	54
FIGURA 17	– Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ) e diferentes números de saltos ( $M$ ), em função da distância do enlace. A FER alvo é $P_f^* = 10^{-3}$ . ....	54
FIGURA 18	– Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para $\tau_{\max} = 1$ , $P_f^* = 10^{-2}$ e $P_f^* = 10^{-3}$ , para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa de código fixa $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código. ....	57
FIGURA 19	– Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para $\tau_{\max} = 2$ , $P_f^* = 10^{-2}$ e $P_f^* = 10^{-3}$ , para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa de código fixa $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código. ....	58

FIGURA 20	– Número ótimo de saltos para $\tau_{\max} = 1$ e $\tau_{\max} = 2$ , $P_f^* = 10^{-2}$ , para transmissão não codificada e com seleção da taxa ótima do código. ....	59
FIGURA 21	– Número ótimo de saltos para $\tau_{\max} = 1$ e $\tau_{\max} = 2$ , $P_f^* = 10^{-3}$ , para transmissão não codificada e com seleção da taxa ótima do código. ....	59
FIGURA 22	– Taxa ótima do código para $\tau_{\max} = 2$ , $P_f^* = 10^{-2}$ e $P_f^* = 10^{-3}$ , para transmissão single-hop e multi-hop. ....	60
FIGURA 23	– Energia consumida por bit para diferentes números de saltos, para $\tau_{\max} = 1$ , $P_f^* = 10^{-3}$ , e seleção da taxa ótima do código. ....	61
FIGURA 24	– Energia consumida por bit para diferentes números de saltos, para $\tau_{\max} = 1$ , $P_f^* = 10^{-2}$ , e seleção da taxa ótima do código. ....	62
FIGURA 25	– Energia consumida por bit para diferentes $\tau_{\max}$ , $P_f^* = 10^{-3}$ , para seleção da taxa ótima do código e número ótimo de saltos. ....	62
FIGURA 26	– Energia consumida por bit para diferentes $\tau_{\max}$ , $P_f^* = 10^{-2}$ , para seleção da taxa ótima do código e número ótimo de saltos. ....	63
FIGURA 27	– Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa do código fixa $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código. Rede sem restrição de atraso. ....	64
FIGURA 28	– Número médio de tentativas de transmissão necessário para transmissão sem erros. ....	64
FIGURA 29	– Energia consumida por bit para $\tau_{\max} = 1$ e $P_f^* = 10^{-2}$ , para o caso de redes de sensores sem fio terrestres considerando transmissão multi-hop com taxa ótima do código, número ótimo de saltos e SNR ótima. A figura também mostra o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia para cada distância de enlace. ....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Comparação entre transmissões acústicas, de rádio frequência e ópticas subaquáticas .....	24
TABELA 2	– Dados de alguns modems comerciais .....	30
TABELA 3	– Parâmetros do sistema .....	50

## LISTA DE SIGLAS

WSN	do inglês <i>wireless sensor networks</i>
UWAN	do inglês <i>underwater acoustic networks</i>
SNR	do inglês <i>signal to noise ratio</i>
FDMA	do inglês <i>frequency division multiple access</i>
TDMA	do inglês <i>time division multiple access</i>
CDMA	do inglês <i>code division multiple access</i>
MAC	do inglês <i>media access control</i>
CSMA/CA	do inglês <i>carrier sense multiple access with collision avoidance</i>
CSMA/CD	do inglês <i>carrier sense multiple access with collision detection</i>
FAMA	do inglês <i>floor acquisition multiple access</i>
R-MAC	do inglês <i>reservation-based media access protocol</i>
NOGO	do inglês <i>node grouped orthogonal</i>
UWOR	do inglês <i>underwater opportunistic routing</i>
ARQ	do inglês <i>automatic repeat request</i>
ACK	do inglês <i>acknowledgement</i>
FSK	do inglês <i>binary frequency shift keying</i>
p.s.d.	do inglês <i>power spectral density</i>
PDF	do inglês <i>probability density function</i>
BFSK	do inglês <i>binary frequency shift keying</i>
BER	do inglês <i>bit error rate</i>
FER	do inglês <i>frame error rate</i>
LDPC	do inglês <i>low-density parity-check</i>
APU	do inglês <i>arithmetic processing unit</i>
M-DPSK	do inglês <i>M-ary differential phase shift keying</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A(l, f)$	atenuação do canal acústico subaquático
$l$	distância entre a fonte e o destino
$f$	frequência
$A_0$	constante de normalização
$kappa$	fator de espalhamento da onda acústica
$a(f)$	coeficiente de absorção da onda acústica
$N_t$	ruído devido à turbulência
$N_s$	ruído devido à navegação
$N_w$	ruído devido à ondulação provocada pelo vento
$N_{th}$	ruído térmico
$N(f)$	p.s.d. total do ruído
$\bar{\gamma}(l, f)$	SNR média
$\mathcal{P}_t$	potência acústica
$\Delta f$	banda do ruído no receptor
$\nu$	parâmetro de forma da distribuição K
$\alpha$	parâmetro de escala da distribuição K
$K_{\nu-1}$	função de Bessel modificada de segunda espécie
$p_b(\bar{\gamma})$	taxa de erros de bits
$E_b$	energia por bit
$R_b$	taxa de bits
$K$	número de <i>relays</i>
$M$	número de saltos
$r$	taxa do código convolucional
$n$	número de bits de codificação
$k$	número de bits de informação
$H$	número de bits de cabeçalho
$L$	número de bits de <i>payload</i>
$p_f(\bar{\gamma})$	probabilidade de erro de quadro
$p_{cc}(\bar{\gamma})$	probabilidade de erro de bits de payload
$\beta_d$	peso da informação das palavras de código convolucional que estão a uma distância $d$ da palavra de código zero
$d_{free}$	distância mínima do código convolucional
$p_{header}(\bar{\gamma})$	probabilidade de erro de bits de cabeçalho
$P_f$	FER total
$\tau$	número de tentativas de transmissão
$\epsilon_{bT}(M, \tau)$	energia total consumida para cada bit de informação transmitido com sucesso entre a fonte e o destino
$\epsilon_T(M, \tau)$	energia consumida por transmissor para cada bit de informação transmitido com sucesso
$\epsilon_{enc}$	energia gasta na codificação
$\mathcal{P}_{el,tx}$	consumo dos circuitos eletrônicos e de banda base utilizados na transmissão

$\mathcal{P}_{\text{el,rx}}$	consumo dos circuitos eletrônicos utilizados para recepção dos bits de retorno
$\mathcal{P}_{\text{PA}}\left(\frac{l}{M}, f\right)$	consumo elétrico do amplificador de potência acústica no transmissor
$T_b$	tempo médio de transmissão por bit
$T_f$	tempo de retorno por bit
$\varepsilon_R(M, \tau)$	energia usada para demodular $\tau$ quadros e transmitir os correspondentes quadros de retorno
$\varepsilon_{\text{dec}}$	energia gasta para decodificar um quadro
$T_L$	tempo para transmitir $L$ bits de <i>payload</i>
$T_H$	tempo para transmitir os $H$ bits de cabeçalho
$T_O$	tempo para transmitir sinais de <i>overhead</i>
$O$	número de bits de <i>overhead</i>
$T_b$	tempo médio de transmissão por bit de <i>payload</i> por quadro transmitido
$T_f$	tempo de retorno por bit de <i>payload</i>
$F$	número de bits em um quadro de retorno
$\phi$	eficiência total do conjunto amplificador-transdutor
$J$	número de diferentes operações aritméticas necessárias para a codificação
$c_j$	número de ciclos de relógio usado por cada operação na codificação
$n_j^{\text{enc}}$	número de vezes que uma operação é executada no algoritmo de codificação
$V_{\text{dd}}$	tensão de operação da unidade de processamento aritmético
$I_0$	corrente média durante a execução da operações aritméticas
$f_{\text{APU}}$	frequência do relógio da APU
$n_j^{\text{dec}}$	número de vezes que a $j$ -ésima operação é executada durante a decodificação
$P_f^*$	FER alvo
$\tau_{\text{max}}$	número máximo de tentativas de transmissão
$p_f(\bar{\gamma})$	FER por tentativa de transmissão
$\bar{\tau}$	número médio de tentativas de transmissão por salto
$\bar{\tau}_{\infty}$	número médio de tentativas de transmissão quando não há limitações de atraso
$\bar{\varepsilon}_{\text{bT}}$	energia média total por bit transmitido com sucesso para um dado número de saltos
$\bar{\varepsilon}_{\text{T}}$	energia média gasta na transmissão
$\bar{\varepsilon}_{\text{R}}$	energia média gasta na recepção
$\mathcal{P}_{\text{el}}$	energia total consumida pelos componentes eletrônicos
$M_{\text{opt}}$	número ótimo de saltos
$\mathcal{P}_{\text{PA}}(l, f)_{\text{min}}$	potência Mínima de transmissão
$\mathcal{P}_{\text{PA}}(l, f)_{\text{max}}$	potência Máxima de transmissão
$L_m$	margem de enlace

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	18
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo Geral .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 PUBLICAÇÕES .....	19
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	20
<b>2 REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS</b> .....	<b>22</b>
2.1 TOPOLOGIAS .....	25
2.2 ACESSO AO MEIO .....	25
2.3 SOLICITAÇÃO AUTOMÁTICA DE REPETIÇÃO .....	27
2.4 ROTEAMENTO .....	28
2.5 MODEMS ACÚSTICOS .....	28
2.6 O CANAL DE COMUNICAÇÃO SUBAQUÁTICO .....	31
2.6.1 Atenuação .....	32
2.6.2 Ruído .....	34
2.6.3 Relação Sinal Ruído .....	35
2.6.4 Desvanecimento .....	36
2.6.5 Capacidade .....	37
2.7 COMENTÁRIOS .....	38
<b>3 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA PARA REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS</b> .....	<b>39</b>
3.1 MODELO DO SISTEMA .....	41
3.1.1 Atenuação e Ruído .....	42
3.2 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA .....	43
3.2.1 Número Médio de Tentativas de Transmissão .....	46
3.2.2 Energia Média Total .....	47
3.3 COMENTÁRIOS .....	47
<b>4 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE SALTOS E TENTATIVAS DE TRANSMISSÃO</b> .....	<b>48</b>
4.1 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE SALTOS .....	48
4.2 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TENTATIVAS DE TRANSMISSÃO .....	51
4.3 COMENTÁRIOS .....	55
<b>5 RESULTADOS NUMÉRICOS</b> .....	<b>56</b>
5.1 REDES COM RESTRIÇÃO DE ATRASO .....	57
5.2 REDES SEM RESTRIÇÃO DE ATRASO .....	61
5.3 COMPARAÇÃO COM O CASO SEM FIO TERRESTRE .....	64
5.4 COMENTÁRIOS .....	66
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>67</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	68
6.1.1 Análise de outros protocolos ARQ .....	68



6.1.2	Uso de outras modulações .....	68
6.1.3	Otimização do tamanho de pacotes .....	69
6.1.4	Uso de outros códigos corretores de erros .....	70
6.1.5	Codificação de Rede .....	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

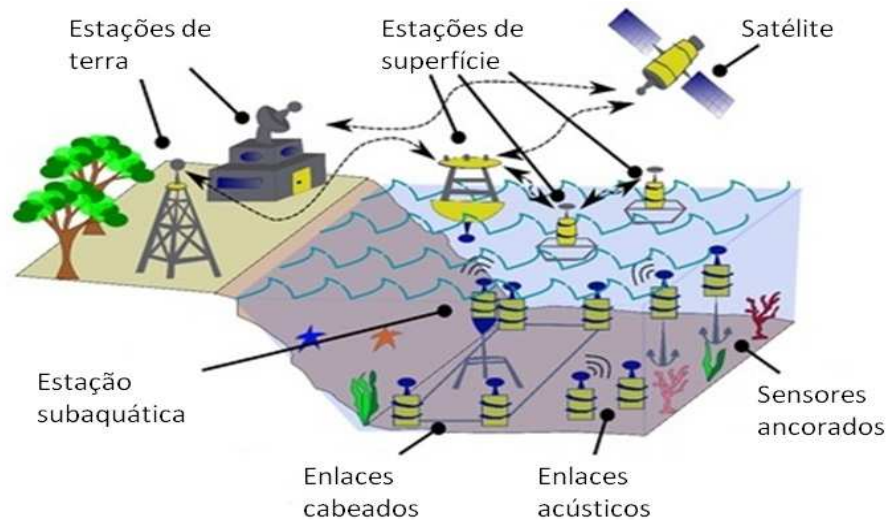
As redes de sensores (WSN) tornaram-se uma tecnologia dominante em nossos dias, enquanto suas aplicações estão criando um enorme impacto na maneira que muitos processos estão sendo interligados e no compartilhamento de informações valiosas. Devido aos recentes desenvolvimentos na capacidade de comunicação das WSN e nas melhorias da infraestrutura dessas redes, elas vem sendo aplicadas em praticamente todas as áreas da atividade humana: monitoramento e previsão ambiental, saúde, localização e rastreamento, sistemas de controle, entre outras (ANDONOVIC, 2009).

Mais de setenta por cento da superfície da Terra é coberta com água (na sua maioria mares e oceano). É natural que o desenvolvimento de novas tecnologias trouxesse o interesse em monitorar ambientes aquáticos. Atividades como vigilância, monitoramento da poluição fluvial e marítima, detecção e monitoramento de atividades sísmicas e vulcânicas, passaram a ser foco de pesquisas e desenvolvimento (LLORET, 2013).

Nas últimas três décadas tem havido um interesse crescente nas redes de sensores acústicas subaquáticas, ou mais genericamente Redes Acústicas Subaquáticas (UWAN) devido à sua aplicação na exploração científica, comercial e militar. A comunicação acústica subaquática é a tecnologia que permitiu o maior desenvolvimento dessas aplicações, uma vez que no ambiente subaquático os sinais de rádio são atenuados rapidamente, não conseguindo viajar longas distâncias, bem como os sinais ópticos que, por apresentarem alta dispersão também não podem ser transmitidos por longas distâncias. As UWAN executam funções como coleta, armazenamento e transmissão de dados, e alguns dos desafios na implantação dessas redes são o alcance da comunicação, a alimentação dos nós por baterias, a potência de transmissão e o custo dos dispositivos (SHAHAPUR; KHANAI, 2015).

As UWAN sofreram um grande avanço nas últimas décadas, sendo principalmente utilizadas para monitoramento ambiental e supervisionamento de áreas subaquáticas, para fins industriais e militares (SOZER et al., 2000) (PROAKIS et al., 2001). No caso de monitoramento ambiental, a abordagem tradicional é a colocação de sensores no fundo do

oceano, que precisam ser posteriormente recuperados para análise dos dados. Um grande problema dessa abordagem é o longo tempo passado entre a coleta e a análise dos dados, uma vez que estes ficam armazenados localmente. A Figura 1 mostra um exemplo de rede subaquática com enlaces sem fio.



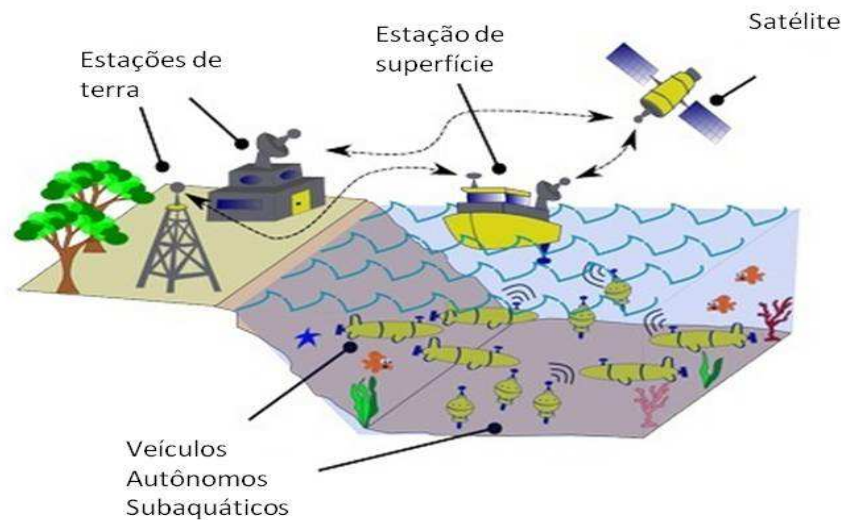
**Figura 1: Rede Acústica Subaquática com Enlaces Sem Fio.**

Fonte: <http://nautilus.dei.unipd.it/research-activity/research-activity> adaptada

Para aplicações em tempo real e por longos períodos, a solução ideal é conectar os equipamentos via enlaces sem fio, formando uma rede que permita a transmissão dos dados coletados para uma central, além de possibilitar a configuração remota dos sensores por meio de canais de controle, evitando a perda de dados por falhas nos equipamentos (SOZER et al., 2000). A Figura 2 exemplifica uma rede com veículos autônomos subaquáticos.

O estado tecnológico atual permite que as UWAN sejam reconfiguráveis e tolerantes a falhas, atingindo praticamente o mesmo nível das WSN terrestres. No entanto, as comunicações acústicas subaquáticas são caracterizadas por grandes atrasos de propagação, baixas larguras de banda, maior número de perdas de pacotes, e um tempo de vida menor das baterias que alimentam os nós, principalmente devido às altas potências de transmissão (GKIKOPOULI et al., 2012).

Como a troca das baterias pode ser uma tarefa muito difícil, o consumo de energia é um fator fundamental nas UWAN, e tornou-se foco de pesquisas nas últimas décadas.



**Figura 2: Rede Acústica Subaquática com Veículos Autônomos.**

**Fonte:** <http://nautilus.dei.unipd.it/research-activity/research-activity> adaptada

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Com a difusão do uso de redes acústicas subaquáticas nas últimas décadas, nas mais diversas áreas da atividade humana, o estudo dessas redes intensificou-se. Especificamente o consumo de energia tem sido foco de estudos pela comunidade científica. A maioria dos trabalhos considera o consumo de energia como uma das métricas para o desenvolvimento e a implantação das redes acústicas subaquáticas.

A motivação desta tese é, portanto, realizar um estudo sobre a otimização de parâmetros em um sistema de comunicação acústica subaquático visando otimizar o consumo energético.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as redes acústicas subaquáticas do ponto de vista do consumo de energia, considerando as diferenças dessas redes em relação às redes terrestres, mais conhecidas. Considerar também o máximo possível de parâmetros que são utilizados no estudo e desenvolvimento das UWAN, como frequência de operação, modulações, códigos corretores de erros, entre outros.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão da literatura para entender o atual cenário tecnológico das UWAN e os principais desafios no seu desenvolvimento.
- Desenvolvimento de um modelo de consumo de energia que leve em consideração as especificidades das UWAN.
- Análise teórica usando o modelo desenvolvido, considerando o impacto da otimização do número de saltos e retransmissões.
- Análise numérica visando reduzir o consumo energético a partir da otimização dos parâmetros do sistema.

### 1.3 PUBLICAÇÕES

Os seguintes trabalhos foram resultado do desenvolvimento desta tese.

- SOUZA, F. A. de et al. Code rate, frequency and SNR optimization for energy efficient underwater acoustic communications. In: IEEE Int. Conf. Commun. (ICC). 2015. p. 6351-6356.

Neste artigo foi estudado o consumo de energia em um enlace acústico subaquático, visando a redução do consumo de energia para transmitir um bit de informação e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida dessas redes. Foi analisado o efeito de selecionar a melhor frequência dentro de uma determinada faixa de operação para várias distâncias de enlace. Também foi considerado o uso de códigos corretores de erros e a otimização da taxa de código, além da relação sinal-ruído (SNR) para cada distância de enlace. Os resultados mostraram que o consumo de energia pode ser bastante reduzido através da otimização da taxa do código. Em particular, foi mostrado que as transmissões não codificadas podem ser mais eficientes para uma gama considerável de distâncias de enlace do que a transmissão com uma taxa fixa do código convolucional comum em dispositivos comerciais. Os resultados também mostraram que o número ótimo médio de retransmissões é muito pequeno (inferior a um) para todas as distâncias estudadas. Este foi um resultado muito interessante, uma vez que os canais de comunicação acústicos impõem atrasos muito mais longos do que os canais de rádio frequência e, portanto, os sistemas que requerem várias retransmissões podem se tornar inviáveis nas redes subaquáticas.

- SOUZA, F. A. de et al. Code rate optimization for energy efficient delay constrained underwater acoustic communications. In: IEEE OCEANS Genova. 2015. p. 1-4.

Neste trabalho foi investigado o consumo mínimo de energia para transmitir um bit de informação através de um canal acústico submarino. Considerando o uso de modulação binária e códigos convolucionais, foram otimizadas a frequência de operação, a SNR e a taxa de código quando retransmissões não são permitidas e uma FER alvo deve ser alcançada. Os resultados mostraram que a escolha adequada da taxa de código tem um grande impacto sobre o consumo total de energia e, conseqüentemente, o tempo de vida dos dispositivos de comunicação subaquática. Além disso, a escolha correta do código pode aumentar significativamente o alcance da transmissão em redes com restrição de atraso.

- SOUZA, F. A. de et al. Optimizing the number of hops and retransmissions for energy efficient multi-hop underwater acoustic communications. IEEE Sensors Journal, v. 16, n. 10, p. 3927- 3938, May 2016. ISSN 1530-437X.

Neste trabalho, foi analisado o consumo de energia para transmitir com sucesso um bit de informação através de uma rede acústica subaquática de múltiplos saltos, considerando o número ótimo de saltos, retransmissões, taxa de código e SNR. Também foi investigado o impacto das restrições de atraso no consumo total de energia, considerando o caso em que retransmissões são ilimitadas e quando retransmissões são limitadas ou não permitidas. Os resultados mostraram que uma grande economia de energia pode ser obtida quando os parâmetros acima mencionados são otimizados em conjunto para uma determinada distância de enlace. Além disso, embora o uso de múltiplos saltos traga a maior contribuição para a redução do consumo de energia, o uso de um pequeno número de retransmissões leva a ganhos extras no consumo. Finalmente, os resultados obtidos foram comparados com um caso de comunicações sem fios terrestre, mostrando que uma modelagem adequada do cenário subaquático é imperativa para um projeto eficiente em termos de consumo de energia, uma vez que o número ótimo de saltos nas redes terrestres pode ser consideravelmente diferente daquele para comunicações subaquáticas.

#### 1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No capítulo 2 apresenta-se as redes acústicas subaquáticas e suas principais características. O foco é o canal de comunicação acústica subaquático, principalmente do ponto de vista da atenuação, ruído e desvanecimento, pontos fundamentais para o desenvolvimento do modelo de consumo de energia.

No Capítulo 3 desenvolve-se um modelo de consumo de energia para redes acústicas subaquáticas. O modelo considera as principais características do canal de comunicação acústica subaquático e leva em conta, além do consumo do amplificador de potência usado para transmissão, o consumo dos circuitos eletrônicos e de banda base, baseando-se em características de especificações de equipamentos comerciais.

Com esse modelo é possível determinar o consumo total de energia para transmitir um bit de informação com sucesso em redes acústicas subaquáticas de transmissão direta e de múltiplos saltos, considerando o uso de códigos corretores de erros e cenários com ou sem restrição de atraso, ou seja, considerando um número limitado de retransmissões, onde uma FER residual é tolerada; ou infinitas retransmissões, quando a comunicação acontece sem erros.

O Capítulo 4 apresenta uma análise teórica, usando o modelo de consumo de energia, visando otimizar o número de saltos e tentativas de transmissão em redes acústicas subaquáticas de múltiplos saltos, a fim reduzir o consumo de energia para transmitir um bit de informação com sucesso.

Sabendo que a energia gasta depende do número de saltos e do número de tentativas de transmissão, apresenta-se uma análise teórica do papel do número de saltos e tentativas de transmissão no consumo total do sistema.

No Capítulo 5 realiza-se uma análise numérica para determinar o consumo de energia por bit de informação em uma rede acústica subaquática de múltiplos saltos. A análise considera o impacto da otimização do número de saltos e da taxa do código corretor de erros em conjunto com a SNR e frequência ótimas, além do número máximo de tentativas de transmissão.

Finalmente, no Capítulo 6 conclui-se o trabalho e apresenta-se propostas para o futuro.

## 2 REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS

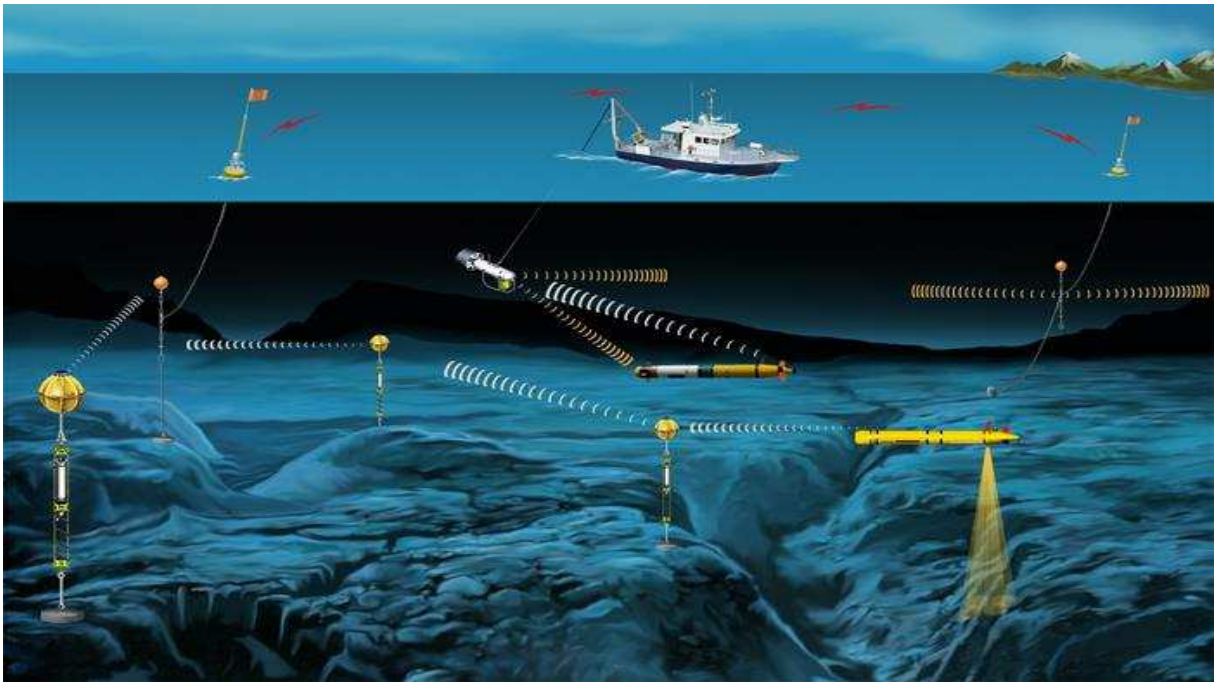
Com o recente aumento do interesse nas aplicações das UWAN, principalmente para monitoramento ambiental e aplicações industriais e militares, cresceram também os desafios para o desenvolvimento dessas redes (HEIDEMANN et al., 2006). A abordagem tradicional de colocar sensores no fundo do oceano e posteriormente resgatá-los para coleta de dados foi substituída pela comunicação sem fio entre os sensores e a transmissão de dados, muitas vezes, em tempo real.

O desenvolvimento das comunicações acústicas subaquáticas permitiu a implantação de redes subaquáticas formadas por nós sensores, que se comunicam por canais acústicos sem fio. Dispositivos acústicos subaquáticos podem ser posicionados fixamente no fundo do oceano, em veículos autônomos subaquáticos e estações de superfície, possibilitando a comunicação via rádio com estações em terra.

A transmissão em taxas mais elevadas permite aplicações em tempo real e o uso de canais de controle possibilita a configuração e restauração das redes em caso de falhas, aumentando sua confiabilidade (STOJANOVIC, 2005) (HEIDEMANN et al., 2012). O uso de equipamentos acústicos subaquáticos permite a implementação de redes com múltiplos sistemas, como mostrado na Figura 3. Já a Figura 4 mostra uma aplicação com comunicação entre embarcação e veículo subaquático.

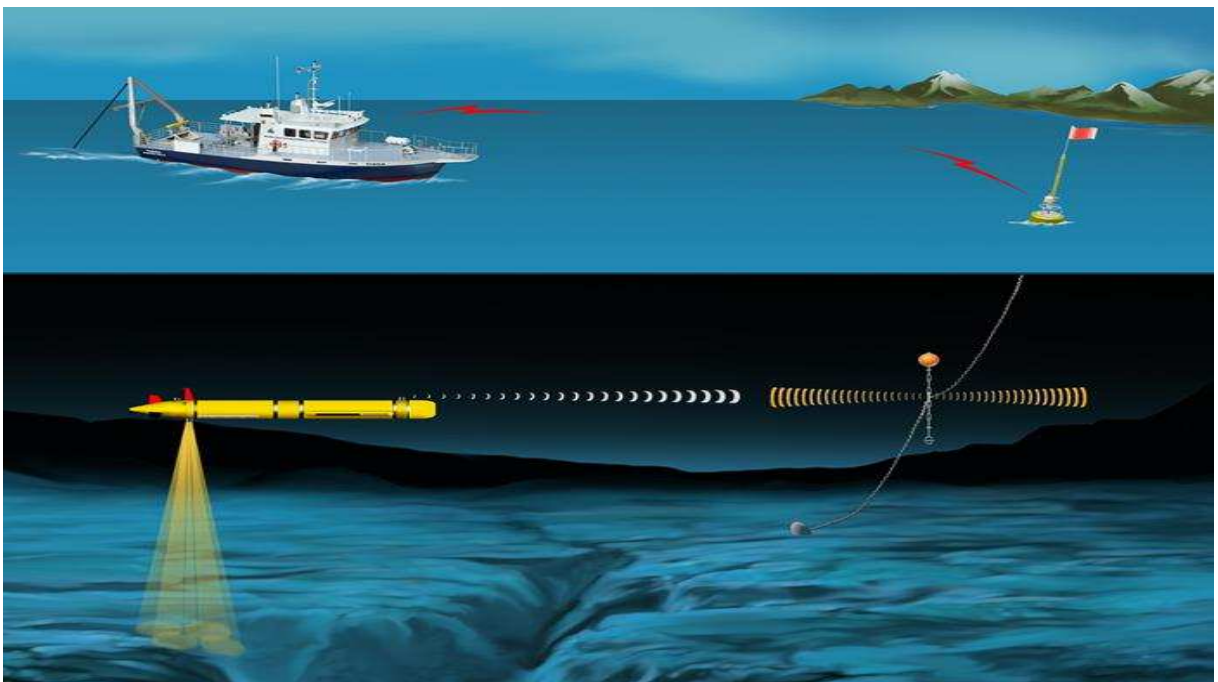
Um fator importante no desenvolvimentos das redes subaquáticas é o canal de comunicação sem fio. As ondas eletromagnéticas utilizadas em comunicações de rádio terrestres não têm boa propagação em ambientes subaquáticos. Para curtas distâncias transmissão via rádio-frequência (um a dez metros) ou óptica (até cem metros) têm sido propostas a fim de explorar sua alta largura de banda (KAUSHAL; KADDOUM, 2016). A atenuação desses sinais, entretanto, fica muito grande a partir de uns poucos metros fazendo necessário o uso de altas potências de transmissão ou antenas muito grandes, tornando as ondas acústicas para comunicação entre os equipamentos a melhor escolha, para distâncias maiores. A Tabela 1 (KAUSHAL; KADDOUM, 2016) mostra uma comparação entre o desempenho de





**Figura 3: Rede Acústica Subaquática com Múltiplos Sistemas.**

Fonte: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem/>



**Figura 4: Rede Acústica Subaquática com Comunicação Embarcação-Veículo Autônomo.**

Fonte: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem/>

transmissão acústica, de rádio frequência e óptica no ambiente subaquático.

**Tabela 1: Comparação entre transmissões acústicas, de rádio frequência e ópticas subaquáticas**

<b>Parâmetro</b>	<b>Acústica</b>	<b>RF</b>	<b>Óptica</b>
Velocidade	1500m/s	$2.255 \times 10^8$ m/s	$2.255 \times 10^8$ m/s
Distância	até 25km	até 10m	até 100m
Taxa	kbps	Mbps	Gbps
Latência	Alta	Moderada	Baixa
Largura de Banda	Dependente de f	MHz	Até 150 MHz
Potência de transmissão	Dezenas de Watts	de mWatts a centenas de mWatts	Poucos Watts

A comunicação acústica subaquática possibilita alcançar longas distâncias, mas apresenta limitações maiores que a comunicação via ondas de rádio terrestres. A largura de banda do canal acústico depende da perda de percurso, que varia tanto com a distância quanto com a frequência (URICK, 1996). A propagação por multipercurso é variante no tempo e a velocidade de propagação das ondas sonoras, bem menor que das ondas eletromagnéticas, faz com que o tempo de propagação seja consideravelmente longo. Esses fatores em conjunto fazem com que o canal de comunicação acústica subaquático tenha baixa qualidade e alta latência, tornando o ambiente subaquático um meio de comunicação extremamente difícil.

No desenvolvimento e projeto de redes subaquáticas também é preciso considerar a disponibilidade de energia. A maioria dos equipamentos é alimentada por baterias e, diferentemente das redes terrestres onde a troca de baterias não representa grande desafio, em redes subaquáticas esta pode ser inviabilizada pelo custo e logística envolvidos (PROAKIS et al., 2001). A qualidade e tempo de vida das redes subaquáticas dependem da topologia (distâncias entre os nós) e da frequência de operação, o que traz novos fatores para o desenvolvimento de equipamentos e protocolos de comunicação e roteamento. Os protocolos de rede, portanto, precisam visar a economia de energia, limitando o número de retransmissões, permitindo que os equipamentos entrem em modo de baixo consumo (*sleep mode*) entre transações e utilizando o mínimo necessário de energia para transmissão. Além disso, equipamentos e instrumentos subaquáticos são caros e precisam ter um longo tempo de uso.

Todos esses fatores fazem com que as redes acústicas subaquáticas apresentem características que as diferem das redes terrestres, o que significa dizer que muitas soluções que já são comuns no projetos das redes terrestres não podem ser diretamente aplicadas às redes subaquáticas.

Nas seções seguintes são apresentadas de maneira resumida as principais características das redes subaquáticas, que podem influenciar no projeto e no desempenho em termos de consumo de energia dessas redes. Não é objetivo desse trabalho explorar todas as características apresentadas.

## 2.1 TOPOLOGIAS

Há três topologias básicas que podem ser utilizadas para interconectar os nós de uma rede subaquática: centralizada, distribuída e de múltiplos saltos (*multi-hop*) (SOZER et al., 2000). Nas redes centralizadas a comunicação entre os nós se dá através de uma estação central. Os nós se conectam à estação central por um *backbone*. Essa configuração é mais adequada para redes em águas profundas. A principal desvantagem é a presença de um ponto de falha essencial. Se a estação central falhar, a rede inteira para. O alcance também é limitado pela capacidade dos modems.

As redes distribuídas, por sua vez, apresentam conexões ponto a ponto entre todos os seus nós. Isso elimina a necessidade de roteamento. Entretanto, a energia necessária para a comunicação entre nós distantes também limita sua aplicação.

Já as redes de múltiplos saltos possuem enlaces apenas entre nós adjacentes e as mensagens são transmitidas da fonte para o destino através de múltiplos saltos entre esses nós. Essas redes podem cobrir grandes áreas, pois o alcance é limitado pela quantidade de nós e não pela capacidade dos modems. Uma desvantagem, porém, é o atraso que pode acontecer pelo grande número de saltos em uma transmissão.

## 2.2 ACESSO AO MEIO

Em redes de pacotes, como é o caso das redes subaquáticas, na maior parte do tempo os usuários não transmitem informação, ou seja, o tempo de ocupação do canal por um usuário é pequeno. Sendo assim, vários usuários podem compartilhar os recursos de frequência e tempo, visando otimizar seu uso. Vários métodos de múltiplo acesso ao meio estão disponíveis e devem ser considerados (PROAKIS et al., 2001).

Quando se usa múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA) a banda disponível é dividida em sub-bandas que são alocadas para cada usuário. Devido às severas limitações de banda do canal acústico e a baixa imunidade ao desvanecimento dos sistemas de banda estreita, FDMA não é uma boa escolha para as redes subaquáticas.

No caso do múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA), em vez da frequência, o tempo é dividido em janelas (*time slots*) para cada usuário. Para evitar colisões entre canais adjacentes, tempos de guarda são introduzidos, proporcionais ao atraso de propagação do canal. A alta latência das redes subaquáticas demanda longos tempos de guarda, limitando o uso de TDMA.

O múltiplo acesso por divisão de código (CDMA) permite que todos os usuários transmitam ao mesmo tempo utilizando toda a banda disponível. CDMA utiliza técnica de espalhamento espectral onde cada usuário é identificado por um código pseudo-aleatório. A banda larga dos canais CDMA faz com que sejam mais resistentes ao desvanecimento seletivo em frequência e permite o aproveitamento da diversidade no tempo dos canais acústicos subaquáticos pela utilização de receptores *rake*. Também possibilitam a resolução de colisões no receptor através da detecção de multiusuários. Por isso CDMA se mostra a técnica mais robusta de acesso ao meio para redes subaquáticas, tanto quando se usa *frequency hop* quanto *direct sequence* (PROAKIS et al., 2001).

O controle de acesso ao meio (MAC), apesar de estudado por muito tempo em redes terrestres de rádio, ainda é um dos problemas em redes acústicas subaquáticas (PARTAN et al., 2006). Implantada em 1998, a rede Seaweb utilizava FDMA devido às limitações dos modems da época (RICE et al., 2000). A solução, entretanto não apresentava bons resultados, principalmente pelas restrições impostas pelo canal acústico: limitação da banda e seletividade em frequência. Experimentos seguintes utilizaram aglomerados híbridos TDMA/CDMA. CSMA/CA (SMITH et al., 1997) e CSMA/CD (LAPIERRE et al., 2001) também foram propostos. Em (MOLINS; STOJANOVIC, 2006) os autores apresentam um protocolo de controle de acesso ao meio chamado FAMA, introduzindo *time slots* para limitar os atrasos de propagação.

Visando atingir eficiência energética (XIE; CUI, 2007) e (PARK; RODOPLU, 2007) propuseram protocolos onde a energia é a principal métrica de desempenho. O primeiro trabalho apresenta um protocolo chamado R-MAC, onde além da eficiência energética, justiça entre os usuários é um dos objetivos. Um protocolo MAC é dito justo quando todas as estações compartilham de forma equitativa o meio durante um intervalo de tempo fixo. Já em (PARK; RODOPLU, 2007) foi apresentado um protocolo MAC que pudesse servir como uma base para o desenvolvimento de protocolos energeticamente eficientes para redes de sensores subaquáticas.

Mais recentemente, (CHEON; CHO, 2011) apresentaram um novo protocolo MAC energeticamente eficiente chamado NOGO MAC que se baseia em FDMA ortogonal e explora a característica da perda de propagação da onda acústica depender da distância mais fortemente em altas frequências que em baixas frequências. No esquema proposto, nós sensores são agrupados de acordo com a distância de um nó central. Em seguida, cada grupo usa uma faixa de frequências diferente, de tal forma que nós sensores que estão mais perto do nó central usam frequências mais altas enquanto os nós mais distantes usam frequências mais baixas. Já (CHEN

et al., 2014) propõe um protocolo chamado UWOR MAC baseado em roteamento oportunista que apresenta bons resultados em termos de eficiência energética e *throughput*.

### 2.3 SOLICITAÇÃO AUTOMÁTICA DE REPETIÇÃO

É fundamental para qualquer rede que a informação chegue corretamente ao destino na maior parte do tempo. Nas redes subaquáticas, a largura de banda disponível é limitada tanto pela distância quanto pela frequência e os sinais acústicos estão sujeitos a efeitos de multipercurso, que gera interferência intersimbólica e efeito Doppler. O resultado é a recepção de pacotes com erros, que devem ser detectados e corrigidos.

A técnica de solicitação automática de repetição (ARQ) é utilizada para detectar erros e solicitar a retransmissão de pacotes (PROAKIS et al., 2001). Há três tipos básicos de ARQ: *Stop & Wait*, *Go Back N* e *Selective Repeat*.

*Stop & Wait* é o mais simples, quando a fonte aguarda uma confirmação de recebimento (ACK) pelo destino antes de transmitir o próximo pacote. Se a confirmação não chegar em um tempo pré-determinado a fonte retransmite o pacote. A principal desvantagem é que o canal permanece vazio entre os tempos de envio e confirmação. O uso de canais *full duplex* melhora o desempenho da rede em termos de *throughput*, quando a fonte transmite várias vezes o mesmo pacote até receber o ACK.

Na técnica *Go Back N*, a fonte transmite uma sequência (janela) de pacotes sem aguardar a confirmação. Os pacotes são numerados e o destino envia confirmação com o número do pacote recebido. O envio de ACK com o número de um pacote reconhece também o recebimento de todos os pacotes anteriores. Quando a fonte não recebe o ACK de um determinado pacote ela retransmite todos os pacotes posteriores ao último reconhecimento.

Nas duas técnicas anteriores, os pacotes chegam ao destino em sequência, evitando a necessidade de *buffer* no receptor. Quando se utiliza *buffer* na recepção, os pacotes podem chegar fora de ordem e a fonte precisa retransmitir apenas os pacotes não reconhecidos pelo destino. Essa técnica é chamada *Selective Repeat Protocol*, sendo a mais eficiente das três.

Os modems acústicos normalmente operam no modo *half duplex*, que limita o uso de ARQ à técnica *Stop & Wait*, fazendo com que as redes operem com baixas taxas de transmissão e pequenas distâncias. Para melhorar o *throughput* uma alteração foi proposta por (STOJANOVIC, 2005). Nesse caso os pacotes são transmitidos em grupos e confirmados separadamente. É possível maximizar o *throughput* selecionando um tamanho ótimo de pacote em função dos parâmetros do enlace acústico (taxa de transmissão, distância e probabilidade de

erro) e do número de pacotes transmitidos.

## 2.4 ROTEAMENTO

Algoritmos de roteamento em redes terrestres tem sido muito estudados e várias propostas visando eficiência energética foram apresentadas, como em (CHANG; TASSIULAS, 2000; SHAH; RABAEY, 2002; KAR et al., 2003). Muitos desses algoritmos propõem o aumento do número de saltos entre os nós, diminuindo a distância entre os saltos, o que pode resultar em economia de energia.

As redes subaquáticas, entretanto, apresentam diferenças importantes em relação às redes terrestres, como atenuação e ruído, atrasos de propagação e a dependência da banda disponível e da potência de transmissão com a distância e frequência. Ainda, o consumo de energia dos modems subaquáticos é diferente dos utilizados em redes terrestres de rádio.

Em (ZORZI et al., 2008) é apresentado um estudo sobre o impacto das características específicas das redes subaquáticas em protocolos de roteamento. Um componente importante no desenvolvimento de protocolos de roteamento é a compreensão dos impactos das propriedades do canal, como perda de percurso e largura de banda, nas principais métricas utilizadas para roteamento, tais como consumo de energia e atraso. Enquanto a análise de capacidade de canal e largura de banda em redes terrestres é bem conhecida, apenas recentemente foram publicados trabalhos que consideram a capacidade do enlace subaquático, em termos de largura de banda, taxa de bits e energia (STOJANOVIC, 2006).

(ZORZI et al., 2008) apresenta uma classe de algoritmos de roteamento desenvolvidos considerando as principais características das redes subaquáticas e características de modems reais. Foram estudados os efeitos dessas características no consumo de energia e atraso para diferentes distâncias e números de saltos. Os resultados mostraram que, para um dado tipo de modem, a escolha de uma distância ótima de saltos minimiza o consumo de energia em um determinado caminho.

## 2.5 MODEMS ACÚSTICOS

Alguns dos principais desafios na implementação de redes de sensores subaquáticas estão relacionadas com instalação e manutenção dos nós sensores, dificuldade de captação de energia e alto custo dos equipamentos. Do ponto de vista da transmissão de dados a obtenção de altas taxas é limitada pela dificuldade de propagação dos sinais no meio subaquático. Padrões

de comunicação sem fio terrestres, como WIFI, Zigbee e Bluetooth, não têm aplicação direta em redes subaquáticas devido à propagação muito pobre das ondas eletromagnéticas nesse meio. Comunicações ópticas, por sua vez, também são limitadas, principalmente em distância, devido à alta dispersão da luz no meio subaquático (EROL-KANTARCI et al., 2011). Uma alternativa seria o uso de fibras ópticas, o que possibilitaria transmissão em altíssimas taxas. Essa solução, entretanto, é pouco flexível e de alto custo, o que a torna praticamente inviável na maioria das aplicações (SENDRA et al., 2016).

A comunicação subaquática utilizando ondas acústicas veio cobrir esse "vazio". Nas últimas décadas aconteceu o desenvolvimento de vários dispositivos de comunicação subaquática, apesar de existirem muitos modelos de modems acústicos comerciais, esse desenvolvimento se deu principalmente pelo custo desses equipamentos e pelo interesse de controlar e alterar configurações dos modems de acordo com sua aplicação.

(SANCHEZ et al., 2011) apresentou uma proposta de modem acústico de baixo custo e baixo consumo de energia, utilizando modulação FSK, com taxa de transmissão de até 1 kbps. Seu preço e consumo são comparáveis aos dos equipamentos de redes terrestres, consumindo 12 mW na transmissão e 24 mW na recepção. Entretanto, a máxima distância alcançada em testes foi de 100 m. Esse modem evoluiu para o modelo apresentado em (SÁNCHEZ et al., 2012), chamado ITACA, cuja principal melhoria foi a implementação de um sistema de despertar de ultra-baixo consumo de energia.

Um modem reconfigurável foi apresentado em (SÖZER; STOJANOVIC, 2006). O uso de tecnologia FPGA possibilita a escolha de diferentes transdutores e aumento na capacidade de processamento. Um outro modem usando tecnologia FPGA foi desenvolvido por (NOWSHEEN et al., 2010), nesse caso para altas frequências e taxas de transmissão, com baixo custo. O modem foi testado em um lago, operando a 800 kHz e alcançou taxas de 80 kbps até 50 m de distância.

Mais um modem acústico reconfigurável foi desenvolvido por (BENSON et al., 2010), com proposta de ser um modem de baixo custo para curto alcance e aplicações em baixas taxas de transmissão. Utilizando modulação FSK, suporta taxas de até 200 bps e alcança distância máxima de cerca de 350 m. A substituição do transdutor comercial por um de desenvolvimento próprio levou à diminuição do custo do equipamento e à uma redução do consumo de energia. Ele transmite com potência de 2 a 40 W e consome na recepção 0,75 W.

Finalmente, o WHOI micro-modem (FREITAG et al., 2005) e WHOI 2 (GALLIMORE et al., 2010) que tem como principais características ser um subsistema compacto e de baixa potência, para uso em comunicações acústicas subaquáticas e navegação. O WHOI é um

dispositivo subaquático que pode se comunicar usando modulação BFSK em baixas taxas e realiza *frequency hop*, que evita os efeitos da interferência intersimbólica. Transmite em diferentes faixas de frequências, permitindo que se selecione a melhor frequência para diminuir o consumo de energia, dentro da faixa de 10 a 25 kHz, mantendo-se fixa a largura de banda ao redor da frequência ótima para cada distância de enlace.

A Tabela 2<sup>1</sup> (SENDRA et al., 2016) mostra alguns dados de modems acústicos subaquáticos comerciais.

**Tabela 2: Dados de alguns modems comerciais**

Modem	Modulação	f	Banda	Rate	Tx power	Rx power	D max
Aquatec AQUAModem 1000	n/d	9,75 kHz	4,5 kHz	2000 bps	20 W	0,6 W	5000 m
DSPComm AquaComm Marlis	n/d	23 kHz	14 kHz	480 bps	1,8 W	252 mW	1000 m
DSPComm AquaComm Mako	n/d	23 kHz	14 kHz	240 bps	1,8 W	252 mW	100 m
DSPComm AquaComm Orca	n/d	14 kHz	100 kHz	0,007 bps	252 mW	1,8 W	300 m
Desert Star Systems SAM-1	n/d	37,5 kHz	9 kHz	154 bps	32 W	168 mW	1000 m
EvoLogics S2CR 48/78USBL	n/d	48-78 kHz	30 kHz	31200 bps	18 W	1,1 W	1000 m
EvoLogics S2CR 40/80USBL	n/d	38-64 kHz	26 kHz	27700 bps	40 W	1,1 W	1000 m
EvoLogics S2CR 18/34wise	n/d	18-34 kHz	16 kHz	13900 bps	35 W	1,3 W	3500 m
EvoLogics S2CR 12/24USBL	n/d	13-24 kHz	11 kHz	9200 bps	15 W	1,1 W	6000 m
EvoLogics S2CR 7/17USBL	n/d	7-17 kHz	10 kHz	6900 bps	40 W	1,1 W	8000 m
LinkQuest UVM1000	n/d	26,77-44,62 kHz	17,85 kHz	17800 bps	2 W	0,75 W	350 m
LinkQuest UVM2000	n/d	26,77-44,62 kHz	17,85 kHz	17800 bps	8 W	0,8 W	1200 m
LinkQuest UVM2200	n/d	53,55-89,25 kHz	17,85 kHz	35700 bps	6 W	1 W	1000 m
LinkQuest UVM3000	n/d	7,5-12,5 kHz	5 kHz	5000 bps	12 W	8,8 W	5000 m
LinkQuest UVM4000	n/d	12,75-21,25 kHz	8,5 kHz	8500 bps	7 W	8,8 W	7000 m
LinkQuest UVM10000	n/d	7,5-12,5 kHz	5 kHz	5000 bps	40 W	0,9 W	10000 m
Teledyne Benthos Atm9xx	PSK	11,5-24,5 kHz	5 kHz	15360 bps	20 W	0,768 W	6000 m
Teledyne Benthos Atm9xx	MFSK	11,5-24,5 kHz	5 kHz	2400 bps	20 W	0,768 W	6000 m
Teledyne Benthos Atm88x	PSK	11,5-18,5 kHz	5 kHz	15360 bps	84 W	0,756 W	6000 m
Teledyne Benthos Atm88x	FSK	11,5-18,5 kHz	5 kHz	2400 bps	84 W	0,756 W	6000 m
triTech Micromodem	n/d	22 kHz	4 kHz	40 bps	7,92 W	0,72 W	500 m
uComm Acoustic	n/d	26 kHz	n/d	9000 bps	40 W	60 mW	3000 m
AM-OFDM-S	OFDM	21-27 kHz	n/d	1600 bps	5-20 W	0,7 W	4000 m
MATS 3 G 12 KHZ	n/d	10-15 kHz	n/d	7400 bps	75 W	0,6 W	15000
GPM 300	DSSS	n/d	n/d	1200 bps	300 W	1,8 W	25000

<sup>1</sup>n/d = informação não disponível



A título de ilustração a Figura 5 mostra o Aquamodem1000 da Aquatec, a Figura 6 mostra o UVM10000 da LinkQuest. A Figura 7 mostra o micro-modem WHOI; enquanto A Figura 8 mostra detalhes das placas do WHOI.



**Figura 5: Modem Acústico AquatecAquamodem1000**

**Fonte:** <http://www.oceanografialitoral.com/sites/default/files/aquamodem1000.pdf>

Alguns parâmetros do modem WHOI serão considerados no Capítulo 5 a fim de aproximar os resultados da análise de um cenário mais real. No entanto, não se pretende nesse trabalho avaliar o desempenho do modem WHOI ou de qualquer outro modem aqui citado.

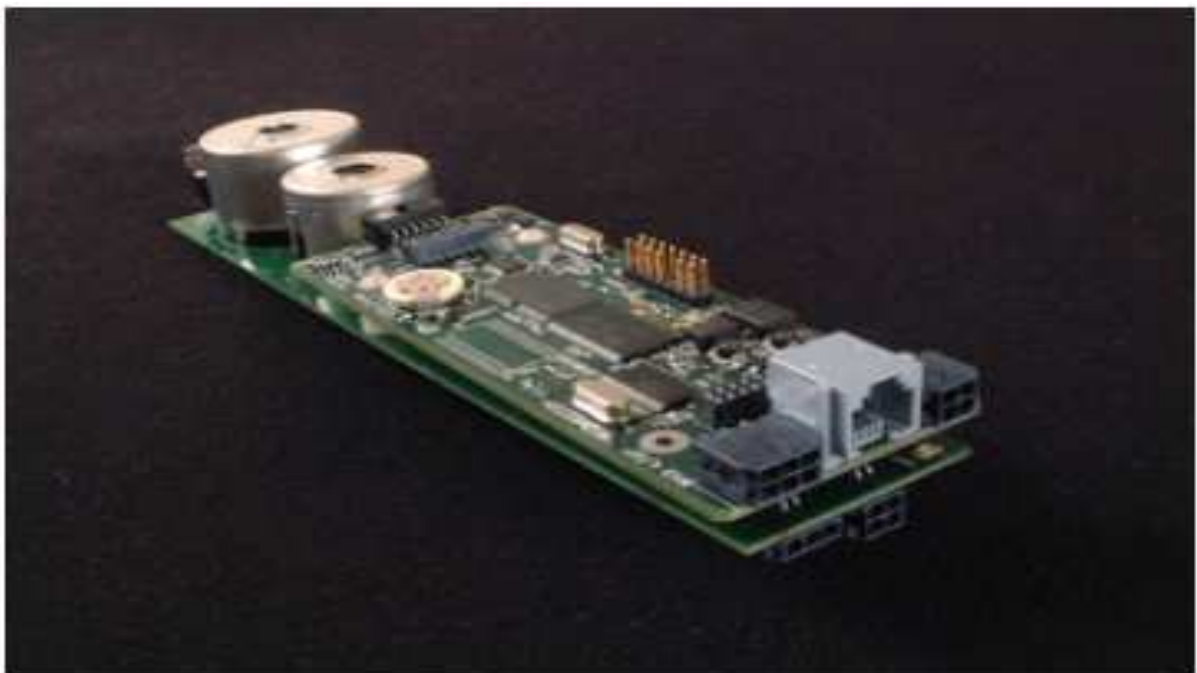
## 2.6 O CANAL DE COMUNICAÇÃO SUBAQUÁTICO

Canais de comunicação acústica subaquática apresentam perda de caminho que depende não apenas da distância entre transmissor e receptor, mas também da frequência. Essa dependência se dá pela perda da energia acústica na forma de calor, conhecida por perda de absorção. A perda de absorção aumenta com a distância e com a frequência, limitando a largura de banda disponível para comunicação. De maneira geral, enlaces mais curtos apresentarão largura de banda disponível maior que enlaces mais longos (STOJANOVIC, 2006).



**Figura 6: Modem Acústico LinkQuest UVM10000**

Fonte: <http://www.link-quest.com/html/uwm10000.htm>



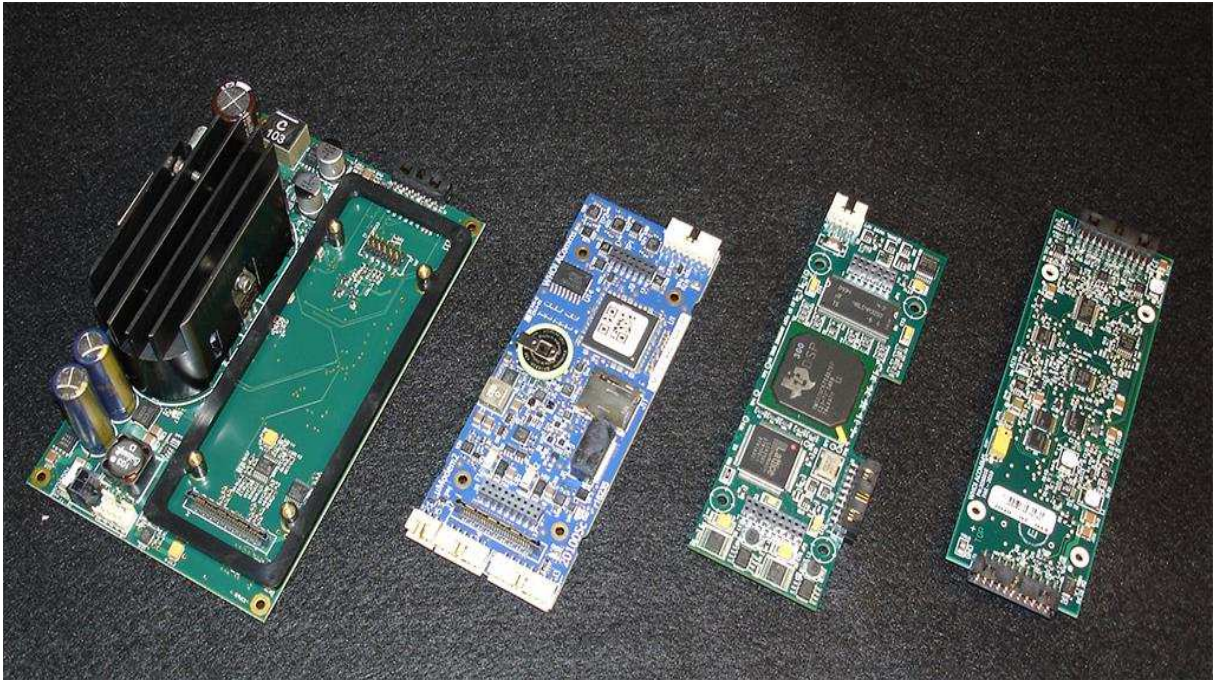
**Figura 7: Modem Acústico WHOI**

Fonte: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem/>

### 2.6.1 ATENUAÇÃO

A atenuação ( $A(l, f)$ ) em um canal acústico subaquático é dada por:

$$A(l, f) = A_0 l^K(f)^l, \quad (1)$$



**Figura 8: Modem Acústico WHOI. Da esquerda para a direita: amplificador, DSP, coprocessador e interface analógica.**

Fonte: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem/>

onde  $l$  é a distância entre a fonte e o destino,  $f$  é a frequência,  $A_0$  é uma constante de normalização,  $\kappa$  é o fator de espalhamento e  $a(f)$  é o coeficiente de absorção da onda acústica.

A atenuação pode ser expressa em dB por:

$$10\log A(l, f)/A_0 = \kappa 10\log l + l 10\log a(f), \quad (2)$$

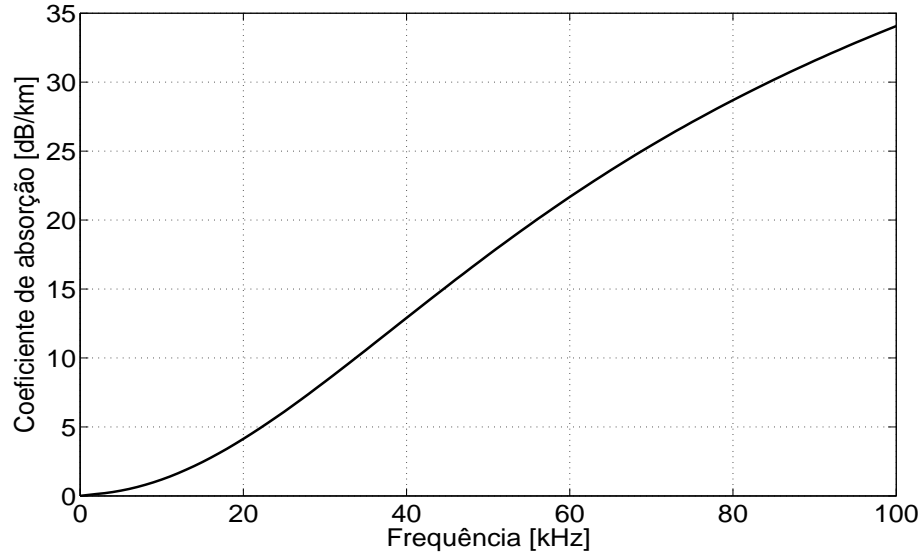
onde  $\log$  é o logaritmo na base 10, o primeiro termo no lado direito da equação representa a perda por espalhamento ( $l$  em m). O fator  $\kappa$  representa a geometria da propagação. Valores usualmente utilizados são  $k=2$  para espalhamento esférico e  $k=1$  para espalhamento cilíndrico. O equivalente de  $k$  em um canal de rádio é o expoente de perdas. O segundo termo no lado direito da equação representa a perda por absorção ( $l$  em km). O coeficiente de absorção é expresso pela fórmula de Thorp:

$$10\log a(f) = 0,11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2,75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,003, \quad (3)$$

sendo  $10\log a(f)$  expresso em dB/km e  $f$  em kHz.

A Figura 9 mostra o coeficiente de absorção em função da frequência. Percebe-se

claramente que o aumento rápido do coeficiente de absorção impõe um limite máximo da frequência de operação para uma dada distância.



**Figura 9: Coeficiente de absorção,  $a(f)$ , em [dB/km].**

## 2.6.2 RUÍDO

O ruído ambiente no oceano é modelado utilizando-se quatro fontes (STOJANOVIC, 2006): turbulência ( $N_t$ ), navegação ( $N_s$ ), ondulação produzida pelo vento ( $N_w$ ) e ruído térmico ( $N_{th}$ ). As fontes de ruído são representadas por fórmulas empíricas, onde a densidade espectral de potência (p.s.d.) do ruído é dada em dB referente a  $\mu Pa$  por Hz em função da frequência em kHz:

$$10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log f, \quad (4)$$

$$10 \log N_s(f) = 40 + 20(s - 0,5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0,03), \quad (5)$$

$$10 \log N_w(f) = 50 + 7,5w^{0,5} + 20 \log f - 40 \log(f + 0,4), \quad (6)$$

$$10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log f. \quad (7)$$

A p.s.d. total do ruído ( $N(f)$ ) será

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f), \quad (8)$$

podendo ser razoavelmente aproximada por

$$10 \log N(f) = N_1 - \eta \log f, \quad (9)$$

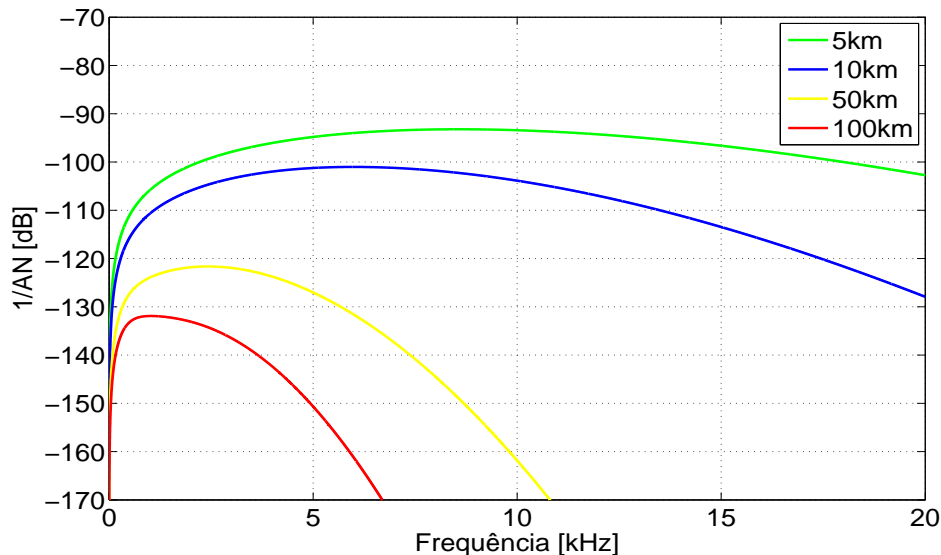
fazendo  $N_1 = 50$  dB referente a  $\mu Pa$  por Hz e  $\eta = 18$  dB/década.

### 2.6.3 RELAÇÃO SINAL RUÍDO

A partir da atenuação  $A(l, f)$  e da p.s.d. do ruído  $N(f)$  é possível determinar a SNR média ( $\bar{\gamma}(l, f)$ ) para uma distância  $l$  quando um sinal de frequência  $f$  e potência  $\mathcal{P}_t$  é transmitido:

$$\bar{\gamma}(l, f) = \frac{\mathcal{P}_t/A(l, f)}{N(f)\Delta f}, \quad (10)$$

onde  $\Delta f$  é a banda do ruído no receptor. O produto  $A(l, f)N(f)$  expressa a dependência em frequência da SNR. O produto  $AN$  é mostrado na Figura 10.



**Figura 10: Produto  $AN$ , com  $k = 1.5$ ,  $s = 0$  e  $w = 0$ .**

A Figura 10 mostra que, para altas frequências, a atenuação cresce rapidamente em longas distâncias, o que força equipamentos que transmitem a distâncias da ordem de quilômetros a trabalhar com frequências da ordem de poucas dezenas de kHz, fazendo com que exista, para cada distância, uma faixa de frequências onde o efeito do produto  $AN$  é menor. Essa é a região ótima de operação e pode ser útil quando se dispõe de faixas de frequência fixas mas pode-se escolher uma frequência específica dentro dessas faixas. Pode-se ver, também, que quanto maior a distância menor a faixa de frequências disponível. Sendo assim, é necessário determinar a frequência ótima de operação para cada distância e alocar uma largura de banda em torno dessa frequência.

#### 2.6.4 DESVANECIMENTO

Em sistemas de comunicação sem fio terrestres via rádio, as variações rápidas das amplitudes, fases ou atrasos de multipercurso são descritos pela atenuação em pequena escala ou desvanecimento (RAPPAPORT, 2002). As distribuições de Rayleigh e Rice são largamente utilizadas para modelar o efeito do desvanecimento em sistemas de rádio, sendo a distribuição de Rayleigh usada para representar sistemas onde não há uma linha de visada entre o transmissor e o receptor e a distribuição Rice para representar sistemas onde há uma componente dominante estacionária, como um linha de visada entre o transmissor e o receptor.

O multipercurso cria ecos do sinal, que chegam ao receptor com atrasos diferentes. O espalhamento do atraso depende da localização, podendo variar de alguns milissegundos a centenas de milissegundos. Em um sistema de banda larga, isso leva a uma função de transferência do canal seletiva em frequência, uma vez que diferentes componentes de frequência podem apresentar atenuações muito diferentes. A resposta do canal e a potência instantânea podem apresentar variações rápidas de pequena escala, causadas pelo "scattering" e pela variação da superfície (ondas). Enquanto grandes variações influenciam no controle de potência do transmissor, variações de pequena escala influenciam no projeto de algoritmos de processamento do sinal no receptor.

Experimentos sugerem que o desvanecimento em um canal acústico subaquático é melhor representado pela distribuição K (YANG; YANG, 2006), cuja função densidade de probabilidade (PDF) é

$$f_X(x) = \frac{4}{\sqrt{\alpha}\Gamma(\nu)} \left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right)^\nu K_{\nu-1}\left(\frac{2x}{\sqrt{\alpha}}\right), \quad (11)$$

onde  $\nu$  é o parâmetro de forma,  $\alpha$  é um parâmetro de escala,  $K_{\nu-1}$  é a função de Bessel modificada de segunda espécie, de ordem  $\nu - 1$ , e  $\Gamma(\nu)$  é a função Gamma (GRADSHTEIN et al., 2000). Vale ressaltar que o desvanecimento representado pela distribuição K pode ser bem mais severo que aqueles representados por Rayleigh e Rice.

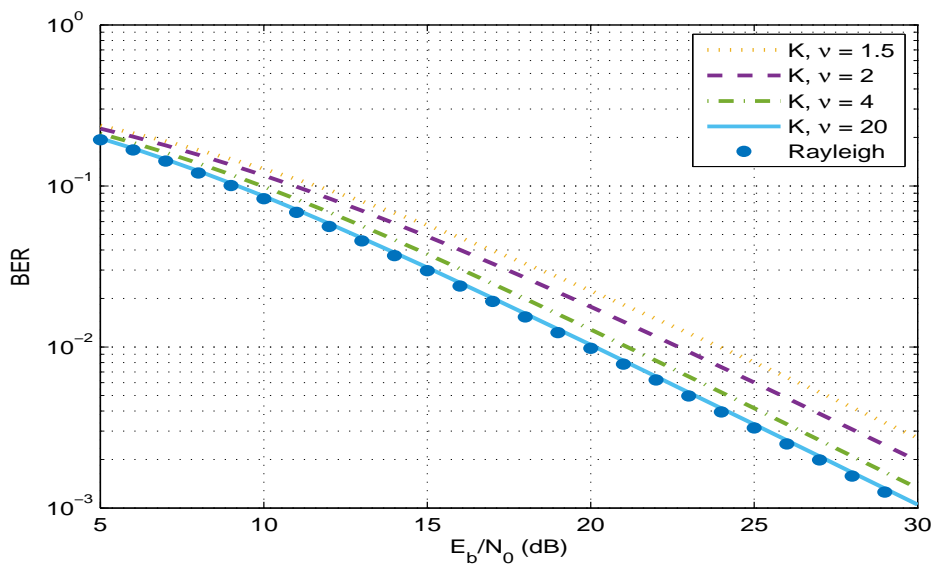
Para evitar o espalhamento devido aos longos atrasos e a distorção de fase variante no tempo, a maioria dos equipamentos trabalha com modulação em frequência com detecção não coerente que, apesar de não serem muito eficientes em termos de uso da largura de banda, permitem uma comunicação robusta com taxas da ordem de algumas centenas de bps.

No caso da modulação binária por chaveamento de frequência (BFSK) não coerente, a probabilidade de erros de bits ( $p_b(\bar{\gamma})$ ) quando se considera o desvanecimento representado pela distribuição K é (YANG; YANG, 2006)

$$p_b(\bar{\gamma}) = \frac{\nu}{\Gamma(\nu)} \int_0^{\infty} \frac{u^{\nu-1} e^{-u}}{2\nu + u \frac{E_b}{N(f)}} du, \quad (12)$$

onde  $E_b = \frac{\bar{\gamma}}{R_b}$  é a energia por bit e  $R_b$  é a taxa de bits.

A Figura 11 mostra a taxa de erros de bits (BER) para modulação BFSK considerando o desvanecimento modelado por Rayleigh e pela distribuição K. Quando o parâmetro de forma  $\nu$  aumenta a distribuição K se aproxima de Rayleigh.



**Figura 11: Taxa de erros de bits da modulação BFSK para canais Rayleigh e K.**

### 2.6.5 CAPACIDADE

Como já citado anteriormente, o canal de comunicação acústica subaquático se caracteriza por uma perda de caminho que depende, além da distância de transmissão, da frequência do sinal. Sendo assim, a largura de banda disponível para transmissão depende da distância, uma diferença fundamental entre a comunicação acústica subaquática e as comunicações sem fio terrestres. Isso torna muito difícil obter uma relação exata entre potência, banda de transmissão e capacidade.

Não faz parte do escopo desse trabalho analisar a capacidade do canal acústico subaquático, mas pode-se citar alguns trabalhos que tratam essa análise, a fim de possibilitar um estudo inicial.

Em (STOJANOVIC, 2006), assume-se que o ruído é Gaussiano e que o canal pode ser considerado invariante durante um determinado intervalo de tempo. Dessa forma, a capacidade

do canal pode ser obtida dividindo-se a largura de banda total em sub-bandas e somando-se as capacidades individuais. Já em (LUCANI et al., 2008), também assume-se que o ruído é Gaussiano e são apresentados resultados numéricos, a partir de resultados analíticos, para aproximar o consumo de energia, a frequência limite da banda e a largura de banda como funções da capacidade.

## 2.7 COMENTÁRIOS

Nesse capítulo apresentou-se as redes acústicas subaquáticas e suas principais características foram discutidas: topologias, acesso ao meio, retransmissões e roteamento.

O canal de comunicação acústica subaquático foi analisado do ponto de vista da atenuação, ruído e desvanecimento, evidenciando a principal diferença do canal acústico subaquático em relação ao canal sem fio terrestre: a dependência da largura de banda com a distância de transmissão, em função do forte aumento da atenuação com a frequência.

Apesar de não ter sido realizada análise da capacidade do canal acústico subaquático, referências foram citadas, para que o leitor interessado possa iniciar um estudo nesse sentido.



### 3 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA PARA REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS

Em redes que utilizam comunicação via rádio, a qualidade da comunicação depende basicamente da distância entre os nós. Nas redes subaquáticas, devido à dependência da frequência do canal acústico, o desempenho depende tanto da posição dos nós (distância do enlace) quanto da frequência escolhida.

Sinais acústicos podem ser gerados com diferentes formas de onda, frequência e potência. A característica do sinal é determinada pelos circuitos eletrônicos, que podem modular o sinal acústico para transmitir informação. O tipo de sinal e os circuitos necessários para gerá-lo dependem da aplicação. Por exemplo, um localizador subaquático precisa gerar um pulso estreito em uma determinada frequência, já um sistema de comunicação subaquática precisará de uma ou mais portadoras em uma faixa de frequências para operar. Normalmente quanto mais complexa a aplicação maior será o consumo dos circuitos que, é depende da eficiência dos circuitos eletrônicos e da potência necessária para transmissão. Como a maioria dos equipamentos subaquáticos é alimentada por baterias, que possuem um tempo de vida limitado, aumentar o tempo de vida é um fator fundamental no projeto de equipamentos e redes subaquáticas.

Em (BENSON et al., 2007) um estudo comparando economia de energia entre redes subaquáticas de múltiplos saltos e redes de transmissão direta mostrou que uma potência significativamente maior é necessária para aumentar tanto o *throughput* quanto o alcance em redes de transmissão direta, sendo as redes de múltiplos saltos mais eficientes em termos de energia. Os autores de (ZORZI et al., 2008) apresentaram algoritmos que minimizam o consumo de energia em redes acústicas subaquáticas, considerando as características do canal acústico e o perfil de consumo de energia de um modem acústico. A fim de definir diretrizes para a análise de desempenho do roteamento, o estudo considera a distância de salto, atraso e consumo de energia. Estes parâmetros influenciam o número de nós por área ou volume e têm impacto no consumo de energia e tempo de vida da rede. O trabalho considera o uso de modulação binária e desenvolve um modelo para a taxa de erros de quadros (FER);

entretanto, não analisa o uso de códigos corretores de erros. Em (WANG et al., 2012) os autores propuseram um modelo teórico para otimizar a potência de transmissão em redes acústicas subaquáticas de múltiplos saltos. Também apresentaram uma função custo baseada em potência para minimizar o número de saltos em uma rede de múltiplos saltos linear que otimiza a potência de transmissão em todo o enlace. Neste trabalho também não se considera o uso de códigos corretores de erros e não são analisadas retransmissões, assim como não são considerados os consumos dos circuitos de transmissão e recepção.

O posicionamento de nós e seleção de frequência de operação foram estudados em (KAM et al., 2014). Os autores focam no problema da seleção da frequência de operação e posicionamento dos nós para minimizar o consumo de energia em uma rede acústica subaquática. O processo de otimização aborda a escolha da frequência para a rede toda, o posicionamento dos nós, permitindo a escolha da melhor frequência para cada enlace, e a otimização conjunta da posição dos nós e da frequência para a rede toda. A perda de caminho acústica e um modelo de banda estreita para determinar a potência de transmissão para uma dada SNR são considerados. O modelo de consumo de energia, no entanto, leva em conta apenas a potência acústica, e estratégias de retransmissão não são analisadas. Esses trabalhos mostram que o uso de diferentes frequências tem impacto no posicionamento ótimo dos nós.

Já em (WANG et al., 2015) os autores propuseram um esquema de transmissão para redes acústicas subaquáticas de múltiplos saltos confiável e energeticamente eficiente. O trabalho apresenta um mecanismo de busca para o nó do próximo salto baseado na energia residual, distância e atraso fim a fim. Além disso, em (SU et al., 2015) os autores analisam a robustez de redes de sensores subaquáticas, usando a relação entre o alcance de transmissão de um nó sensor e a distância mais curta entre dois nós adjacentes a fim de alcançar um equilíbrio entre robustez e consumo de energia. Apesar de considerar esquemas de retransmissão e atraso, nenhum dos trabalhos anteriores considera o impacto do uso de códigos corretores de erros no consumo total de energia.

O uso de códigos corretores de erros no ambiente subaquático foi considerado em apenas alguns trabalhos recentes na literatura. Por exemplo, (ZORITA; STOJANOVIC, 2015) emprega códigos de Hamming juntamente com diversidade na transmissão, através de um esquema de transmissão baseado em Alamouti. Como a coerência em frequência existe naturalmente no ambiente subaquático, os autores focam no projeto da codificação espaço-frequência, em oposição à codificação espaço-temporal. Ainda, códigos LDPC foram considerados em (RAFATI et al., 2014), cujos resultados mostraram que o esquema LDPC proposto provê detecção robusta para comunicações subaquáticas com diferentes modulações e

alcances de transmissão. Por sua vez, (ZORITA; STOJANOVIC, 2015; RAFATI et al., 2014) têm em comum que a taxa do código é fixa e não é feita nenhuma otimização do consumo de energia.

Em (SOUZA et al., 2015b) analisamos o consumo de energia para transmitir um bit de informação com sucesso usando um esquema de transmissão direta com restrição de atraso, onde retransmissões não são permitidas. A características severa do desvanecimento do ambiente subaquático é considerada, de modo que o desvanecimento é modelado de acordo com a distribuição K, baseado em medidas reais do canal acústico subaquático (YANG; YANG, 2006). Vários parâmetros do sistema, como taxa de transmissão, modulação, código corretor de erros, tamanho do quadro, consumo de potência, entre outros, foram tirados de dispositivos subaquáticos existentes (FREITAG et al., 2005), enquanto um modelo detalhado de consumo de energia foi descrito. A taxa de códigos convolucionais foi otimizada para cada distância de enlace, visando minimizar o consumo total de energia para uma FER alvo máxima. Os resultados mostraram que a otimização da taxa do código produz uma grande redução no consumo de energia, permitindo um tempo de vida maior da rede e possibilitando alcançar maiores distâncias de transmissão. Já em (SOUZA et al., 2015a), considerando um cenário sem restrições de atraso, onde ilimitadas retransmissões são permitidas, uma análise similar de consumo de energia foi feita. Os resultados mostraram novamente que o consumo total de energia é bastante reduzido quando a frequência de operação, a taxa do código e a SNR são otimizadas para cada distância de enlace. Ainda, o número ótimo médio de tentativas de transmissão é relativamente pequeno para todas as distâncias de enlace estudadas, mesmo que o número máximo de tentativas fosse ilimitado.

Sendo assim, a seguir descreve-se um modelo de consumo de energia para redes acústicas subaquáticas de múltiplos saltos que considera as características específicas do ambiente subaquático, como atenuação, ruído, desvanecimento, e permite determinar o menor consumo de energia a partir da otimização da SNR, da taxa do código corretor de erro, do número de saltos e do número de retransmissões, além de considerar restrições de atraso (redes com e sem retransmissões).

### 3.1 MODELO DO SISTEMA

Considera-se uma rede linear de múltiplos saltos com  $K$  relays entre a fonte e o destino, separados por  $l$  metros, assumindo-se que os relays estão igualmente espaçados e, portanto, o número de saltos será  $M = K + 1$ , com distância de enlace  $l/M$ . Se  $K = 0$  (então  $M = 1$ ) o modelo de múltiplos saltos se torna transmissão direta.

### 3.1.1 ATENUAÇÃO E RUÍDO

O modelo de atenuação apresentado no Capítulo 2 pode ser adaptado para o modelo de múltiplos saltos reescrevendo (2) da seguinte forma

$$10 \log A \left( \frac{l}{M}, f \right) = 10 \kappa \log \frac{l}{M} + \frac{l/M}{100} \log a(f). \quad (13)$$

Novamente, combinando a atenuação  $A \left( \frac{l}{M}, f \right)$  e a p.s.d total do ruído  $N(f)$  dada por (8), a SNR para o modelo de múltiplos saltos se torna

$$\bar{\gamma} \left( \frac{l}{M}, f \right) = \frac{\mathcal{P}_t \left( \frac{l}{M}, f \right)}{A \left( \frac{l}{M}, f \right) N(f) B}. \quad (14)$$

Considera-se que o desvanecimento em cada enlace é modelado por (12) e, com base em modems comerciais (FREITAG et al., 2005), considera-se o uso de códigos convolucionais, com taxa  $r = k/n$ , onde  $n$  é o número de bits de codificação e  $k$  é o número de bits de informação.

Cada pacote transmitido carrega  $H$  bits de cabeçalho, com parâmetros sobre a transmissão e um *payload* composto por um total de  $L$  bits. O cabeçalho é sempre codificado com um código convolucional conhecido, de taxa  $1/2$ , enquanto os bits de *payload* são codificados com um código de taxa  $k/n$ . Assim, assumindo decodificação Viterbi de decisão abrupta (LIN; COSTELLO, 2004; PROAKIS, 2001), a FER (ou  $p_f(\bar{\gamma})$ ) pode ser escrita como

$$p_f(\bar{\gamma}) = 1 - [1 - p_{\text{header}}(\bar{\gamma})]^{H/2} [1 - p_{\text{cc}}(\bar{\gamma})]^{rL}, \quad (15)$$

onde a BER dos  $rL$  bits de dados após a decodificação do código convolucional de taxa  $r$  (PROAKIS, 2001) ( $p_{\text{cc}}(\bar{\gamma})$ ) é dada por

$$p_{\text{cc}}(\bar{\gamma}) \approx \frac{1}{k} \sum_{d=d_{\text{free}}}^{\infty} \beta_d p_2(d), \quad (16)$$

sendo  $\beta_d$  o peso da informação das palavras de código que estão a uma distância  $d$  da palavra de código zero,  $d_{\text{free}}$  a distância mínima do código, e

$$p_2(d) = \begin{cases} \sum_{j=(d+1)/2}^d \binom{d}{j} p_b(\bar{\gamma})^j (1 - p_b(\bar{\gamma}))^{d-j}, & \text{se } d \text{ é ímpar,} \\ \frac{1}{2} \binom{d}{d/2} p_b(\bar{\gamma})^{d/2} (1 - p_b(\bar{\gamma}))^{d/2} \\ + \sum_{j=d/2+1}^d \binom{d}{j} p_b(\bar{\gamma})^j (1 - p_b(\bar{\gamma}))^{d-j}, & \text{se } d \text{ é par.} \end{cases} \quad (17)$$

onde  $p_b(\bar{\gamma})$  é a probabilidade de erro de bits.

Neste trabalho considera-se o impacto do uso de códigos com diferentes taxas, de modo que (16) depende da escolha do código convolucional, cujos detalhes são apresentados no Capítulo 5. Ainda, a BER dos bits de cabeçalho após a decodificação do código convolucional de taxa  $r = 0.5$   $p_{\text{header}}(\bar{\gamma})$  pode ser calculada da mesma maneira que  $p_{\text{cc}}(\bar{\gamma})$ , apenas considerando as modificações apropriadas para este código em particular.

Finalmente, a FER total ( $P_f$ ) precisa considerar os  $M$  saltos equidistantes e as  $\tau$  tentativas de transmissão por salto (incluindo a transmissão original e  $\tau - 1$  retransmissões), então

$$P_f = 1 - [1 - (p_f(\bar{\gamma}))^\tau]^M. \quad (18)$$

### 3.2 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA

Nesta seção apresenta-se o modelo de consumo proposto. O modelo é baseado naquele apresentado para rádio comunicação em (ROSAS; OBERLI, 2012; ROSAS et al., 2014, 2015), fazendo-se as modificações necessárias para adaptá-lo ao ambiente acústico subaquático, que provavelmente estará sujeito a restrições de atraso. Considerando  $M$  saltos e que  $\tau$  tentativas de transmissão são realizadas em cada salto, a energia total consumida para cada bit de informação transmitido com sucesso entre a fonte e o destino  $\varepsilon_{bT}(M, \tau)$  é

$$\varepsilon_{bT}(M, \tau) = \frac{M [\varepsilon_T(M, \tau) + \varepsilon_R(M, \tau)]}{1 - P_f}, \quad (19)$$

onde  $\varepsilon_T(M, \tau)$  é a energia consumida por transmissor para cada bit de informação transmitido com sucesso,  $\varepsilon_R(M, \tau)$  é a energia gasta para transmitir os bits de retorno para confirmar a recepção e solicitar retransmissões. Ainda, como  $P_f$  representa a FER residual do processo de comunicação, o termo  $\frac{1}{1 - P_f}$  leva em conta a energia adicional gasta na transmissão de quadros sem sucesso.

Vale a pena ressaltar que o termo relacionado à FER residual em (19) difere de maneira fundamental daquele do modelo apresentado em (ROSAS; OBERLI, 2012; ROSAS et al., 2014, 2015), que considera apenas o caso de retransmissões ilimitadas, portanto permitindo atingir FER residual zero, por outro lado impondo um atraso ilimitado. Como as ondas acústicas subaquáticas se propagam com velocidade muito inferior à da luz, neste trabalho considera-se a possibilidade de limitar o atraso máximo, conseqüentemente limitando o número máximo de retransmissões, o que implica aceitar uma FER residual.

A energia consumida por transmissor para cada bit transmitido  $\varepsilon_T(M, \tau)$  pode ser escrita como

$$\varepsilon_T(M, \tau) = \varepsilon_{\text{enc}} + \left[ \left( \mathcal{P}_{\text{el,tx}} + \mathcal{P}_{\text{PA}} \left( \frac{l}{M}, f \right) \right) T_b + \mathcal{P}_{\text{el,rx}} T_f \right] \tau, \quad (20)$$

onde  $\varepsilon_{\text{enc}}$  é a energia gasta na codificação,  $\mathcal{P}_{\text{el,tx}}$  representa o consumo dos circuitos eletrônicos e de banda base utilizados na transmissão, enquanto  $\mathcal{P}_{\text{el,rx}}$  é o consumo equivalente na recepção dos bits de retorno. O consumo elétrico do amplificador de potência acústica no transmissor é  $\mathcal{P}_{\text{PA}} \left( \frac{l}{M}, f \right)$ , que depende da distância e da frequência de operação. Além disso,  $T_b$  é o tempo médio de transmissão por bit e  $T_f$  é o tempo de retorno por bit. Por questões de simplificação da análise, considera-se que os bits de retorno são recebidos sem erros.

No lado do receptor, a energia usada para demodular  $\tau$  quadros e transmitir os correspondentes quadros de retorno ( $\varepsilon_R(M, \tau)$ ) é

$$\varepsilon_R(M, \tau) = \left[ \varepsilon_{\text{dec}} + \mathcal{P}_{\text{el,rx}} T_b + \left( \mathcal{P}_{\text{el,tx}} + \mathcal{P}_{\text{PA}} \left( \frac{l}{M}, f \right) \right) T_f \right] \tau, \quad (21)$$

onde  $\varepsilon_{\text{dec}}$  é a energia gasta para decodificar um quadro <sup>1</sup>.

Recordando que cada quadro transmitido carrega  $H$  bits de cabeçalho e um *payload* composto por  $rL$  bits de informação e  $(1-r)L$  bits de codificação e definindo a duração total de um quadro transmitido como  $T_L$  para transmitir os  $L$  bits de *payload*,  $T_H$  para o cabeçalho e  $T_O$  para transmitir sinais de *overhead* para estimação do canal, sincronismo, *etc.*, com comprimento equivalente de  $O$  bits, o tempo médio de transmissão por bit de *payload* por quadro transmitido ( $T_b$ ) será

$$T_b = \frac{T_L + T_H + T_O}{rL} = \frac{L + H + O}{rR_b L}, \quad (22)$$

onde  $R_b$  é a taxa de bits em bits/s.

<sup>1</sup>Por questões de simplificação assume-se que a energia gasta por bit no processo de ativação dos nós é muito pequena ou está incluída em  $\mathcal{P}_{\text{el,tx}}$  and  $\mathcal{P}_{\text{el,rx}}$ .

Do mesmo modo, o tempo de retorno por bit de *payload* ( $T_f$ ) é

$$T_f = \frac{F}{rR_bL}, \quad (23)$$

onde  $F$  é o número de bits em um quadro de retorno <sup>2</sup>.

Ainda, o consumo de energia acústica para transmitir um único quadro ( $\mathcal{P}_t(\frac{l}{M}, f)$ ) pode ser expresso em  $\mu\text{Pa}$  como (GAO et al., 2012)

$$\mathcal{P}_t\left(\frac{l}{M}, f\right) = N(f)A\left(\frac{l}{M}, f\right)B\bar{\gamma}. \quad (24)$$

Então, para calcular o consumo elétrico do amplificador em Watts  $\mathcal{P}_{\text{PA}}(\frac{l}{M}, f)$  a seguinte relação é utilizada (GAO et al., 2012)

$$\mathcal{P}_{\text{PA}}\left(\frac{l}{M}, f\right) = \mathcal{P}_t\left(\frac{l}{M}, f\right) \cdot \frac{10^{-17.2}}{\phi}, \quad (25)$$

onde  $10^{-17.2}$  é um fator de conversão e  $\phi$  é a eficiência total do conjunto amplificador-transdutor.

Finalmente, a energia gasta para codificação por bit de informação ( $\epsilon_{\text{enc}}$ ) pode ser modelada como (ROSAS et al., 2015)

$$\epsilon_{\text{enc}} = \frac{V_{\text{dd}}I_0}{rLf_{\text{APU}}} \sum_{j=1}^J c_j n_j^{\text{enc}}, \quad (26)$$

onde  $J$  é o número de diferentes operações aritméticas necessárias para a codificação,  $c_j$  é o número de ciclos de relógio usado por cada operação e  $n_j^{\text{enc}}$  é o número de vezes que uma operação é executada no algoritmo de codificação. Ainda,  $V_{\text{dd}}$  é a tensão de operação da unidade de processamento aritmético (APU),  $I_0$  é a corrente média durante a execução das operações aritméticas, e  $f_{\text{APU}}$  é a frequência do relógio da APU.

Do mesmo modo, a energia gasta na decodificação, por bit de informação ( $\epsilon_{\text{dec}}$ ) é

$$\epsilon_{\text{dec}} = \frac{V_{\text{dd}}I_0}{rLf_{\text{APU}}} \sum_{j=1}^J c_j n_j^{\text{dec}}, \quad (27)$$

onde  $n_j^{\text{dec}}$  é o número de vezes que a  $j$ -ésima operação é executada durante a decodificação.

---

<sup>2</sup>Vale a pena notar que a formulação apresentada é geral para um dado número  $\tau$  de tentativas de transmissão. No entanto, quando  $\tau = 1$ , *i.e.* quando retransmissões não são permitidas, os bits de retorno não são necessários, portanto,  $F = 0$  e  $T_f = 0$ .

### 3.2.1 NÚMERO MÉDIO DE TENTATIVAS DE TRANSMISSÃO

Uma vez que o uso de ondas acústicas subaquáticas impõe longos atrasos no processo de comunicação, é importante considerar um cenário com restrições de atraso, isto é, um cenário com atraso máximo e, portanto, um número limitado de retransmissões. Nesse cenário, a decodificação correta do quadro transmitido nem sempre pode ser assegurada, o que implica em aceitar uma FER residual no receptor. Nesse caso, deve-se estabelecer um FER alvo  $P_f^*$  baseada em um número máximo de tentativas de transmissão  $\tau_{\max}$ . O objetivo é operar um sistema tão eficiente em termos de gasto de energia o quanto possível, dadas as restrições de atraso e FER. A SNR ótima de operação é aquela que minimiza a energia total consumida para um dado conjunto de parâmetros (como taxa do código, número máximo de tentativas de transmissão, etc.), garantindo que uma FER menor ou igual a  $P_f^*$  seja alcançada.

Considerando-se desvanecimento rápido, transmissões consecutivas são independentes e identicamente distribuídas. Então, dado que um número máximo  $\tau_{\max}$  de tentativas de transmissão é permitido, é possível relacionar a FER alvo global à FER por tentativa de transmissão ( $p_f(\bar{\gamma})$ ) por  $P_f^* \geq 1 - [1 - (p_f(\bar{\gamma}))^{\tau_{\max}}]^M$ , de modo que  $P_f \leq P_f^*$  e a FER global nunca ultrapasse a FER alvo. Sendo assim, o número médio de tentativas de transmissão por salto ( $\bar{\tau}$ ) é

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= 1 + \sum_{n=1}^{\tau_{\max}-1} (p_f(\bar{\gamma}))^n = \frac{1 - (p_f(\bar{\gamma}))^{\tau_{\max}}}{1 - p_f(\bar{\gamma})} \\ &\leq \frac{(1 - P_f^*)^{\frac{1}{M}}}{1 - \left[1 - (1 - P_f^*)^{\frac{1}{M}}\right]^{\frac{1}{\tau_{\max}}}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Para se obter um cenário sem limitações de atraso a partir de (28) basta fazer  $\tau_{\max} \rightarrow \infty$ . Em outras palavras, o receptor solicita retransmissões até que o quadro seja corretamente decodificado. Neste caso o número médio de tentativas de transmissão ( $\bar{\tau}_{\infty}$ ) é dado por (ROSAS; OBERLI, 2012)

$$\bar{\tau}_{\infty} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (p_f(\bar{\gamma}))^n = \frac{1}{1 - p_f(\bar{\gamma})}. \quad (29)$$



### 3.2.2 ENERGIA MÉDIA TOTAL

A partir do número médio de tentativas de transmissão é possível determinar a energia média total por bit transmitido com sucesso para um dado número de saltos ( $\bar{\epsilon}_{bT}$ ) por

$$\bar{\epsilon}_{bT} = \mathbb{E}\{\epsilon_{bT}(M, \tau)\} = \frac{M(\bar{\epsilon}_T + \bar{\epsilon}_R)}{1 - P_f}, \quad (30)$$

onde é fácil mostrar que a energia gasta na transmissão ( $\bar{\epsilon}_T$ ) é

$$\bar{\epsilon}_T = \epsilon_{\text{enc}} + \left[ \left( \mathcal{P}_{\text{el,tx}} + \mathcal{P}_{\text{PA}} \left( \frac{l}{M}, f \right) \right) T_b + \mathcal{P}_{\text{el,rx}} T_f \right] \bar{\tau}, \quad (31)$$

e a energia gasta na recepção ( $\bar{\epsilon}_R$ ) é

$$\bar{\epsilon}_R = \left[ \epsilon_{\text{dec}} + \mathcal{P}_{\text{el,rx}} T_b + \left( \mathcal{P}_{\text{el,tx}} + \mathcal{P}_{\text{PA}} \left( \frac{l}{M}, f \right) \right) T_f \right] \bar{\tau}, \quad (32)$$

válidas tanto para os casos com e sem restrição de atraso, substituindo-se adequadamente  $\bar{\tau}$  por  $\bar{\tau}_\infty$ .

### 3.3 COMENTÁRIOS

Neste capítulo desenvolveu-se um modelo de consumo de energia para redes acústicas subaquáticas. O modelo apresentado considera as principais características do canal de comunicação acústica subaquático: atenuação, ruído e desvanecimento. Ainda, são considerados além do consumo do amplificador de potência usado para transmissão, o consumo dos circuitos eletrônicos e de banda base, baseando-se em características de especificações de equipamentos comerciais.

Com esse modelo é possível determinar o consumo total de energia para transmitir um bit de informação com sucesso em redes acústicas subaquáticas de transmissão direta e de múltiplos saltos, considerando o uso de códigos corretores de erros e cenários com ou sem restrição de atraso, ou seja, considerando um número limitado de retransmissões, onde uma FER residual é tolerada; ou infinitas retransmissões, quando a comunicação acontece sem erros.

## 4 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE SALTOS E TENTATIVAS DE TRANSMISSÃO

Em uma rede subaquática de múltiplos saltos, a energia gasta depende do número de saltos e do número de tentativas de transmissão. Neste capítulo apresenta-se uma análise teórica do papel de  $M$  e  $\tau_{\max}$  no consumo total do sistema. Inicialmente analisa-se o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia por bit de informação transmitido com sucesso e na sequência o impacto do número de tentativas de transmissão é considerado (SOUZA et al., 2016).

A fim de conseguir uma análise tratável matematicamente algumas simplificações são consideradas em relação ao modelo apresentado no Capítulo 3. Na análise aqui desenvolvida será considerada transmissão sem codificação, ou seja,  $r = 1$ , para que o papel de outros parâmetros do sistema possa ser melhor analisado.

### 4.1 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE SALTOS

De acordo com a Figura 11, a BER da modulação BFSK não coerente em um canal com desvanecimento modelado pela distribuição K tem como limite inferior a BER do canal com desvanecimento Rayleigh, que pode ser bem aproximado para uma SNR suficientemente alta por (PROAKIS, 2001)

$$p_b(\bar{\gamma}) \approx \frac{1}{E_b/N_0}. \quad (33)$$

Além disso, para o caso da modulação FSK não coerente,  $\frac{E_b}{N_0} = 2\bar{\gamma}$ . Então, como a FER para cada transmissão não codificada pode ser escrita em termos da BER como  $p_f(\bar{\gamma}) = 1 - (1 - p_b(\bar{\gamma}))^{L+H}$ , lembrando que  $L$  é o número de bits do payload e  $H$  é o número de bits de cabeçalho, (33) pode ser usada para aproximar a SNR média requerida em função da FER alvo  $P_f^*$  (assumido  $P_f = P_f^*$ ) por

$$\bar{\gamma} \approx \frac{1}{2 \left(1 - \Theta^{\frac{1}{L+H}}\right)}, \quad (34)$$

onde  $\Theta = 1 - \left[1 - (1 - P_f^*)^{\frac{1}{M}}\right]^{\frac{1}{\tau_{\max}}}$ .

Inserindo (34) em (30), com o auxílio de (31), (32), (24) and (25), a energia média total consumida pode ser reescrita como

$$\begin{aligned}\bar{\epsilon}_{bT} &\approx \frac{M\bar{\tau}(T_b+T_f)}{1-P_f^*} \left[ \mathcal{P}_{el} + A\left(\frac{l}{M}, f\right) \frac{N(f)B10^{-17.2}}{2\left(1-\Theta^{\frac{1}{L+H}}\right)\phi} \right] \\ &= M\bar{\tau} \left[ K_1 + \frac{K_2}{1-\Theta^{\frac{1}{L+H}}} A\left(\frac{l}{M}, f\right) \right],\end{aligned}\quad (35)$$

onde  $K_1 = \frac{\mathcal{P}_{el}(T_b+T_f)}{1-P_f^*}$  e  $K_2 = \frac{(T_b+T_f)N(f)B10^{-17.2}}{2(1-P_f^*)\phi}$  são constantes em relação a  $M$  e  $\bar{\tau}$ , enquanto  $\mathcal{P}_{el} = \mathcal{P}_{el,tx} + \mathcal{P}_{el,rx}$  é a energia total consumida pelos componentes eletrônicos.

Assim, usando (13) na forma linear, de modo que  $A\left(\frac{l}{M}, f\right) = \left(\frac{l}{M}\right)^\kappa a(f)^{\frac{1}{1000M}}$ , colocando em (35) e fazendo a derivada de primeira ordem de  $\bar{\epsilon}_{bT}$  em relação a  $M$  obtêm-se

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\epsilon}_{bT}}{\partial M} &\approx \frac{\Psi}{\Theta} \left[ \left( K_1 + \frac{\Phi}{\Upsilon} \right) \left( 1 - \ln \Psi + \frac{(1-\Theta)\Psi \ln \Psi}{(1-\Psi)\Theta \tau_{\max}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\Phi}{\Upsilon} \left( \kappa + \frac{l \ln a(f)}{1000M} + \frac{(1-\Theta)(1-\Upsilon)\Psi \ln \Psi}{(L+H)(1-\Psi)\Theta \Upsilon \tau_{\max}} \right) \right],\end{aligned}\quad (36)$$

onde  $\Phi = K_2 A\left(\frac{l}{M}, f\right)$ ,  $\Psi = \sqrt[M]{1-P_f^*}$  e  $\Upsilon = 1 - \Theta^{\frac{1}{L+H}}$ .

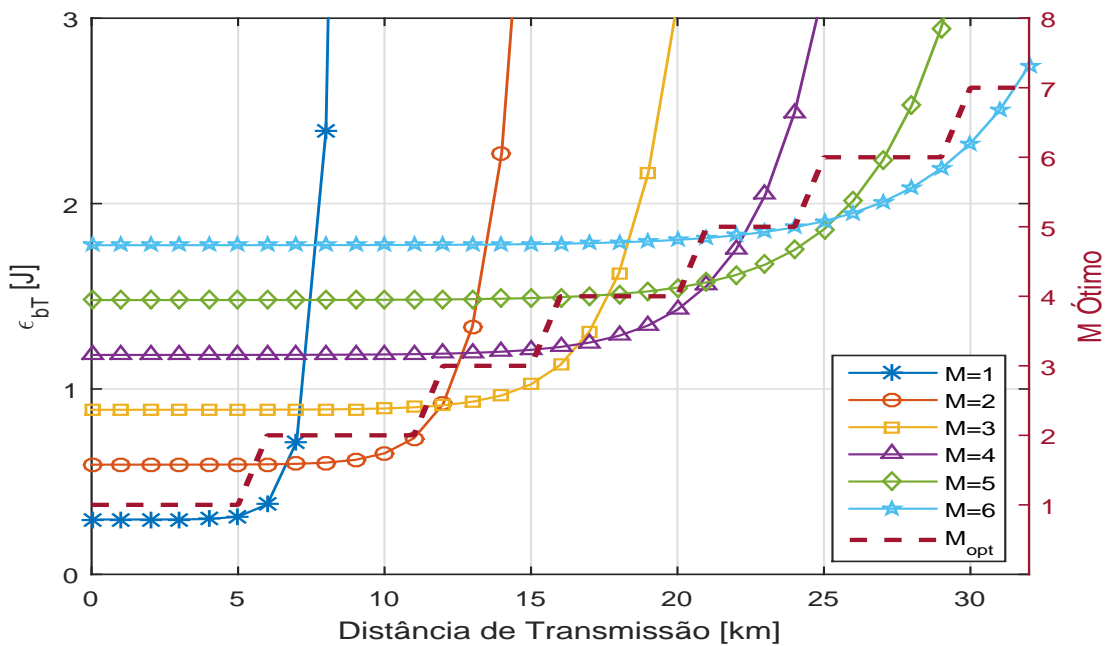
Finalmente, o número ótimo de saltos  $M_{opt}$  que minimiza o consumo de energia pode ser obtido resolvendo  $\frac{\partial \bar{\epsilon}_{bT}}{\partial M} = 0$  em relação a  $M$ . Como, no entanto,  $\frac{\partial \bar{\epsilon}_{bT}}{\partial M} = 0$  não tem uma solução fechada, recorre-se a uma solução numérica para encontrar  $M_{opt}$  para cada distância de enlace  $l$  usando (36).

A Figura 12 mostra  $\bar{\epsilon}_{bT}$  para diferentes números de saltos. O número ótimo de saltos obtido pela solução numérica de (36) também é mostrado, na linha pontilhada. Nesta análise considera-se que retransmissões não são permitidas ( $\tau_{\max} = \bar{\tau} = 1$ ), com uma FER alvo  $P_f^* = 10^{-2}$ . Os demais parâmetros do sistema são mostrados na Tabela 3. Como se observa na Figura 12, para distância de enlace até 20 km,  $M_{opt}$  aumenta de uma unidade a cada 7 km aproximadamente. Isso mostra que, após tal incremento da distância do enlace, o consumo total para  $M$  saltos se torna maior que o consumo total para  $M+1$  saltos. Neste ponto o número de saltos deve ser incrementado para garantir o menor consumo de energia. Para transmissões a distâncias maiores que 20 km,  $M_{opt}$  aumenta com incrementos menores da distância, como mostra a linha pontilhada. Assim,  $M_{opt}$  depende tanto do consumo dos circuitos eletrônicos quanto do consumo do amplificador de potência. O consumo dos circuitos eletrônicos depende do estado atual da tecnologia; por outro lado, o consumo do amplificador de potência depende da distância e da frequência de operação (atenuação e ruído), assim como da SNR dada por

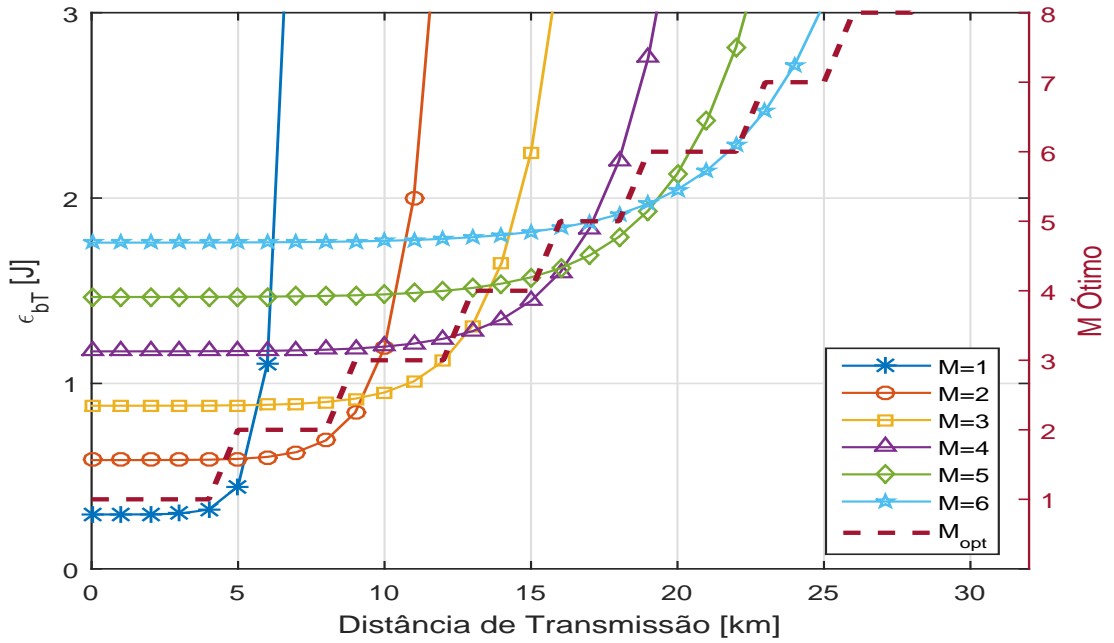
(34). Considerando-se, por exemplo, que o consumo dos circuitos,  $\mathcal{P}_{el}$ , caia cerca de 10 a 100 vezes no futuro devido a avanços na tecnologia,  $M_{opt}$  aumentará uma unidade a cada 5 km (com  $\mathcal{P}_{el}/10$ ) e a cada 4 km (com  $\mathcal{P}_{el}/100$ ).

**Tabela 3: Parâmetros do sistema**

Parâmetro	Descrição	Valor
$H$	Cabeçalho (FREITAG; SINGH, 2000.)	4 bytes
$O$	Overhead (FREITAG; SINGH, 2000.)	2 bytes
$F$	Tamanho do quadro de retorno (ROSAS; OBERLI, 2012)	11 bytes
$L$	textit Payload (FREITAG; SINGH, 2000.)	128 bytes
$B$	Largura de banda	320 Hz
$R_b$	Taxa de bits (FREITAG; SINGH, 2000.)	160 bps
$\mathcal{P}_{PA}(l, f)_{min}$	Potência Mínima de transmissão (FREITAG et al., 2005)	8 W
$\mathcal{P}_{PA}(l, f)_{max}$	Potência Máxima de transmissão (FREITAG et al., 2005)	50 W
$\mathcal{P}_{el,rx}$	Potência de recepção (FREITAG et al., 2005)	1 W
$\phi$	Eficiência do amplificador-transdutor (GAO et al., 2012)	0.25
$L_m$	Margem de enlace	20 dB
$f_{APU}$	Frequência da APU (ROSAS; OBERLI, 2012)	20 MHz
$V_{dd}$	Tensão da APU (ROSAS; OBERLI, 2012)	3 V
$I_0$	Corrente média (ROSAS; OBERLI, 2012)	6.37 mA
$c_j$	Número de ciclos de relógio por operação	1 cycle
$\nu$	Parâmetro de forma da distribuição K (YANG; YANG, 2006)	1.5
$\alpha$	Parâmetro de escala da distribuição K (YANG; YANG, 2006)	$\nu^{-1}$



**Figura 12: Energia total consumida para diferentes números de saltos ( $M$ ). Para cada distância total de enlace considera-se  $M$  saltos igualmente espaçados. O número ótimo de saltos, obtido pela solução numérica de (36), também é mostrado. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-2}$ .**



**Figura 13: Energia total consumida para diferentes números de saltos ( $M$ ). Para cada distância total de enlace considera-se  $M$  saltos igualmente espaçados. O número ótimo de saltos, obtido pela solução numérica de (36), também é mostrado. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-3}$ .**

A Figura 13 mostra a mesma análise da Figura 12 considerando uma FER alvo  $P_f^* = 10^{-3}$ . Com uma FER mais forte, apesar do comportamento do sistema ser parecido, o consumo de energia é maior e o número ótimo de saltos (calculado numericamente) incrementa a intervalos menores da distância do enlace, aproximadamente a cada 4 km, chegando a oito saltos em uma distância de enlace de aproximadamente 26 km.

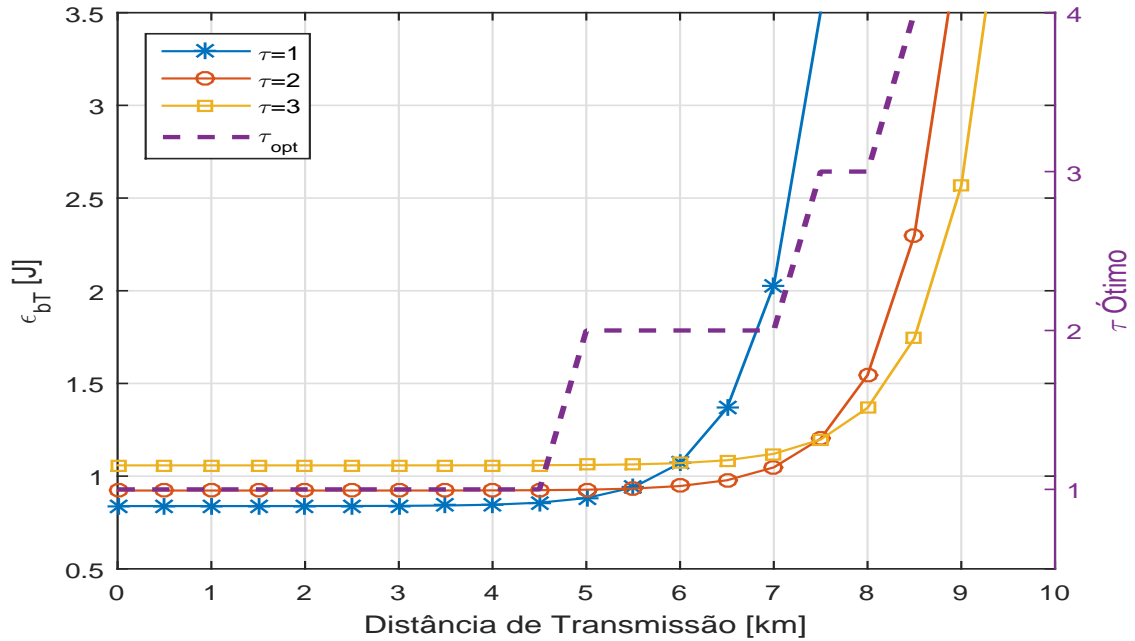
#### 4.2 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TENTATIVAS DE TRANSMISSÃO

Para analisar o número ótimo máximo de tentativas de transmissão que minimiza o consumo de energia para uma dada FER alvo e um certo número de saltos, uma análise similar àquela feita em (36) é desenvolvida. Inicialmente usa-se (28) para escrever  $\bar{\tau}$  em função da FER e de  $\tau_{\max}$ . Então, fazendo a derivada de primeira ordem de  $\bar{\epsilon}_{bT}$  em relação a  $\tau_{\max}$  resulta

$$\frac{\partial \bar{\epsilon}_{bT}}{\partial \tau_{\max}} \approx \frac{M\Psi(1-\Theta)\ln(1-\Psi)}{\Theta^2\tau_{\max}^2} \left[ \frac{(1-\Upsilon)\Phi}{(L+H)\Upsilon^2} - \left( K_1 + \frac{\Phi}{\Upsilon} \right) \right]. \quad (37)$$

Na sequência o número ótimo de tentativas de transmissão  $\tau_{\text{opt}}$  que minimiza o consumo de energia pode ser obtido resolvendo numericamente  $\frac{\partial \bar{\epsilon}_{bT}}{\partial \tau_{\max}} = 0$  em relação a  $\tau_{\max}$ .

A Figura 14 mostra  $\bar{\epsilon}_{bT}$  para diferentes números de tentativas de transmissão para o

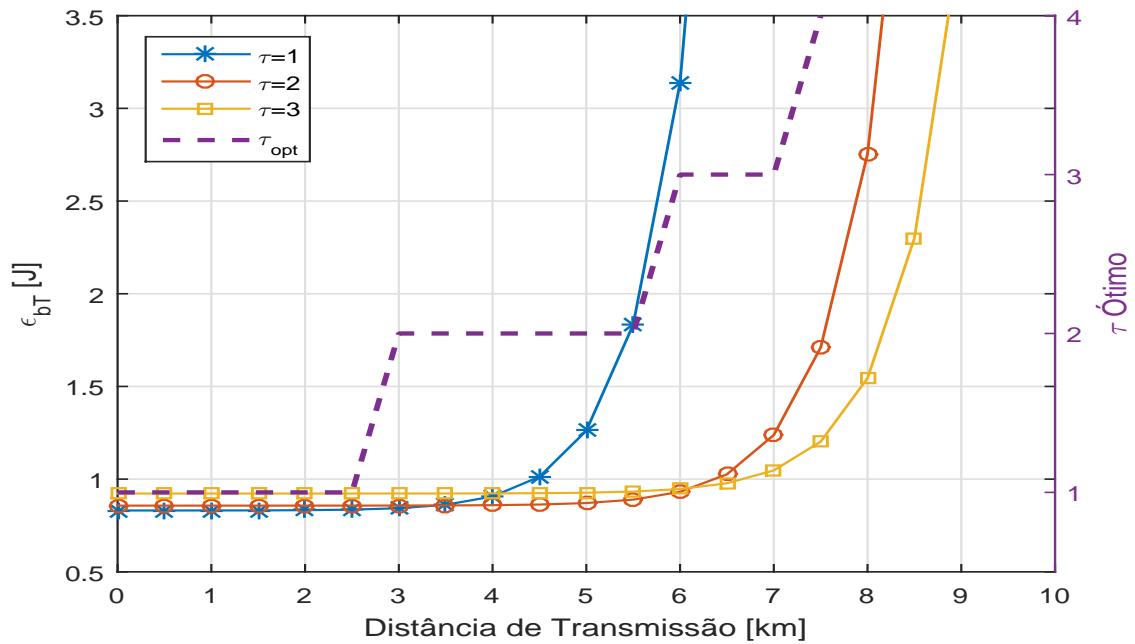


**Figura 14: Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ) quando  $M = 1$ . O  $\tau_{\max}$  ótimo, obtido pela solução numérica de (37), também é mostrado. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-2}$ .**

caso de transmissão direta ( $M = 1$ ) e também  $\tau_{\text{opt}}$  obtido pela solução numérica de (37). Assim como na análise do número ótimo de saltos, a energia consumida pelos circuitos eletrônicos é significativa em distâncias de enlace menores, o que torna menos transmissões mais eficiente do ponto de vista do consumo de energia até uma certa distância total de enlace. Entretanto, observando-se a figura percebe-se que o efeito de aumentar  $\tau_{\max}$  não é linear. Assim, o efeito de aumentar  $\tau_{\max}$  de 2 para 3 é bem menos significativo que aumentar  $\tau_{\max}$  de 1 para 2. Isso indica que um número bem pequeno de tentativas de transmissão (uma ou duas) pode ser suficiente para uma operação eficiente em termos de consumo.

Vale a pena ressaltar também que, quando o sistema opera com  $\tau_{\max} = 1$  o quadro de retorno torna-se desnecessário. Por outro lado, quando retransmissões são realizadas a energia consumida pelos bits de retorno precisa ser levada em conta, o que significa um aumento considerável no consumo de energia, uma vez que o consumo dos circuitos eletrônicos dos equipamentos acústicos subaquáticos atuais é relativamente alto. Por exemplo, o consumo mínimo do circuito de recepção do WHOI é 1 W.

Assim como na Figura 14, a Figura 15 mostra o  $\bar{\epsilon}_{bT}$  para diferentes números de tentativas de transmissão para o caso de transmissão direta ( $M = 1$ ) e também  $\tau_{\text{opt}}$  obtido pela solução numérica de (37), entretanto nessa caso a FER alvo é  $P_f^* = 10^{-3}$ . O comportamento do sistema é bem parecido com o caso de  $P_f^* = 10^{-2}$ , entretanto, aqui, o número ótimo de tentativas



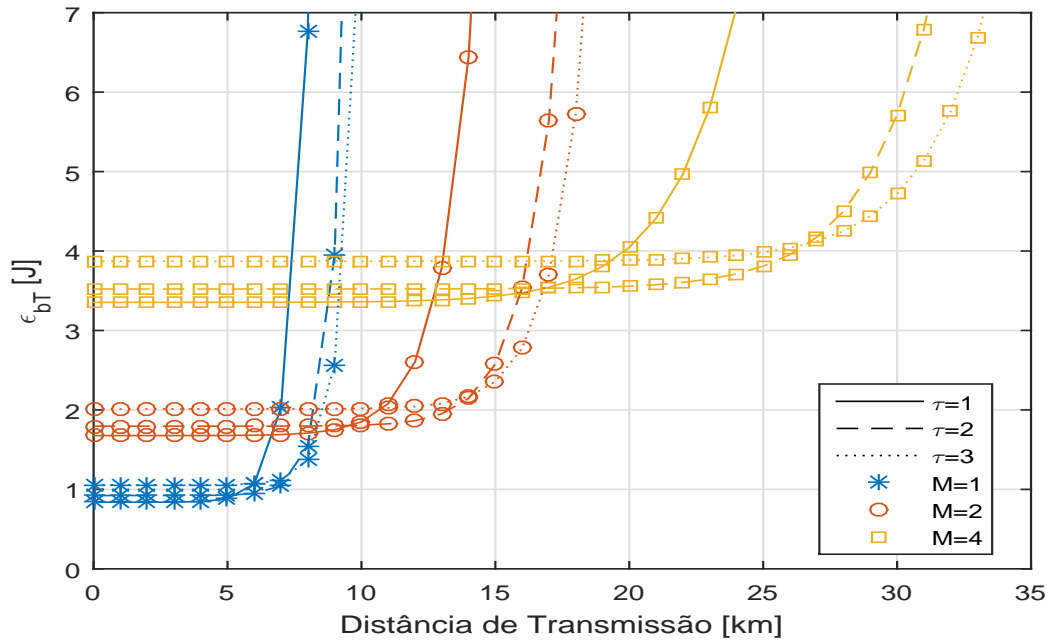
**Figura 15:** Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{\max}$ ). O  $\tau_{\max}$  ótimo, obtido pela solução numérica de (37), também é mostrado. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-3}$ .

de transmissão (calculado numericamente) aumenta mais rapidamente com a distância de enlace.

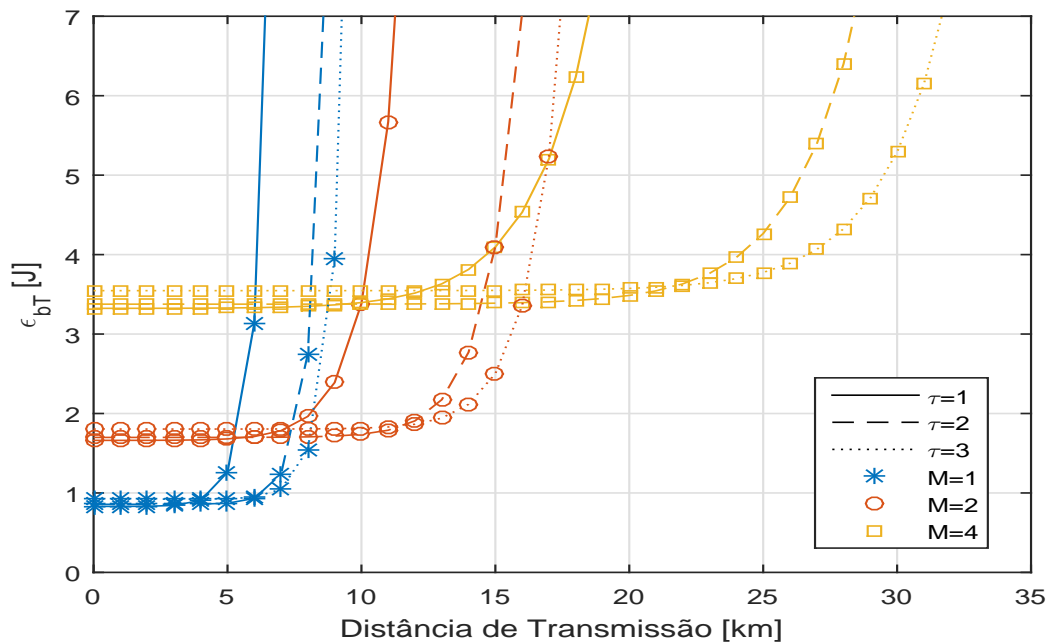
Finalmente, a Figura 16 e a Figura 17 mostram  $\bar{\epsilon}_{bT}$  para diferentes valores de  $M$  e  $\tau_{\max}$ , considerando  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , respectivamente. Como é possível observar na Figura 16, o simples aumento do número de tentativas de transmissão não leva ao consumo mínimo de energia quando a distância do enlace aumenta. É preciso aumentar o número de saltos para chegar ao consumo mínimo. Além disso, a Figura 16 também sugere que um grande aumento de  $\tau_{\max}$  resulta em uma pequena melhora no consumo de energia. A Figura 17 mostra resultados bem parecidos. Essas conclusões são corroboradas pela severidade do ruído, atenuação e desvanecimento característicos do ambiente subaquático.

Portanto, a fim de balancear a relação de compromisso entre o consumo dos circuitos, relativamente alto para modems acústicos, e o consumo do amplificador de potência, a análise teórica aqui apresentada sugere que a otimização da distância de enlace em uma rede de múltiplos saltos é de fundamental importância.

Lembra-se que a análise realizada considerou transmissão não codificada. O efeito do uso de códigos corretores de erros na otimização do sistema como um todo implica em uma grande aumento de complexidade na análise teórica. No capítulo seguinte será realizada uma análise numérica do impacto da otimização do número de saltos, taxa do código e número



**Figura 16:** Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{max}$ ) e diferentes números de saltos ( $M$ ), em função da distância do enlace. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-2}$ .



**Figura 17:** Energia total consumida para diferentes números máximos de tentativas de transmissão ( $\tau_{max}$ ) e diferentes números de saltos ( $M$ ), em função da distância do enlace. A FER alvo é  $P_f^* = 10^{-3}$ .

máximo de tentativas de transmissão no consumo de energia por bit de informação transmitido com sucesso em um cenário acústico subaquático.



### 4.3 COMENTÁRIOS

Neste capítulo realizou-se uma análise teórica visando otimizar o número de saltos e tentativas de transmissão em redes acústicas subaquáticas de múltiplos saltos a fim de reduzir o consumo de energia para transmitir um bit de informação com sucesso.

Sabendo que a energia gasta depende do número de saltos e do número de tentativas de transmissão, apresentou-se uma análise teórica do papel de  $M$  e  $\tau_{\max}$  no consumo total do sistema. Inicialmente foi analisado o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia por bit de informação transmitido com sucesso e na sequência o impacto do número de tentativas de transmissão foi considerado. Para que uma análise tratável matematicamente pudesse ser feita a fim de melhor analisar o papel de outros parâmetros do sistema, foi considerada transmissão não codificada.

Os resultados dessa análise teórica indicaram que a otimização do número de saltos é fundamental para minimizar o consumo de energia para médias e longas distâncias, enquanto o aumento no número médio de tentativas de transmissão tem um impacto menor no consumo de energia.

## 5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo apresenta-se resultados numéricos avaliando o consumo de energia por bit transmitido usando o modelo de consumo desenvolvido no Capítulo 3, para o esquema de múltiplos saltos. Os cálculos são realizados para várias distâncias de enlace e considera-se dois cenários: com limitação de atraso, o que implica restringir ou proibir retransmissões; e sem limitação de atraso, onde ilimitadas retransmissões são possíveis. O efeito da otimização da taxa do código e do número de saltos é analisado, bem como o número máximo de retransmissões. Em todos os casos, a frequência de operação e a SNR que minimizam o consumo de energia são consideradas (SOUZA et al., 2016). A escolha pela solução numérica se dá pela complexidade da otimização, devido ao grande número de variáveis, que impossibilita uma solução analítica completa.

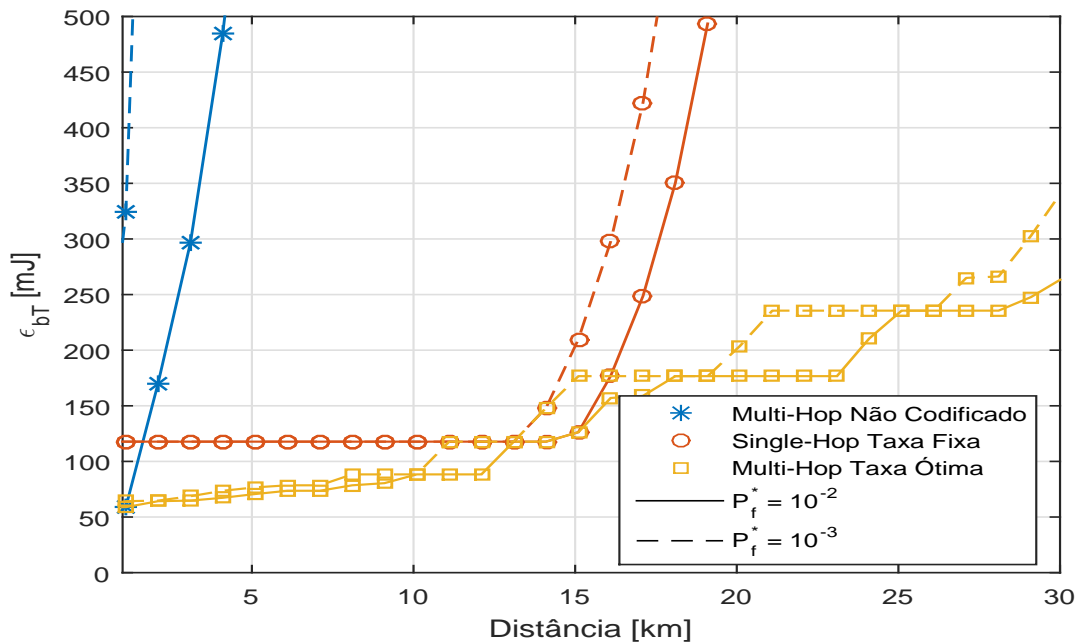
A fim de aproximar os resultados de um cenário mais real, alguns parâmetros do modem WHOI (FREITAG et al., 2005) são utilizados. O WHOI é um dispositivo subaquático que pode se comunicar usando modulação BFSK em baixas taxas e *frequency hop*, que evita os efeitos da interferência intersimbólica. Transmite em diferentes faixas de frequências, permitindo que se selecione a melhor frequência para diminuir o consumo de energia, dentro da faixa de 10 a 25 kHz, mantendo-se fixa a largura de banda ao redor da frequência ótima para cada distância de enlace. O código utilizado é o convolucional de taxas  $r = 0,125$  a  $r = 0,917$  para codificação do *payload*, considerando o código otimizado de taxa  $1/n$  apresentado em (BOCHAROVA; KUDRYASHOV, 1997) e os códigos puncionados de alta taxa  $k/n$ , com  $k > 1$  de (BEGIN et al., 1990). O header é codificado com um código padrão de taxa  $r = 0,5$  utilizado pelo WHOI. Vale lembrar que, apesar de se utilizar alguns parâmetros do modem WHOI, não é objetivo desse trabalho avaliar seu desempenho.

A Tabela 3 mostra os parâmetros considerados na simulação. Aqui também é importante lembrar que, no transmissor, a energia gasta para codificação ( $\epsilon_{\text{enc}}$ ) e o consumo dos circuitos de banda base ( $\mathcal{P}_{\text{el,tx}}$ ) são muito menores que o consumo do amplificador de potência acústica  $\mathcal{P}_{\text{PA}}(l, f)$ . Portanto, em termos práticos, esses valores podem ser desconsiderados no cálculo do consumo total sem que os resultados sejam alterados. Ainda,  $\mathcal{P}_{\text{PA}}(l, f)_{\text{min}}$  representa

a potência mínima de transmissão, e  $\mathcal{P}_{PA}(l, f)_{\max}$  é a potência máxima de transmissão. No receptor, o consumo de energia é dominado pela potência de recepção,  $\mathcal{P}_{el,rx}$ . Finalmente, uma margem de enlace  $L_m$  deve ser considerada, a fim de compensar outras perdas não incluídas no modelo considerado e que podem estar presentes em um cenários real.

## 5.1 REDES COM RESTRIÇÃO DE ATRASO

Inicialmente se analisa o caso de enlaces com restrição de atraso, onde uma FER alvo, representada por  $P_f^*$  pode ser tolerada e o número permitido de transmissões é limitado a  $\tau_{\max}$ . A Figura 18 mostra a energia gasta por bit transmitido com sucesso para  $\tau_{\max} = 1$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , para três casos diferentes: esquema de múltiplos saltos com transmissão não codificada, esquema de transmissão direta com taxa fixa  $r = 0,5$ ; e esquema de múltiplos saltos com seleção da taxa ótima do código convolucional. Para os esquemas de múltiplos saltos, o número ótimo de saltos também é selecionado para cada distância de enlace. Ainda, para todos os casos, a frequência e SNR ótimas, que minimizam o consumo de energia são consideradas para cada distância de enlace.

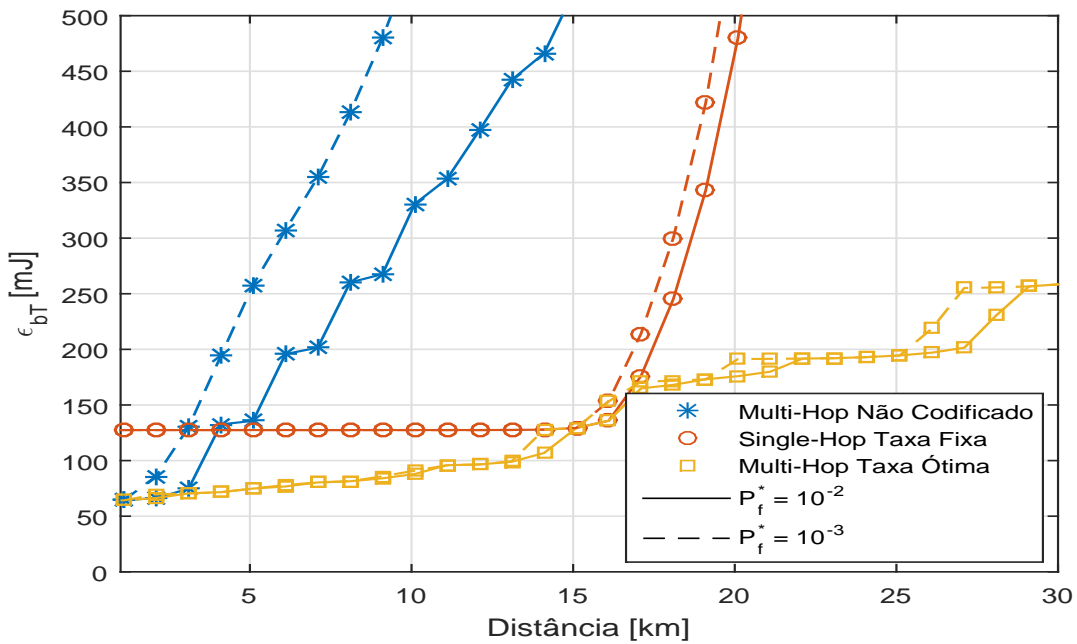


**Figura 18:** Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para  $\tau_{\max} = 1$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa de código fixa  $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código.

Analisando-se a Figura 18 percebe-se que uma grande quantidade de energia pode ser economizada quando se otimiza a taxa do código e o número de saltos. A figura também mostra que quanto menor é a FER alvo, maior é o consumo de energia. Já no esquema de

transmissão direta, o consumo de energia permanece quase constante até aproximadamente 13 km. Isso acontece devido à mínima potência de transmissão considerada, de acordo com a Tabela 3.

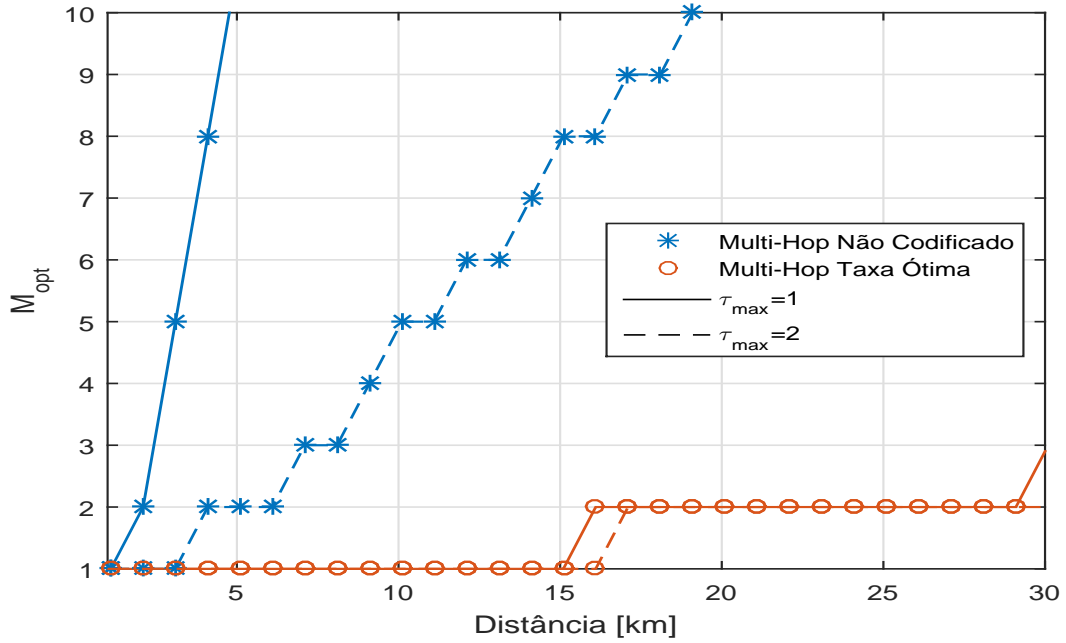
Um resultado semelhante, agora para o caso onde  $\tau_{\max} = 2$ , é mostrado na Figura 19, onde se percebe que o consumo total é um pouco menor e o consumo para diferentes FER alvo fica mais parecido, especialmente para os casos com taxa de código e número de saltos ótimos.



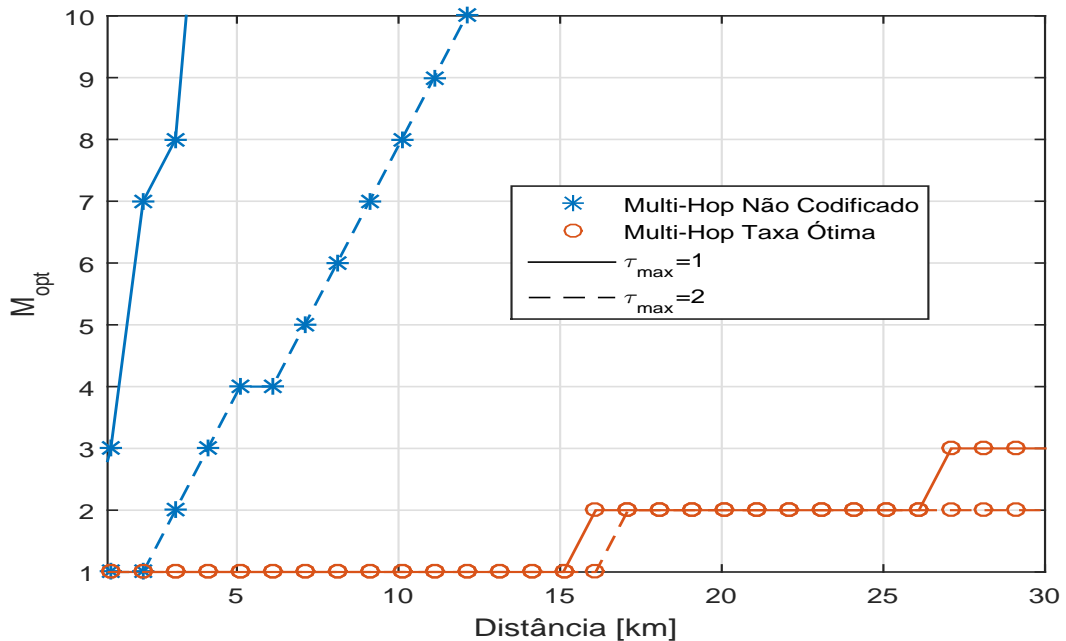
**Figura 19:** Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para  $\tau_{\max} = 2$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa de código fixa  $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código.

A seguir são apresentados resultados que mostram como a seleção do número de saltos e taxa do código variam com a FER alvo e com o número máximo de transmissões permitido. A Figura 20 mostra o número ótimo de saltos para os casos de transmissão não codificada e transmissão com taxa ótima do código, quando a FER alvo é  $P_f^* = 10^{-2}$ , para  $\tau_{\max} = 1$  e  $\tau_{\max} = 2$ . O número de saltos que minimiza o consumo de energia é relativamente alto e apresenta uma grande variação com  $\tau_{\max}$  quando transmissão não codificada é utilizada. No entanto, quando a transmissão com taxa ótima é utilizada o número de saltos que minimiza o consumo de energia é pequeno, no máximo  $M_{\text{opt}} = 3$  para esse caso, e apresenta uma variação muito pequena com  $\tau_{\max}$ . A Figura 21 mostra a mesma análise para FER alvo  $P_f^* = 10^{-3}$ . Os resultados são parecidos, mas com uma FER mais forte o número de saltos cresce mais rapidamente. Novamente a diferença entre  $\tau_{\max} = 1$  e  $\tau_{\max} = 2$  é pequena.

Lembrando que o número de saltos em uma rede de múltiplos saltos está diretamente



**Figura 20:** Número ótimo de saltos para  $\tau_{\max} = 1$  e  $\tau_{\max} = 2$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$ , para transmissão não codificada e com seleção da taxa ótima do código.

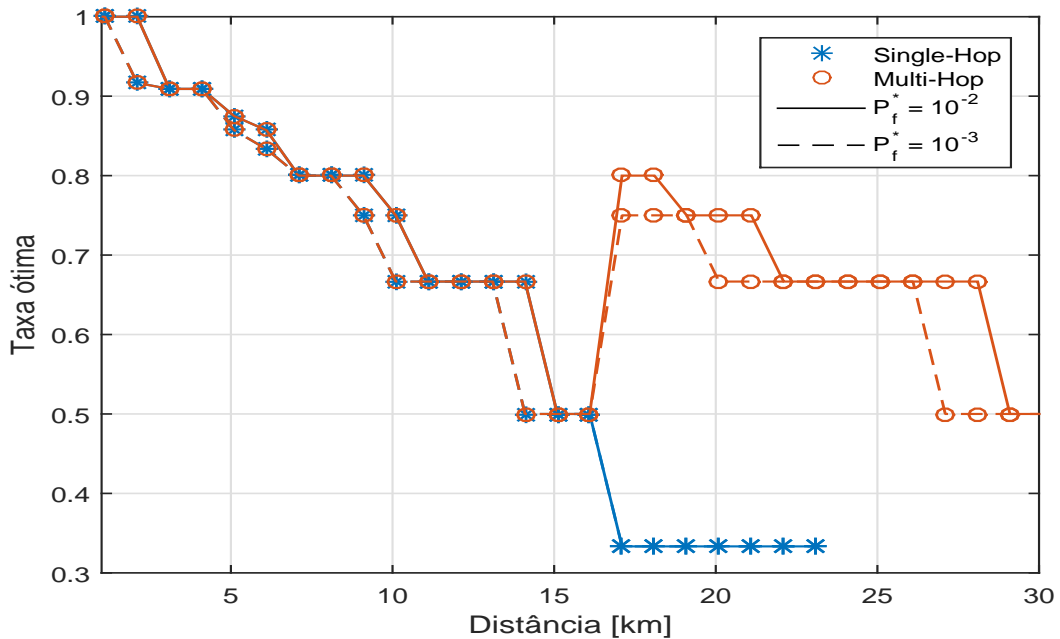


**Figura 21:** Número ótimo de saltos para  $\tau_{\max} = 1$  e  $\tau_{\max} = 2$ ,  $P_f^* = 10^{-3}$ , para transmissão não codificada e com seleção da taxa ótima do código.

relacionado com a latência da rede, vale a pena notar que um número alto de saltos pode afetar negativamente a latência da rede. Como a otimização feita visa minimizar o consumo total de energia não é possível, a princípio, garantir que o caso mais eficiente em termos de consumo de energia seja também a melhor solução em termos de latência da rede. Entretanto, a Figura 20

mostra que o número ótimo de saltos é pequeno quando a taxa do código também é otimizada, não sendo maior que  $M_{\text{opt}} = 2$  até a distância de 29 km entre a fonte e o destino. Portanto, apenas um salto é adicionado em relação ao esquema de transmissão direta, fazendo com que a latência aumente pelo tempo de processamento de apenas um nó *relay*.

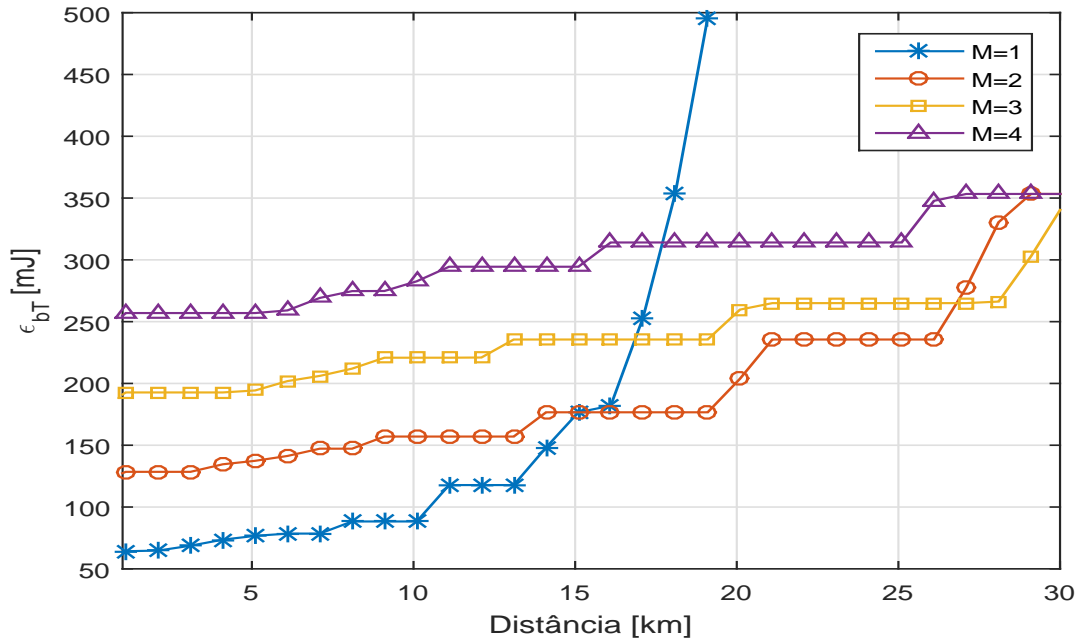
A Figura 22 mostra a seleção da taxa ótima do código para  $\tau_{\text{max}} = 2$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , para os esquemas de transmissão direta e múltiplos saltos. Fica claro que para o caso de múltiplos saltos o sistema pode operar com uma taxa mais alta, ou seja, quando o número de saltos aumenta também pode ser aumentada a taxa do código, o que é bom em termos de consumo de energia. A taxa do código varia muito pouco com a a FER alvo. É importante notar também que a taxa do código e o número de saltos são otimizados em conjunto. Portanto, é possível que, mesmo para uma FER alvo menor, a taxa ótima do código seja maior, desde que o número ótimo de saltos e a SNR de operação aumentem simultaneamente.



**Figura 22: Taxa ótima do código para  $\tau_{\text{max}} = 2$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$  e  $P_f^* = 10^{-3}$ , para transmissão single-hop e multi-hop.**

As Figuras 23 e 25 mostram o consumo de energia por bit transmitido com sucesso para diferentes números de saltos (Figura 23) e números máximos de tentativas de transmissão (Figura 25), com  $P_f^* = 10^{-3}$  e seleção da taxa ótima do código. As Figuras 24 e 26 mostram o consumo de energia por bit transmitido com sucesso para diferentes números de saltos (Figura 24) e números máximos de tentativas de transmissão (Figura 26), mas com  $P_f^* = 10^{-3}$  e seleção da taxa ótima do código.

A Figura 23 considera um caso onde  $\tau_{\text{max}} = 1$ , mostrando claramente que o número



**Figura 23:** Energia consumida por bit para diferentes números de saltos, para  $\tau_{\max} = 1$ ,  $P_f^* = 10^{-3}$ , e seleção da taxa ótima do código.

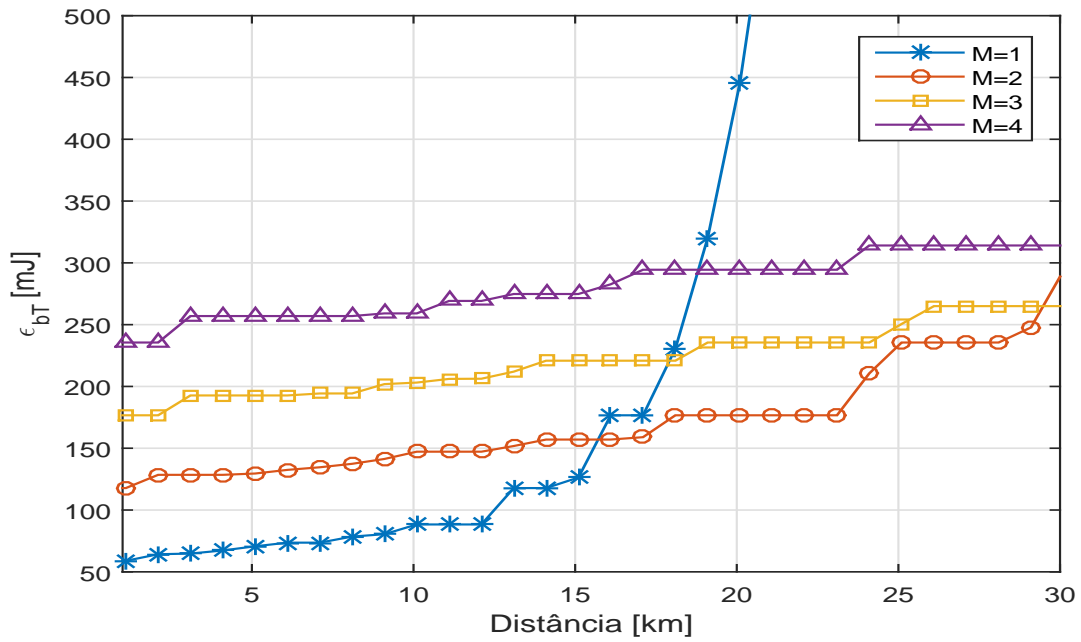
ótimo de saltos aumenta com a distância e o comportamento do consumo de energia é similar aquele previsto pela análise teórica e mostrado na Figura 12. Da mesma forma, a partir da Figura 25 observa-se que pequenas melhoras são obtidas quando se utiliza  $\tau_{\max} \geq 3$  quando o número de saltos é otimizado, especialmente para distâncias de enlace maiores.

Esse comportamento também é similar ao previsto na análise teórica e mostrado na Figura 14. A mudança da FER alvo altera muito pouco o comportamento do sistemas para esses casos.

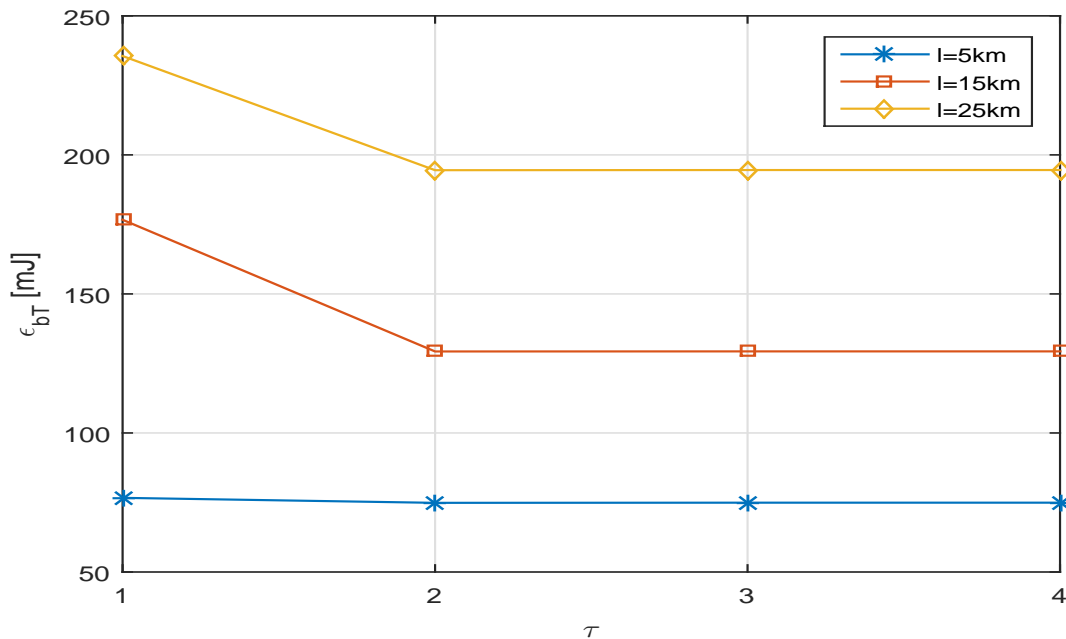
## 5.2 REDES SEM RESTRIÇÃO DE ATRASO

Agora considera-se o caso onde a comunicação não apresenta restrições de atraso, de forma que não há limitações no número de transmissões ( $\tau_{\max} \rightarrow \infty$ ) e a comunicação acontece sem erros.

A Figura 27 mostra a energia gasta por bit transmitido com sucesso para os três casos considerados anteriormente: esquema de múltiplos saltos com transmissão não codificada, esquema de transmissão direta com taxa de código fixa  $r = 0,5$ ; e esquema de múltiplos saltos com seleção da taxa ótima do código. Lembrando que também aqui a frequência de operação e a SNR são otimizadas para cada distância de enlace. Como no caso de comunicação com restrição de atraso, fica claro que a otimização da taxa do código em conjunto com o número



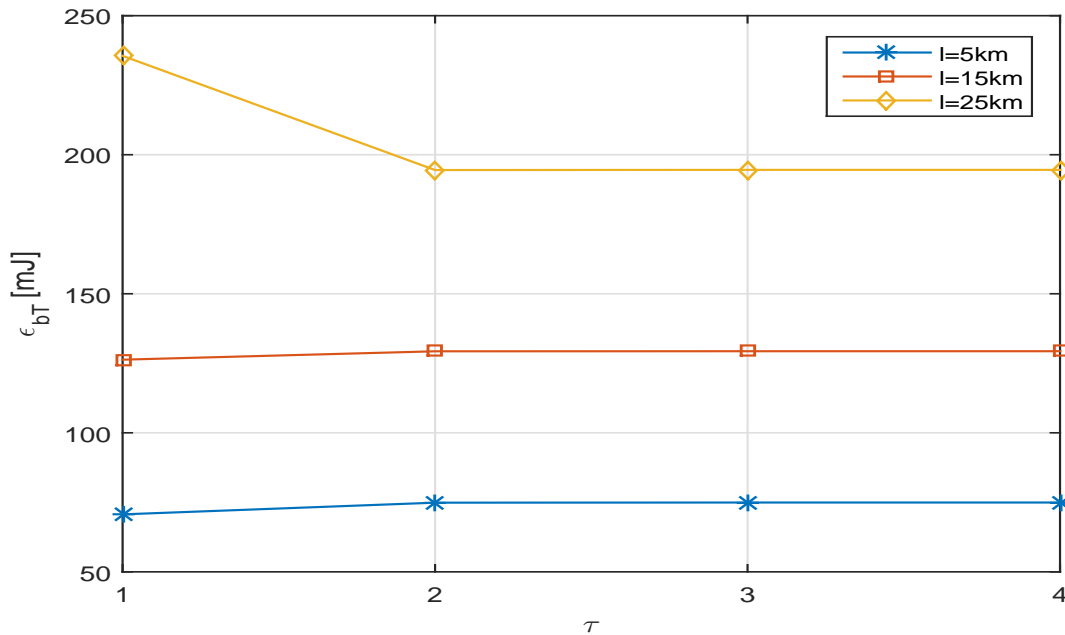
**Figura 24:** Energia consumida por bit para diferentes números de saltos, para  $\tau_{\max} = 1$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$ , e seleção da taxa ótima do código.



**Figura 25:** Energia consumida por bit para diferentes  $\tau_{\max}$ ,  $P_f^* = 10^{-3}$ , para seleção da taxa ótima do código e número ótimo de saltos.

de saltos leva a uma grande redução no consumo de energia. Mais ainda, analisando o número ótimo de saltos e a taxa ótima do código para o caso sem restrição de atraso, as conclusões gerais são basicamente as mesmas do cenário com restrição de atraso.

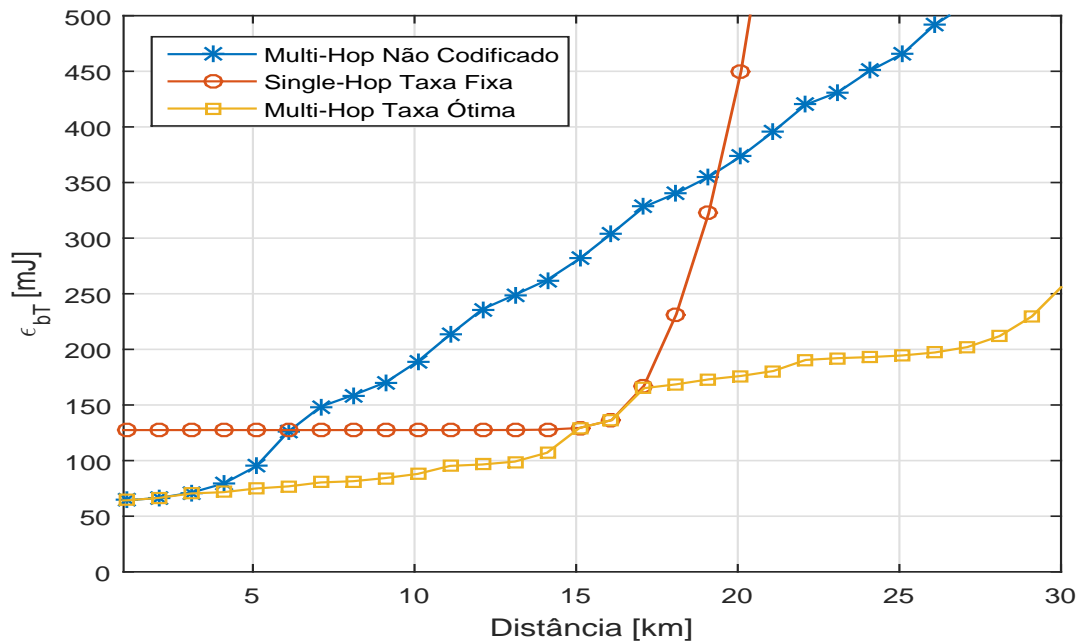




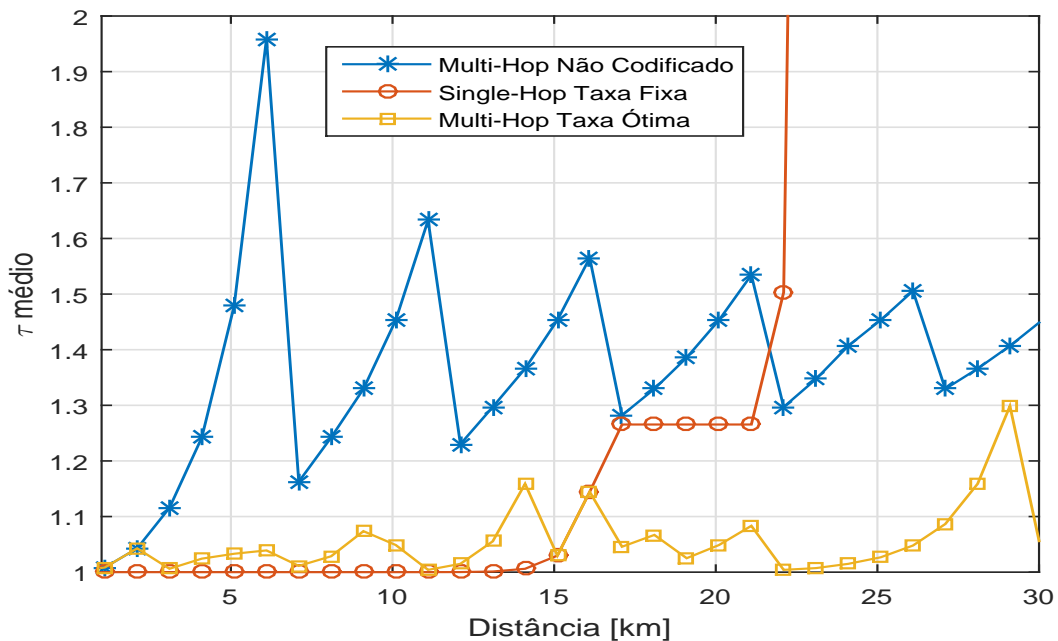
**Figura 26: Energia consumida por bit para diferentes  $\tau_{\max}$ ,  $P_f^* = 10^{-2}$ , para seleção da taxa ótima do código e número ótimo de saltos.**

Entretanto, diferentemente do caso de comunicação com restrição de atraso, aqui é importante analisar o número médio de tentativas de transmissão  $\bar{\tau}$  que garante uma comunicação sem erros. A Figura 28 mostra que no esquema de múltiplos saltos com seleção da taxa ótima do código o número médio necessário de transmissões para que um pacote seja recebido sem erros é, no máximo,  $\bar{\tau} = 1, 3$  para esse cenário. Esse resultado é muito interessante, uma vez que mesmo não havendo limite para o número de tentativas de transmissão, o atraso médio é bem pequeno, o que pode ser muito interessante em aplicações práticas.

Um comparação direta entre os dois cenários, com e sem restrições de atraso, pode não levar a resultados realistas, visto que no primeiro caso há uma FER alvo diferente de zero e um limite para o número de transmissões, enquanto que no segundo caso não há FER residual e o número de tentativas de transmissão é infinito. Entretanto, é possível dizer que se a FER residual tolerada for muito pequena, é melhor permitir o máximo de tentativas de transmissão possível, já que isso permite uma maior flexibilidade para a otimização dos diferentes parâmetros do sistema, como a taxa do código, número de saltos e SNR. Ademais, como na prática não é possível permitir infinitas retransmissões, os resultados mostram que um pequeno número de retransmissões pode ser suficiente, uma vez que o número médio de tentativas de transmissão é bem pequeno.



**Figura 27:** Energia total consumida por bit transmitido com sucesso para três casos: multi-hop não codificado, single-hop com taxa do código fixa  $r = 0,5$ , e multi-hop com seleção da taxa ótima do código. Rede sem restrição de atraso.



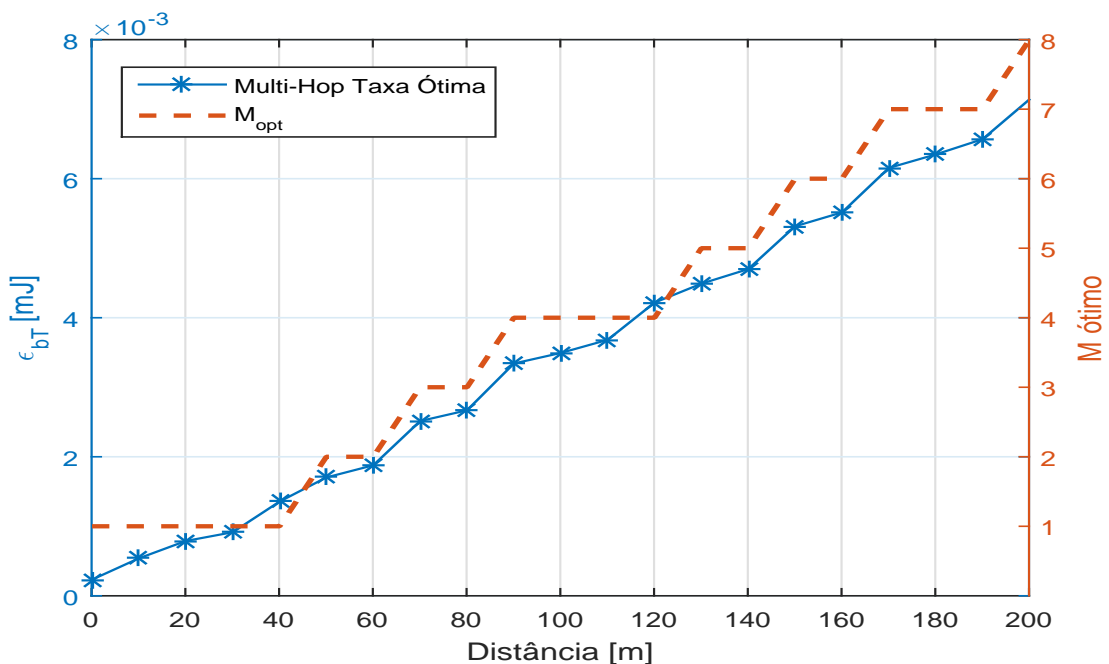
**Figura 28:** Número médio de tentativas de transmissão necessário para transmissão sem erros.

### 5.3 COMPARAÇÃO COM O CASO SEM FIO TERRESTRE

Uma questão interessante que aparece é se os parâmetros ótimos, como por exemplo o número de saltos, no cenário subaquático podem ser diretamente inferidos dos resultados

considerando o caso mais familiar da comunicação sem fio terrestre. A fim de responder a essa pergunta, realiza-se uma análise baseada em parâmetros típicos de redes de sensores sem fio terrestres, encontrados em (ROSAS et al., 2015), considerando modulação BFSK e desvanecimento Rayleigh, assumindo  $\tau_{\max} = 1$  e  $P_f^* = 10^{-2}$ . A Figura 29 mostra a energia consumida por bit transmitido com sucesso considerando o esquema de múltiplos saltos com seleção da taxa ótima do código, número de saltos e SNR que minimizam o consumo de energia. É interessante notar que o número ótimo de saltos para o caso sem fio terrestre pode ser muito maior que aquele para o caso subaquático (como mostrado na Figura 20). Isso se justifica pelo consumo da potência de transmissão e recepção dos dispositivos sem fio terrestres, bem menor que o do modem WHOI (FREITAG et al., 2005), tornado possível em termos de consumo de energia empregar vários saltos entre a fonte e o destino.

Esse resultado enfatiza a importância de se considerar as especificidades do cenário subaquático a fim de projetar adequadamente um sistema eficiente em termos de consumo de energia e que apenas inferir parâmetros da otimização de sistemas terrestres pode levar a resultados não ótimos no cenário subaquático.



**Figura 29:** Energia consumida por bit para  $\tau_{\max} = 1$  e  $P_f^* = 10^{-2}$ , para o caso de redes de sensores sem fio terrestres considerando transmissão multi-hop com taxa ótima do código, número ótimo de saltos e SNR ótima. A figura também mostra o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia para cada distância de enlace.

## 5.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo realizou-se uma análise numérica para determinar o consumo de energia por bit de informação em uma rede acústica subaquática de múltiplos saltos. A análise considerou o impacto da otimização do número de saltos e da taxa do código corretor de erros em conjunto com a SNR e frequência ótimas, além do número máximo de tentativas de transmissão.

Os resultados numéricos, que consideraram valores práticos de consumo para os diferentes circuitos envolvidos, validaram a análise teórica realizada no Capítulo 4, mostrando que o esquema de múltiplos saltos é mais eficiente em termos de consumo de energia que a transmissão direta. Além disso, os resultados demonstraram que um número pequeno de tentativas de transmissão é suficiente para alcançar uma redução considerável no consumo de energia em redes de múltiplos saltos, limitando o atraso médio por pacote transmitido, o que é muito interessante em aplicações reais.

Finalmente, comparando-se os resultados com o cenário mais conhecido das redes de sensores sem fio terrestres, observa-se que o número ótimo de saltos para o caso terrestre pode ser bem maior que para o caso acústico subaquático, o que mostra que uma modelagem adequada para o cenário subaquático é fundamental para se obter um projeto eficiente em termos de consumo de energia.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta Tese de Doutorado, foi proposto um modelo de consumo de energia para redes acústicas subaquáticas. O modelo leva em consideração as especificidades do ambiente subaquático, como a pobre propagação das ondas eletromagnéticas, que leva à escolha de ondas acústicas para comunicação na maioria das aplicações, a dependência da largura de banda do canal acústico subaquático com a perda de percurso, que varia tanto com a distância quanto com a frequência; e o ruído, que tem como principais fontes a turbulência, a navegação, a ondulação produzida pelo vento e a temperatura.

O desvanecimento, resultado do multipercurso, normalmente modelado pelas distribuições Rayleigh e Rice nas transmissões terrestres, neste trabalho foi modelado pela distribuição K, que melhor representa a severidade do ambiente subaquático.

O modelo considera uma rede subaquática linear de múltiplos saltos e a possibilidade de retransmissões. A fim de obter o menor consumo de energia, a SNR e a frequência de operação foram otimizadas e também foi considerado o uso de códigos convolucionais, cuja taxa ótima que leva ao menor consumo também foi determinada.

Levando em consideração que o atraso devido à baixa velocidade de propagação das ondas acústicas pode ser relevante em muitas aplicações, foram analisados cenários com e sem restrição de atraso. No primeiro caso avaliou-se o consumo de energia quando retransmissões não são permitidas ou devem ser limitadas e, portanto, uma FER residual deve ser tolerada. No segundo caso foram permitidas infinitas retransmissões, até que um pacote fosse recebido sem erros.

Visando prever o comportamento do modelo proposto, uma análise teórica foi desenvolvida para os cenários considerados. Inicialmente foi analisado o número ótimo de saltos que minimiza o consumo de energia por bit de informação transmitido com sucesso e na sequência o impacto do número de tentativas de transmissão foi considerado. Para que uma análise tratável matematicamente pudesse ser feita a fim melhor analisar o papel de outros parâmetros do sistema, foi considerada transmissão não codificada. Os resultados dessa análise

teórica indicaram que a otimização do número de saltos é fundamental para minimizar o consumo de energia para médias e longas distâncias, enquanto o aumento no número médio de tentativas de transmissão tem um impacto menor no consumo de energia.

Em seguida uma extensa análise numérica foi realizada. A escolha pela solução numérica deveu-se à complexidade da otimização, devido ao grande número de variáveis, que impossibilitaria uma solução analítica completa. Os cálculos foram realizados para várias distâncias de enlace e consideraram dois cenários: com limitação de atraso e sem limitação de atraso. O efeito da otimização da taxa do código e do número de saltos foi analisado, bem como o número máximo de retransmissões. Em todos os casos, a frequência de operação e a SNR que minimizam o consumo de energia também foram consideradas.

Os resultados numéricos, que consideraram valores práticos de consumo para os diferentes circuitos envolvidos, validaram a análise teórica, mostrando que o esquema de múltiplos saltos é mais eficiente em termos de consumo de energia que a transmissão direta. Além disso, os resultados demonstraram que um número pequeno de tentativas de transmissão é suficiente para alcançar uma redução considerável no consumo de energia em redes de múltiplos saltos, limitando o atraso médio por pacote transmitido, o que é muito interessante em aplicações reais.

Finalmente, comparando-se os resultados com o cenário mais conhecido das redes de sensores sem fio terrestres, observou-se que o número ótimo de saltos para o caso terrestre pode ser bem maior que para o caso acústico subaquático, confirmando que uma modelagem adequada para o cenário subaquático é fundamental para se obter um projeto eficiente em termos de consumo de energia.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

### 6.1.1 ANÁLISE DE OUTROS PROTOCOLOS ARQ

Uma extensão do trabalho realizado até aqui é analisar outros protocolos ARQ, como Go Back N ou Selective Repeat, para diminuir o consumo do canal de retorno.

### 6.1.2 USO DE OUTRAS MODULAÇÕES

Uma outra extensão imediata desse é a análise da eficiência energética em redes acústicas subaquáticas considerando o uso de modulações de ordem superior. Além do uso da modulação BFSK que foi considerada neste trabalho, analisar o desempenho de modulações

de mais alta ordem pode apresentar resultados interessantes em termos de consumo de energia e, ao mesmo tempo, a otimização da ordem de modulação pode permitir alcançar taxas de bits mais altas para a mesma largura de banda.

Resultados iniciais, considerando o uso de modulação (M-DPSK) em um enlace direto, foram obtidos e apresentados em

- SOUZA, F. A. de et al. Modulation Order Optimization for Energy Efficient Underwater Acoustic Communications. In: OCEANS16 MTS/IEEE Monterey.

Os resultados mostraram que, a partir da otimização da ordem de modulação é possível minimizar ainda mais o consumo de energia e, ao mesmo tempo, atingir taxas de bits mais altas, especialmente para distâncias de enlace curtas. Esse ganho se dá pelo domínio do consumo dos componentes eletrônicos no consumo total de energia para distâncias mais curtas.

Uma próxima etapa, portanto, seria a análise da otimização da ordem de modulação em redes subaquáticas de múltiplos saltos.

### 6.1.3 OTIMIZAÇÃO DO TAMANHO DE PACOTES

Outra proposta de continuidade é o estudo do impacto no consumo de energia em redes acústicas subaquáticas considerando a otimização do tamanho do payload de códigos convolucionais.

O trabalho

- MENON, M. et al. Eficiência Energética e Otimização do Tamanho do Payload em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Códigos Convolucionais . Em: XXXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBrt2016.

apresenta resultados da otimização do tamanho do payload em WSN visando eficiência energética. Estudou-se o impacto em eficiência energética da otimização do tamanho do payload de códigos convolucionais empregando HARQ em uma rede de sensores sem fio. O modelo de simulações utilizado considera o consumo de energia da transmissão de pacotes, consumo dos circuitos eletrônicos associados aos sinais de RF e consumo em banda base para codificação e decodificação dos pacotes. Além disso, foram considerados diferentes cenários em que se permite otimizar SNR e taxa de código, aliada à adaptação do tamanho do payload. Os resultados mostram que existe um tamanho de payload ótimo que maximiza a eficiência energética, que depende da distância de transmissão e do tipo de canal analisado.

Essa análise pode ser estendida para o cenário subaquático utilizando o modelo proposto neste trabalho.

#### 6.1.4 USO DE OUTROS CÓDIGOS CORRETORES DE ERROS

Uma outra extensão do trabalho seria avaliar o desempenho de outros códigos corretores de erros. Neste trabalho considerou-se o uso de códigos convolucionais, que são utilizados em equipamentos como o modem WHOI. Em

- HAYASHIDA, D. et al. Energy Consumption Analysis of Underwater Acoustic Networks Using Fountain Codes. In: OCEANS16 MTS/IEEE Monterey.

foi investigado o consumo de energia em redes de sensores subaquáticas usando códigos fontanais, isto é, quando o transmissor codifica um grupo de quadros, cada um deles codificado com códigos convolucionais, e transmite esse conjunto de quadros de uma única vez. O modelo de consumo de energia foi estendido a fim de otimizar o número de pacotes adicionais que devem ser transmitidos com códigos fontanais assumindo uma FER. Os resultados mostraram que o uso de códigos fontanais pode diminuir em até trinta por cento o consumo de energia, especialmente em distâncias de enlace maiores.

A análise para outros códigos corretores de erros pode ser também incluída no modelo de consumo de energia apresentado.

#### 6.1.5 CODIFICAÇÃO DE REDE

A técnica de codificação de rede é relativamente recente (AHLWEDE et al., 2000). A codificação de rede permite, em um cenário multi-usuário, que a informação de usuários diferentes seja codificada em um único pacote e a decodificação realizada a partir da recepção de pacotes linearmente independentes, melhorando o *throughput* e adicionando redundância, o que melhora a correção de erros (REBELATTO et al., 2010).

Nos sistemas cooperativos com codificação de rede, os nós cooperadores transmitem combinações lineares das informações recebidas e decodificadas. Essas combinações são realizadas sobre um campo finito. A técnica com transmissão de combinações lineares trabalha para que com cada mensagem seja transmitida por uma quantidade maior de percursos independentes. Isso possibilita que uma maior ordem de diversidade possa ser obtida.

Os benefícios do uso da codificação de rede em cenários subaquáticos são objeto de estudos ainda mais recentes (CHIRDCHOO et al., 2010; MANVILLE et al., 2013) e o impacto



na eficiência energética das redes acústicas subaquáticas é um campo aberto para exploração. Nesse sentido, propomos como uma sequência do trabalho o estudo, do ponto de vista da eficiência energética, do uso da codificação de rede nos cenários subaquáticos multi-usuário.

## REFERÊNCIAS

- AHLWEDE, R. et al. Network information flow. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, Jul 2000. ISSN 0018-9448.
- ANDONOVIC, I. Evolution and applications of wireless sensor networks. In: **Communications and Mobile Computing, 2009. CMC '09. WRI International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1, p. 4–5.
- BEGIN, G.; HACCOUN, D.; PAQUIN, C. Further results on high-rate punctured convolutional codes for Viterbi and sequential decoding. **IEEE Trans. Commun.**, v. 38, n. 11, p. 1922–1928, Nov. 1990. ISSN 0090-6778.
- BENSON, B. et al. Design of a low-cost, underwater acoustic modem for short-range sensor networks. In: **OCEANS 2010 IEEE - Sydney**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–9.
- BENSON, C.; RYAN, M.; FRATER, M. On the benefits of high absorption in practical multi-hop networks. In: **IEEE OCEANS**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6.
- BOCHAROVA, I.; KUDRYASHOV, B. Rational rate punctured convolutional codes for soft-decision Viterbi decoding. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 43, n. 4, p. 1305–1313, Jul. 1997. ISSN 0018-9448.
- CHANG, J.-H.; TASSIULAS, L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In: **INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 22–31 vol.1. ISSN 0743-166X.
- CHEN, Y. D. et al. A channel-aware depth-adaptive routing protocol for underwater acoustic sensor networks. In: **OCEANS 2014 - TAIPEI**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- CHEON, J.; CHO, H.-S. A delay-tolerant ofdma-based mac protocol for underwater acoustic sensor networks. In: **Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4.
- CHIRDCHOO, N.; CHITRE, M.; SOH, W.-S. A study on network coding in underwater networks. In: **OCEANS 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8.
- EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H. T.; OKTUG, S. A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 13, n. 3, p. 487–502, Third 2011. ISSN 1553-877X.
- FREITAG, L. et al. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In: **IEEE OCEANS**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1086–1092 Vol. 2.
- FREITAG, L.; SINGH, S. **Multi-User Frequency-Hopping Underwater Acoustic Communication Protocol**. [S.l.], May 2000.

- GALLIMORE, E. et al. The whoi micromodem-2: A scalable system for acoustic communications and networking. In: **OCEANS 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7.
- GAO, M.; FOH, C. H.; CAI, J. On the selection of transmission range in underwater acoustic sensor networks. **Sensors**, v. 12, n. 4, p. 4715–4729, 2012. ISSN 1424-8220.
- GKIKOPOULI, A.; NIKOLAKOPOULOS, G.; MANESIS, S. A survey on underwater wireless sensor networks and applications. In: **Control Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1147–1154.
- GRADSHTEIN, I.; RYZHIK, I.; JEFFREY, A. **Table of Integrals, Series, and Products**. 7th. ed. [S.l.]: Academic Press, 2000. ISBN 9780122947575.
- HEIDEMANN, J.; STOJANOVIC, M.; ZORZI, M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society, v. 370, n. 1958, p. 158–175, 2012.
- HEIDEMANN, J. et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 1, p. 228–235. ISSN 1525-3511.
- KAM, C. et al. Frequency selection and relay placement for energy efficiency in underwater acoustic networks. **IEEE J. Ocean. Eng.**, v. 39, n. 2, p. 331–342, Apr. 2014. ISSN 0364-9059.
- KAR, K. et al. Routing for network capacity maximization in energy-constrained ad-hoc networks. In: **INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 673–681 vol.1. ISSN 0743-166X.
- KAUSHAL, H.; KADDOUM, G. Underwater optical wireless communication. **IEEE Access**, v. 4, p. 1518–1547, 2016. ISSN 2169-3536.
- LAPIERRE, G. et al. Design of a communication protocol for underwater acoustic modems and networks. In: **OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 4, p. 2220–2226 vol.4.
- LIN, S.; COSTELLO, D. J. **Error Control Coding: Fundamentals and Applications**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2004.
- LLORET, J. Underwater sensor nodes and networks. **Sensors**, v. 13, n. 9, p. 11782–11796, 2013. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/11782>>.
- LUCANI, D.; STOJANOVIC, M.; MEDARD, M. On the relationship between transmission power and capacity of an underwater acoustic communication channel. In: **OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.
- MANVILLE, C. et al. Network coding in underwater sensor networks. In: **OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.
- MOLINS, M.; STOJANOVIC, M. Slotted fama: a mac protocol for underwater acoustic networks. In: **OCEANS 2006 - Asia Pacific**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–7.

- NOWSHEEN, N.; BENSON, C.; FRATER, M. A high data-rate, software-defined underwater acoustic modem. In: **OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. ISSN 0197-7385.
- PARK, M. K.; RODOPLU, V. Uwan-mac: An energy-efficient mac protocol for underwater acoustic wireless sensor networks. **Oceanic Engineering, IEEE Journal of**, v. 32, n. 3, p. 710–720, July 2007. ISSN 0364-9059.
- PARTAN, J.; KUROSE, J.; LEVINE, B. N. A survey of practical issues in underwater networks. In: **Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2006. (WUWNet '06), p. 17–24. ISBN 1-59593-484-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161045>>.
- PROAKIS, J. **Digital Communications**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001. ISBN 9780072321111.
- PROAKIS, J. et al. Shallow water acoustic networks. **IEEE Commun. Mag.**, v. 39, n. 11, p. 114–119, Nov. 2001. ISSN 0163-6804.
- RAFATI, A.; LOU, H.; XIAO, C. Soft-decision feedback turbo equalization for LDPC-coded MIMO underwater acoustic communications. **IEEE J. Ocean. Eng.**, v. 39, n. 1, p. 90–99, Jan 2014. ISSN 0364-9059.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2002.
- REBELATTO, J. et al. Generalized distributed network coding based on nonbinary linear block codes for multi-user cooperative communications. In: **Information Theory Proceedings (ISIT), 2010 IEEE International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 943–947.
- RICE, J. et al. Evolution of seaweb underwater acoustic networking. In: **OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 2007–2017 vol.3.
- ROSAS, F. et al. Optimizing the code rate for achieving energy-efficient wireless communications. In: **IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 775–780.
- ROSAS, F.; OBERLI, C. Modulation and SNR optimization for achieving energy-efficient communications over short-range fading channels. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 11, n. 12, p. 4286–4295, Dec. 2012. ISSN 1536-1276.
- ROSAS, F. et al. Optimizing the code rate of energy-constrained wireless communications with HARQ. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, PP, n. 99, p. 1–1, Aug. 2015. ISSN 1536-1276.
- SANCHEZ, A. et al. A low cost and high efficient acoustic modem for underwater sensor networks. In: **OCEANS, 2011 IEEE - Spain**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–10.
- SÁNCHEZ, A. et al. An ultra-low power and flexible acoustic modem design to develop energy-efficient underwater sensor networks. **Sensors**, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 6, p. 6837–6856, 2012.
- SENDRA, S. et al. Underwater acoustic modems. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 11, p. 4063–4071, June 2016. ISSN 1530-437X.

- SHAH, R.; RABAEY, J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: **Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 350–355 vol.1.
- SHAHAPUR, S. S.; KHANAI, R. Underwater sensor network at physical, data link and network layer - a survey. In: **Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1449–1453.
- SMITH, S.; PARK, J.; NEEL, A. A peer-to-peer communication protocol for underwater acoustic communication. In: **OCEANS '97. MTS/IEEE Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, p. 268–272 vol.1.
- SOUZA, F. A. de et al. Optimizing the number of hops and retransmissions for energy efficient multi-hop underwater acoustic communications. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 10, p. 3927–3938, May 2016. ISSN 1530-437X.
- SOUZA, F. A. de et al. Code rate, frequency and SNR optimization for energy efficient underwater acoustic communications. In: **IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 6351–6356.
- SOUZA, F. A. de et al. Code rate optimization for energy efficient delay constrained underwater acoustic communications. In: **IEEE OCEANS Genova**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.
- SOZER, E.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. Underwater acoustic networks. **Oceanic Engineering, IEEE Journal of**, v. 25, n. 1, p. 72–83, Jan 2000. ISSN 0364-9059.
- SÖZER, E. M.; STOJANOVIC, M. Reconfigurable acoustic modem for underwater sensor networks. In: **ACM. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks**. [S.l.], 2006. p. 101–104.
- STOJANOVIC, M. Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel. In: **IEEE OCEANS**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 68–73 Vol. 1.
- STOJANOVIC, M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. In: **ACM Int. Workshop on Underwater Netw. (WUWNet)**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 41–47. ISBN 1-59593-484-7.
- SU, R.; VENKATESAN, R.; LI, C. Balancing between robustness and energy consumption in underwater acoustic sensor networks. In: **IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1048–1053.
- URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound 3rd Edition**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1996.
- WANG, C.; FANG, Y.; ZHANG, H. On optimizing the transmission power of multi-hop underwater acoustic networks. In: **IEEE Int. Conf. Netw. (ICON)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 120–124. ISSN 1556-6463.
- WANG, K. et al. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks. **IEEE Sensors J.**, PP, n. 99, p. 1–1, May 2015. ISSN 1530-437X.

XIE, P.; CUI, J.-H. R-mac: An energy-efficient mac protocol for underwater sensor networks. In: **Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 187–198.

YANG, W.-B.; YANG, T. C. M-ary frequency shift keying communications over an underwater acoustic channel: Performance comparison of data with models. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 120, n. 5, p. 2694–2701, Nov. 2006.

ZORITA, E. V.; STOJANOVIC, M. Space-frequency block coding for underwater acoustic communications. **IEEE J. Ocean. Eng.**, v. 40, n. 2, p. 303–314, April 2015. ISSN 0364-9059.

ZORZI, M. et al. Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 26, n. 9, p. 1754–1766, Dec. 2008. ISSN 0733-8716.