

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

DANIEL HAYASHIDA SIMÃO

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES
SUBAQUÁTICAS UTILIZANDO CÓDIGOS FONTANAIS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2017

DANIEL HAYASHIDA SIMÃO

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES
SUBAQUÁTICAS UTILIZANDO CÓDIGOS FONTANAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Sens Chang

CURITIBA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S588a Simão, Daniel Hayashida
2017 Análise do consumo energético em redes subaquáticas
utilizando códigos fontanais / Daniel Hayashida Simão.--
2017.
31 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas
Elétricos. Área de Concentração: Automação e Sistemas
de Energia, Curitiba, 2017.

Bibliografia: f. 30-31.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Acústica subaquática.
3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Sistemas de
transmissão de dados. 5. Códigos corretores de erros
(Teoria da informação). 6. Comutação de pacotes (Transmissão
de dados). 7. Processamento de sinais - Técnicas digitais.
8. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. I. Brante,
Glauber Gomes de Oliveira, orient. II. Chang, Bruno Sens,
coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.31

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR

Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

Título da Dissertação Nº. _____

Análise do Consumo Energético em Redes Subaquáticas Utilizando Códigos Fontanais

por

Daniel Hayashida Simão

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

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Sens Chang (UTFPR)

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA – Área de Concentração: **Automação e Sistemas de Energia** do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia – PPGSE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 10h do dia 06 de fevereiro 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Marcos Tomio Kakitani
(UFSJ)

Prof. Dr. Ohara Kerasauskas Rayel
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Eduardo Félix Ribeiro Romanelli
(Coordenador do PPGSE)

RESUMO

HAYASHIDA, Daniel. ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO EM REDES SUBAQUÁTICAS UTILIZANDO CÓDIGOS FONTANAIS. 31 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O presente trabalho aborda a aplicação de códigos fontanais em redes subaquáticas. Tais redes transmitem dados abaixo da água fazendo uso de sinais acústicos e possuem diversas aplicações. No entanto, é sabido que esse tipo de rede é caracterizado por uma baixa velocidade de propagação e largura de banda menor que as redes que operam em meios de transmissão mais conhecidos, tais como a transmissão sem fio via ondas de rádio frequência, resultando num maior atraso na entrega de pacotes. Para tentar minimizar estes atrasos e aumentar a eficiência energética das redes subaquáticas, o trabalho otimizou o sistema de transmissão inserindo um código corretor de erros fontanal no transmissor de mensagens. Dentro desse contexto, foi necessário modelar o consumo energético necessário para a transmissão correta de pacotes de dados em redes subaquáticas utilizando códigos fontanais. Dentre os resultados do trabalho, o mais relevante conclui que o uso dos códigos fontanais é capaz de reduzir em até 30% o consumo de energia quando a distância de transmissão é de 20 km para o caso com a taxa de erro de quadro alvo (FER) de $P_o = 10^{-5}$, e em até 25% para a FER alvo de $P_o = 10^{-3}$.

Palavras-chave: Redes Subaquáticas, Eficiência Energética, Consumo Energético, Canal Acústico, Código Corretor de Erro, Códigos Fontanais

ABSTRACT

HAYASHIDA, Daniel. Energy Consumption Analysis of Underwater Acoustic Networks Using Fountain Codes. 31 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The present work employs fountain codes in an underwater network, in which data is transmitted using acoustic signals and has many applications. However, underwater networks are usually characterized by low propagation speed and smaller bandwidth than networks that use radio frequency signals, resulting in larger transmission delays. Then, aiming at minimizing the delays and increasing the energy efficiency of underwater networks, the present work employs fountain error-correcting codes at the transmitter. To that end, it was first necessary to model the energy consumption of a success data packet transmission in an underwater network using fountain codes. Our results show that the use of fountain codes is able to reduce up to 30% of energy consumption when the transmission distance is of 20 km for the case with a target frame error rate (FER) of $P_o = 10^{-5}$, and 25% for the same distance with a target FER of $P_o = 10^{-3}$.

Keywords: Underwater Networks, Energy Efficiency, Energy Consumption, Acoustic Channel, Error-Correcting Code, Fountain Codes

LISTA DE SIGLAS

ARQ	Automatic repeat request (Pedido automático de repetição)
ECC	Error-correcting codes (Código corretor de erros)
SNR	Signal-to-noise ratio (Relação sinal-ruído)
BFSK	Binary frequency-shift keying (Modulação por chaveamento de frequência binário)
AN	Produto formado pela atenuação e ruído
BER	Bit error rate (Taxa de erro de bit)
FER	Frame error rate (Taxa de erro de quadro)
APU	Arithmetic Processing Unit (Unidade de processamento aritmético)

LISTA DE SÍMBOLOS

$10\kappa \log_{10} l$	Perda de espalhamento
l	Distância entre os nós
κ	Propagação geométrica
$a(f)$	Coefficiente de absorção
f	Frequência em kHz
A_0	Constante de normalização de unidades
N_t	Ruído referente a turbulência
N_s	Ruído referente ao transporte
N_w	Ruído referente as ondas geradas pelo vento
N_{th}	Ruído térmico
$A(l, f)$	Atenuação
$N(f)$	Ruído
$\bar{\gamma}(l, f)$	SNR
$P_t(l, f)$	Potência acústica
B	Largura de banda
$f_o(l)$	Frequência ótima
ν	Parâmetro de forma
α	Parâmetro de escala
$K_{\nu-1}$	Função de Bessel
$\Gamma(\nu)$	Função Gamma
$E_b = \frac{\bar{\gamma}}{R_b}$	Energia gasta por bit
R_b	Taxa de bit
n	Número de bits codificados
k	Bits de informação
L	Taxa de leitura
β_d	Carga de informação dos códigos
d_{free}	Distância mínima do código
ϵ_{enc}	Energia usada pelo codificador
$P_{el,tx}$	Consumo da banda de base e componentes eletrônicos
P_{PA}	Consumo de potência do amplificador acústico
T_b	Tempo médio de transmissão por bit
ϕ	Eficiência total do conjunto formado pelo amplificador e pelo transdutor
ϵ_{dec}	Energia gasta para decodificar
$P_{el,rx}$	Potência consumida pela banda de base de transmissão
P_o	FER alvo
P_s	Probabilidade de sucesso dos códigos fontanais
ϕ	Eficiência do transdutor PA
M_l	Margem de enlace
\hat{N}	Número de pacotes extras
ν	Parâmetro da distribuição K

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos Específicos	10
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2	CARACTERÍSTICAS DO CANAL	12
2.1	ATENUAÇÃO NO CANAL SUBAQUÁTICO	14
2.2	RUÍDO	14
2.3	RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)	16
2.4	DESVANECIMENTO	17
3	MÉTODO PROPOSTO	19
3.1	MODELAGEM DA BER E FER	19
3.2	MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA	20
3.3	SNR ÓTIMA	22
3.4	CÓDIGOS FONTANAIS	22
4	RESULTADOS	24
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	28
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

A comunicação subaquática é uma área de recente interesse no segmento de redes de sensores. Derivada de sensores terrestres, suas aplicações são conhecidas e ainda possuem grandes desafios (HEIDEMANN et al., 2006). As comunicações subaquáticas estão envolvidas basicamente com o monitoramento de áreas do oceano (PROAKIS et al., 2001). No caso do monitoramento ambiente, a abordagem mais tradicional se caracteriza por posicionar os sensores no fundo do oceano para coletar dados, recolher os sensores e analisar os dados coletados. Os maiores problemas com essa abordagem são os longos períodos entre a coleta e análise dos dados, além da perda de dados com as falhas dos equipamentos. Para sistemas em tempo real, a alternativa é conectar os dispositivos através de sinais sem fio, formando assim uma rede (SOZER et al., 2000).

Inicialmente implantadas com base no desenvolvimento de redes de sensores terrestres, descobriu-se que as redes subaquáticas necessitam de soluções específicas para o ambiente subaquático (DAVIS; CHANG, 2012). Uma das principais limitações destas redes é a baixa eficiência das ondas de rádio na transmissão subaquática; por isso, os sensores subaquáticos passaram a usar sinais acústicos na transmissão. A transmissão das ondas acústicas, por sua vez, possui importantes diferenças em relação às ondas eletromagnéticas utilizadas em redes terrestres, tais como a baixa velocidade de propagação, frequência dependente da atenuação e ruído, largura de banda limitada, ruído e desvanecimento mais severos, e maior taxa de perda de pacotes (STOJANOVIC, 2006; YANG; YANG, 2006).

Com o desenvolvimento de equipamentos específicos para uso em cenários subaquáticos, as redes de sensores subaquáticos podem ser usadas para diversas aplicações, tais como o monitoramento do ambiente, assistência de navegação, vigilância tática, uso militar e monitoramento em tempo real para a prevenção de desastres naturais (GKIKOPOULI et al., 2012). Os sensores subaquáticos são normalmente alimentados através de bateria; isto faz com que o desenvolvimento e a topologia das redes de sensores devam levar em conta o fornecimento de energia, uma vez que a troca de bateria pode ser um grande problema se tratando de ambientes subaquáticos, considerando também o tempo e o custo. Portanto, a

energia em aplicações subaquáticas e a diminuição da energia requerida por bit transmitido com sucesso é um ponto muito importante (PROAKIS et al., 2001).

A propagação neste ambiente tem um grande impacto no consumo energético por cada bit de informação transmitido com sucesso. Nesse sentido, muitos desafios chegam junto com o uso de ondas acústicas para a comunicação de dados em ambientes subaquáticos (URICK, 1996). Nos modelos de comunicação sem fio terrestres são utilizados comumente as distribuições de Rayleigh e Rice para modelar o efeito do desvanecimento, sendo que a distribuição Rayleigh modela um cenário mais severo (RAPPAPORT, 2002). Não existe uma distribuição que seja unânime e que possa ser aplicada em todos os cenários subaquáticos (YANG; YANG, 2006). Para alguns canais subaquáticos o desvanecimento pode ser modelado pela distribuição K, cujos efeitos de propagação multicaminhos são ainda mais severos que o Rayleigh. Além disso, a baixa velocidade de propagação das ondas acústicas implica em atrasos em transmissões de longa distância, aumentando consideravelmente a latência e limitando a taxa de transferência (STOJANOVIC, 2006).

Dentro do contexto das redes subaquáticas e suas limitações, alguns trabalhos propuseram algumas soluções tanto para sanar as ineficiências encontradas nesse modelo, quanto para melhorar a eficiência energética do processo. Para superar o problema de lentidão na transmissão de pacotes, os autores em (RAMEEZ; STOJANOVIC, 2013) substituíram o modelo convencional de repetição de pacotes (ARQ) (do inglês *automatic repeat request*) por um modelo que usa controle de potência e controle de taxa. Os autores concluíram que essa alternativa ajuda a superar o efeito do desvanecimento, enquanto minimiza a energia média por bit transmitido com sucesso. O modelo ARQ pode não ser eficiente em redes subaquáticas porque o consumo de energia é muito elevado e o atraso pode ser maior, o que é indesejado em comunicações acústicas.

Outro trabalho realizado abordou o gasto energético para transmitir um bit corretamente em uma rede sem fio levando em consideração o uso de código corretores de erro para otimizar o sistema de transmissão, onde códigos corretores de erro foram utilizados (ECC, do inglês *error-correcting codes*) para tentar reduzir o consumo energético na transmissão (ROSAS et al., 2014). No entanto, a própria introdução dos códigos corretores de erro acarreta em consumo de energia adicional no transmissor e no receptor. Portanto, há uma relação de otimização a ser estudada envolvendo o ganho de eficiência energética devido ao maior poder de correção de erros, e o gasto de energia em se introduzir tais códigos corretores.

Por sua vez, os códigos fontanais, objeto fundamental no presente trabalho, foram introduzidos em (LIVA et al., 2010) como uma possível solução na entrega de informação de

transmissão em redes *multicast*, onde o codificador fontanal é capaz de produzir uma quantidade indeterminada de símbolos codificados, também conhecidos como símbolos de saída. Diferente dos códigos corretores de erro tradicionais, como os abordados em (ROSAS et al., 2014), os códigos fontanais não tem uma taxa de codificação fixa, isto é, uma relação fixa entre o número de bits de informação e o número de bits de redundância. Os códigos fontanais tentam reduzir a taxa de erro de quadro (FER, do inglês *frame error rate*) codificando um grupo de M pacotes em $N \geq M$ pacotes. Dessa forma, a probabilidade de sucesso dos códigos fontanais é a função da FER e do número de pacotes necessários para efetuar a transmissão com sucesso.

Como já mencionado no presente trabalho, as maiores limitações da comunicação acústica subaquática concentram-se na baixa eficiência na transmissão de pacotes devido à latência (SOZER et al., 2000; PROAKIS et al., 2001). Outra questão muito importante e que deve ser estudada é a eficiência energética, pois está ligada diretamente ao tempo de vida da rede, tendo em vista que os sensores subaquáticos são alimentados através de bateria, e a troca de bateria pode ser um grande problema se tratando de ambientes subaquáticos (PROAKIS et al., 2001). Diante desse cenário, a utilização dos códigos fontanais pode ter um efeito importante do ponto de vista energético. No entanto, é necessário modelar o consumo dos códigos, o consumo dos circuitos, o consumo do amplificador acústico, o desvanecimento seguindo a distribuição K e a atenuação, tudo isso direcionado aos códigos fontanais, para que seja possível realizar comparações em relação aos sistemas sem códigos fontanais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o consumo energético de um sistema de comunicações transmitindo através de um canal subaquático utilizando um código corretor de erros fontanal e comparar o desempenho desta solução com soluções empregando códigos corretores de erro convolucionais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar computacionalmente o canal subaquático;
- Inserir o código corretor de erros fontanal no modelo de consumo de energia já desenvolvido para sistemas utilizando códigos convolucionais;
- Realizar simulações computacionais de desempenho;

- Comparar em termos de eficiência energética o trabalho atual com outros existentes;
- Analisar os resultados fornecidos pelas simulações computacionais.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo do presente trabalho foi destinado à introdução ao tema, bem como os conceitos básicos sobre comunicações subaquáticas, modems acústicos e desafios do segmento. A caracterização do canal subaquático será abordada no capítulo 2, incluindo a atenuação, ruído, desvanecimento e a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*). O modelo de consumo de energia do sistema empregando códigos fontanais e códigos convolucionais, juntamente com a otimização da frequência e taxa de código serão discutidos no capítulo 3. O capítulo 4 é destinado à apresentação dos resultados, bem como a análise dos resultados obtidos. Para finalizar, o capítulo 5 conclui o trabalho e fornece sugestão de trabalhos futuros.

Os estudos do presente trabalho renderam a publicação de um artigo (SIMAO et al., 2016) na conferência MTS/IEEE Oceans' 16, Monterrey, EUA. O artigo é uma versão resumida do presente trabalho, com foco principal na apresentação da ideia central dos estudos e nos resultados mais relevantes.

2 CARACTERÍSTICAS DO CANAL

As redes de sensores estão revolucionando as mais diversas áreas da ciência e da indústria. Os recursos de pequenos sensores possibilitam a exploração dos mais diversos ambientes. Entretanto, a topologia dessas redes deve ser bem projetada, pois a mesma pode resultar em um alto custo financeiro, tendo em vista que o número de sensores pode ser bastante elevado (HEIDEMANN et al., 2006).

Partindo do princípio que o planeta Terra é constituído por três quartos de água, é normal que esse imenso e vasto ambiente despertasse o interesse do homem por sua exploração e monitoramento, tanto para fins comerciais quanto para fins científicos. Um recurso interessante para o monitoramento do ambiente aquático é denominada por Rede de Sensores Subaquáticos. Esse tipo de rede é capaz de prover soluções eficientes para monitoramento do ambiente aquático (ZHOU, 2006).

Uma das topologias empregadas por uma rede subaquática pode ser visualizada na Figura 1. Nessa abordagem, os sensores subaquáticos coletam os dados e realizam suas transmissões até serem entregues aos sensores localizados na superfície da água, que são responsáveis por transmitir, através de sinais de rádio, os dados para uma estação central, em terra. Tendo em vista que esse tipo de rede foi projetada para monitoramento durante longos períodos, a economia de energia é um dos principais focos no desenvolvimento dos protocolos de comunicação (ZHOU, 2006).

Um trabalho no segmento das redes subaquáticas propôs o modem WHOI (FREITAG et al., 2005), que é um modem subaquático acústico, compacto e de baixa potência. Esse modem é bastante utilizado e opera com uma taxa de codificação fixa, usando um código convolucional (FREITAG et al., 2005). Em contrapartida, o trabalho em (SOUZA et al., 2015) enfatizou a importância da economia energética em redes subaquáticas, uma vez que uma grande quantidade de energia é gasta para transmitir ondas acústicas; os autores chegaram à conclusão que a otimização da taxa de codificação é de vital importância para atingir uma maior eficiência em termos energéticos, quando comparado com o uso de uma codificação de taxa

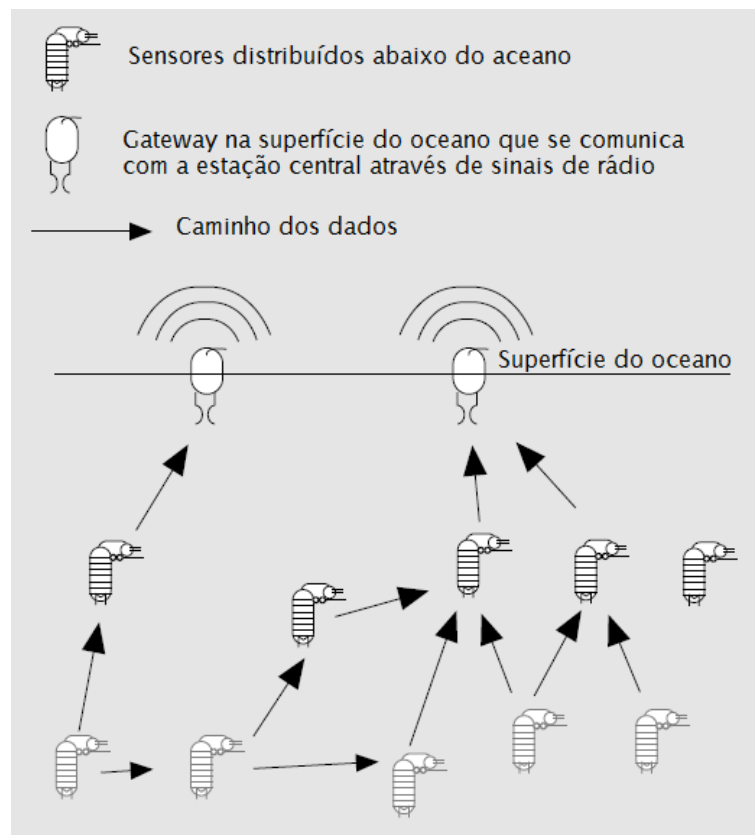


Figura 1: Topologia de uma Rede de Sensores Subaquática.

Fonte: Adaptado de (ZHOU, 2006).

fixa com códigos convolucionais, que são populares em dispositivos comerciais. Para alguns cenários de menor distância de comunicação, os autores em (SOUZA et al., 2015) concluem inclusive que a transmissão sem códigos corretores de erro pode ser mais eficiente do ponto de vista energético. Para conseguir atingir esses resultados, os autores modelaram o consumo dos códigos, a atenuação e o ruído, além de otimizarem a frequência e a taxa de código.

No presente trabalho foi considerado o uso de modulação BFSK (do inglês *non-coherent binary frequency-shift keying*) com códigos convolucionais, como utilizado em alguns dispositivos subaquáticos. Por se tratar de uma modulação não coerente, não se faz necessária a sincronização de fase entre o transmissor e o receptor. Esta sincronização de fase é um problema no ambiente subaquático. Além disso, foi assumido o uso dos códigos fontanais, onde a ideia principal é codificar um grupo de M pacotes (cada um codificado de forma convolucional) em $N > M$ pacotes a serem enviados de uma só vez através do enlace acústico, no qual este grupo está sujeito aos efeitos da atenuação e ruído, que foram modelados de acordo com (STOJANOVIC, 2006). Além disso, seguindo os resultados demonstrados em (YANG; YANG, 2006), o desvanecimento foi modelado de acordo com a distribuição K. Então, tendo como base

o modelo descrito em (SOUZA et al., 2015), onde é detalhada a energia requerida para transmitir um bit de informação em um enlace acústico subaquático, incluindo a taxa de transmissão, modulação, código corretor de erros, tamanho do frame e consumo de potência, considerando o uso dos códigos fontanais, o objetivo do trabalho é investigar o consumo de energia otimizando o número de pacotes extras provenientes do código fontanal a serem transmitidos, assumindo uma determinada FER (do inglês *frame error rate*) alvo.

2.1 ATENUAÇÃO NO CANAL SUBAQUÁTICO

Em comunicações acústicas subaquáticas, a atenuação depende da perda de energia acústica em forma de calor. Essa perda é aumentada com a distância e com a frequência, limitando a largura de banda disponível. A atenuação é dada em dB por (STOJANOVIC, 2006):

$$10\log_{10} \frac{A(l, f)}{A_0} = 10\kappa \log_{10} l + \frac{l}{100} \log_{10} a(f), \quad (1)$$

sendo que $10\kappa \log_{10} l$ é a perda de espalhamento, com l sendo a distância entre os nós, em metros, e κ representa a propagação geométrica. A perda de absorção é representada por $\frac{l}{100} \log_{10} a(f)$, com $a(f)$ sendo o coeficiente de absorção e f é a frequência em kHz. Enfim, A_0 é uma constante de normalização de unidades.

Utilizando a fórmula de Thorp, temos o coeficiente de absorção (STOJANOVIC, 2006):

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

onde $a(f)$ é dado em dB/km.

Como um exemplo, a Figura 2 ilustra o coeficiente de absorção em função da frequência. Como pode-se observar, a absorção aumenta rapidamente com a frequência, assim, impondo um limite na frequência máxima utilizada em uma ligação acústica de uma determinada distância.

2.2 RUÍDO

Por se tratar de uma comunicação acústica, os ruídos para essa forma de transmissão são caracterizados pelos sons do ambiente subaquático, que podem interferir na comunicação. A equação empírica proposta em (STOJANOVIC, 2006) considera quatro diferentes fontes para o cálculo do ruído: turbulência (N_t), transporte (N_s), ondas geradas pelo vento (N_w) e o ruído

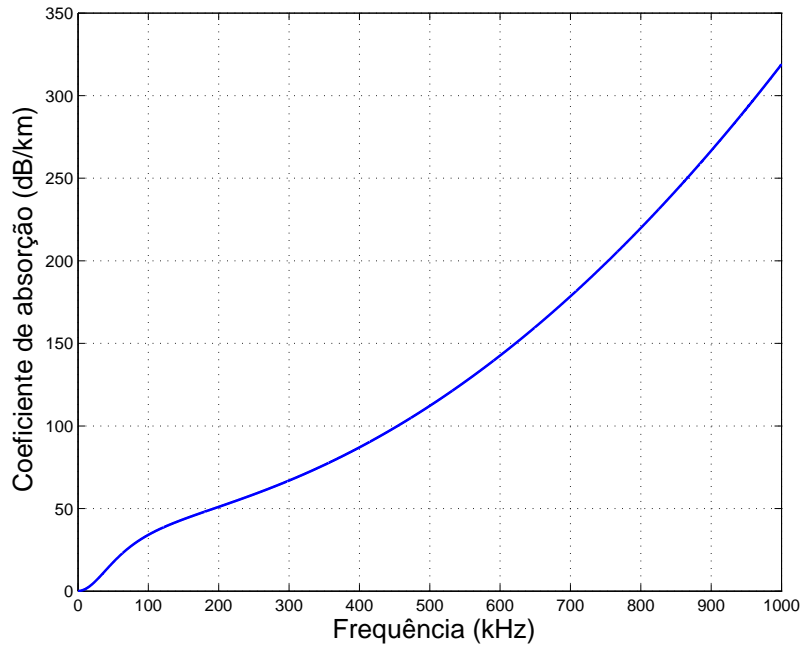


Figura 2: Coeficiente de absorção em função da frequência de transmissão para um canal acústico subaquático.

Fonte: Adaptado de (STOJANOVIC, 2006).

térmico (N_{th}). Cada uma delas possui uma equação específica:

$$\begin{aligned}
 10 \log N_t(f) a &= 17 - 30 \log f, \\
 10 \log N_s(f) &= 40 + 20(s - 0,5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0,03), \\
 10 \log N_w(f) &= 50 + 7,5\sqrt{w} + 20 \log f - 40 \log(f + 0,4), \\
 10 \log N_{th}(f) &= -15 + 20 \log f,
 \end{aligned} \tag{3}$$

onde s é o fator de atividade de embarque, podendo variar de 0 a 1 para baixa e alta atividade, respectivamente, e w é a velocidade do vento em m/s.

Dessa forma, o ruído total $N(f)$ é representado pela soma das quatro fontes de ruído, conforme a equação a seguir:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f). \tag{4}$$

No entanto, para obter a mesma modelagem do estudo em (STOJANOVIC, 2006), no presente trabalho foi utilizada a seguinte aproximação em função da frequência (STOJANOVIC, 2006):

$$10 \log N(f) \approx N_1 - \eta \log f, \tag{5}$$

onde $N_1 = 50$ dB e $\eta = 18$ dB/década.

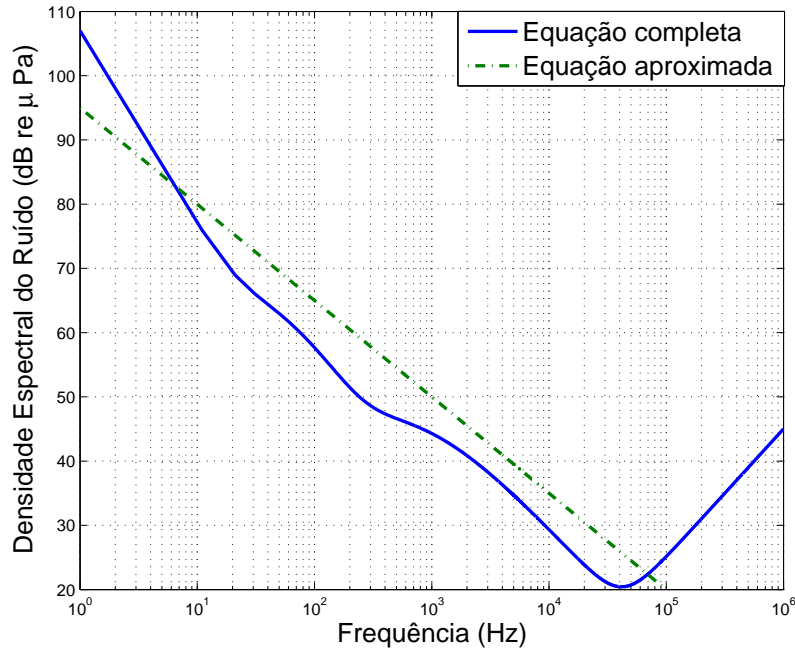


Figura 3: Densidade espectral do ruído ambiente e o ruído da equação aproximada, ambas em função da frequência.

Fonte: Adaptado de (STOJANOVIC, 2006).

A Figura 3 ilustra os ruídos derivados da equação completa e da equação aproximada. Em ambos os casos o ruído decai com a frequência, limitando a largura de banda acústica utilizável. Além disso, pode-se observar que a aproximação é suficientemente boa para operação até uma frequência de 10^4 Hz, sendo portanto empregada a aproximação na sequência desse trabalho.

2.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)

Com a atenuação $A(l, f)$ e o ruído $N(f)$, é possível avaliar a SNR, $\bar{\gamma}(l, f)$, para uma distância l , frequência f e potência acústica $P_t(l, f)$, como exibido na equação a seguir (STOJANOVIC, 2006):

$$\bar{\gamma}(l, f) = \frac{P_t(l, f)}{A(l, f)N(f)B}, \quad (6)$$

onde B é a largura de banda.

O produto entre $A(l, f)N(f)$, comumente denominado de produto AN, determina parte da frequência dependente da SNR. A Figura 4 ilustra o inverso do produto AN, de onde é

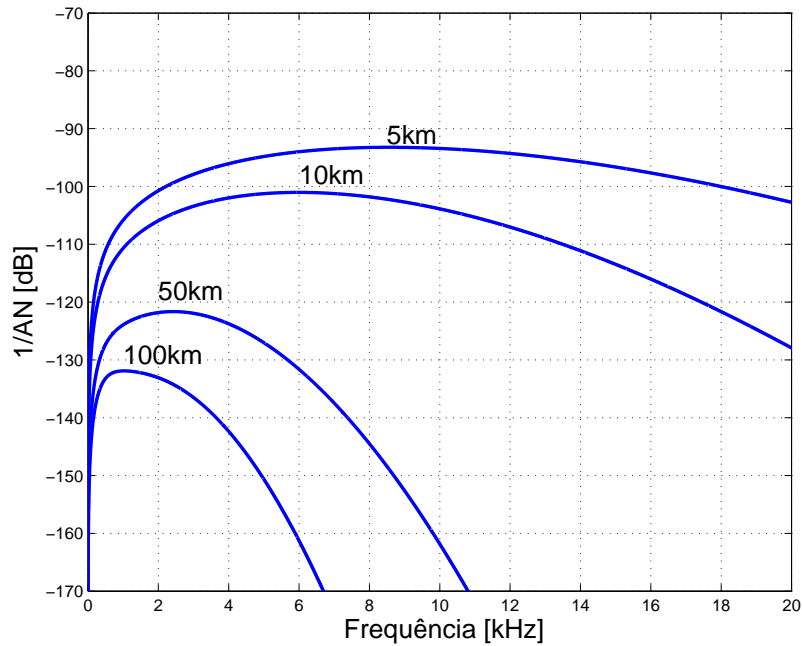


Figura 4: Parte da frequência dependente da SNR, $1/A(l, f)N(f)$, em função da distância.

Fonte: Adaptado de (STOJANOVIC, 2006).

possível observar que para cada distância l , existe claramente uma frequência ótima $f_o(l)$ onde a SNR máxima é obtida.

A frequência ótima é ilustrada na Figura 5 em função da distância de transmissão. Na prática, é possível escolher uma largura de banda de transmissão em torno de $f_o(l)$ e ajustar a potência de transmissão para atingir a SNR desejada.

2.4 DESVANECIMENTO

Os modelos de comunicação sem fio mais tradicionais utilizam as distribuições de Rayleigh e Rice para modelar os efeitos do desvanecimento. No entanto, no presente trabalho foi utilizada a distribuição K (YANG; YANG, 2006), pois a mesma é mais adequada para um cenário subaquático que os dois modelos citados anteriormente, pois considera um cenário mais severo. A função densidade de probabilidade da distribuição K é dada pela equação a seguir (YANG; YANG, 2006):

$$f_X(x) = \frac{4}{\sqrt{\alpha}\Gamma(\nu)} \left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right)^\nu K_{\nu-1}\left(\frac{2x}{\sqrt{\alpha}}\right), \quad (7)$$

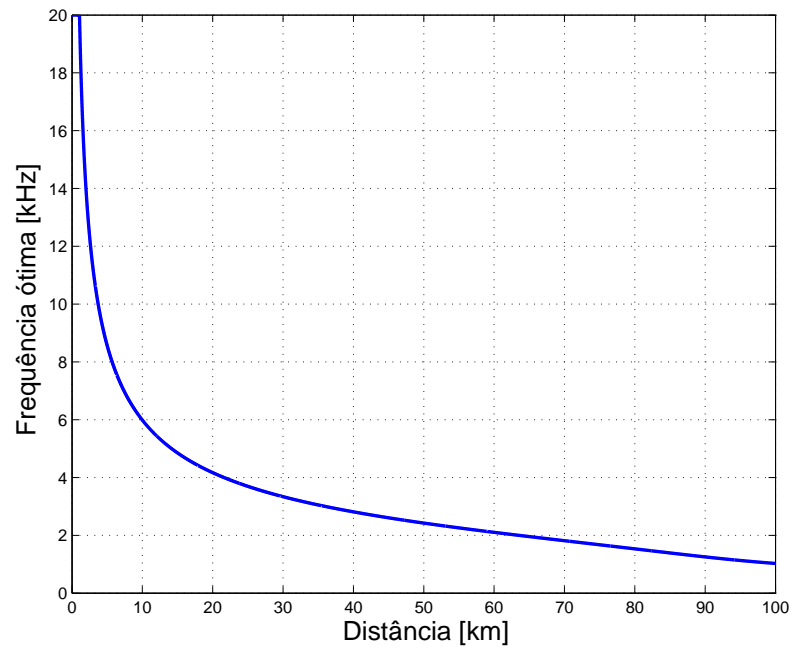


Figura 5: Frequência ótima em função da distância.

Fonte: Adaptado de (STOJANOVIC, 2006).

onde ν é o parâmetro de forma, α é o parâmetro de escala, $K_{\nu-1}$ é a função de Bessel modificada de segundo tipo, de ordem $\nu - 1$, e $\Gamma(\nu)$ é a função Gamma (GRADSHTEIN et al., 2000).

3 MÉTODO PROPOSTO

Viu-se no capítulo anterior que nas redes subaquáticas, devido à dependência da frequência do canal acústico, o desempenho depende da posição dos nós e da frequência escolhida.

O foco do presente trabalho é a análise do consumo energético em uma rede acústica subaquática, bem como a redução do consumo de energia dessa rede. Foram utilizados códigos corretores de erro fontanais, onde retransmissões não são permitidas, sendo enviados pacotes extras de dados redundantes para a montagem da mensagem. Esse modelo é diferente do encontrado em (SOUZA et al., 2015), onde são utilizadas retransmissões. Dessa forma, a comparação entre os dois métodos faz-se necessária. Para uma comparação coerente, o método proposto consiste na modelagem do consumo energético, bem como as otimizações necessárias para a redução do consumo. A taxa de erro de bit (BER, do inglês *bit error rate*) e a taxa de erro de quadro (FER) foram modeladas considerando o uso de códigos convolucionais. Também foram feitas otimizações na taxa de código e na SNR.

3.1 MODELAGEM DA BER E FER

Para a modulação BFSK, que foi utilizada no presente trabalho e é utilizada em alguns modems acústicos comerciais como o modem WHOI (FREITAG et al., 2005), a BER sobre a distribuição K é calculada da seguinte forma (YANG; YANG, 2006):

$$R_b(\bar{\gamma}) = \frac{\nu}{\Gamma(\nu)} \int_0^{\infty} \frac{u^{\nu-1} e^{-u}}{2\nu + u \frac{E_b}{N(f)}} du \quad (8)$$

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

Assim como no modem comercial WHOI (FREITAG et al., 2005), consideramos o uso dos códigos convolucionais com a taxa $r = k/n$, onde n é o número de bits codificados por k bits de informação. Cada quadro transporta uma taxa de leitura composta por um total de L bits.

Então, assumindo a decodificação Viterbi (PROAKIS et al., 2001), a FER é escrita segundo a equação a seguir:

$$P_f(\bar{\gamma}) = 1 - [1 - p_{cc}(\bar{\gamma})]^{rL}, \quad (9)$$

onde $p_{cc}(\bar{\gamma})$ é a BER após a decodificação, e a BER de rL bits de dados após a decodificação do código convolucional de taxa r é dada pela equação a seguir (PROAKIS et al., 2001):

$$P_{cc}(\bar{\gamma}) \approx \frac{1}{k} \sum_{d=d_{\text{free}}}^{\infty} \beta_d p_2(d), \quad (10)$$

no qual β_d é a carga de informação dos códigos que estão na distância d de todos os códigos zero, enquanto d_{free} é a distância mínima do código.

3.2 MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA

Na presente seção apresenta-se o modelo de consumo de energia proposto. O modelo é baseado no modelo encontrado em (SOUZA et al., 2015) com algumas adaptações. Levando em consideração a energia consumida pelo codificador, pela banda de base, pelos componentes eletrônicos, a potência do amplificador acústico e o tempo médio de transmissão por bit, o total de energia necessária para transmitir um bit com sucesso pode ser descrita a seguir:

$$\mathcal{E}_T = \varepsilon_{\text{enc}} + (P_{\text{el,tx}} + P_{\text{PA}}) T_b, \quad (11)$$

onde ε_{enc} é a energia usada pelo codificador, $P_{\text{el,tx}}$ é o consumo da banda de base e de componentes eletrônicos para a transmissão, e P_{PA} é o consumo de potência do amplificador acústico em Watts, calculado de acordo com (GAO et al., 2012). Além disso, T_b é o tempo médio de transmissão por bit.

Para a codificação de cada bit de informação (ε_{enc}) a energia consumida se dá pela seguinte modelação (ROSAS et al., 2014)

$$\varepsilon_{\text{enc}} = \left(\frac{V_{\text{dd}} I_0}{rL f_{\text{APU}}} \right) \sum_{j=1}^J c_j n_j^{\text{enc}}, \quad (12)$$

onde J é o número das diferentes operações matemáticas utilizadas para a codificação, c_j é o número de ciclos de *clock* usado por cada operação e n_j^{enc} é o número de vezes que uma operação é executada no algoritmo de codificação. A tensão de operação da unidade de processamento aritmético (APU) é representada por V_{dd} , I_0 é a corrente média durante a execução das operações matemáticas, e por fim, f_{APU} é a frequência do *clock* da APU.

O consumo de energia acústica para transmitir um quadro pode ser expresso em μPa

(GAO et al., 2012) da seguinte forma

$$P_t(l, f) = N(f)A(l, f)B\bar{\gamma}(l, f). \quad (13)$$

Desta forma, para calcular o consumo elétrico do amplificador acústico em Watts a seguinte relação é utilizada (GAO et al., 2012)

$$P_{PA}(l, f) = N(f)A(l, f)\frac{10^{-17,2}}{\phi}, \quad (14)$$

onde $10^{-17,2}$ é o fator de conversão e ϕ é a eficiência total do conjunto formado pelo amplificador e pela caixa acústica.

Como informado anteriormente no presente trabalho, cada quadro transmitido carrega uma taxa de *payload* formado 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* e T_O pra transmitir sinais de *overhead* para estimação de canal, etc., com comprimento equivalente a O bits, o tempo médio de transmissão por bit de *payload* será

$$T_b = \frac{T_L + T_O}{rL} = \frac{L + O}{rR_bL}, \quad (15)$$

onde R_b é a taxa de bits em bits/s.

No receptor, a energia por bit usada para receber o quadro é descrita na equação a seguir:

$$\mathcal{E}_R = \varepsilon_{dec} + P_{el,rx}T_b, \quad (16)$$

onde ε_{dec} é a energia consumida para decodificar e $P_{el,rx}$ é a potência consumida pela banda base de recepção e componentes eletrônicos do receptor. Deve-se salientar que a energia requerida para codificar e decodificar é calculada considerando o número de operações e o consumo de um típico microcontrolador de baixa potência, como o StrongARM da Intel e o AVR da Atmel (SOUZA et al., 2015; INTEL CORPORATION, 2000; ATMEL, 2015).

Para a decodificação, a energia consumida por bit de informação é

$$\varepsilon_{dec} = \left(\frac{V_{dd}I_o}{rLf_{APU}} \right) \sum_{j=1}^J c_j n_j^{dec}, \quad (17)$$

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

3.3 SNR ÓTIMA

O sistema é projetado para alcançar uma determinada FER alvo, que no presente trabalho é denotada por P_o . Então, a SNR ótima é aquela que fará o sistema atingir P_o para a taxa de código que minimiza o total da energia consumida, que depende da FER depois da decodificação. No caso dos códigos convolucionais, que possuem codificação do tipo abrupta, é possível escrever a FER em função da SNR média conforme (9). Além disso, tendo em vista que a FER decresce monotonicamente com o aumento da SNR, podemos obter a SNR média ótima ($\bar{\gamma}^*$) como aquela que garante

$$P_f(\bar{\gamma}^*) = P_o. \quad (18)$$

3.4 CÓDIGOS FONTANAIS

A ideia dos códigos fontanais (LIVA et al., 2010) é transmitir uma quantidade indeterminada de bits, tal que o receptor seja capaz de decodificar com uma taxa de erros predeterminada. Dessa forma, são códigos com aplicação interessante para cenários de longos atrasos, tais como as redes subaquáticas, em que a retransmissão de pacotes não é desejável. Os códigos fontanais não utilizam o tradicional canal de *feedback*, utilizado para retransmissão de pacotes com erros, fazendo com que o mesmo não tenha um número de pacotes fixos. Ou seja, o atraso máximo usando códigos fontanais pode ser um pouco maior que em outras abordagens, como no ARQ, por exemplo. Para uma comparação mais coerente, comparou-se o uso dos códigos fontanais com um modelo de transmissões diretas, que utiliza um número menor de pacotes se comparado ao modelo que considera o uso dos códigos fontanais, que utiliza muitos pacotes redundantes. Portanto, foi necessário analisar em quais situações é possível obter melhor desempenho energético analisando as duas abordagens. Mesmo com a possibilidade de um atraso maior causado pela utilização dos códigos fontanais, a utilização dos mesmos pode ser mais eficiente em termos de consumo energético em determinados cenários.

A Figura 6 ilustra de maneira genérica o funcionamento dos códigos fontanais, onde existem M pacotes de dados diferentes embaralhados em $N \geq M$ pacotes ao todo, para gerar pacotes de redundância e garantir uma taxa de erros alvo para efetuar a transmissão com sucesso. Sendo que cada pacote é codificado com um código convolucional. Então, M pacotes codificados são agrupados de forma aleatória em $N \geq M$ pacotes, gerando ainda mais redundância.

O objetivo dos códigos fontanais é reduzir a FER representada na equação (9) codificando um grupo de M pacotes em $N \geq M$ pacotes. Então, a probabilidade de sucesso dos

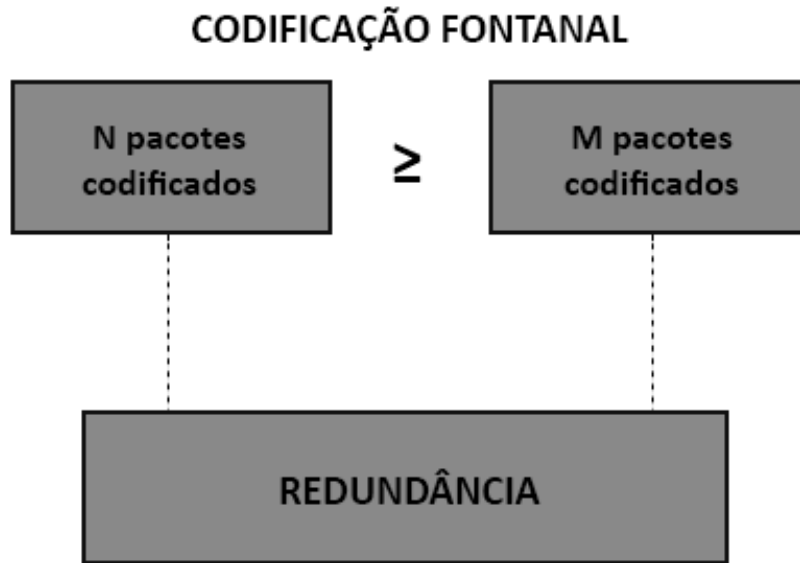


Figura 6: Ilustração do funcionamento dos códigos fontanais.

Fonte: Autoria própria

códigos fontanais P_s é em função da FER e do número de pacotes N necessários para efetuar a transmissão com sucesso. Esta probabilidade pode ser escrita de acordo com a equação a seguir (RAMEEZ; STOJANOVIC, 2013):

$$P_s(\bar{\gamma}) = \sum_{m=M}^N \binom{N}{m} (1 - P_f(\bar{\gamma}))^m P_f(\bar{\gamma})^{N-m}. \quad (19)$$

Portanto, assumindo que a probabilidade de sucesso deve ser maior que $(1 - P_o)$, é possível encontrar o número de pacotes ótimo N^* que satisfaz $P_s(\bar{\gamma}) = 1 - P_o$.

Assim, o total de energia consumida por cada bit transferido com sucesso pode ser expressado através da equação a seguir, que foi baseada na equação em (SOUZA et al., 2015):

$$\mathcal{E}_b = \frac{\varepsilon_{\text{enc}} + \varepsilon_{\text{dec}} + (P_{\text{el,tx}} + P_{\text{el,rx}} + P_{\text{PA}})T_b}{1 - P_o} \cdot \frac{N}{M}, \quad (20)$$

onde se leva em conta a relação de N/M pacotes extras usados pelo código fontanal, bem como que apenas uma fração $(1 - P_o)$ desses pacotes são transmitidas com sucesso. Além disso, deve-se salientar que o uso dos códigos fontanais apesar de incrementa o consumo de energia por adicionar um termo $\frac{N}{M} \geq 1$ em (20), isso pode ser compensado por uma alta probabilidade de sucesso em (19), permitindo a otimização da SNR para diminuir o valor de P_{PA} .

4 RESULTADOS

O presente trabalho analisou o consumo energético de redes subaquáticas utilizando códigos corretores de erros fontanais, e também, em quais cenários ele pode ser mais eficiente. Além disso, o trabalho comparou e analisou o número de pacotes extras (redundância) necessários para efetuar a comunicação, a SNR ótima e a taxa de código. Para realizar as simulações, foram utilizados vários parâmetros de um modem bastante utilizado nesse tipo de comunicação, o modem WHOI (FREITAG et al., 2005). Os parâmetros de simulação utilizados estão expostos na Tabela 1.

A Figura 7 compara o consumo energético do uso dos códigos fontanais com N^* ótimo com o caso onde os códigos fontanais não são usados (ou onde $N = M$), usando $P_o = 10^{-3}$ e $P_o = 10^{-5}$ para ambos os casos. Ambas as SNR e as taxas de códigos do código convolucional foram otimizadas nesse cenário. É possível ver que o consumo de energia é bem semelhante até os 10 km iniciais, com uma pequena vantagem para a abordagem que considera o uso dos códigos fontanais, para as mesmas P_o 's. No entanto, a economia pode ser de até 30% com o uso dos códigos fontanais quando a distância de transmissão é de 20 km para o caso com $P_o = 10^{-5}$, e de até 25% para a mesma distância com $P_o = 10^{-3}$. Essa redução de energia está ligada ao fato que os códigos fontanais permitem aumentar a taxa de sucesso de pacotes, diminuindo

Tabela 1: Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Descrição	Valor
L	Quadro de leitura	64 bytes
B	Largura de banda	320 Hz
R_b	Taxa de bit	160 bps
$P_{el,rx}$	Potência do receptor	1 W
ϕ	Eficiência do transdutor PA	0,25
M_l	Margem de enlace	20 dB
M	Número de pacotes de informação	10
\hat{N}	Número máximo de pacotes extras	80
ν	Parâmetro da distribuição K	1,5

Fonte: Autoria própria

consideravelmente a potência de transmissão no custo de envio dos pacotes redundantes.

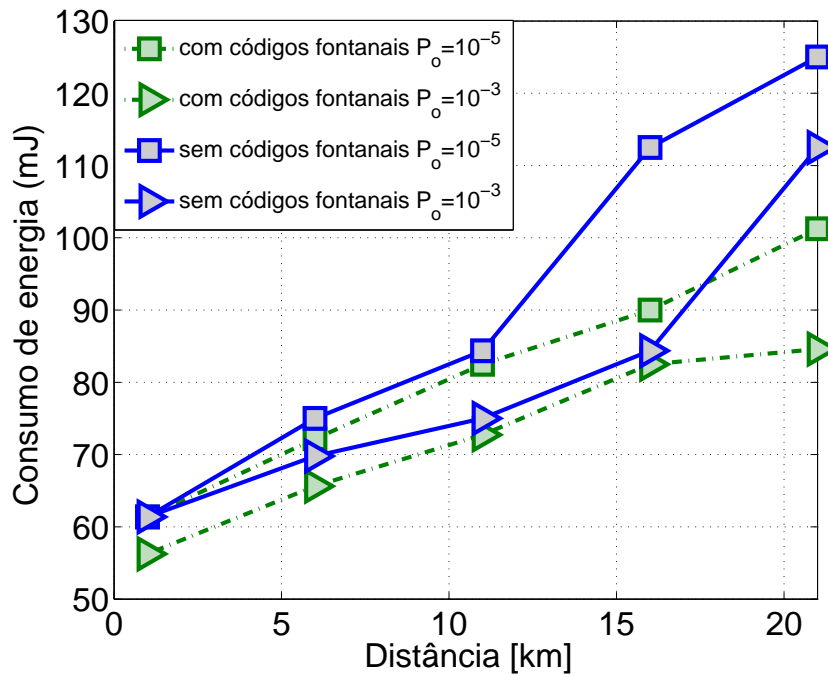


Figura 7: Comparação do consumo energético para os casos que consideram e não consideram o uso dos códigos fontanais, com $P_o = 10^{-5}$ e $P_o = 10^{-3}$, em função da distância de transmissão.

Fonte: Autoria própria

A comparação do número de pacotes codificados pelos códigos fontanais (N) para $M = 10$ e diferentes valores de FER alvo é mostrada na Figura 8. O número de pacotes extras N aumenta consideravelmente com a distância, com o objetivo de manter a FER proposta. É possível ver claramente que para uma FER menor, o número de pacotes extras aumenta gradualmente. Nas simulações realizadas, o número de pacotes codificados pelos códigos fontanais N foi limitado em $\hat{N} = 80$, que pode ser visto como efeito de saturação na Figura 7. Tal limitação é aplicada para evitar um congestionamento excessivo na conexão acústica.

As Figuras 9 e 10 comparam, respectivamente, a SNR ótima e taxa de código ótima em função da distância, entre o caso que utiliza códigos fontanais com N^* ótimo e o caso onde os códigos fontanais não são usados. A FER alvo foi definida como $P_o = 10^{-5}$ em ambas as figuras. É possível ver que a SNR ótima na Figura 9 é similar em ambos os casos, mostrando que quantidades semelhantes de potência podem ser alocadas para o transmissor, independentemente do uso dos códigos fontanais. Já a Figura 10 mostra que a taxa ótima do código convolucional é significativamente diferente quando os códigos fontanais são utilizados. Por exemplo, quando a distância de transmissão é de 15 km, a taxa de código ótima aumenta de 0,5 para 0,75 no caso da utilização dos códigos fontanais. A taxa maior dos códigos

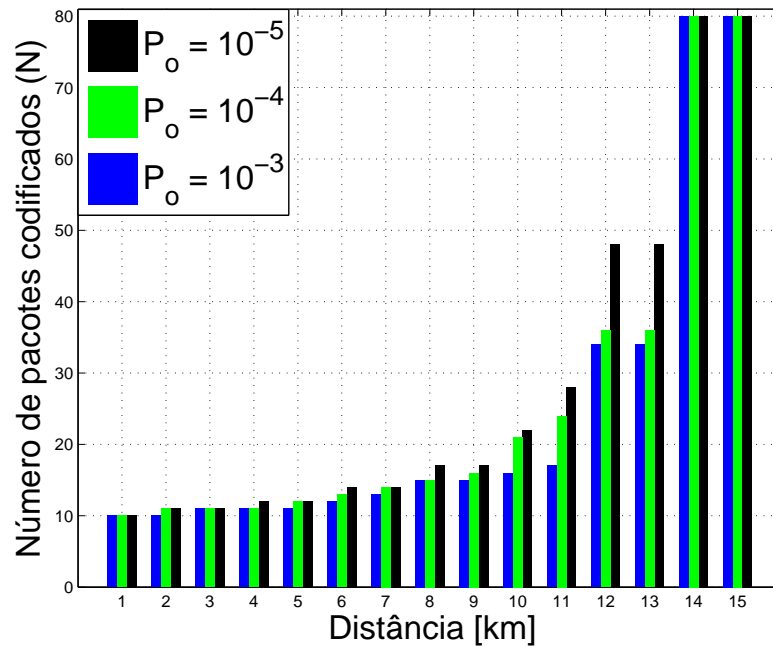


Figura 8: Número de pacotes codificados pelos códigos fontanais N em função da distância de transmissão.

Fonte: Autoria própria

convolucionais introduz menos redundância, algo que contrabalança a quantidade de pacotes extras necessários para os códigos fontanais. Dessa forma, o codificador fontanal permite o uso de um código corretor de erros mais simples, reduzindo a complexidade e a utilização de energia tanto no transmissor, como no receptor. Após estas análises é possível concluir que, para curtas distâncias, a economia de energia é bem pequena, e o uso dos códigos fontanais conseguiu atingir melhor desempenho para longas distâncias, onde a economia de energia é mais significativa.

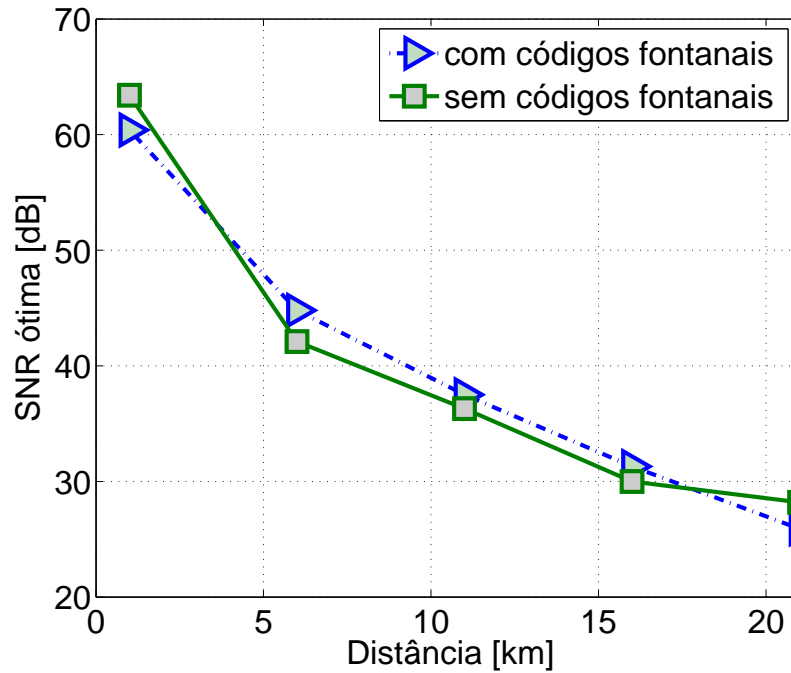


Figura 9: Comparação da SNR ótima para casos com e sem códigos fontanais, com $P_0 = 10^{-5}$, em função da distância de transmissão.

Fonte: Autoria própria

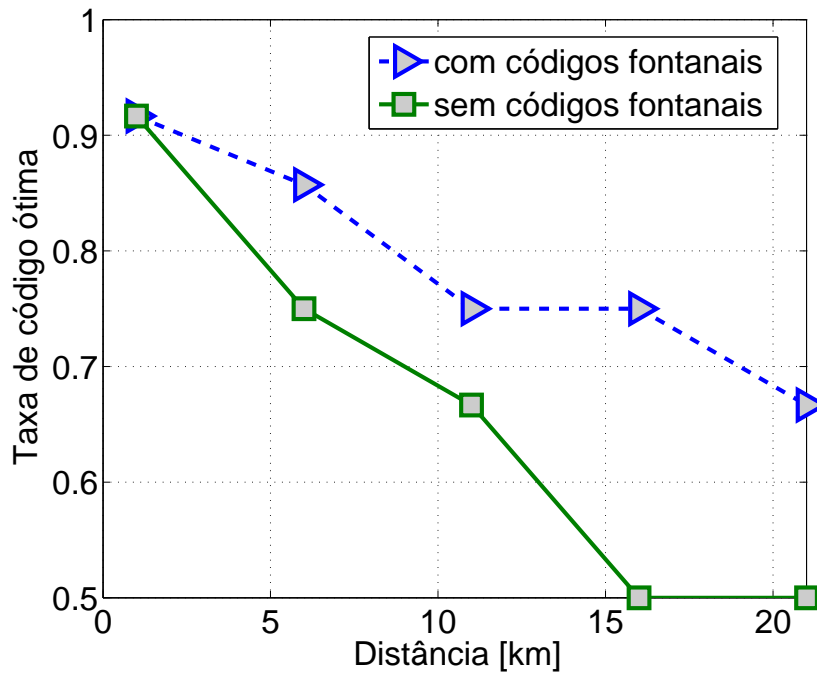


Figura 10: Comparação da taxa de código para casos com e sem códigos fontanais, com $P_0 = 10^{-5}$, em função da distância de transmissão.

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho introduziu um código corretor de erros fontanal no modelo de comunicação acústico subaquático para tentar reduzir o consumo de energia de redes de sensores subaquáticas, algo considerado como um dos maiores desafios desse tipo de comunicação. Primeiro foi necessário modelar o canal subaquático. Além disso, foi utilizada a distribuição K para modelar o efeito do desvanecimento, pois a mesma considera um cenário mais severo que as abordagens mais tradicionais, como Rayleigh e Rice. Posteriormente, foi realizada a modelagem do consumo energético, bem como as otimizações necessárias para a redução do consumo, tendo como base alguns parâmetros do modem comercial WHOI, proposto em (FREITAG et al., 2005). Por fim, os resultados foram apresentados, onde foi possível concluir que uso dos códigos fontanais podem diminuir em até 30% o consumo de energia em uma rede acústica subaquática, principalmente em cenários de longa distância. Tal resultado foi obtido com uma distância de transmissão de 20 km para o caso com $P_0 = 10^{-5}$. Essa redução de energia está ligada ao fato que os códigos fontanais permitem aumentar a taxa de sucesso de pacotes, diminuindo consideravelmente a potência de transmissão no custo de envio dos pacotes redundantes. Outra conclusão tirada foi que, usando os códigos fontanais, o número de pacotes extras N aumenta consideravelmente com a distância, com o objetivo de manter a FER proposta. A simulação foi feita com diferentes FER alvo e foi possível observar que para uma FER mais forte, o número de pacotes extras aumenta gradualmente. A SNR ótima também foi analisada, permitindo concluir que a SNR ótima, ou seja, a alocação de potência é similar em ambos os casos da simulação, independentemente do uso dos códigos fontanais. Já a taxa de código ótima é significativamente diferente quando os códigos fontanais são utilizados, podendo aumentar de 0,5 para 0,75 quando a distância de transmissão é 15 km, por exemplo. Dessa forma, o codificador fontanal permite o uso de um código corretor de erros mais simples, reduzindo a complexidade e a utilização de energia tanto no transmissor, como no receptor.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar a análise com outros tipos de modulações, o que poderia estender o conhecimento sobre o problema. A maior dificuldade para tal trabalho está em modelar a taxa de erro de bit dessas modulações em distribuição K

(SOUZA et al., 2016). Além disso, outras ordens de modulação podem permitir uma melhor utilização da largura de banda. A modulação BFSK utilizada no presente trabalho é usada para manter a banda estreita, o que faz com que não seja necessário a preocupação com os efeitos de equalização do canal. Se a banda aumentar com diferentes modulações, isso deverá ser levado em consideração, pois será algo relevante.

Outra sugestão, está na implementação real do estudo utilizando alguma plataforma de *hardware*. Dessa forma, seria possível medir efetivamente o gasto energético real e comparar com os resultados teóricos obtidos. Entretanto, a implementação poderia ser um desafio, visto que seria necessário um ambiente subaquático para testes.

REFERÊNCIAS

- ATMEL. **ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH**. 2015.
- DAVIS, A.; CHANG, H. Underwater wireless sensor networks. In: **Oceans, 2012**. 2012. p. 1–5.
- FREITAG, L. et al. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In: **IEEE OCEANS Conf**. 2005.
- 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: **20th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)**. 2012. p. 1147–1154.
- GRADSHTEIN, I.; RYZHIK, I.; JEFFREY, A. **Table of Integrals, Series, and Products**. 7th. ed. Academic Press, 2000. ISBN 9780122947575.
- HEIDEMANN, J. et al. Research challenges and applications for underwater sensor networking. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. 2006. v. 1, p. 228–235. ISSN 1525-3511.
- INTEL CORPORATION. **Intel® StrongARM* SA-1110 Microprocessor**. 2000.
- LIVA, G.; PAOLINI, E.; CHIARI, M. Performance versus overhead for fountain codes over Fq. **IEEE Commun. Lett.**, v. 14, n. 2, p. 178–180, Feb. 2010.
- PROAKIS, J. et al. Shallow water acoustic networks. **IEEE Commun. Mag.**, v. 39, n. 11, p. 114–119, Nov 2001. ISSN 0163-6804.
- RAMEEZ, A.; STOJANOVIC, M. Random linear packet coding for fading channels. **OCEANS - San Diego**, n. 1-6, 2013.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2nd. ed. Prentice-Hall, 2002.
- ROSAS, F. et al. Optimizing the code rate for achieving energy-efficient wireless communications. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. 2014.
- SIMAO, D. et al. Energy consumption analysis of underwater acoustic networks using fountain codes. **MTS/IEEE Oceans'16, Monterrey, EUA**, 2016.
- SOUZA, F. et al. Modulation order optimization for energy efficient underwater acoustic communications. **MTS/IEEE Oceans'16, Monterrey, EUA**, 2016.

SOUZA, F. A. et al. Code rate optimization for energy efficient delay constrained underwater acoustic communications. **MTS/IEEE Oceans 2015, Genoa, Italy**, 2015.

SOZER, E.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. Underwater acoustic networks. **IEEE J. Ocean. Eng.**, v. 25, n. 1, p. 72–83, Jan 2000. ISSN 0364-9059.

STOJANOVIC, M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. In: **1st ACM Int. Workshop on Underwater Netw.** New York, NY, USA, 2006. p. 41–47. ISBN 1-59593-484-7.

URICK, R. J. **Principles of Underwater Sound**. 3rd ed.. ed. McGraw-Hill, 1996.

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

ZHOU, J.-H. C. . J. K. . M. G. . S. The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications. **IEEE Network**, v. 20, p. 12–18, 2006.