

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

ZAQUEU CABRAL PEREIRA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE REDES
COOPERATIVAS EM AMBIENTES SUBAQUÁTICOS
UTILIZANDO CODIFICAÇÃO DE REDE E OFDMA**

TESE

CURITIBA

2018

ZAQUEU CABRAL PEREIRA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE REDES
COOPERATIVAS EM AMBIENTES SUBAQUÁTICOS
UTILIZANDO CODIFICAÇÃO DE REDE E OFDMA**

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. João Luiz Rebelatto

Coorientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza

CURITIBA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P436a
2018 Pereira, Zaqueu Cabral
 Análise de eficiência energética de redes cooperativas
 em ambientes subaquáticos utilizando codificação de rede e
 OFDMA / Zaqueu Cabral Pereira.-- 2018.
 81 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, Curitiba. Área de Concentração:
Telecomunicações e Redes, 2018.

Bibliografia: f. 76-81.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Acústica subaquática.
3. Divisão ortogonal de frequência multiplexada. 4. Acesso
múltiplo por divisão de frequência. 5. Sistemas de
comunicação sem fio. 6. Teoria da codificação. 7. Otimização
matemática. 8. Métodos de simulação 9. Engenharia elétrica -
Teses. I. Rebelatto, João Luiz, orient. II. Souza, Richard
Demo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 170

A Tese de Doutorado intitulada “**Análise de Eficiência Energética de Redes Cooperativas em Ambientes Subaquáticos Utilizando Codificação de Rede e OFDMA**”, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Zaqueu Cabral Pereira**, no dia 23 de maio de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

- Prof(a). Dr(a). João Luiz Rebelatto – Presidente – (UTFPR)
- Prof(a). Dr(a). Guilherme Luiz Moritz – (UTFPR)
- Prof(a). Dr(a). Marcelo Eduardo Pellenz – (PUC-PR)
- Prof(a). Dr(a). Samuel Baraldi Mafra – (UFPR)
- Prof(a). Dr(a). Glauber Gomes de Oliveira Brante – (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 23 de maio de 2018.

À minha amada esposa, companheira de todo o tempo.
Às minhas duas princesas, energia para continuar.
À minha mãe, exemplo de perseverança.
À memória de minha irmã, alcançada pela graça de Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, Senhor da minha vida, pela Sua graça e misericórdia, me permitindo alcançar esse momento tão esperado.

Agradeço às minhas princesas, minha preciosa esposa Karol e minhas filhas Luiza e Helena, por serem o combustível necessário para a caminhada.

Aos meus pais pelo exemplo, suporte, incentivo e apoio.

À ITAIPU BINACIONAL, a maior geradora de energia limpa e renovável do planeta, pela confiança, investimento e suporte financeiro.

Ao meu orientador João Luiz Rebelatto pelo constante incentivo e suporte. Por sua paciência e esforço na minha volta aos estudos acadêmicos.

Ao meu coorientador Richard Demo Souza, por suas sugestões e encaminhamentos, também pelo seu importante papel na minha vida acadêmica e profissional desde o Mestrado.

Aos colegas pesquisadores do LabSC pela cooperação, em especial ao Fábio, Marcos e Thiago Ton pelas contribuições ao trabalho. Também aos professores Guilherme Peron, Guilherme Moritz, Ohara e Glauber pelo suporte.

Aos colegas de ITAIPU na Superintendência de Informática, principalmente à equipe da SITT.GG da qual tenho muita alegria em fazer parte. Em especial ao colega Celso, grande incentivador deste projeto.

Agradeço a Família Ferreira, meus anfitriões durante todo esse período de viagens.

Agradeço à UTFPR e ao CPGEI por poder participar deste programa de doutorado.

Por último, agradeço aos meus amigos que estiveram na torcida por essa jornada.

“Give thanks to the LORD, for He is good; His love endures forever.” Psalm 107.1

RESUMO

PEREIRA, Zaqueu Cabral. Análise de Eficiência Energética de Redes Cooperativas em Ambientes Subaquáticos utilizando Codificação de Rede e OFDMA. 81 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

As Redes Acústicas Subaquáticas (UWANs) são utilizadas na coleta de dados e para o monitoramento de diversos tipos de aplicações, desde a indústria *off-shore* até instalações militares. Da mesma forma que as redes de sensores sem fio terrestres, também é possível explorar a natureza de difusão do canal sem fio e empregar o conceito de comunicações cooperativas para combater o desvanecimento. Em uma rede cooperativa, os nós ajudam uns aos outros, retransmitindo as informações divulgadas por seus parceiros. No entanto, mais do que apenas aumentar a confiabilidade, é necessário também despende esforços para aumentar o tempo de vida da rede, uma vez que não é desejável substituir frequentemente as baterias dos nós sem fio. Assim, neste trabalho é adotada a eficiência energética (em Joules/bit) para avaliar o desempenho de alguns protocolos cooperativos com codificação de rede (NCC) quando comparados à comunicação não cooperativa. Mais especificamente, é considerado um cenário em que o acesso múltiplo é realizado por meio de OFDMA com alocação de subportadora e que estende os resultados de um esquema NCC-OFDMA recentemente proposto. No esquema proposto, referido como codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC)-OFDMA, mais do que simplesmente adotar também o domínio do tempo para alcançar a diversidade, também é mostrado que a ordem de diversidade pode ser aumentada ainda mais sobre o esquema NCC-OFDMA, relaxando uma restrição imposta ao NCC-OFDMA onde apenas um conjunto de nós é capaz de transmitir informações redundantes. Os resultados deste trabalho, os quais englobam análise matemática suportada por simulações computacionais e adotam parâmetros reais de modems acústicos, mostram que o esquema GDNC-OFDMA proposto é capaz de apresentar maior eficiência energética em diversos cenários práticos.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Redes Cooperativas, Codificação de Rede, Redes subaquáticas, OFDMA

ABSTRACT

PEREIRA, Zaqueu Cabral. Energy Efficiency Analysis of Cooperative Networking in underwater environments using Network Coding and OFDMA. 81 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Underwater Acoustic Networks (UWANs) are used to collect data and to monitor various types of applications, from the offshore industry to military installations. Similarly to terrestrial wireless sensor networks, it is also possible to explore the broadcast nature of the wireless channel and employ the concept of cooperative communications in order to combat the fading. In a cooperative network, nodes help each other by relaying the information broadcasted by their partners. However, more than just increasing reliability, one must also expend efforts towards increasing the network lifetime, since it is not desirable to oftenly replace the batteries of the wireless nodes. Thus, in this work we adopt the energy efficiency (in Joules/bit) as performance metric to evaluate some network-coded cooperative (NCC) protocols. More specifically, it is considered a scenario where the multiple access is performed by means of subcarrier allocation-aided OFDMA, extending the results of a recently proposed NCC-OFDMA scheme. In the proposed scheme, referred to as generalized dynamic network coding (GDNC)-OFDMA, more than just achieving diversity from time domain, it is shown that the diversity order can be increased even further, by relaxing a constraint imposed to the NCC-OFDMA scheme that only a set of nodes is able to transmit redundant information. The results of this work, which encompasses mathematical analysis supported by computer simulations, adopt real acoustic modems parameters, show that the proposed GDNC-OFDMA scheme is capable of present improved energy efficiency in several practical scenarios.

Keywords: Energy efficiency, Cooperative Networking, Network Coding, Underwater Networks, OFDMA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Exemplo de Rede Acústica Subaquática adaptada de (GATECH, 2016). A linha vermelha destaca os dispositivos que compõem a rede.	17
Figura 2.1 –	Coeficiente de absorção, $a(f)$, em [dB/km] em função da frequência f em [kHz].	23
Figura 2.2 –	Relação Sinal Ruído em um canal acústico depende da frequência e da distância através do fator $1/AN$	26
Figura 2.3 –	Probabilidade de <i>outage</i> pela SNR. Rayleigh e K_G com $m = 1$ e diversos valores de ν	29
Figura 2.4 –	Probabilidade de <i>outage</i> pela SNR. Uma comparação entre Rayleigh, $K_G(m = 1, \nu = 1, 5)$ e K_G <i>Fitting</i>	30
Figura 2.5 –	Probabilidade de <i>outage</i> pela SNR. Uma comparação entre \mathcal{KG} Teórica e \mathcal{KG} <i>Fitting</i> com valores diferentes de taxa.	31
Figura 2.6 –	Rede cooperativa decodifica-e-encaminha com 2 nós cooperadores.	33
Figura 2.7 –	Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede binária. ..	35
Figura 2.8 –	Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária.	36
Figura 2.9 –	Esquema DNC para uma rede com M nós e taxa $1/M$	37
Figura 2.10 –	Pacotes no esquema GDNC.	38
Figura 3.1 –	Um exemplo de (a) O grafo bipartido completo, (b) O grafo bipartido $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ que contém os eventos de <i>outage</i> entre usuários e o destino e (c) Alocação resultante da aplicação do algoritmo MCMA. As linhas tracejadas indicam os L blocos de coerência, que no exemplo é composta de $N_L = 4$ subportadoras.	43
Figura 3.2 –	Exemplo do algoritmo R^2EHK (a) Rotação (b) Expansão (c) Alocação de subportadora pelo algoritmo Hopcroft-Karp.	45
Figura 4.1 –	Rede de múltiplo acesso de M nós transmissores, onde que cada um do nós transmite informações diferentes para o nó destino através de subportadoras em canais ortogonais.	52
Figura 4.2 –	Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M = 2$ nós cooperadores, considerando os esquemas DT, DF e GDNC e FA GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K}	60
Figura 4.3 –	Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M = 2$ nós cooperadores, considerando os esquemas DT, DF e GDNC e FA-GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K} , com potência do amplificador ≥ 8	61
Figura 4.4 –	Consumo de Energia (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores, para $d = 13km$, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K}	62
Figura 5.1 –	Rede de múltiplo acesso de M nós transmissores, onde que cada um do nós transmite informações diferentes para o nó destino através de	

	subportadoras em canais ortogonais.	64
Figura 5.2–	Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem WHOI (GALLIMORE et al., 2010), (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)	69
Figura 5.3–	Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Marlin (SENDRA et al., 2016), (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)	70
Figura 5.4–	Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Orca (SENDRA et al., 2016) (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)	70
Figura 5.5–	Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Benthos (SENDRA et al., 2016) (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)	71
Figura 5.6–	Número ótimo de nós em função da distância para os esquemas GDNC-OFDMA e NCC-OFDMA (com $k_1 = k_2 = 2$).	71
Figura 5.7–	Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela frequência para o modem Benthos (SENDRA et al., 2016) (com $L = 3$, $M = 6$, $N = 12$, $k_1 = k_2 = 2$, and $d = 10000\text{m}$) ...	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Rede cooperativa com 2 nós cooperadores utilizando método decodifica-e-encaminha.	33
Tabela 2.2– Número de transmissões e recepções do esquema DF.	34
Tabela 2.3– Número de transmissões e recepções do esquema DNC (RAYEL, 2013) .	37
Tabela 2.4– Número de transmissões e recepções do esquema GDNC	39
Tabela 2.5– Número de transmissões e recepções do esquema FA-GDNC	40
Tabela 2.6– Dados dos esquemas de cooperação e codificação de rede	41
Tabela 3.1– Número de transmissões e recepções no esquema GDNC-OFDMA.	48
Tabela 3.2– Número de transmissões e recepções no esquema NCC-OFDMA.	49
Tabela 4.1– Parâmetros do Sistema - Análise TDMA	58
Tabela 4.2– Parâmetros do Modem WHOI2 (GALLIMORE et al., 2010)	59
Tabela 5.1– Parâmetros do Sistema - Análise OFDMA	68
Tabela 5.2– Parâmetros dos Modems	68

LISTA DE SIGLAS

RF	Radio-Frequência
UWANs	Redes Acústicas Subaquáticas, do inglês <i>Underwater Acoustic Networks</i>
MIMO	Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas, do inglês <i>multiple-input multiple-output</i>
MAC	Controle de Acesso ao Meio, do inglês <i>Medium Access Control</i>
OFDM	Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês <i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
OCP	Protocolo de Cooperação Ortogonal, do inglês <i>Orthogonal Cooperation Protocol</i>
OFDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
p.s.d.	Densidade Espectral de Potência, do inglês <i>Power Spectral Density</i>
PDF	Função de Densidade de Probabilidade, do inglês <i>Probability Density Function</i>
AWGN	Ruído Aditivo Gaussiano Branco, do inglês <i>Additive White Gaussian Noise</i>
CDF	Função Distribuição Acumulada, do inglês <i>Cumulative Distribution Function</i>
MSE	Erro Médio Quadrático, do inglês <i>Mean-squared error</i>
DF	Decodifica-e-Encaminha, do inglês <i>Decode-and-Forward</i>
GF(q)	Campo de Galois de ordem q , do inglês <i>Galois Field</i>
BNC	Codificação de Rede Binária, do inglês <i>Binary Network Coding</i>
DNC	Codificação de Rede Dinâmica, do inglês <i>Dynamic Network Coding</i>
GDNC	Codificação de Rede Dinâmica Generalizada, do inglês <i>Generalized Dynamic Network Coding</i>
MDS	Máxima Distância Mínima de Hamming, do inglês <i>Maximum Distance Separable</i>
FA-GDNC	Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com Canal de Retorno, do inglês <i>Feedback-Assisted Generalized Dynamic Network Coding</i>
MCMA	Abordagem de Acoplamento- $\mathcal{K}_{1,K}$ de Restrição Máxima, do inglês <i>maximum constraint $\mathcal{K}_{1,K}$-matching approach</i>
R ² EHK	Rotação e Expansão Aleatória Hopcroft-Karp, do inglês <i>Random Rotation and Expansion based Hopcroft-Karp</i>
SNR	Relação Sinal Ruído, do inglês <i>Signal to Noise Ratio</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$N(f)$	ruído ambiente total
N_t	ruído por turbulência
N_s	ruído por navegação
N_w	ruído por ondulação produzida pelo vento
N_{th}	ruído térmico
$A(l, f)$	atenuação em função da distância e da frequência
\mathcal{P}_o	probabilidade de <i>outage</i>
$\mathcal{P}_{o,X}$	probabilidade de <i>outage</i> total do esquema X
D_X	ordem de diversidade do esquema X
R_X	taxa de pacotes de informação efetivamente transmitidos em relação ao total de pacotes transmitido no esquema X
k_1	quantidade de pacotes de informação transmitidos na fase de difusão para o GDNC
k_2	quantidade de pacotes de paridade transmitidos na fase de cooperação para o GDNC
$\overline{\mathcal{P}_o}$	probabilidade de não ocorrer <i>outage</i>
k'_2	quantidade média de pacotes de paridade transmitidos na fase de cooperação para o FA-GDNC
j	índice do nó receptor
i	índice do nó transmissor
\oplus	adição binária(XOR)
\boxplus	adição sobre campo não binário
\boxminus	subtração sobre campo não binário
E_{tx}	energia gasta por bit no circuito transmissão
E_{st}	energia gasta no processo de ativação do nó
P_{ctx}	potência consumida com circuitos eletrônicos e de banda base para transmissão
E_{rx}	energia gasta por bit no circuito recepção
E_t	energia gasta no amplificador acústico
$P^e(l, f)$	potência elétrica do amplificador de potência em Watts
$P^a(l, f)$	potência acústica para transmissão
φ	Eficiência total dos circuitos elétricos (amplificador de potência e transdutor)
\mathcal{P}_o^*	limiar máximo de probabilidade de <i>outage</i>
E_X	consumo energético do esquema X
\oplus	adição binária(XOR)
\boxplus	adição sobre campo não binário
\boxminus	subtração sobre campo não binário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 MOTIVAÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 PUBLICAÇÕES	20
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	22
2.1 CANAL SUBAQUÁTICO	22
2.1.1 Atenuação	22
2.1.2 Ruído	23
2.1.3 Relação Sinal Ruído - SNR	25
2.1.4 Desvanecimento	26
2.1.5 Probabilidade de <i>outage</i> para a distribuição \mathcal{K}_G	27
2.1.5.1 Manipulação matemática para obtenção da potência	28
2.1.6 Aproximação baseada em <i>Curve Fitting</i>	29
2.2 DIVERSIDADE	31
2.3 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA	32
2.4 CODIFICAÇÃO DE REDE	35
2.4.1 Codificação de Rede Binária (BNC)	35
2.4.2 Codificação de Rede Dinâmica (DNC)	36
2.4.3 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)	37
2.4.4 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com canal de Retorno (FA-GDNC)	39
2.5 DADOS DOS ESQUEMAS COOPERATIVOS	41
3 CODIFICAÇÃO DE REDE ASSOCIADA AO OFDMA	42
3.1 ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE SUB-PORTADORA MCMA	42
3.1.1 Probabilidade de <i>Outage</i>	44
3.1.2 Algoritmo de Alocação de Baixa Complexidade - R^2EHK	44
3.2 GDNC-OFDMA	45
3.2.1 Probabilidade de <i>Outage</i>	46
3.2.2 Análise de taxa	47
3.3 NCC-OFDMA	48
3.3.1 Análise de taxa	49
4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ESQUEMAS TDMA	50
4.1 DEFINIÇÕES IMPORTANTES	50
4.1.1 Eficiência Energética	50
4.1.2 Eficiência Energética utilizando Codificação de Rede	50
4.1.3 Eficiência Energética em UWANs	51
4.2 MODELO DO SISTEMA - TDMA	51
4.3 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO	54
4.3.1 Consumo de Energia do <i>Hardware</i>	54

4.3.2 Consumo Energético da Transmissão Direta	55
4.3.3 Consumo Energético do Esquema DF	55
4.3.4 Consumo Energético do Esquema GDNC	56
4.3.5 Consumo Energético do Esquema FA-GDNC	57
4.4 PARÂMETROS UTILIZADOS	58
4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS	59
4.5.1 Consumo Energético em Relação à Distância	59
4.5.2 Consumo Energético em Relação ao Número de Nós	61
5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ESQUEMAS OFDMA	63
5.1 MODELO DO SISTEMA - OFDMA	63
5.2 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA GDNC-OFDMA	66
5.3 PARÂMETROS UTILIZADOS	67
5.4 RESULTADOS NUMÉRICOS	68
5.4.1 Consumo Energético em Relação à distância	68
5.4.2 Consumo Energético em Relação ao Número de Nós	69
5.4.3 Consumo Energético em Relação à Frequência	72
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6.1 CONCLUSÃO	73
6.2 TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Em indústrias de todos os setores, tem-se hoje uma grande utilização de sistemas de comunicação. Com esse crescimento no uso, o fluxo de informações em redes corporativas ou industriais tem aumentado significativamente. Essas demandas, sejam elas comerciais, ambientais ou industriais, tem gerado requisitos cada vez mais desafiadores, devido principalmente ao crescimento do tráfego de dados.

Nesse sentido, muitos esforços têm sido despendidos recentemente com o intuito de aumentar a taxa de transmissão (e/ou a confiabilidade) dos sistemas de comunicação sem fio, para os mais diferenciados ambientes. Dentro da indústria, especificamente, a utilização de sistemas de comunicações tem crescido consideravelmente. A automação de processos, o controle e monitoramento de ambientes são cada vez mais dependentes de redes de comunicação eficientes.

Nesse cenário, ressalta-se o ramo *off-shore* (termo utilizado para indústria de construção e operação de plataformas, perfuração, fabricação de equipamentos subaquáticos e lançamento de dutos submarinos) e o ramo de usinas hidrelétricas e segurança de barragens que necessitam utilizar sistemas de comunicações em meios subaquáticos (HEIDEMANN et al., 2006).

No meio subaquático, devido à alta atenuação de sinais de rádio frequência (RF) na água, a comunicação através de RF de longo alcance é problemática. Para se obter melhores resultados as transmissões devem usar frequências extra baixas, as quais necessitam de antenas grandes e de altas potências de transmissão inviabilizando sistema de baixo consumo de energia (AL-DHARRAB et al., 2013).

Como alternativa ao uso de RF, a transmissão acústica é o método mais prático e geralmente utilizado devido às condições favoráveis à propagação do som na água. A qualidade de serviço nessas redes é limitada pela largura de banda do canal de transmissão acústico, pela alta latência e pelo elevado nível de ruído (SOZER et al., 2000; PROAKIS et al., 2001).

As redes acústicas subaquáticas (UWANs, do inglês *Underwater Acoustic Networks*) são conectadas por sensores, veículos subaquáticos, e estações de superfície que provêem a comunicação com as estações em terra, sendo muito utilizadas para monitoramento ambiental e supervisionamento de áreas submarinas para fins industriais e militares (SOZER et al., 2000; PROAKIS et al., 2001). Um exemplo deste tipo de rede

é mostrado da Figura 1.1, que apresenta uma UWAN bi-dimensional, constituída de nós sensores subaquáticos no fundo do oceano, que comunicam entre si e com as estações de superfície através de ondas acústicas.

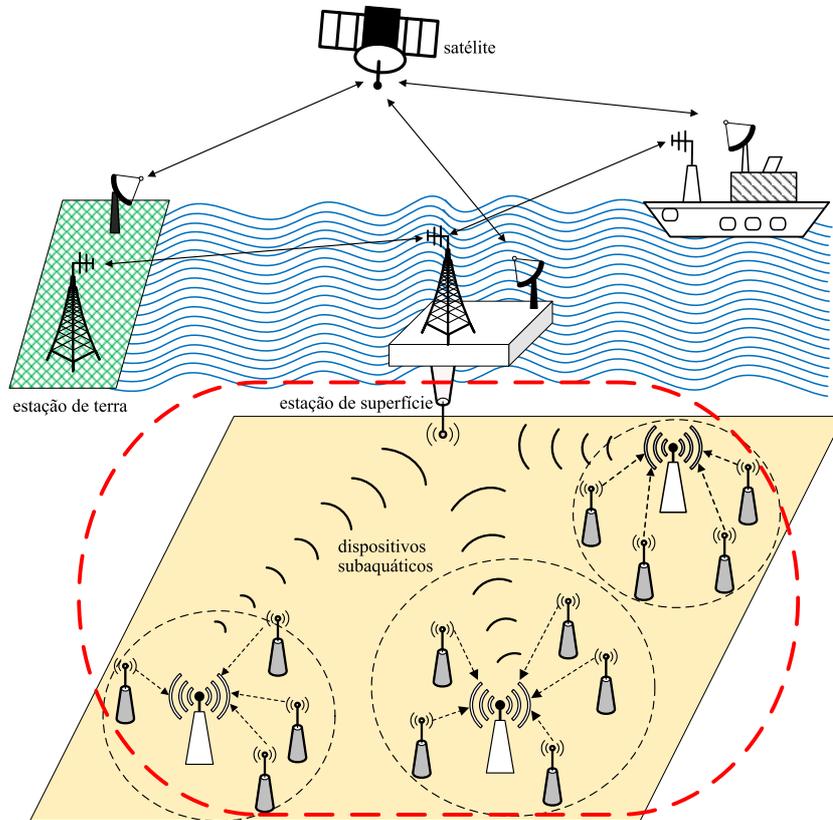


Figura 1.1 – Exemplo de Rede Acústica Subaquática adaptada de (GATECH, 2016). A linha vermelha destaca os dispositivos que compõem a rede.

Grandes avanços têm sido alcançados com a aplicação de técnicas que já vem sendo utilizadas em sistemas com comunicação RF tradicional em UWANs com comunicação acústica. Um exemplo é o uso de sistemas com múltiplas antenas de transmissão e recepção (MIMO) com aumento significantes de capacidade de transmissão e confiabilidade explorando a diversidade espacial (ROY et al., 2007).

Apesar de ser possível aplicar soluções já estudadas para RF em ambientes subaquáticos, as diferenças entre os meios devem ser consideradas no projeto de um sistema de comunicação específico. Por exemplo, é possível alcançar grandes distâncias com comunicação subaquática por meio de ondas acústicas, entretanto as restrições são muito maiores do que em comunicação terrestre por RF (KAUSHAL; KADDOUM, 2016; URICK, 1996). Uma das principais restrições quando se compara comunicação acústica com RF é percebida na largura de banda do canal acústico. A largura de banda é extremamente dependente da perda de percurso a qual tem componente da frequência

e da distância do enlace (URICK, 1996). Outra característica é que o multipercorso varia no tempo e a velocidade de propagação, com valores bem inferiores aos das ondas eletromagnéticas, torna o tempo de propagação perceptivelmente longo. Assim, tem-se como produto dessas características um canal com baixa qualidade e latência alta, o que torna o meio subaquático ainda mais desafiador para o projeto de sistemas de comunicação.

Pelas características do ambiente subaquático, o acesso ao meio (MAC) ainda é um problema não resolvido em UWANs, mas é um tema que vem sendo estudado por décadas em redes de rádio tradicionais, e tem recebido uma atenção especial em redes de sensores sem fio (PARTAN et al., 2006).

Existem possibilidades de combater os problemas inerentes ao canal das UWANs. A utilização de técnicas de comunicação cooperativa aumentando a diversidade pode ser vista como uma boa solução para a perda de percurso dependente da frequência e da distância apresentada pelo canal subaquático (AL-DHARRAB et al., 2013). Outra técnica promissora e que vem sendo recentemente empregada em estudos sobre confiabilidade do canal sem fio em comunicações terrestres é a técnica de codificação de rede (AHLISWEDE et al., 2000; XIAO; SKOGLUND, 2010; REBELATTO et al., 2012). Em um sistema com codificação de rede, os nós são capazes de transmitir combinações lineares de toda a informação disponível, ao invés de apenas encaminhar as mensagens de seus nós parceiros separadamente.

Esquemas de comunicação cooperativa já são estudados para UWANs em (AL-DHARRAB et al., 2013), onde os autores avaliam um sistema cooperativo baseado em OFDM (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês *Orthogonal frequency-division multiplexing*) utilizando o protocolo de cooperação ortogonal OCP (Protocolo de Cooperação Ortogonal, do inglês *Orthogonal Cooperation Protocol*). Nesse trabalho são utilizados canais ortogonais para a transmissão da informação em duas fases (difusão e retransmissão). Tal estratégia se mostrou capaz de combater problemas como a falta de confiabilidade do canal e as grandes perdas de percurso em canais submarinos.

Outras técnicas buscam melhorar o desempenho de taxa de erro de bits e o aumento da eficiência energética no canal subaquático. Em (AHMED; STOJANOVIC, 2013) o controle adaptativo de potência e da taxa de codificação são usados para superar o efeito do desvanecimento, minimizando a média de energia por bit transmitido com sucesso. Em (KAM et al., 2014) são utilizadas técnicas de seleção de frequência e localização dos nós na rede para melhorar a eficiência energética das transmissões em

UWANs. Em (SOUZA et al., 2015, 2016) os autores analisam o efeito da seleção da melhor frequência em uma dada rede subaquática além considerarem o uso de códigos corretores de erros e otimização de taxa de código para obterem eficiência energética.

Neste trabalho, a técnica de comunicação cooperativa com codificação de rede será avaliada em um cenário subaquático com o objetivo de aumentar a eficiência energética, já que não é desejável substituir ou recarregar baterias em um ambiente subaquático. Como ponto de partida é utilizada a mesma estratégia abordada em (RAYEL et al., 2013; RAYEL, 2013) que analisa a eficiência energética em redes de sensores sem fio terrestres aplicando técnicas de cooperação e codificação de rede.

Em complemento, visando impulsionar a diversidade já inerente da codificação de rede, é aplicada a técnica de OFDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) com alocação de subportadoras pelo destino. Para fins de comparação é aplicada uma outra técnica de codificação associada com OFDMA demonstrada por (HEIDARPOUR et al., 2017) e modificada por (TON et al., 2017).

1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento e implementação de técnicas para melhoria do desempenho de redes sem fio é um desafio que vem sendo tratado com sucesso em técnicas de comunicação terrestre. Em comunicações acústicas subaquáticas as restrições de energia são ainda maiores devido às limitações causadas pela utilização de baterias: como impossibilidade de carregamento através de energia solar, dificuldade de substituição, além do alto consumo empregado na transmissão acústica. Este trabalho é motivado pela aplicação de uma dessas técnicas de comunicação terrestre, já utilizada para obtenção de eficiência energética, a codificação de rede aliada ao uso de OFDMA. Dados os resultados já obtidos em comunicações sem fio tradicionais com essa técnica de comunicação, espera-se ser possível atingir bons resultados em comunicações acústicas subaquáticas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho, em termos de eficiência energética, de técnicas de transmissão cooperativas com codificação de rede, empregando OFDMA com seleção de

subportadoras, em cenário subaquático.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar OFDMA com seleção de subportadoras a um esquema de cooperação com codificação de rede recentemente proposto na literatura;
- Obter a equação da probabilidade de outage do referido esquema;
- Avaliar qual a eficiência energética do esquema proposto, utilizando dados reais de modems subaquáticos;
- Avaliar a influência de parâmetros tais como distância entre os nós, número de nós, etc, na eficiência energética.

1.3 PUBLICAÇÕES

PEREIRA, Zaqueu Cabral et al. Generalized Network-Coded Cooperation in OFDMA Communications. IEEE Access, v. 6, p. 6550-6559, 2018.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No Capítulo 2 são introduzidos os conceitos e definições fundamentais de rede acústicas subaquáticas, detalhando as características do canal subaquático, como atenuação, ruído e desvanecimento. Também são apresentados os conceitos de comunicação cooperativa e codificação de rede, para esses esquemas são apresentados os cálculos de probabilidade de *outage* e análise de taxa. No capítulo 3 é apresentado o esquema proposto neste trabalho, um variação do esquema de codificação de rede GDNC com adição de OFDMA bem seu cálculo de probabilidade de *outage* e análise de taxa. No Capítulo 4, é realizada a análise de eficiência energética para os esquemas de comunicação cooperativa e codificação de rede TDMA, nesse capítulo é modelado o consumo energético de cada cenário. São apresentados os resultados numéricos com comparações entre os esquemas de cooperação e a transmissão direta, utilizando parâmetros de modem de uso acadêmico. No Capítulo 5, a análise de eficiência energética é aplicada para os esquemas de comunicação cooperativa e codificação de rede com OFDMA, tanto o esquema GDNC-OFDMA quanto outro esquema da literatura em comparação com a transmissão direta. Neste Capítulo, são mostrados os resultados numéricos com comparações entre os

esquemas de cooperação e a transmissão direta, utilizando parâmetros de modems de uso comercial bem como o modem de uso acadêmico apresentado no capítulo anterior. Por fim, o Capítulo 6 conclui a tese apresentando as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 CANAL SUBAQUÁTICO

O canal subaquático possui características específicas de propagação e forte dependência da frequência da portadora (AL-DHARRAB et al., 2013). Existem muitas fontes de ruído ambiente, como eventos sísmicos, navegação, agitação térmica, chuva e ondas sonoras de animais marinhos, entre outros. O canal subaquático acústico também apresenta perdas por espalhamento e por absorção, tais perdas possuem uma correlação direta com a frequência de operação. Soma-se à potência média determinada pela perda de percurso, o nível instantâneo da potência recebida que varia como resultado dos efeitos de desvanecimento devido à propagação de múltiplos caminhos em ambientes subaquáticos. Em águas rasas ¹ ocorrem multipercursos devido a sinais de reflexos da superfície, fundo e quaisquer objetos na água. Em águas profundas ² é principalmente devido a um fenômeno conhecido como flexão de raios, isto é, a tendência das ondas acústicas de viajar ao longo do eixo da menor velocidade do som (AL-DHARRAB et al., 2013).

2.1.1 Atenuação

A atenuação considerada como perda de propagação e espalhamento, entre os nós i e j é investigada em vários trabalhos como (BREKHOVSKIKH, 2003; POLPRASERT et al., 2011; STOJANOVIC; PREISIG, 2009; AL-DHARRAB et al., 2013), e é dada por:

$$A(l, f) = A_0 l^k a(f)^l, \quad (2.1)$$

onde l é a distância, f é a frequência, A_0 é uma constante de normalização unitária que inclui perdas fixas, k é o fator de espalhamento e $a(f)$ é o coeficiente de absorção.

A atenuação pode ser expressa em dB por:

$$10 \log_{10}(A(l, f)/A_0) = k10 \log_{10}(l) + l10^4 \log_{10}(a(f)), \quad (2.2)$$

onde o primeiro termo no lado direito da equação representa a perda por espalhamento (l em m). O fator k representa a geometria da forma de propagação, mais especificamente se refere ao espalhamento da energia do som resultante da expansão da frente da onda.

¹Águas onde a profundidade é pelo menos 20 vezes menor do que o comprimento das ondas.

²Águas onde a profundidade é maior que a metade do comprimento das ondas.

Valores usualmente utilizados são $k = 2$ para espalhamento esférico típico de uma fonte pontual e $k = 1$ para espalhamento cilíndrico observado uma fonte linear, no caso prático de espalhamento $k = 1,5$ (BREKHOVSKIKH, 2003). O segundo termo no lado direito da equação representa a perda por absorção (l em m). O coeficiente de absorção é expresso pela fórmula de Thorp (BREKHOVSKIKH, 2003):

$$10 \log_{10} a(f) = 0,11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2,75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,003, \quad (2.3)$$

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

A Figura 2.1 ilustra o coeficiente de absorção em função da frequência de acordo com a fórmula de Thorp em (2.3). Observa-se o comportamento restritivo para um limite de frequência de operação, pois com o aumento da frequência tem-se por consequência um crescimento rápido do coeficiente de absorção, fator de suma importância ao se considerar a perda de percurso. Tal afirmação demonstra claramente que para uma certa distância existe um limite máximo para a frequência de operação.

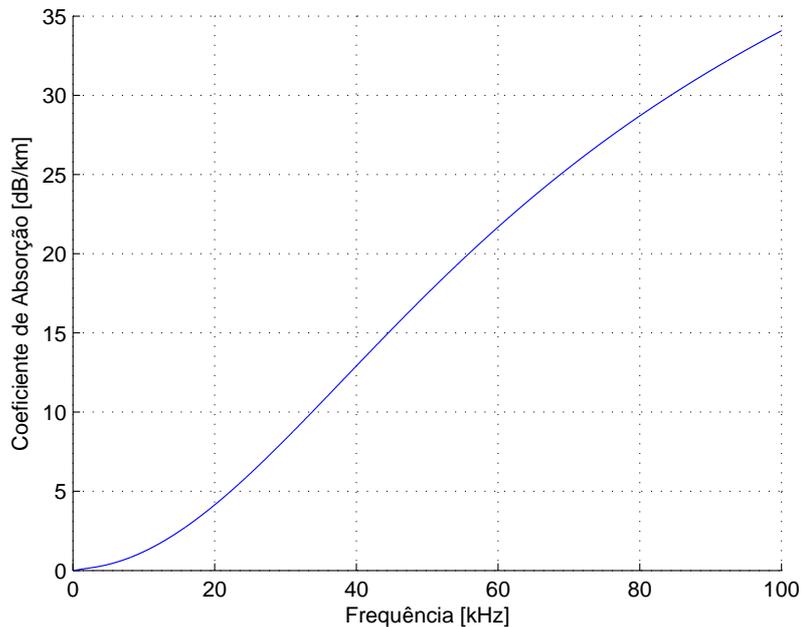


Figura 2.1 – Coeficiente de absorção, $a(f)$, em [dB/km] em função da frequência f em [kHz].

2.1.2 Ruído

O ruído em canal acústico subaquático consiste no ruído do ambiente e ruído específico das características do local (STOJANOVIC, 2006). O ruído ambiente $N(f)$

existe inclusive em águas profundas calmas. Entretanto, existem outros tipos ruídos que aparecem apenas em alguns lugares e com fontes específicas. O modelo utiliza quatro fontes: 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 inglês *Power Spectral Density* do ruído é dada em a dB re μPa ³(STOJANOVIC, 2006).

O Ruído por turbulência $N_t(f)$ é dado em função da frequência f em kHz como:

$$10\log_{10} N_t(f) = 17 - 30\log_{10} f. \quad (2.4)$$

No Ruído por navegação $N_s(f)$, s é o fator de atividade de navegação, o qual varia entre 0 e 1 para baixa e alta atividade, respectivamente, conforme equação a seguir:

$$10\log_{10} N_s(f) = 40 + 20(s - 0,5) + 26\log_{10} f - 60\log_{10}(f + 0,03). \quad (2.5)$$

O Ruído por ondulação produzida pelo vento considera a velocidade dos ventos w em m/s :

$$10\log_{10} N_w(f) = 50 + 7,5w^{0.5} + 20\log_{10} f - 40\log_{10}(f + 0,4). \quad (2.6)$$

O Ruído térmico é dado basicamente em função da frequência f :

$$10\log_{10} N_{th}(f) = -15 + 20\log_{10} f. \quad (2.7)$$

A p.s.d. total do ruído será:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f). \quad (2.8)$$

De acordo com (STOJANOVIC, 2006) por questões de complexidade nas medições de algumas grandezas, essa expressão pode ser aproximada por

$$10\log_{10} N(f) \approx 50 - 18\log_{10} f. \quad (2.9)$$

Na sequência deste trabalho foi utilizada a aproximação para todos os cálculos. Como percebe-se pelas equações, a frequência de operação exerce grande influência em todos os tipos de ruído. Na literatura em (MURUGAN, 2015) os valores típicos de p.s.d. do ruído são dados em função da banda de operação conforme mostrado a seguir:

³Escala logarítmica em decibéis (dB) referente ao nível de pressão acústica expressado na unidade de padrão de pressão Pascal (Pa), do Sistema Internacional (CHAPMAN; ELLIS, 1998).

- **Banda I** - Banda Ultra Baixa: O ruído dessa banda tem origem em marés, ondas ou devido atividades sísmicas. Desse modo, o ruído possui um intervalo de frequência inferior a 1 Hz. Medições precisas deste ruído são muito difíceis de fazer.
- **Banda II** - Banda Infra Sônica: Esta banda compreende frequências de 1 Hz a 20 Hz, com uma inclinação espectral caracterizada em cerca de -30 dB/década. A fonte que tem a maior associação com esse intervalo é a turbulência do oceano. A banda II é classificada em duas faixas: de 1 a 5 Hz e de 5 a 20 Hz. O intervalo mais alto exibe uma inclinação acentuada, entretanto, um ruído de navegação mais forte resulta em uma inversão dessa inclinação.
- **Banda III** - Banda Sônica Baixa: Frequências que variam de 20 Hz a 500 Hz se enquadram nessa categoria. O ruído por navegação e velocidade do vento domina nesta faixa. As bandas de 11 Hz e 17 Hz dependem do vento, assim como aquelas acima da frequência de 200 Hz. A frequência no meio desta faixa depende de outras fontes além do vento, e os picos a 20 Hz e 60 Hz são devidos a uma combinação de fontes biológicas, atividades na costa (60 Hz) e tráfego marítimo de navios. Devido a grande quantidade de fontes, não existem valores típicos para essa banda.
- **Banda IV** - Banda Sônica Alta: Inclui o intervalo de frequências de 500 Hz a 50 KHz e tem um declive típico de cerca de -30 dB por década.
- **Banda V** - Banda Ultra Sônica: Estão nessa banda as frequências acima de 50 KHz. A alta frequência resulta em um declive positivo de +20 dB por década. O movimento de moléculas é a principal fonte de produção de ruído nesta faixa. Pode apresentar altas variações dependendo do local de medição.

2.1.3 Relação Sinal Ruído - SNR

Utilizando a atenuação $A(l, f)$ e a p.s.d do ruído $N(f)$, pode-se avaliar a SNR observada sobre uma distância l (em m) quando o sinal é transmitido em uma frequência f (em KHz) e uma potência acústica P^a , como segue

$$SNR(l, f) = \frac{P^a}{A(l, f)N(f)\Delta f}, \quad (2.10)$$

onde Δf é a largura de banda do ruído (STOJANOVIC, 2006). A perda de absorção aumenta de forma diretamente proporcional com a distância e com a frequência, limitando a largura de banda disponível para comunicação. A influência da frequência na SNR pode

ser demonstrada analisando sua relação com a atenuação $A(l, f)$ e o ruído $N(f)$, por meio do produto $A(l, f)N(f)$ em algumas distâncias conforme a Figura 2.2.

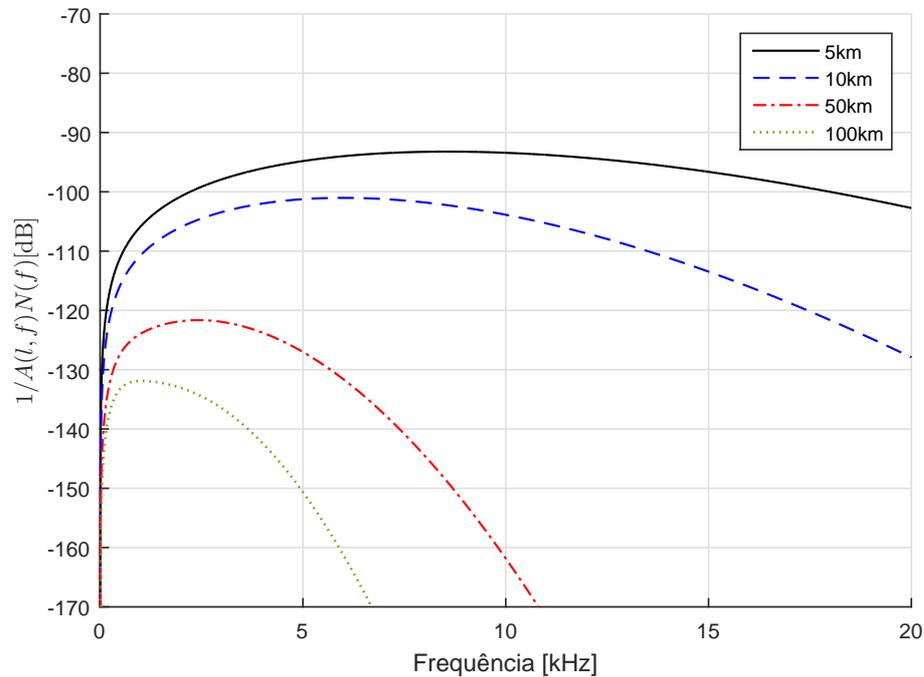


Figura 2.2 – Relação Sinal Ruído em um canal acústico depende da frequência e da distância através do fator $1/AN$.

2.1.4 Desvanecimento

Nas transmissões em comunicação sem fio terrestres via rádio, os múltiplos percursos que resultam em variações rápidas das amplitudes, fases ou atrasos são descritos pela atenuação em pequena escala ou desvanecimento (GOLDSMITH, 2005). A distribuição de Rice e a distribuição Rayleigh são largamente utilizadas para modelar o efeito do desvanecimento em sistemas terrestres de RF. A distribuição de Rayleigh é usada para representar sistemas onde não há uma linha de visada entre o transmissor e o receptor. A distribuição Rice, por sua vez, representa sistemas onde há uma componente dominante estacionária, como um linha de visada entre o transmissor e o receptor.

No ambiente subaquático, ecos do sinal original são gerados devido a seus multipercursos. Tais ecos chegam aos receptor com diferentes tempos de atraso. Dependendo da localização, o atraso pode variar, em alguns casos poucos milissegundos em outros centenas de milissegundos. Quando se opera em um sistema de banda larga, a função de transferência do canal se torna seletiva em frequência, onde as componentes da frequência podem ter atenuações discrepantes.

Experimentos sugerem, no entanto, que o desvanecimento em um canal acústico subaquático é melhor representado pela distribuição \mathcal{K} -Generalizada (\mathcal{K}_G), no caso particular da distribuição \mathcal{K} (YANG; YANG, 2006; SHANKAR, 2011), cuja função densidade de probabilidade (PDF) é

$$f_X(x) = \frac{4}{\sqrt{\alpha}\Gamma(\nu)} \left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right)^\nu K_{\nu-1}\left(\frac{2x}{\sqrt{\alpha}}\right), \quad (2.11)$$

onde ν é o parâmetro de forma, α é um parâmetro de escala, $K_{\nu-1}$ é a função de Bessel modificada, de ordem $\nu - 1$, e $\Gamma(\nu)$ é a função Gamma completa, a qual é definida como (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2000, eq. (6.41/1))

$$\Gamma(\nu) = \int_0^{\infty} x^{\nu-1} e^{-x} dx. \quad (2.12)$$

2.1.5 Probabilidade de *outage* para a distribuição \mathcal{K}_G

Afim de viabilizar a análise de eficiência energética, é necessário ter uma expressão analítica onde seja possível determinar a potência de transmissão necessária para alcançar uma probabilidade de *outage* alvo. Na literatura foram descritas expressões para a probabilidade de *outage* da distribuição \mathcal{K}_G , no caso particular de \mathcal{K} , entretanto possuem alta complexidade de resolução e de difícil manipulação matemática. (XIAO; LU, 2013; REDDY et al., 2010; SHANKAR, 2011; BITHAS et al., 2008).

No contexto de comunicações digitais, a distribuição \mathcal{K} -Generalizada começou a ser utilizada recentemente para representar os fenômenos de desvanecimento e sombreamento em canais de comunicação móvel. Uma das grandes desvantagens da utilização da distribuição \mathcal{K}_G é que sua manipulação matemática é mais complexa quando se compara a modelos baseados em Lognormal como Nakagami- m e Rayleigh-Lognormal (SHANKAR, 2004; BITHAS et al., 2006). A expressão de PDF da distribuição \mathcal{K}_G é dada por:

$$f_{\gamma_s}(\gamma) = \frac{2 \Xi^{(\beta+1)/2} \gamma^{(\beta+1)/2}}{\Gamma(m)\Gamma(\nu)} K_\alpha \left[2(\Xi\gamma)^{1/2} \right], \gamma \geq 0 \quad (2.13)$$

sendo $\alpha = \nu - m$, $\beta = \nu + m - 1$, onde ν e m são os parâmetros de forma da distribuição K_α é a Função Bessel Modificada de ordem α e $\Xi = (\nu m / \gamma)$.

A grande vantagem da distribuição \mathcal{K}_G , que é a principal motivação para sua utilização neste trabalho, é que é possível descrever vários modelos de sombreamento e

desvanecimento usando diferentes combinações de valores de seus parâmetros ν e/ou m . Por exemplo, com $\nu \rightarrow \infty$, se torna uma aproximação da distribuição Nakagami- m ; sendo $\nu \rightarrow \infty$ e $m \rightarrow \infty$ aborda o canal de ruído aditivo branco gaussiano (AWGN); para $m = 1$, corresponde às condições de desvanecimento da distribuição \mathcal{K} (YILMAZ; ALOUINI, 2010; SHANKAR, 2011; BITHAS et al., 2006).

Assim é possível obter uma expressão da (CDF) da distribuição \mathcal{K}_G que represente o ambiente subaquático, fixando m da CDF dada em (BITHAS et al., 2006) para obtenção da probabilidade de *outage* \mathcal{P}_o :

$$F_{\gamma_s}(\gamma) = \pi \csc(\pi\alpha) \left[\frac{(\Xi\gamma)^m {}_1F_2(m; 1-\alpha, 1+m; \Xi\gamma)}{\Gamma(\nu)\Gamma(1-\alpha)\Gamma(1+m)} - \frac{(\Xi\gamma)^\nu {}_1F_2(\nu; 1+\alpha, 1+\nu; \Xi\gamma)}{\Gamma(m)\Gamma(1+\alpha)\Gamma(1+\nu)} \right] \quad (2.14)$$

onde ${}_pF_q$ é a Função Hypergeométrica Generalizada (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2000, eq. (9.14/1)). Assim, a probabilidade de *outage* pode ser obtida pela expressão CDF como a seguir.

$$\mathcal{P}_o = F_{\gamma_s}(\gamma). \quad (2.15)$$

Visando demonstrar que as premissas assumidas em (YILMAZ; ALOUINI, 2010; SHANKAR, 2011; BITHAS et al., 2006) sobre a relação entre as distribuições de probabilidade são válidas, na Figura 2.3 é possível confirmar que quando $\nu \rightarrow \infty$ tem-se a distribuição de Nakagami- m , e que com $m = 1$ tem-se a distribuição de Rayleigh. Também ressalta-se na Figura 2.3 que a probabilidade de *outage* de \mathcal{K}_G com $m = 1$ equivale à probabilidade de *outage* de \mathcal{K} .

2.1.5.1 Manipulação matemática para obtenção da potência

Tendo validadas as condições para uso da expressão de probabilidade de *outage* em (BITHAS et al., 2006), é imprescindível que seja viável a manipulação matemática para a obtenção de uma potência de transmissão dada uma probabilidade de *outage* alvo. A expressão de (BITHAS et al., 2006) contém uma Função Hypergeométrica Generalizada ${}_qF_p$ que não possui função inversa. Outra alternativa estudada, foi baseada nas expressões de probabilidade de *outage* apresentadas em (SHANKAR, 2011). A distribuição \mathcal{K}_G é apresentada com uma função $G(\cdot)$ de Meijer, de qual a já mencionada Função Hypergeométrica Generalizada é um caso particular. A distribuição \mathcal{K}_G é apresentada

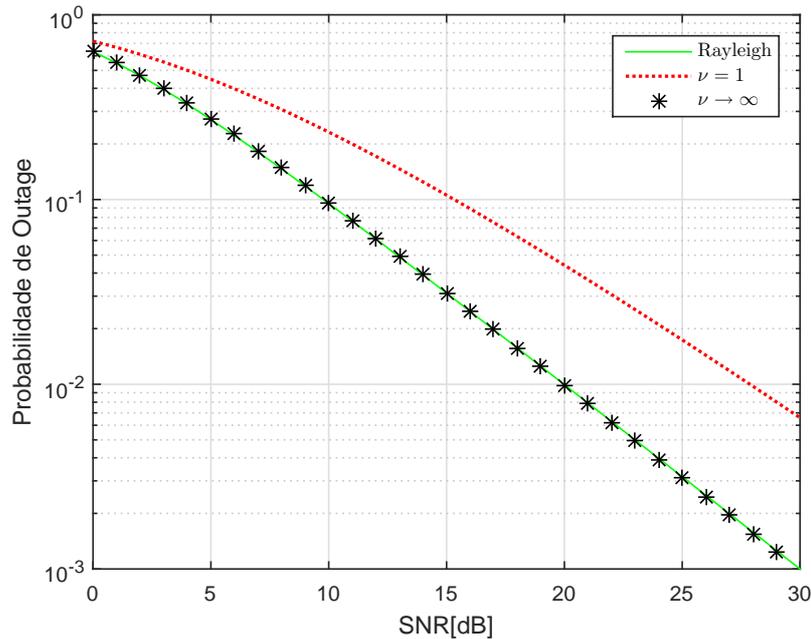


Figura 2.3 – Probabilidade de *outage* pela SNR. Rayleigh e K_G com $m = 1$ e diversos valores de ν .

como uma $K_{\nu-1}$, função de Bessel modificada. A função Bessel modificada por sua vez não possui função inversa, impossibilitando também sua manipulação matemática sem alguma simplificação ou aproximação. Outros trabalhos como (WENIGER; CÍZEK, 1990; JING; ZHE-WEI, 2004) trazem aproximações para essa função, contudo, também incluem expressões com a mesma Função Hypergeométrica Generalizada, o que leva a alternativa para uma situação similar à da alternativa anterior.

2.1.6 Aproximação baseada em *Curve Fitting*

Os métodos de *Curve Fitting* correspondem aos processos de construção de uma função matemática ou curva que melhor se ajusta a uma série de dados (ARLINGHAUS; NYSTUEN, 1994). Pode ser realizada por interpolação ou suavização. A *Toolbox Curve fitting* do MATLAB ® pode ser utilizada desde que exista uma curva definida para o ajuste. O desvanecimento presente no ambiente subaquático é caracterizado pelo parâmetro de forma da distribuição \mathcal{K}_G . Desse modo, é possível obter uma expressão e por consequência uma curva para aplicação dos métodos de *Curve Fitting*. Para avaliação da precisão da aproximação da curva obtida através do *Curve Fitting* foi utilizada a métrica de MSE (*Erro Médio Quadrático*). As curvas de Probabilidade de *outage* pela SNR apresentam um MSE de valor 0,005. Como pode ser observado na Figura 2.4, a curva é equivalente também a probabilidade de *outage* de um desvanecimento Rayleigh

com uma penalização de aproximadamente 5 dB.

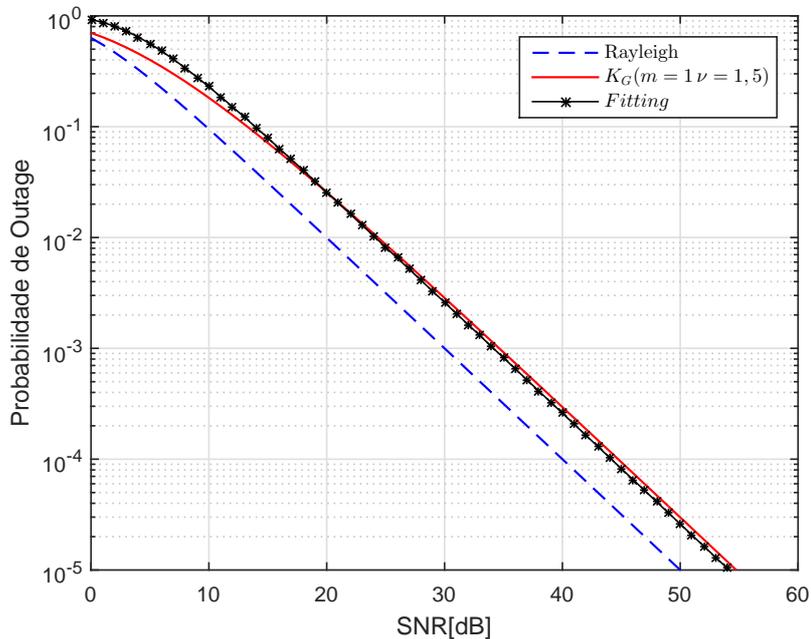


Figura 2.4 – Probabilidade de *outage* pela SNR. Uma comparação entre Rayleigh, $K_G(m = 1, \nu = 1,5)$ e K_G *Fitting*

Baseado no método de *Curve Fitting*, é possível encontrar uma expressão de fácil manipulação matemática com uma aproximação satisfatória possibilitando a obtenção da potência de transmissão dada uma probabilidade de *outage* alvo,

$$\mathcal{P}_{ofit} \approx \mathcal{P}_o = 1 - \exp\left(\frac{-(2^r - 1)2,6}{SNR}\right). \quad (2.16)$$

Para comprovar que a aproximação é válida para diferentes cenários com taxa r variando, é necessário realizar a comparação entre a expressão teórica e a expressão aproximada por *Fitting* para valores possíveis de taxa r ⁴. A Figura 2.5 demonstra essa comparação e por meio dela é possível observar que a aproximação pode ser usada para diferentes valores de taxa. A aproximação por *Fitting* possui maior precisão na região de alta SNR, por outro lado, tal comportamento não é observado na região de baixa SNR. Para o cenário considerado neste trabalho, são analisadas apenas a região de alta SNR, assim conclui-se que a aproximação é válida nas análises a seguir.

⁴Não são considerados outros valores de m e ν , visto que (YANG; YANG, 2006) demonstra que o desvanecimento do canal subaquático é caracterizado pela distribuição \mathcal{KG} com os valores de $m = 1$ e $\nu = 1,5$.

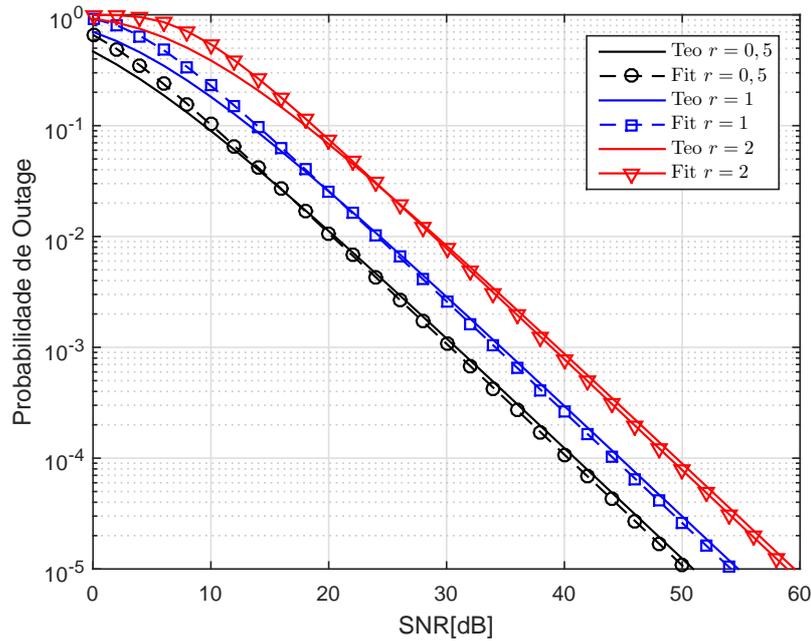


Figura 2.5 – Probabilidade de *outage* pela SNR. Uma comparação entre \mathcal{KG} Teórica e \mathcal{KG} Fitting com valores diferentes de taxa.

2.2 DIVERSIDADE

Em um sistema de comunicação sem fio o nível do sinal no receptor de um sistema sem fio flutua e desvanece, o que implica no comprometimento do desempenho. A diversidade atenua os efeitos do desvanecimento e é alcançada provendo ao receptor com múltiplas cópias do sinal transmitido por canais diferentes, proporcionando desvanecimentos independentes entre as diferentes cópias. Com caminhos independentes aumenta da probabilidade de pelo menos uma das cópias não experimente um desvanecimento profundo. Os sinais que chegam por caminhos independentes são detectados no receptor que os seleciona ou combina de forma que o sinal resultante apresente um desvanecimento reduzido (GOLDSMITH, 2005).

A diversidade também pode ser aumentada com a aplicação de comunicação cooperativa. Para um sistema de comunicação cooperativa, que é o alvo desse trabalho, é portanto importante analisar a ordem de diversidade proporcionada pelo esquema. A potência de transmissão necessária para atingir uma probabilidade de *outage* alvo, diminui quando a ordem de diversidade aumenta.

Considerando o desvanecimento em bloco, a ordem de diversidade D é definida como (TSE; VISWANATH, 2005)

$$D_X \triangleq \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{-\log \mathcal{P}_{o,X}}{\log SNR}, \quad (2.17)$$

onde $\mathcal{P}_{o,X}$ é a probabilidade de *outage* total do esquema X .

Para esclarecer a notação, neste trabalho será utilizado D_X para a ordem de diversidade do esquema X citado.

2.3 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

A difusão é uma característica própria do canal de transmissão sem fio, seja ele terrestre ou subaquático. Tal característica possibilita que qualquer mensagem enviada para o nó destino seja detectada pelos demais nós da rede. Com o conhecimento da mensagem recebida do nó vizinho é possível que haja cooperação entre os nós transmissores. Dispositivos em redes sem fio celulares ou dispositivos *ad-hoc*, podem utilizar comunicação cooperativa para aumentar sua qualidade de serviço. Essa qualidade de serviço pode ser medida na camada física pela taxa de erros de bits, taxa de erros de blocos e probabilidade de *outage* (NOSRATINIA et al., 2004). Esse aumento de qualidade de serviço se dá pelo aumento da ordem de diversidade do sistema, diminuindo o efeito do desvanecimento inerente ao canal sem fio (SENDONARIS et al., 2003; LANEMAN et al., 2004; XIAO et al., 2007; REBELATTO et al., 2012). Um sistema cooperativo é capaz de obter ordem de diversidade equivalente a um sistema com múltiplas antenas (TAROKH et al., 2006).

Em sistemas cooperativos, a transmissão é realizada em duas fases: a fase de difusão, onde os nós transmissores enviam seus próprios dados por canais ortogonais, e a fase de cooperação, quando os nós retransmitem as mensagens recebidas de seus nós vizinhos durante a fase anterior. Um exemplo de uma comunicação cooperativa decodifica-e-encaminha é demonstrado na Tabela 2.1, onde na fase de difusão - *Time Slot 1*: Cada nó usa o canal sem fio para difundir sua própria informação, a seguir, na fase de cooperação - *Time Slot 2* : cada nó transmite a informação do nó vizinho após decodificação e recodificação.

Os dados corretamente recebidos de seus parceiros e retransmitidos possibilitam múltiplas cópias de uma mesma mensagem sejam enviadas ao destino. Essas cópias se propagaram por caminhos independentes, provendo um aumento da ordem de diversidade do sistema, e aumentando por consequência a probabilidade de sucesso na comunicação.

O esquema de cooperação *Decodifica-e-Encaminha*, é apresentado na Figura 2.6.

Tabela 2.1 – Rede cooperativa com 2 nós cooperadores utilizando método decodifica-e-encaminha.

	<i>Time Slot 1</i> (Difusão)	<i>Time Slot 2</i> (Cooperação)
Nó 1	I_1	I_2
Nó 2	I_2	I_1

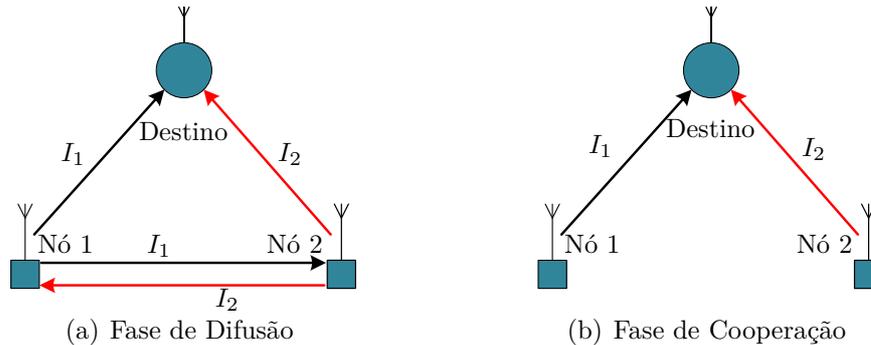


Figura 2.6 – Rede cooperativa decodifica-e-encaminha com 2 nós cooperadores.

Trata-se de uma rede cooperativa modelo DF (Decodifica-e-Encaminha, do inglês *Decode-and-Forward*) para número de nós transmissores $M = 2$.

Após realizar a difusão de seus pacotes, cada nó cooperador apenas recebe, decodifica, recodifica e retransmite o pacote de seu nó vizinho. Se o nó não decodificar sem erros a informação de seu nó vizinho, ele envia uma cópia da sua própria informação. Por ser um sistema cooperativo que tem como objetivo aumentar a ordem de diversidade, nota-se também na Figura 2.6 que a informação de cada nó percorre 2 caminhos independentes até o nó de destino, alcançando o objetivo em termos de ordem de diversidade quando comparado à transmissão direta de dados.

Neste esquema, cada nó realiza 2 transmissões, na fase de difusão - da sua própria informação, na fase de cooperação - da informação do nó vizinho, de modo que o número total de transmissões é dado por $2M$. Na fase de difusão, durante cada uma das M difusões, todos os M nós restantes ($M - 1$ nós transmissores mais o destino) tentam recuperar a mensagem transmitida, gerando uma quantidade de M^2 recepções. Na fase de cooperação, as transmissões são endereçadas somente ao nó destino, totalizando M recepções. Assim, o número de recepções do esquema DF é dado por $M^2 + M$. Tal resultado é demonstrado na Tabela 2.2.

Conforme já mencionado, dado o modelo do sistema sujeito a desvanecimento do canal, a métrica a ser utilizada na análise de desempenho dos diversos esquemas

Tabela 2.2 – Número de transmissões e recepções do esquema DF.

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	M	M^2
Fase de Cooperação	M	M
Total	$2M$	$M^2 + M$

a serem apresentados será a probabilidade de *outage*. Desse modo, considerando que todos os enlaces da rede possuem SNRs equivalentes e são sujeitos a falhas, tem-se que a probabilidade de *outage* é dada por (LANEMAN et al., 2004):

$$\mathcal{P}_{o,DF} = 0,5 \mathcal{P}_o^2. \quad (2.18)$$

em que \mathcal{P}_o é a probabilidade de *outage* de um enlace individual, dada em (2.16) para desvanecimento em distribuição \mathcal{K} .

O ganho de diversidade obtido por um esquema de cooperação, pode proporcionar transmissões que oneram menos a fonte de energia do transmissor mantendo a qualidade. Aplicando (2.18) em (2.17) obtém-se,

$$D_{DF} \triangleq \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{-\log 0,5 \mathcal{P}_o^2}{\log SNR} \quad (2.19a)$$

$$= \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{-\log 0,5 \left(1 - \exp\left(\frac{-(2^r - 1)2,6}{SNR}\right)\right)^2}{\log SNR} \quad (2.19b)$$

$$= 2 \quad (2.19c)$$

Nota-se então que a diversidade do esquema DF é 2, equivalente a um sistema de transmissão direta onde o nó receptor possui 2 antenas.

Para uma comparação justa com a transmissão direta em termos de eficiência espectral, utiliza-se uma expressão que represente a taxa, que é a razão entre a quantidade de informação efetiva e a quantidade total de informação transmitida. Considerando o número de transmissões apresentados na Tabela 2.2, a taxa do esquema DF é dada por:

$$R_{DF} = \frac{\text{Nº de pacotes de informação}}{\text{Nº total de pacotes}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \quad (2.20)$$

Para fins de notação, R_X sempre denotará a taxa de pacotes de informação efetivamente transmitidos em relação ao total de pacotes transmitido no esquema sub-indexado.

2.4 CODIFICAÇÃO DE REDE

A Codificação de Rede (do inglês *Network Coding*)(KOETTER; MEDARD, 2003), tem sido aproveitada para reduzir a taxa de erros em redes cooperativas sem fio (XIAO et al., 2007; XIAO; SKOGLUND, 2009, 2010; REBELATTO et al., 2012). Nos sistemas cooperativos tradicionais (SENDONARIS et al., 2003; LANEMAN et al., 2004) as informações dos nós parceiros são retransmitidas individualmente. Nos sistemas cooperativos com codificação de rede, os nós cooperadores transmitem combinações binárias das informações recebidas e decodificadas. Essas combinações são realizadas sobre um campo finito $GF(q)$, onde q é a ordem do Campo de Galois utilizado.

A realização de combinações lineares na transmissão é executada para que cada mensagem seja transmitida por uma quantidade maior de percursos independentes. Isto acontece devido ao fato de ser possível combinar duas mensagens independentes e enviá-las de forma conjunta pela rede e no receptor separá-las para conseguir os dados originais. Esse envio combinado sendo realizado por diversos caminhos possibilita a obtenção de uma maior ordem de diversidade.

2.4.1 Codificação de Rede Binária (BNC)

No esquema BNC (*Codificação de Rede Binária*, do inglês *Binary Network Coding*) (XIAO et al., 2007), cada nó transmite a soma binária de sua própria informação e a informação do nó adjacente. Uma rede BNC com dois nós é ilustrada na Figura 2.7. Na fase de difusão, cada nó difunde a sua própria informação, no próximo período, na fase de cooperação cada nó transmite a soma binária de sua informação e da informação do nó adjacente. A adição binária (XOR) é representada pelo símbolo \oplus .

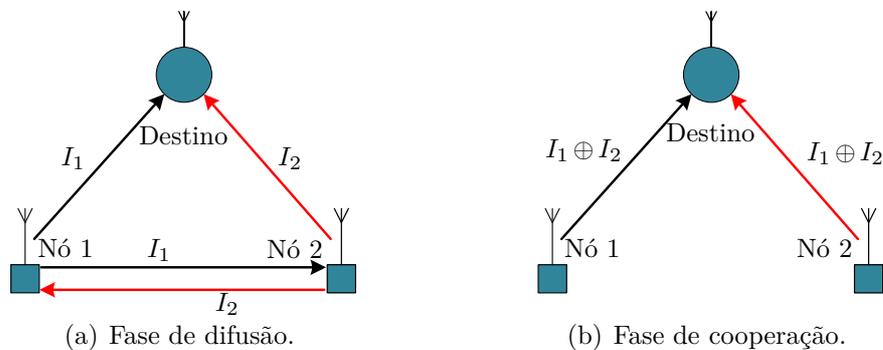


Figura 2.7 – Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede binária.

Em (RAYEL, 2013) a probabilidade de *outage* do esquema BNC é definida como.

$$\mathcal{P}_{o,\text{BNC}}(M=2) \approx \mathcal{P}_o^2, \quad (2.21)$$

com uma ordem de diversidade definida como $D_{\text{BNC}} = 2$.

Neste esquema somente é transmitida uma combinação binária de sua própria informação e as informações dos $M - 1$ nós adjacentes, a taxa do esquema BNC pode ser dada por:

$$R_{\text{BNC}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \quad (2.22)$$

2.4.2 Codificação de Rede Dinâmica (DNC)

A *Codificação de Rede Dinâmica* (DNC, do inglês *Dynamic Network Coding*), foi definida em (XIAO; SKOGLUND, 2009). Nesse trabalho é mostrado que quando é utilizada uma codificação de rede não-binária é possível alcançar ordem de diversidade maior. Numa rede DNC o tamanho do campo é aumentado e coeficientes utilizados não são mais binários. Um exemplo do esquema DNC é mostrado na Figura 2.8. Na fase de difusão, cada nó difunde a sua própria informação e em seguida, na fase de cooperação cada nó transmite uma combinação linear sobre GF(4) dos pacotes de informação disponíveis. Os símbolos \boxplus e \boxminus representam adição e subtração sobre campos finitos, respectivamente.

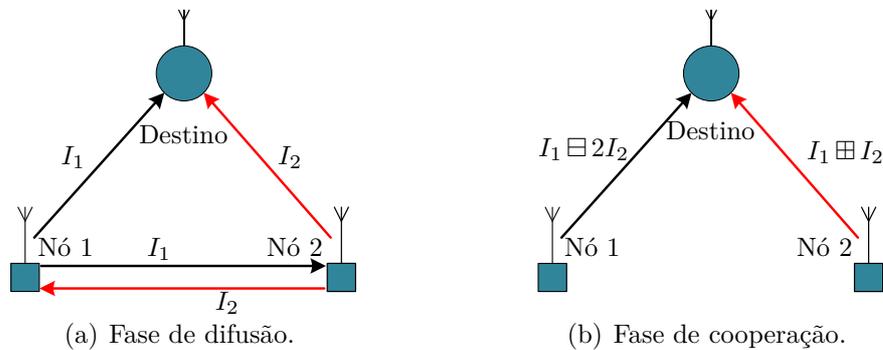


Figura 2.8 – Rede cooperativa com 2 nós empregando codificação de rede não-binária.

Assumindo-se o canal entre os nós livre de falhas, foi mostrado em (XIAO; SKOGLUND, 2009) que a probabilidade de *outage* é dada por

$$\mathcal{P}_{o,\text{DNC}}(M=2) \approx 4\mathcal{P}_o^3.$$

onde é possível perceber que a diversidade do esquema é $D = 3$

O DNC pode ser expandido para uma rede com uma quantidade maior que 2

nós. Essa expansão foi apresentada em (XIAO; SKOGLUND, 2009), nesse esquema cada nó transmite $M - 1$ combinações lineares na fase de cooperação, conforme mostrado na Figura 2.9. O pacote de paridade $P_i(t)$ é transmitido pelo nó i durante o *slot* de tempo t .

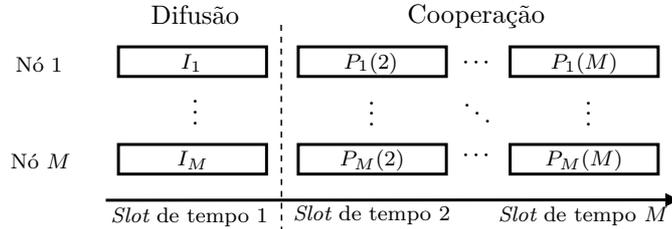


Figura 2.9 – Esquema DNC para uma rede com M nós e taxa $1/M$.

Para o cálculo da taxa do esquema, é necessário saber o número de transmissões e recepções adicionais. A Tabela 2.3 traz essas informações em função do número de nós cooperadores.

Tabela 2.3 – Número de transmissões e recepções do esquema DNC (RAYEL, 2013)

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	M	M^2
Fase de Cooperação	$M^2 - M$	$M^2 - M$
Total	M^2	$2M^2 - M$

Desse modo, a taxa de um sistema DNC com M nós, é calculado como

$$R_{\text{DNC}} = \frac{\text{n}^\circ \text{ pacotes de informação}}{\text{n}^\circ \text{ total de pacotes}} = \frac{M}{M^2} = \frac{1}{M}. \quad (2.23)$$

a ordem de diversidade é dada por

$$D_{\text{DNC}} = 2M - 1, \quad (2.24)$$

com uma taxa fixa conforme mostrado em (2.23).

2.4.3 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)

O esquema denominado *Codificação de Rede Dinâmica Generalizada* (GDNC, do inglês *Generalized Dynamic Network Coding*), é uma estratégia de comunicação cooperativa proposta por (REBELATTO et al., 2012). Trata-se da generalização do esquema DNC proposto por (XIAO; SKOGLUND, 2010) mostrado na seção 2.4.2. Esse esquema explora a diversidade no tempo e no espaço atingindo ordem de diversidade maior que o anterior.

Em (REBELATTO et al., 2012) é realizada uma analogia entre a matriz de transferência da rede e uma matriz geradora de um código de bloco. Tal referência é possível devido à demonstração de que a ordem de diversidade do sistema e a distância mínima de Hamming do código de bloco são equivalentes. Assim, o esquema GDNC opera nas duas fases da seguinte forma:

- **Fase de difusão:** Os nós da rede difundem uma quantidade de k_1 pacotes de informação. Também nessa fase os nós tentam decodificar as informações recebidas dos demais nós.
- **Fase de cooperação:** Os nós transmitem para o destino uma quantidade de k_2 pacotes de paridade.

A Figura 2.10 sumariza o funcionamento do esquema GDNC: do lado esquerdo, na fase de difusão, cada nó difunde k_1 pacotes de informação $I_i(t)$; no lado direito na fase de cooperação cada nó transmite k_2 pacotes de paridade $P_i(t)$.

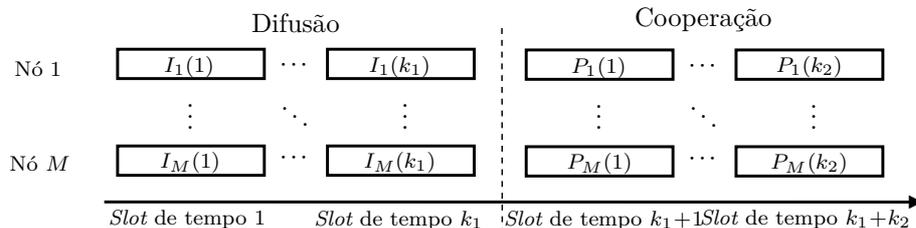


Figura 2.10 – Pacotes no esquema GDNC.

No esquema GDNC original, considera-se ortogonalidade na transmissão/recepção, de tal forma que cada nó da rede pode apenas transmitir ou receber informação no mesmo instante de tempo, mas não os dois. Também considera-se que o múltiplo acesso no destino é ortogonal no tempo, ou seja, o mesmo recebe mensagens de um usuário por vez (não havendo interferência entre as transmissões).

A probabilidade de *outage* do esquema GDNC com parâmetros (k_1, k_2, M) é mostrada em (REBELATTO et al., 2012) como:

$$\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}} \approx \binom{k_1 + k_2 - 1}{k_2} \mathcal{P}_o^{M+k_2} \quad (\text{para } k_2 \geq 2), \quad (2.25)$$

onde $\binom{k_1+k_2-1}{k_2}$ corresponde ao coeficiente binomial.

A ordem de diversidade do esquema GDNC é $D_{\text{GDNC}} = M + k_2$. Tal diversidade pode ser atingida com a utilização de uma matriz de transferência da rede uma

matriz geradora de um código com máxima distância mínima de Hamming (MDS, do inglês *Maximum Distance Separable*). E bom exemplo é classe de códigos Reed-Solomon (REBELATTO et al., 2012).

Baseado nos números de transmissões e recepções do esquema GDNC apresentados na Tabela 2.4 sua taxa é dada por:

$$\begin{aligned} R_{\text{GDNC}} &= \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2} \\ &= \frac{k_1}{k_1 + k_2}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

esse cálculo é baseado no fato de que a quantidade de $M(k_1 + k_2)$ pacotes é transmitida, onde somente Mk_1 destes carregam nova informação.

Tabela 2.4 – Número de transmissões e recepções do esquema GDNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	M^2k_1
Fase de Cooperação	Mk_2	Mk_2
Total	$M(k_1 + k_2)$	$M(Mk_1 + k_2)$

2.4.4 Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com canal de Retorno (FA-GDNC)

Em um sistema de comunicação cooperativa o aumento da SNR traz consigo o aumento da probabilidade do nó destino decodificar corretamente todas as informações recebidas na fase de difusão. O esquema GDNC, mostrado na seção 2.4.3, reenvia todas as informações na fase de cooperação. Entretanto para cenários com alta SNR, boa parte das informações enviadas na fase de difusão são decodificadas corretamente, o que torna o reenvio na fase de cooperação um consumo energético que pode ser evitado

Visando as condições mencionadas na busca em uma melhor taxa para o sistema sem que afete a ordem de diversidade, em (REBELATTO, 2010) é proposto o esquema esquema é denominado FA-GDNC, Codificação de Rede Dinâmica Generalizada com Canal de Retorno, do inglês *Feedback-Assisted Generalized Dynamic Network Coding*.

O esquema considera um canal de retorno entre o destino e os nós transmissores, livre de erros. Por esse canal os nós transmissores são informados sobre o sucesso ou a falha na decodificação dos pacotes transmitidos durante a fase de difusão. A mensagem de retorno é basicamente um bit de *outage* (OUT). Para uma transmissão com sucesso é enviado $\text{OUT} = 0$, quando o pacote de informação ou alguma parte dele não é decodificado

corretamente é enviado $\text{OUT} = 1$. Quando o nó transmissor recebe um bit $\text{OUT} = 0$, ele considera que todos os Mk_1 pacotes de informação recebidos no nó destino foram corretamente decodificados, e novos pacotes de informação podem ser gerados em uma nova fase de difusão sem o envio de paridade. Em contrapartida, se um bit $\text{OUT} = 1$ é recebido de pelos nós transmissores, acontece que pelo menos um dos Mk_1 pacotes de informação não foi decodificado corretamente, nesse cenário, cada nó transmite k_2 pacotes de paridade, de acordo com o esquema GDNC original apresentado na sub-seção anterior.

A análise da probabilidade de *outage* para o esquema FA-GDNC a mesma apresentada na sub-seção anterior, resultando na mesma probabilidade de *outage* e consequentemente na mesma diversidade $M + k_2$ dada (2.25).

Entretanto, a análise de taxa do esquema FA-GDNC, deve considerar a probabilidade dos nós não necessitarem transmitir os pacotes de paridade.

Em (REBELATTO, 2010) esta probabilidade é dada por $\Pr\{\text{OUT}=0\} = (1 - \mathcal{P}_o)^{Mk_1}$. Assim, como o número de pacotes de informação transmitidos por rodada é sempre Mk_1 , e considerando que $\overline{\mathcal{P}_o} = 1 - \mathcal{P}_o$, a taxa do sistema no esquema FA-GDNC pode descrita como:

$$\begin{aligned} R_{\text{FA-GDNC}} &= \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})} \\ &= \frac{k_1}{k_1 + k_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Na Tabela 2.5 são mostra o número total de transmissões e recepções realizadas no esquema FA-GDNC. Como na fase de cooperação nem sempre é necessária, o número médio de pacotes de paridade transmitido por cada nó através de k'_2 , que corresponde a $k_2(1 - \overline{\mathcal{P}_o}^{Mk_1})$.

Tabela 2.5 – Número de transmissões e recepções do esquema FA-GDNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	M^2k_1
Fase de Cooperação	Mk'_2	Mk'_2
Total	$M(k_1 + k'_2)$	$M(Mk_1 + k'_2)$

2.5 DADOS DOS ESQUEMAS COOPERATIVOS

A Tabela 2.6 traz o resumo dos dados do probabilidade de *outage*, taxa (R) e ordem de diversidade.

Tabela 2.6 – Dados dos esquemas de cooperação e codificação de rede

Esquema	$\mathcal{P}_{o,\text{Esquema}}$	Taxa(R)	Ordem de Diversidade
DF	$0,5\mathcal{P}_o^2$	$\frac{1}{2}$	2
BNC	\mathcal{P}_o^2	$\frac{1}{2}$	2
DNC	$4\mathcal{P}_o^3$	$\frac{1}{M}$	$2M-1$
GDNC	$\binom{k_1+k_2-1}{k_2}\mathcal{P}_o^{M+k_2}$	$\frac{k_1}{k_1+k_2}$	$M+k_2$
FA-GDNC	$\binom{k_1+k_2-1}{k_2}\mathcal{P}_o^{M+k_2}$	$\frac{k_1}{k_1+k_2(1-\mathcal{P}_o^{Mk_1})}$	$M+k_2$

3 CODIFICAÇÃO DE REDE ASSOCIADA AO OFDMA

Neste capítulo é apresentado o esquema de GDNC associado com OFDMA. Tal esquema além de explorar a diversidade espaço-temporal, produzido pelo GDNC, visto na seção 2.4, também propõe o aproveitamento da diversidade em frequência proporcionado pelo OFDMA. A referida diversidade em frequência é alcançada pela utilização da ortogonalidade de subportadoras através do OFDMA. Para que essa ortogonalidade seja obtida, os nós transmissores devem ser capazes de enviar seu dados através de subportadoras. O nós transmissores podem utilizar mais de uma subportadora, dependendo da largura de banda total do canal e conseqüentemente da quantidade de subportadoras disponíveis. Entretanto, uma subportadora só pode ser utilizada por um usuário durante um *time slot*. Para garantir tais premissas, é necessário que se empregue uma estratégia eficaz de alocação de subportadoras. Neste trabalho, tal estratégia é realizada através do algoritmo de alocação que será apresentado a seguir.

3.1 ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE SUB-PORTADORA MCMA

O algoritmo MCMA (Abordagem de Acoplamento- $\mathcal{K}_{1,K}$ de Restrição Máxima, do inglês *Maximum Constraint $\mathcal{K}_{1,K}$ -Matching Approach*), baseado em teoria de grafos, apresentado em (BAI et al., 2011). Antes de cada uma das transmissões, o nó de destino, aloca as subportadoras nos $k_1 + k_2$ intervalos de tempo, assim, as subportadoras são atribuídas aos nós de origem visando fornecer o número máximo possível de nós em canais sem *outage*.

A alocação de sub-portadoras é baseada em um *feedback* de informação de estado de canal (CSI) de um bit que representa seu estado de *outage* e apresenta uma perda de desempenho insignificante quando comparada a esquemas de alocação mais complexos, como *water-filling power allocation* (BAI et al., 2011).

Seguindo a teoria dos grafos bipartidos adotada em (BAI et al., 2011), onde $\mathcal{K}_{M,N}$ é um grafo bipartido completo com $M \times N$, representando, respectivamente, os M usuários do conjunto \mathcal{U} e as N subportadoras do conjunto \mathcal{S} . Tal procedimento é ilustrado na Figura 3.1(a).

Um subgrafo conectando um usuário a N subportadoras é representado por $\mathcal{K}_{1,N}$. Em continuação, $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ é um grafo bipartido que conecta os vertices $U_m \in \mathcal{U}$ e $S_n \in \mathcal{S}$ através da aresta $e_{mn} = U_m S_n$ quando a subportadora S_n não está em *outage* para o

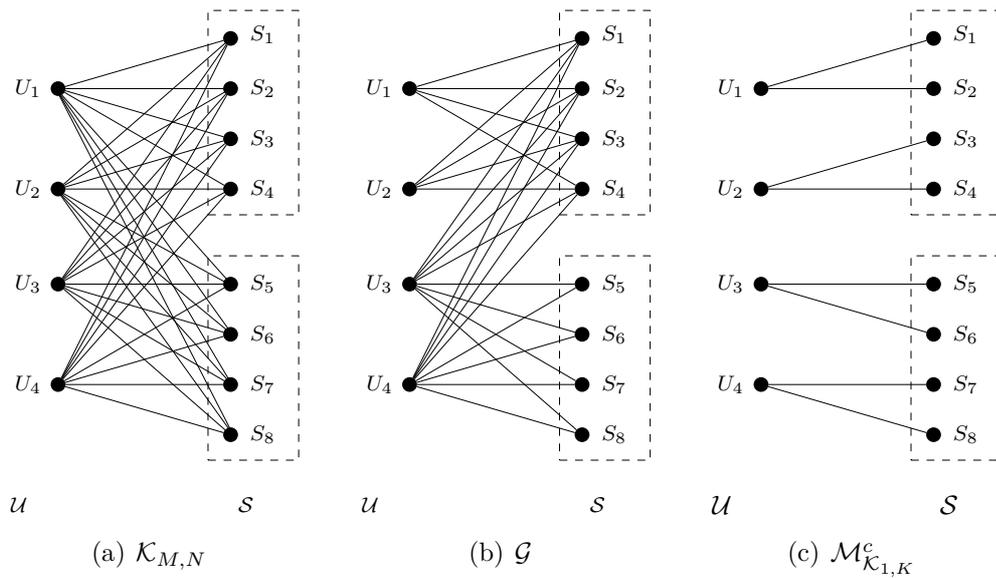


Figura 3.1 – Um exemplo de (a) O grafo bipartido completo, (b) O grafo bipartido $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ que contém os eventos de *outage* entre usuários e o destino e (c) Alocação resultante da aplicação do algoritmo MCMA. As linhas tracejadas indicam os L blocos de coerência, que no exemplo é composta de $N_L = 4$ subportadoras.

usuário U_m . Caso contrário, não haverá aresta conectando U_m até S_m . Isso é ilustrado na Figura 3.1(b), considerando que as subportadoras S_5, \dots, S_8 estão em *outage* para U_1 e U_2 .

O conjunto de todas as arestas (conexões entre usuários e subportadoras) é representado por ε . No grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ exemplificado na Figura 3.1(b), tem-se que $\varepsilon = \{e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{14}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{24}, e_{31}, e_{32}, e_{33}, e_{34}, e_{35}, e_{36}, e_{37}, e_{38}, e_{41}, e_{42}, e_{43}, e_{44}, e_{45}, e_{46}, e_{47}, e_{48}\}$.

Baseado em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$, o destino aloca K subportadoras para cada usuário com o objetivo de encontrar o maior número de usuários que não estão em *outage*. Desse modo, seja $\mathcal{K}_{1,K}$ um grafo fixo, então o acoplamento- $\mathcal{K}_{1,K}$ máximo (do inglês, *maximum $\mathcal{K}_{1,K}$ -matching*) do grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$, indicada como $\mathcal{M}_{\mathcal{K}_{1,K}}^c$, é a maior coleção de nós separados de $\mathcal{K}_{1,K}$ em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$.

Quando um vértice (usuário) em $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ também é um vértice nas cópias de $\mathcal{K}_{1,K}$, esse vértice será classificado como saturado, o que significa que o usuário está contemplado com um conjunto de K subportadoras. Pode-se ver que o grafo bipartido $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ apresentado na Figura 3.1(b) tem um $\mathcal{M}_{\mathcal{K}_{1,K}}^c$, o qual é representado na Figura 3.1(c), que satura todos os vértices em U , isto é, todos os nós-fonte são contemplados com um conjunto de K subportadoras. Por exemplo na Figura 3.1(c), $\mathcal{M}_{\mathcal{K}_{1,K}}^c = U_1S_1, U_1S_2, U_2S_3, U_2S_4, U_3S_5, U_3S_6, U_4S_7, U_4S_8$.

É assumido que a potência média transmitida por subportadora é $P_s = P/N$ para todos os nós, onde P é a potência total transmitida. Os blocos de coerência são definidos como os blocos de subportadoras onde o canal pode ser considerado plano, em outras palavras, os intervalos de frequência onde duas ou mais subportadoras sofrem desvanecimento de amplitudes correlacionadas (GOLDSMITH, 2005). O canal subaquático, apresenta uma banda coerência de centenas de Hertz (LAM; ORMONDROYD, 1997). Outro fator muito importante é o tempo de coerência do canal, que é definido para tempo que o canal permanece plano. Em canais subaquáticos essa grandeza depende da velocidade relativa entre o transmissor e o receptor, entretanto se mantém na ordem de dezenas a centenas de milisegundos (LAM; ORMONDROYD, 1997; PREISIG, 2007).

3.1.1 Probabilidade de *Outage*

Em (BAI et al., 2011) é demonstrado que, quando o destino D aloca as subportadoras utilizando o algoritmo MCMA, um usuário estará em *outage* no nó-destino, responsável pela alocação de subportadoras, somente quando tal usuário equivale a um vértice isolado na restrição acoplamento- $\mathcal{K}_{1,K}$ máximo. Tal evento ocorre quando nenhuma das arestas nos L blocos de coerência existe e tem probabilidade de *outage* dada por

$$\mathcal{P}_{o,\text{MCMA}} = [\mathcal{P}_o^s(K)]^L + \mathcal{O}([\mathcal{P}_o^s(K)]^L), \quad (3.1)$$

onde $\mathcal{P}_o^s(K)$ é a probabilidade de *outage* de um usuário em com única portadora e $\mathcal{O}(x)$ é a maior ordem infinitesimal de x . Assim, a aproximação de primeira ordem pode ser expressa por

$$\mathcal{P}_{o,\text{MCMA}} \approx [\mathcal{P}_o^s(K)]^L, \quad (3.2)$$

a ordem de diversidade obtida com a utilização do MCMA é L .

3.1.2 Algoritmo de Alocação de Baixa Complexidade - R^2EHK

Apesar do resultado em termos de probabilidade de *outage* encontrar a máxima correspondência- $\mathcal{K}_{1,K}$, $\mathcal{M}_{\mathcal{K}_{1,K}}^c$, implica em uma complexidade computacional muito alta para implementação em sistemas práticos. Nesse sentido, (BAI et al., 2011) propõem um

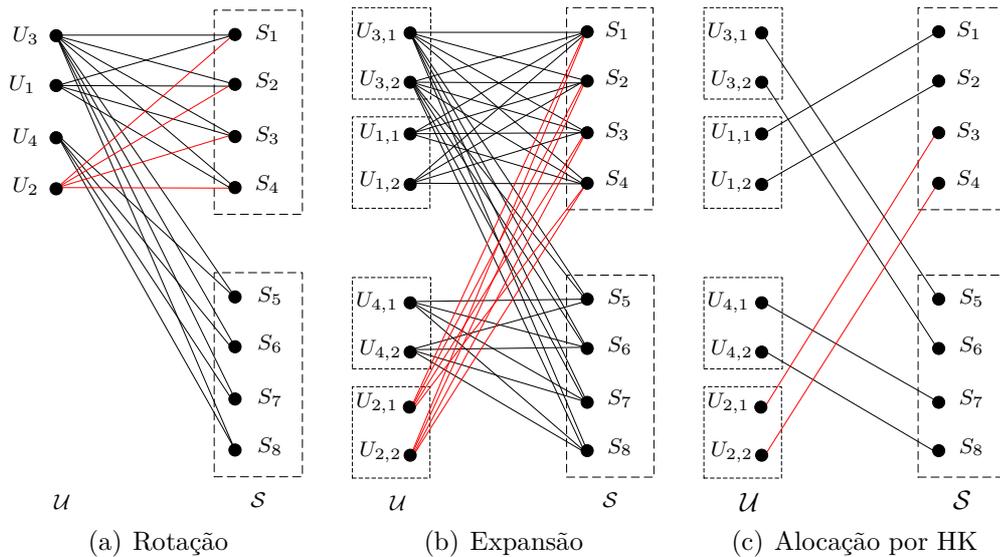


Figura 3.2 – Exemplo do algoritmo R^2EHK (a) Rotação (b) Expansão (c) Alocação de subportadora pelo algoritmo Hopcroft-Karp.

algoritmo que possibilita a alocação de subportadoras para os usuários com complexidade menor e alcançando a mesma diversidade obtida pelo MCMA, o algoritmo R^2EHK (Rotação e Expansão Aleatória Hopcroft-Karp, do inglês *Random Rotation and Expansion based Hopcroft-Karp*).

O algoritmo R^2EHK tem como início o grafo de outage das subportadoras, $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$, do exemplo apresentado na Figura 3.1(b). O R^2EHK opera em duas fases distintas: na fase inicial, é realizada uma rotação e expansão dos vértices em \mathcal{U} ; na fase final, é realizada a busca de acoplamento máximo no grafo expandido na fase inicial através da execução do algoritmo Hopcroft-Karp (HOPCROFT; KARP, 1973).

Tendo como ponto de partida o grafo $\mathcal{G}(\mathcal{U} \cup \mathcal{S}, \varepsilon)$ apresentado na Figura 3.1(b), o algoritmo inicia rotacionando todos os vértices de \mathcal{U} com a mesma probabilidade, mantendo todas os vértices existentes em \mathcal{S} . Um exemplo desse resultado é mostrado na Figura 3.2, com destaque em vermelho para o caso do usuário 2.

3.2 GDNC-OFDMA

O esquema GDNC-OFDMA funciona de forma a complementar o GDNC (REBELATTO et al., 2012) apresentado na seção 4.3.4. A diferença nesse caso está na alocação de subportadoras feita pelo nó destino pelo algoritmo MCMA (BAI et al., 2011) mostrado na seção 3.1. Em cada uma das fases, difusão e cooperação, antes dos nós-fonte iniciarem suas transmissões, o nó destino faz a alocação de subportadoras para

os M nós. Assim, considerando a quantidade de transmissões de uma esquema GNDC, o nó destino deve realizar o processo de alocação de portadoras por $k_1 + k_2$ vezes, durante um ciclo completo do GDNC-OFDMA.

Em relação ao tempo, as transmissões ocorrem de forma semelhante ao GNDC, no entanto, no GDNC-OFDMA o usuário recebe do nó destino a alocação de K subportadoras para transmitir sua informação em cada *time-slot*. Devido à característica de canais ortogonais na frequência, os nós podem transmitir e receber suas informações simultaneamente, visto que cada subportadora foi alocada apenas para um nó (BAI et al., 2011).

3.2.1 Probabilidade de *Outage*

Seja $\mathcal{D}_m(t) \subseteq 1, \dots, M$ um conjunto de nós que decodificaram o pacote de informação (IF) $I(t)$ transmitido pelo usuário U_m no instante de tempo $t \in 1, \dots, k_1$, incluindo o usuário U_m . O conjunto de todos os pacotes corretamente decodificados pelos usuários em $\mathcal{D}_m(t)$ é definido como $\mathcal{I}_{\mathcal{D}_m}(t)$.

De forma a tornar mais simples o entendimento, serão omitidos os índices e sub-índices para facilitar notação sem causar prejuízo no entendimento. Existem pelo menos $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2$ pacotes, contendo pacotes do conjunto $\mathcal{I}_{\mathcal{D}}$ no nó destino (os pacotes IFs transmitidos durante a BP e os PFs transmitidos durante a CP). O destino necessita decodificar corretamente $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}|$ pacotes de forma a recuperar todos os IFs no conjunto $\mathcal{I}_{\mathcal{D}}$. Um dado IF é dito em *outage* se a sua transmissão direta e pelo menos $\mathcal{D}k_2$ dos $|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1$ pacotes restantes não serão corretamente decodificados no destino. Isso ocorre com probabilidade dada por:

$$\mathcal{P}(\mathcal{D}) = \mathcal{P}_D \sum_{n=|\mathcal{D}|k_2}^{N_{frame}} \binom{N_{frame}}{n} \frac{(\mathcal{P}_D)^n}{(1 - \mathcal{P}_D)^{n - N_{frame}}} \quad (3.3a)$$

$$= \binom{|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1}{\mathcal{D}k_2} \mathcal{P}_D^{\mathcal{D}k_2 + 1} + \mathcal{O}(\mathcal{P}_D^{|\mathcal{D}|k_2 + 1}) \quad (3.3b)$$

$$\approx \binom{|\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + \mathcal{D}k_2 - 1}{\mathcal{D}k_2} \mathcal{P}_s^{L(|\mathcal{D}|k_2 + 1)}. \quad (3.3c)$$

onde $N_{frame} = |\mathcal{I}_{\mathcal{D}}| + |\mathcal{D}|k_2 - 1$.

A probabilidade de ocorrência de \mathcal{D} , ou seja, a probabilidade de que um conjunto de nós tenha decodificado corretamente um determinado IF, é dada por:

$$Pr\{\mathcal{D}\} = \mathcal{P}_r^{M-|\mathcal{D}|}(1 - \mathcal{P}_r)^{|\mathcal{D}|-1}. \quad (3.4)$$

Por fim, a probabilidade de *outage* do GDNC-OFDMA, \mathcal{P}_{GO} é dada por:

$$\mathcal{P}_{GO} \approx \sum_{|\mathcal{D}|=1}^M \binom{M-1}{|\mathcal{D}|-1} Pr\{\mathcal{D}\} \mathcal{P}(\mathcal{D}) \quad (3.5a)$$

$$\approx \mu \mathcal{P}_s^{M+L(k_2+1)-1}, \text{ onde } \mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2} \quad (3.5b)$$

onde a aproximação dada na Equação (3.5b) é obtida através da expansão dos termos de (3.5a), com a manutenção dos termos mais significativos, ou seja de menor expoente. Assume-se que $L \geq 2$.

3.2.2 Análise de taxa

Para obter a taxa do esquema GDNC-OFDMA R_{GO} , são consideradas as taxas de multiplexação em frequência R_F introduzidas pelo OFDMA e de multiplexação no tempo R_T , causadas pela cooperação. Assim a taxa do esquema GDNC-OFDMA é dada por:

$$R_{GO} = R_F R_T R_0, \quad (3.6a)$$

$$= \frac{k_1 MK}{(k_1 + k_2)N} R_0. \quad (3.6b)$$

onde $R_F = MK/N$ e $R_T = k_1/(k_1 + k_2)$.

O número de transmissões e recepções do esquema GDNC-OFDMA pode ser analisado da seguinte forma: na fase de difusão cada um dos M nós-fonte realiza a transmissão de seus k_1 IFs, como há ortogonalidade de frequência e não no tempo, todos os $M + 1$ nós da rede, fonte e destino, recebem os k_1 IFs ao mesmo tempo em subportadoras diferentes; na fase de cooperação cada um dos M nós-fonte realiza k_1 a transmissão de seus PFs e apenas o nó destino recebe os k_2 PFs de todos os nós-fonte em cada uma das subportadoras por ele alocadas. Na Tabela 3.1 é possível ver os número de transmissões e recepções no esquema GDNC-OFDMA.

Tabela 3.1 – Número de transmissões e recepções no esquema GDNC-OFDMA.

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	$(M+1)k_1$
Fase de Cooperação	Mk_2	k_2
Total	$M(k_1+k_2)$	$k_2+(M+1)k_1$

3.3 NCC-OFDMA

O esquema NCC-OFDMA foi proposto inicialmente por (HEIDARPOUR et al., 2017), onde é apresentado um esquema de comunicação cooperativa combinado com OFDMA, sendo a alocação de subportadoras realizada pelo destino de acordo com os resultados de (BAI et al., 2011). Esse esquema foi revisto e modificado por (TON et al., 2017), realizando modificação em relação à diversidade promovida pelo MCMA. Nessa revisão, reavalia-se o desempenho do esquema original considerando que apenas as mensagens enviadas diretamente ao destino exploram a diversidade em frequência alcançada pelo algoritmo de alocação proposto em (BAI et al., 2011). Os resultados comparativos desse tese consideram apenas o NCC-OFDMA modificado.

Nessa estratégia, na fase de cooperação apenas os nós que decodificaram corretamente todos os IFs transmitidos da fase de difusão $|\mathcal{M}| \leq M$. Seja \mathcal{M} o conjunto dos nós fonte recuperaram corretamente todos os $(M-1)k_1$ IFs transmitidos na fase de difusão, com $|\mathcal{M}| \leq M$. A probabilidade de ocorrência de \mathcal{M} é dada por:

$$\Pr\{\mathcal{M}\} = \left[\bar{\mathcal{P}}_r^{(M-1)k_1} \right]^{|\mathcal{M}|} \left[1 - \bar{\mathcal{P}}_r^{(M-1)k_1} \right]^{M-|\mathcal{M}|}. \quad (3.7)$$

Para um dado \mathcal{M} , o destino recebe uma quantidade de $Mk_1 + |\mathcal{M}|k_2$ pacotes, e um *outage* só ocorre para um certo IF se sua transmissão direta e pelo menos $|\mathcal{M}|k_2$ dos pacotes restantes estão em *outage* no destino, o que ocorre com probabilidade que pode ser obtida como:

$$\mathcal{P}(\mathcal{M}) = \mathcal{P}_D \sum_{n=0}^{Mk_1-1} \binom{Mk_1 + |\mathcal{M}|k_2 - 1}{|\mathcal{M}|k_2 + n} \frac{[\mathcal{P}_D]^{|\mathcal{M}|k_2 + n}}{[1 - \mathcal{P}_D]^{1 + n - Mk_1}}. \quad (3.8)$$

Nota-se que a probabilidade de *outage* na Equação (3.8) depende da \mathcal{P}_D da Equação (3.2), com diversidade em frequência. Assim, a probabilidade de *outage* total é dada por

$$\mathcal{P}_{o,\text{NCC}} = \sum_{|\mathcal{M}|=0}^M \binom{M}{|\mathcal{M}|} \Pr\{\mathcal{M}\} \mathcal{P}(\mathcal{M}). \quad (3.9)$$

Tabela 3.2 – Número de transmissões e recepções no esquema NCC-OFDMA.

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	$(M+1)k_1$
Fase de Cooperação	Mk_2	k_2
Total	$M'(k_1+k_2)$	$k_2+(M+1)k_1$

Após expansão da Equação (3.9), pode ser visto que os termos mais relevantes, em alta SNR são obtidos quando $n = 0$ na Equação (3.8) e $|\mathcal{M}| = 0$ na Equação (3.9), o que leva a

$$\mathcal{P}_{o,\text{NCC}} \approx [k_1(M-1)]^M \mathcal{P}_s^{M+L}. \quad (3.10)$$

3.3.1 Análise de taxa

Na taxa do esquema NCC-OFDMA R_{NCC} , também são consideradas as taxas de multiplexação em frequência R_F introduzidas pelo OFDMA e de multiplexação no tempo R_T , causadas pela cooperação. Assim a taxa do esquema NCC-OFDMA coincide com a taxa do GDNC-OFDMA é dada da mesmo forma por:

$$R_{NCC} = R_F R_T R_0, \quad (3.11a)$$

$$= \frac{k_1 MK}{(k_1 + k_2)N} R_0. \quad (3.11b)$$

onde $R_F = MK/N$ e $R_T = k_1/(k_1 + k_2)$.

O número de transmissões e recepções do esquema NCC-OFDMA é calculado da mesma forma do esquema GDNC-OFDMA, com exceção do número de transmissões na fase de cooperação, onde apenas os M' nós-fonte que decodificaram corretamente os IFs recebidos na fase de difusão, tais valores são apresentados na Tabela 3.2.

4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ESQUEMAS TDMA

Eficiência energética é um requisito chave em redes acústicas subaquáticas, principalmente devido à restrição de energia resultante da dificuldade de troca de baterias, além da impossibilidade de utilização de energia solar para recarga. Técnicas de comunicação cooperativas podem ser empregadas para reduzir o consumo de energia. Em (RAYEL et al., 2013; RAYEL, 2013) demonstrou-se que é possível empregar tais técnicas para reduzir o consumo de energia em redes de comunicação sem fio terrestres. Para tal, utiliza-se como métrica a relação entre a energia despendida pela quantidade de informação transmitida, em Joules/bit.

4.1 DEFINIÇÕES IMPORTANTES

4.1.1 Eficiência Energética

A eficiência energética de uma UWAN diz respeito ao consumo de energia para a transmissão da informação dos nós transmissores até o nó destino. No ambiente subaquático, onde o acesso aos nós para troca de baterias ou a alimentação por outro meio como energia solar é inviável senão impossível, é de extrema necessidade adotar técnicas que permitam transmitir a informação com o menor consumo possível.

Nesse trabalho a Eficiência Energética é analisada em uma comparação entre uma simples transmissão direta e os diversos esquemas cooperativos. Considera-se a energia gasta com a transmissão (amplificação e transdução acústica), o consumo energético dos circuitos transmissores e receptores que formam a rede bem como o consumo para ativação dos nós.

4.1.2 Eficiência Energética utilizando Codificação de Rede

Em (RAYEL, 2013), a técnica de Codificação de Rede é utilizada para redução do consumo energético em uma rede de comunicação cooperativa. Utilizando o esquema GDNC e a sua variação com canal de retorno FA-GNDC, os índices de redução de consumo energético são ainda melhores quando se compara à transmissão direta ou ao esquema de cooperação apenas por repetição decodifica-e-encaminha. Isto devido a sua maior eficiência em termos de taxa de erro e ordem de diversidade.

Para avaliação do desempenho foi determinada a potência alvo mínima a ser recebida. A probabilidade de *outage* é definida como métrica, visto que ela representa a probabilidade de que a potência recebida seja menor que essa potência alvo mínima.

É possível perceber em (RAYEL, 2013), que a cooperação aumenta a ordem de diversidade do sistema, diminuindo a energia consumida para obter sucesso na comunicação. Com a codificação rede, percebe-se que pela redução a taxa de erro provocada pela técnica, é possível conseguir aumentar a economia de energia.

4.1.3 Eficiência Energética em UWANs

Baseado no trabalho de (RAYEL, 2013), é possível perceber que seus resultados são estimuladores para que as técnicas de comunicação cooperativa e codificação de rede sejam utilizadas para alcançar redução de consumo de energia em redes acústicas subaquáticas. Basicamente, avaliar a eficiência energética de redes cooperativas em UWANs, consiste basicamente em verificar quando redes cooperativas são mais eficientes que redes de transmissão direta. Neste ponto do trabalho, as técnicas aplicadas em (RAYEL, 2013) são aplicadas no cenário de redes acústicas subaquáticas, considerando o desvanecimento e perda de percurso própria do meio além de realizar a análise a partir de dados reais de modems.

4.2 MODELO DO SISTEMA - TDMA

O sistema apresentado neste capítulo considera um conjunto $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_m, \dots, U_M\}$ de M nós-fonte, que transmitem informações distintas ao destino D . As transmissões são realizadas em bloco (*frame*), que pode ser definido com um vetor de comprimento N . O período para a transmissão desse vetor é denominado um *subslot*, já o tempo para a transmissão de um ciclo com M *subslots* é definido como *slot* de tempo (TS). Cada nó realiza sua transmissão em forma de rodízio em canais ortogonais no tempo. Baseado em (REBELATTO et al., 2012), o esquema GDNC pode ser representado pela Figura 4.1 e opera em duas fases descritas abaixo:

- **Fase de Difusão**, do inglês *Broadcast Phase* (BP): A Fase de Difusão é composta de k_1 *time slots*, onde cada nós fonte transmite um número k_1 pacotes de informação (do inglês, *Information Frames* IFs). Além de transmitir seus próprios IFs, os nós-fonte tentam decodificar os IFs transmitidos pelos demais nós-fonte.

- **Fase de Cooperação**, do inglês *Cooperative Phase* (CP): Na Fase de Cooperação, os nós (todos ou um subconjunto) atuam como retransmissores (*relays*) e transmitem cada um uma quantidade de k_2 pacotes de paridade (do inglês, *Parity Frames* PFs) de tal forma que cada PF também é distribuído entre as K subportadoras alocadas para cada nó. Os PFs são combinações lineares realizadas sobre $GF(q)$, de todos os IFs que um determinado nó de origem pode decodificar corretamente durante o BP, incluindo seus próprios IFs.

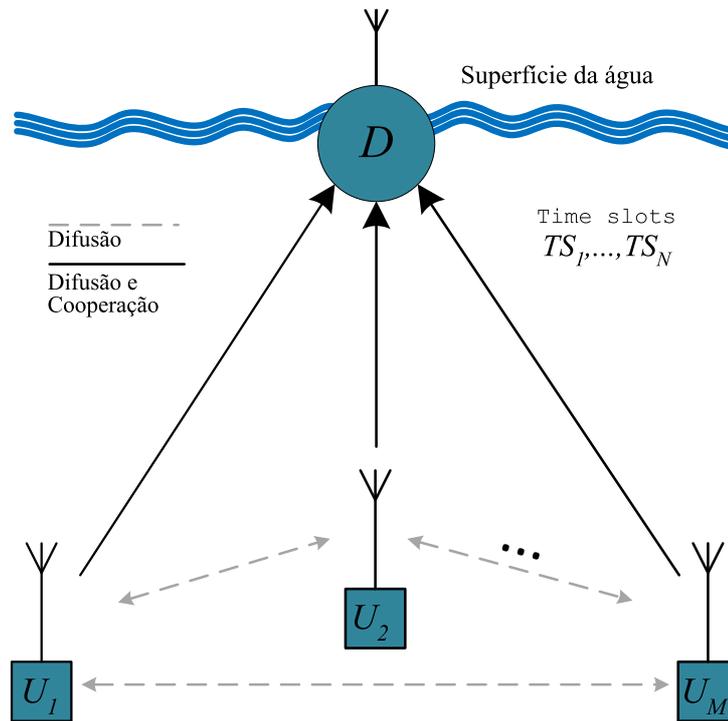


Figura 4.1 – Rede de múltiplo acesso de M nós transmissores, onde que cada um do nós transmite informações diferentes para o nó destino através de subportadoras em canais ortogonais.

As transmissões são realizadas em bloco (*frame*), que pode ser definido com um vetor de comprimento N . O período para a transmissão desse vetor é denominado um *subslot*, já o tempo para a transmissão de um ciclo com M *subslots* é definido como *slot* de tempo (TS). Cada nó realizada sua transmissão em forma de rodízio em canais ortogonais no tempo. Dessa forma a palavra código em banda básica recebido pelo nó j do nó próximo i pode ser escrita como:

$$y_{i,j} = \sqrt{P_i} \gamma_{i,j} h_{i,j} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{i,j} \quad (4.1)$$

onde $i \in \{0, \dots, M-1\}$ representa o índice do nó transmissor e conseqüentemente o índice do *subslot*, $j \in \{0, \dots, M\}$ representa o índice do nó receptor, com M correspondendo

ao destino, P_i a potência do nó transmissor, $h_{i,j} \in \mathbb{C}$ o ganho do canal acústico subaquático devido desvanecimento e sombreamento no percurso $i \rightarrow j$. $\gamma_{i,j}$ a perda de propagação e espalhamento das ondas acústicas, $\mathbf{x}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ e $\mathbf{y}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ são os pacotes transmitidos e recebidos respectivamente, $\mathbf{n}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ o ruído ambiente subaquático.

Em um ambiente com desvanecimento, a potência do sinal recebido varia aleatoriamente de acordo com a distância e o tempo devido ao sombreamento e multipercurso. Assim, o desvanecimento é uma variável aleatória definida pela variação da relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal to Noise Ratio*). Em sistemas de comunicações sem fio, seu desempenho deve ser analisado com a definição de uma métrica de desempenho. A probabilidade de *outage* \mathcal{P}_o é definida como a probabilidade que a SNR caia abaixo de um dado valor alvo que corresponde a um mínimo aceitável para que haver a detecção da informação transmitida. A probabilidade de *outage* é definida em (GOLDSMITH, 2005) como:

$$\mathcal{P}_o = \Pr\{SNR < SNR_{min}\} \quad (4.2)$$

Neste trabalho, considera-se o caso particular de desvanecimento em bloco no qual os coeficientes de desvanecimento são variáveis aleatórias i.i.d. para diferentes blocos mas constantes durante o mesmo bloco. Esse caso particular é denominado desvanecimento quase-estático (TSE; VISWANATH, 2005; BIGLIERI et al., 2007).

Antes de continuar, estabelece-se que os operadores + e - representam operações sobre números reais, \oplus é a adição binária (XOR), além de \boxplus e \boxminus serem as operações de adição e subtração sobre um campo não binário, respectivamente. As principais considerações apresentadas acima estão resumidas no que se segue.

- (i) Considera-se ortogonalidade na transmissão/recepção, de tal forma que cada nó da rede pode apenas transmitir ou receber informação no mesmo tempo, mas não os dois;
- (ii) Considera-se que o múltiplo acesso no destino é ortogonal, ou seja, a mesma recebe mensagens de um usuário por vez (não havendo interferência entre as transmissões);
- (iii) O desvanecimento é considerado lento, constante durante um bloco mas i.i.d. no tempo e no espaço para diferentes blocos;
- (iv) Transmissores e receptores são equipados com somente uma antena.

4.3 MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO

4.3.1 Consumo de Energia do *Hardware*

Em termos de análise de eficiência energética, é necessário definir o *hardware* de um nó sem fio subaquático. Como modelo será utilizado neste capítulo será o modem WHOI (FREITAG et al., 2005), assim será possível obter o consumo total da rede. Esse consumo pode ser separado em três blocos.

- Energia consumida pelo Circuito de Recepção
- Energia consumida pelo Circuito de Transmissão
- Energia consumida pelo amplificador e transdutor eletroacústico

O gasto de energia por bit no circuito transmissão E_{tx} é dado por:

$$E_{tx} = E_{st} + \frac{P_{ctx}}{R_b} \quad (4.3)$$

onde E_{st} é a energia gasta no processo de ativação do nó, P_{ctx} é o consumo circuitos eletrônicos e de banda base para transmissão e R_b é a taxa de bits em bits/s.

Na recepção, a energia gasta E_{rx} por bit é dada por:

$$E_{rx} = E_{st} + \frac{P_{ctx}}{R_b} \quad (4.4)$$

onde P_{ctx} é o consumo circuitos eletrônicos e de banda base para recepção.

Por sua vez, o consumo de energia na transmissão pelo amplificador acústico E_t é dado por:

$$E_t = \frac{P^e(l, f)}{R_b} \quad (4.5)$$

onde $P^e(l, f)$ é a potência elétrica do amplificador em Watts.

Para se obter a potência elétrica consumida pelo amplificador e pelo transdutor acústico, é necessária a conversão da potência acústica obtida $P^a(l, f)$ dada em dB re μPa para potência elétrica $P^e(l, f)$ dada em Watts, aplicando a razão expressada em (GAO et al., 2012):

$$P^e(l) = \frac{P^a(l, f)10^{-17,2}}{\varphi} \quad (4.6)$$

onde $10^{-17,2}$ é o fator de conversão e φ é a eficiência total dos circuitos elétricos (amplificador de potência e transdutor). Nesse trabalho considera-se uma eficiência φ de 0,25 conforme (GAO et al., 2012).

Para fins de notação, ressalta-se que P_X^e refere-se à potência mínima de transmissão necessária para assegurar um limiar máximo de \mathcal{P}_o^* no esquema X e E_X ao consumo energético do esquema X .

4.3.2 Consumo Energético da Transmissão Direta

O primeiro parâmetro para se definir na comparação deve ser o caso simples de um transmissão direta. Para isso define-se o consumo de energia entre dois nós sem nenhum tipo de cooperação. Desse modo, analisando a expressão de probabilidade de *outage* de distribuição \mathcal{K} na equação (2.16) e isolando a potência de transmissão mínima exigida para que se tenha no máximo \mathcal{P}_o^* .

A partir das equações (2.16) e (2.10) além de realizar as manipulações matemáticas necessárias, obtém-se a seguinte expressão, considerando o desvanecimento \mathcal{K} , com fator de forma $\nu = 1,5$ caracterizando o ambiente subaquático

$$P_{DT}^a = \frac{(1 - 2^R) 2,6 A(l, f) N(f) \Delta f}{\ln(1 - \mathcal{P}_o^*)}. \quad (4.7)$$

Dessa forma aplicando a conversão de potência acústica para potência elétrica apresentada em (4.6), a energia consumida para a transmissão direta é dada por

$$E_{DT} = \frac{P_{DT}^e(l) + P_{ctx} + P_{ctx}}{R_b} + 2 E_{st} \quad (4.8)$$

Como base na equação (4.8), pode-se demonstrar o consumo energético mínimo da rede para que a probabilidade de *outage* não seja ultrapassada, o que garante que a qualidade da transmissão de dados entre os nós.

4.3.3 Consumo Energético do Esquema DF

Nessa seção se analisa o primeiro esquema com nós cooperando entre si, tendo como resultado uma expressão para o consumo energético do esquema Decodifica-e-Dncaminha (DF). Conforme a análise realizada nesse trabalho e demonstrada na seção 2.1.6, que considera o desvanecimento com distribuição \mathcal{K} como a representação do

desvanecimento no ambiente subaquático, pode-se demonstrar que a mínima potência exigida para se assegurar que a probabilidade de *outage* do esquema DF seja no máximo $\mathcal{P}_{o,DF}^*$. Essa demonstração pode ser feita observando de forma conjunta as equações (2.16),(2.10) e (2.18), tem-se que:

$$P_{DF}^a = \frac{(1 - 2^{R/R_{DF}}) 2,6 A(l, f) N(f) \Delta f}{\ln \left(1 - \sqrt{2 \mathcal{P}_{o,DF}^*} \right)} \quad (4.9)$$

Observa-se que a taxa R em bits por segundo é dividida pela taxa R_{DF} vista na equação (2.20), para que a eficiência espectral efetiva medida em bits/s/Hz seja calculada e comparada de forma justa com a transmissão direta e com os demais esquemas. Para a obtenção da potência elétrica consumida em watts, aplica-se a conversão demonstrada na equação (4.6).

Para se calcular a energia consumida (em Joules/bits) no esquema DF, é necessário analisar o número de transmissões e recepções realizadas no esquemas. Essa informação pode ser obtida na Tabela 2.2: número de transmissões = $2M$ e número de recepções = $M^2 + M$, desse modo o consumo energético pode ser dado por

$$E_{DF} = 2M \left(\frac{P_{t,DF}^e(l) + P_{ctx}}{M R_b / R_{DF}} + E_{st} \right) + (M^2 + M) \left(\frac{P_{ctx}}{M R_b / R_{DF}} + E_{st} \right) \quad (4.10)$$

No cálculo da energia consumida no esquema DF, a taxa de transmissão R_b é dividida por R_{DF} , refletindo o envio de mais de uma cópia da mensagem como ocorre no sistema.

4.3.4 Consumo Energético do Esquema GDNC

De acordo com o demonstrado em (RAYEL et al., 2013; RAYEL, 2013) é possível reduzir o consumo de energia em redes cooperativas terrestres. Nesse capítulo serão utilizadas as mesmas técnicas de cooperação para redes subaquáticas utilizando parâmetros baseados em experimentos e equipamentos reais. Para isso serão analisados os consumos energéticos dos esquemas GDNC e FA-GDNC já apresentados na seção 2.4.

Da mesma forma das seções anteriores, é imprescindível encontrar a expressão do consumo energético do esquema GDNC que demonstra ter um melhor desempenho em termos de taxa de erro e ordem de diversidade do que outros esquemas cooperativos. Desse modo considerando o desvanecimento em distribuição \mathcal{K} , que caracteriza o ambiente

acústico subaquático, pode se encontrar a partir de (2.10), (2.16) e (2.25) a mínima potência acústica exigida para que a cooperação usando o esquema GDNC garanta a probabilidade de *outage* menor ou igual a $\mathcal{P}_{o,GDNC}^*$, essa potência é dada por:

$$P_{GDNC}^a = \frac{(1 - 2^{R/R_{GDNC}}) 2,6 A(l, f) N(f) \Delta f}{\ln \left(1 - \mathcal{P}_{o,GDNC}^* / \mu^{\left(\frac{1}{M+k_2}\right)} \right)}, \quad (4.11)$$

onde $\mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}$. Nesse esquema também se considera que a taxa R em bits por segundo é dividida pela taxa R_{GDNC} vista na equação (2.26), para que a eficiência espectral efetiva medida em bits/s/Hz seja calculada e comparada de forma justa com a transmissão direta e com os demais esquemas. Do mesmo modo a obtenção da potência elétrica $P_{t,GDNC}^e(l)$ consumida em watts, aplica-se a conversão da equação (4.6).

Baseado na quantidade de transmissões/recepções realizadas pelo esquema GDNC apresentadas na Tabela 2.4, obtém-se que o consumo energético do esquema GDNC (em Joules/bits) é dado por:

$$E_{GDNC} = (k_1 + k_2) \left(\frac{P_{GDNC}^e(l) + P_{ctx}}{k_1 R/R_{GDNC}} + E_{st} \right) + (Mk_1 + k_2) \left(\frac{P_{ctx}}{k_1 R/R_{GDNC}} + E_{st} \right) \quad (4.12)$$

Da mesma maneira que no esquema DF, no cálculo da energia consumida no esquema GDNC, a taxa de transmissão R_b é dividida por R_{GDNC} , refletindo o envio de múltiplas cópias da mensagem como ocorre no sistema.

4.3.5 Consumo Energético do Esquema FA-GDNC

Como mostrada na seção 2.4.4 o esquema GDNC pode ser melhorado com um canal de retorno entre o destino e os nós cooperadores. Dessa forma o esquema nominado FA-GDNC busca evitar a fase de cooperação quando a informação for recebida corretamente no destino. Conclui-se então que o consumo energético pode ser ainda menor, se o tamanho do pacote for grande o suficiente, a energia consumida para o retorno da informação pode ser desconsiderada pois conforme o modelo do sistema apresentado na Seção 4.2 o nó destino encontra-se numa estação de superfície com alimentação elétrica constante e sem a limitação de baterias dos nós transmissores.

Aplicando o mesmo método da seção anterior, partindo das equações (2.10),

(2.16) e (2.25) - considerando que os esquemas GDNC e FA-GDNC apresentam a mesma probabilidade de *outage*, - chega-se a expressão que demonstra que a potência mínima para que o esquema FA-GDNC garanta uma probabilidade de *outage* menor ou igual a $\mathcal{P}_{o,FA-GDNC}^*$:

$$P_{FA-GDNC}^a = \frac{(1 - 2^{R/R_{FA-GDNC}}) 2,6 A(l, f) N(f) \Delta f}{\ln \left(1 - \mathcal{P}_{o,FA-GDNC}^* / \mu^{\left(\frac{1}{M+k_2}\right)} \right)}. \quad (4.13)$$

Como a quantidade de transmissões e recepções realizadas pelo esquema FA-GDNC depende da probabilidade de *outage*, conforme mostrado em (2.27) e na Tabela 2.5, o consumo energético do esquema FA-GDNC (em Joules/bits) é dado por:

$$E_{FA-GDNC} = (k_1 + k'_2) \left(\frac{P_{t,FA-GDNC}^e(l) + P_{el,tx}}{k_1 R/R_{GDNC}} + E_{st} \right) + (Mk_1 + k'_2) \left(\frac{P_{el,rx}}{k_1 R/R_{FA-GDNC}} + E_{st} \right). \quad (4.14)$$

Repetindo o método dos esquemas anteriores, no cálculo da energia consumida no esquema FA-GDNC, a taxa de transmissão R_b é dividida por $R_{FA-GDNC}$, refletindo o envio de múltiplas cópias da mensagem.

4.4 PARÂMETROS UTILIZADOS

Neste capítulo, são abordados os esquemas TDMA, a Tabela 4.1 apresenta os parâmetros do sistema considerados da análise numérica. Nesta análise, foram utilizados os parâmetros reais do modem WHOI2 (GALLIMORE et al., 2010). O modem WHOI2 é a segunda versão de um modem de baixa potência desenvolvido para uso acadêmico em redes acústicas subaquáticas. O modem opera em uma faixa entre 10 e 25 kHz possibilitando a seleção da melhor frequência para operação. Os parâmetros utilizados para o modems WHOI2 na análise numérica desse capítulo são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema - Análise TDMA

Parâmetro	Descrição	Valor
ϕ	Eficiência do amplificador e do transdutor (GAO et al., 2012)	0.25
ν	Parâmetro de forma da distribuição \mathcal{K}_G (YANG; YANG, 2006)	1.5
\mathcal{P}_o	probabilidade de <i>outage</i> alvo	10^{-4}

Tabela 4.2 – Parâmetros do Modem WHOI2 (GALLIMORE et al., 2010)

f_c [kHz]	B_s [kHz]	P_{ctx} [W]	P_{ctx} [W]
20	0.320	0.158	1

4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Baseados no conceitos de cooperação e codificação de redes do Capítulo 2 e nas expressões para avaliação do consumo de energia nas seções anteriores, nessa seção são apresentados alguns resultados numéricos.

O esquema de codificação de rede dinâmica (DNC) é generalizado pelo GDNC, dessa forma não existe a necessidade da análise da eficiência do primeiro. O consumo energético do esquema GDNC também é dependente da quantidade e nós cooperadores M e da distância entre esses nós, tal conclusão fica nítida quando se observa em (4.12). Da mesma forma, isso pode ser também concluído para FA-GDNC observando (4.14).

Nas próximas seções serão realizadas análises comparativas em termos de distância entre os nós cooperadores e em termos de número de nós e sua influência no valor de potência de transmissão utilizada pelo amplificador.

4.5.1 Consumo Energético em Relação à Distância

De acordo com o que já foi tratado nesse capítulo, a distância entre os nós afeta o consumo energético em todos os esquemas, inclusive na transmissão direta. Para comparação entre os esquemas, a Figura 4.2, apresenta o consumo energético (em Joule/bits) em função da distância (em km). Essa comparação acontece para uma rede com $M=2$ nós cooperadores, nos esquemas de transmissão direta, cooperação decodifica-e-encaminha (DF) e o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ (taxa do código de rede do esquema GDNC é igual à do esquema DF). Cada esquema foi avaliado quando submetido a desvanecimento típico de ambientes subaquáticos com distribuição \mathcal{K} . É possível perceber na Figura 4.2 que a transmissão direta é mais eficiente em termos de consumo de energia para distâncias mais curtas. Isso se deve ao fato de que nos esquemas cooperativos (DF, GDNC e FA-GDNC), devido a grande quantidade de recepções, a energia consumida pelos circuitos de recepção possui grande influência no total de energia consumida pelo esquema. Com o aumento da distância entre os nós, esse consumo referente a recepções influencia menos. Percebe-se então que os esquemas GDNC e FA-GDNC são mais eficientes energeticamente, visto sua maior ordem de diversidade comparada aos demais.

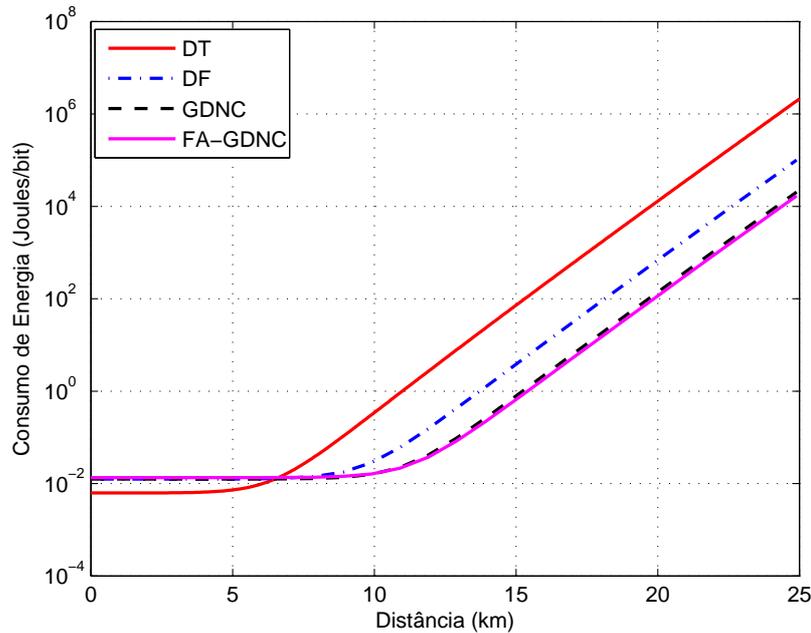


Figura 4.2 – Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M=2$ nós cooperadores, considerando os esquemas DT, DF e GDNC e FA GDNC, com $k_1=k_2=2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K} .

Como dito anteriormente, o esquema FA-GDNC, ao não realizar a fase de cooperação quando não necessário, tem um marginalmente inferior ao do GDNC. Nesse ponto, considerando o modem WHOI de (FREITAG et al., 2005), que possui uma restrição em termos de potência mínima de transmissão $P_{min}^e = 8W$. A partir dessa perspectiva, a Figura 4.3 mostra a mesma análise de consumo *versus* distância, com a aplicação da potência mínima de 8W.

Com a potência mínima fixada em 8W a influência do consumo do amplificador pode ser vista claramente pois até distâncias próximas de 7km todos os esquemas apresentam consumo idêntico uma comparação justa pode ser realizada a partir do 13km quando todos os esquemas já estão fora da zona de influência da potência mínima.

É importante ressaltar que as características do *hardware* tido como referência (FREITAG et al., 2005) trazem restrições importantes ao consumo em curtas distâncias, que influenciam diretamente nas estratégias de eficiência energética que podem ser adotadas.

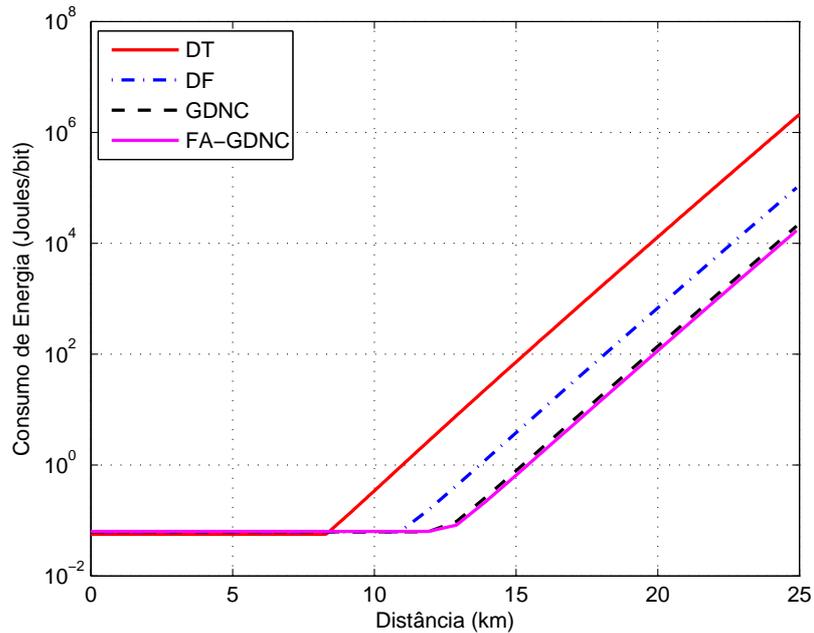


Figura 4.3 – Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M = 2$ nós cooperadores, considerando os esquemas DT, DF e GDNC e FA-GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K} , com potência do amplificador ≥ 8 .

4.5.2 Consumo Energético em Relação ao Número de Nós

Como já mostrado anteriormente neste capítulo, outra variável que afeta o consumo energético dos esquemas cooperativos é o número de nós M . Assim, na Figura 4.4, apresenta-se o consumo energético (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores M , para uma distância fixa $d = 13\text{km}$, considerando-se os mesmos esquemas das Figuras 4.2 e 4.3.

Para a distância de 13km (escolhida por ser a primeira distância onde a influência da potência mínima de 8W não está presente), o esquema GDNC supera a transmissão direta com qualquer quantidade de nós, tendendo ser menos eficiente quando o número de nós aumenta.

Os resultados das numéricos demonstram um desempenho significativo em relação a eficiência energética utilizando as vantagens disponíveis através da cooperação, esse desempenho ainda melhor com a aplicação de codificação de rede. Nessa visão a utilização de técnicas de cooperação aliadas com variações de codificação de rede torna-se uma solução ideal para aplicações subaquáticas para viabilizar a transmissão que atenda aos requisitos de aplicações, no entanto, com baixo consumo mesmo diante do cenário de

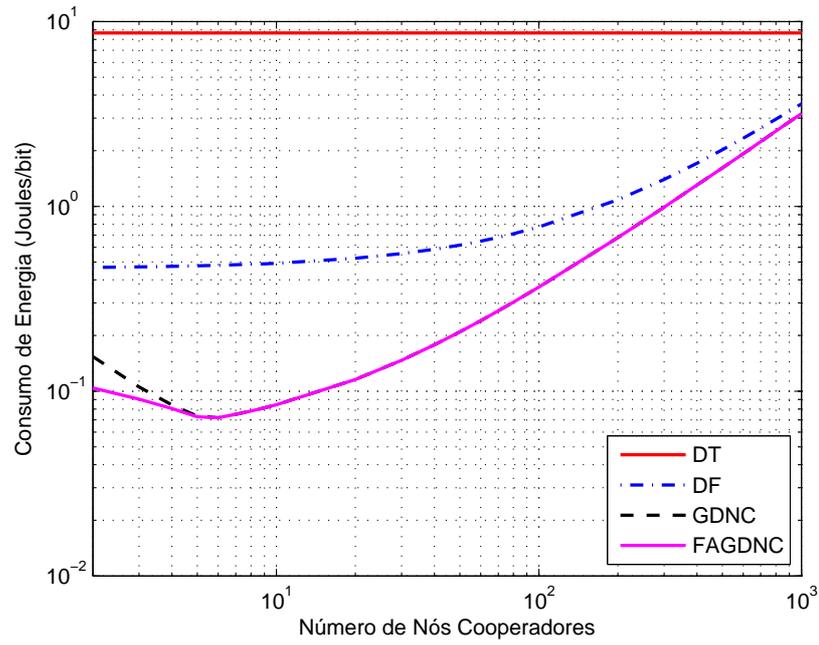


Figura 4.4 – Consumo de Energia (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores, para $d=13km$, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$, sujeitos a desvanecimento em distribuição \mathcal{K} .

desvanecimento e perda de percurso imposto pelo ambiente subaquático

5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ESQUEMAS OFDMA

Visando avaliar a eficiência energética em termos práticos, neste capítulo são apresentados resultados numéricos baseados em dados de modems disponíveis no mercado e de outros utilizados por grupos de pesquisa. Um número grande de modems são apresentados e avaliados por (SENDRA et al., 2016), onde é realizada uma análise completa para comparação dos modelos apresentados nesse trabalho. Em (GALLIMORE et al., 2010), é apresentada segunda versão do modem WHOI, um dispositivo não comercializado mas utilizado por grupos de pesquisas. Para este trabalho foram selecionados diferentes modelos devido às suas características de distância, frequência de operação e largura de banda.

5.1 MODELO DO SISTEMA - OFDMA

O sistema apresentado neste capítulo considera um conjunto $\mathcal{U} = \{U_1, \dots, U_m, \dots, U_M\}$ de M nós-fonte, que transmitem informações distintas ao destino D . O sistema emprega OFDMA com N subportadoras em um canal seletivo em frequência sendo $\mathcal{S} = \{S_1, \dots, S_n, \dots, S_N\}$ o conjunto de subportadoras. Seguindo (HEIDARPOUR et al., 2017), considera-se que cada usuário recebe K subportadoras para transmitir, $K = \lfloor N/M \rfloor$. Assume-se também neste trabalho que o desvanecimento é modelado de acordo com a distribuição \mathcal{K}_G , independente e igualmente distribuídos (i.i.d.) no tempo, espaço e entre os blocos, onde a banda total pode ser dividida em L blocos de coerência independentes cada um composto de $(N_L = N/L)$ subportadoras.

Baseado em (REBELATTO et al., 2012) e em (HEIDARPOUR et al., 2017), o esquema proposto GDNC-OFDMA pode ser representado pela Figura 5.1 e opera em duas fases descritas abaixo:

- **Fase de Difusão**, do inglês *Broadcast Phase* (BP): A Fase de Difusão é composta de k_1 *time slots*, onde cada nó fonte transmite um número k_1 pacotes de informação (do inglês, *Information Frames* IFs). Os M IFs transmitidos em um dado *time slot* são multiplexados em frequências ortogonais (OFDMA), tal que cada nó-fonte espalha seu IF através de $K = \lfloor N/M \rfloor$ subportadoras. Além de transmitir seus próprios IFs, os nós-fonte tentam decodificar os IFs transmitidos pelos demais nós-fonte ⁵.

⁵Ressalta-se que, mesmo que os nós transmitam e recebam simultaneamente, a transmissão e a recepção

- **Fase de Cooperação**, do inglês *Cooperative Phase* (CP): Na Fase de Cooperação, os nós (todos ou um subconjunto) atuam como retransmissores (*relays*) e transmitem cada um uma quantidade de k_2 pacotes de paridade (do inglês, *Parity Frames* PFs), os quais são também multiplexados por OFDMA, de tal forma que cada PF também é distribuído entre as K subportadoras alocadas para cada nó. Os PFs são combinações lineares realizadas sobre $GF(q)$, de todos os IFs que um determinado nó de origem pode decodificar corretamente durante o BP, incluindo seus próprios IFs.

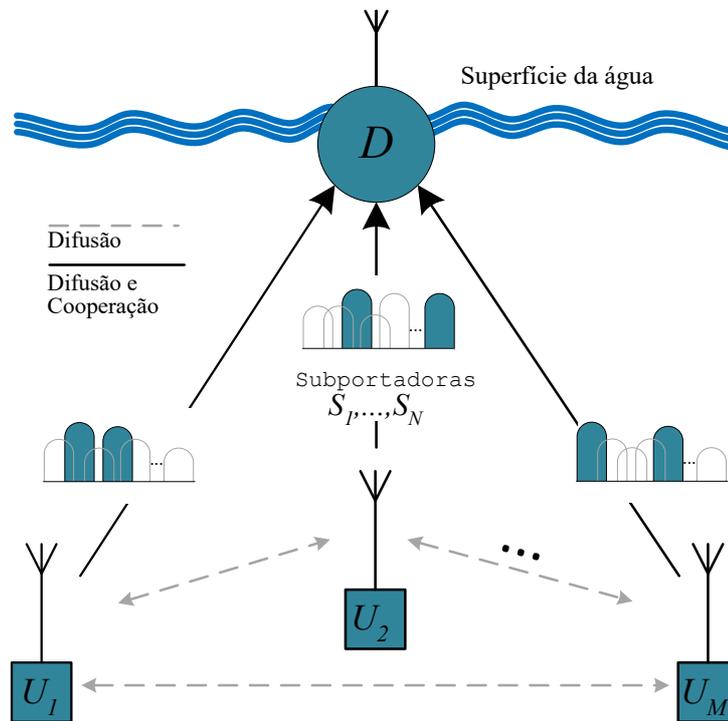


Figura 5.1 – Rede de múltiplo acesso de M nós transmissores, onde que cada um do nós transmite informações diferentes para o nó destino através de subportadoras em canais ortogonais.

Omitindo-se o índice do transmissor e do receptor para simplificar a notação, tem-se que o sinal em frequência recebido $Y[n]$ por um nó-fonte ou pelo nó-destino na n -ésima subportadora é obtido por:

$$Y[n] = \sqrt{P_s}H[n]X[n] + W[n], \quad (5.1)$$

em que a potência total de transmissão do sistema é dada por P , de modo que cada nó-fonte divide igualmente a potência do sinal em todas as subportadoras que foram realizadas através de canais ortogonais em frequência, uma vez que cada sub-portadora é alocada para um único nó por vez. Isso pode ser implementado na prática, por exemplo, por meio de técnicas de cancelamento de interferência (KNOX, 2012; LAUGHLIN et al., 2014).

alocadas para ele pelo nó destino. Assim a potência em cada subportadora, P_s , é dada por $P_s = P/N$. $X[n]$ e $H[n]$ são respectivamente o sinal transmitido e o ganho do canal na n -ésima subportadora. $W[n]$ é o ruído próprio do meio subaquático (STOJANOVIC, 2009).

Em geral, uma certa subportadora está em *outage* se essa não pode suportar uma taxa de transmissão r para um usuário específico, ou seja, a capacidade do canal de uma subportadora é menor que a taxa de transmissão por subportadora (GOLDSMITH, 2005; TSE; VISWANATH, 2005). Quando o sistema é OFDMA, onde as subportadoras são multiplexadas entre usuários, cada usuário divide seu pacote em K subportadoras, fornecidas pelo destino através do algoritmo de alocação. Assim, a taxa de transmissão em cada subportadora é igual a $r = R_0/K$, sendo R_0 a taxa de transmissão do usuário, o que leva a probabilidade de *outage* de uma subportadora S_n ser dada:

$$\mathcal{P}_s(K) = Pr \left\{ \frac{1}{N_L} C_L(n) < \frac{R_0}{K} \right\}, \quad (5.2)$$

onde $C_L(n) = \log_2(1 + SNR|H[n]|^2)$ é a capacidade normalizada pela largura de banda do bloco de coerência que contém a subportadora n , enquanto $[1/N_L]C_L(n)$ é a capacidade por subportadora (GOLDSMITH, 2005; TSE; VISWANATH, 2005).

Neste trabalho, considera-se o caso particular de desvanecimento em bloco no qual os coeficientes de desvanecimento são variáveis aleatórias i.i.d. para diferentes blocos mas constantes durante o mesmo bloco. Esse caso particular é denominado desvanecimento quase-estático (TSE; VISWANATH, 2005; BIGLIERI et al., 2007). Antes de continuar, estabelece-se que os operadores $+$ e $-$ representam operações sobre números reais, \oplus é a adição binária (XOR), além de \boxplus e \boxminus serem as operações de adição e subtração sobre um campo não binário, respectivamente. As principais considerações apresentadas acima estão resumidas no que se segue.

- (i) Considera-se ortogonalidade em frequência na transmissão/recepção, de tal forma que cada nó da rede pode transmitir e receber informação no mesmo instante de tempo, mas em frequências (subportadoras) distintas;
- (ii) O desvanecimento é considerado lento, constante durante um bloco, mas i.i.d. no tempo, no espaço e na frequência para diferentes blocos;
- (iii) Transmissores e receptores são equipados com somente uma antena.

5.2 CONSUMO ENERGÉTICO DO ESQUEMA GDNC-OFDMA

Como visto na seção 4.3.4, a aplicação de codificação de rede em redes de sensores subaquáticas, traz benefícios em termos de eficiência energética quando comparada aos esquemas puramente cooperativo e à transmissão direta. Nesta seção, será analisada a aplicação de codificação de rede aliada ao OFDMA utilizando a alocação de subportadoras por meio do algoritmo R^2EHK apresentado na seção 3.1.

Neste esquema, para encontrar o consumo de potência dada uma certa probabilidade de *outage* alvo, é necessário considerar que o cálculo deve ser efetuado para cada uma das subportadoras utilizadas.

Sendo $|H[n]|^2$, apresentado na Equação (5.2), exponencialmente distribuído conforme a distribuição \mathcal{K} , a probabilidade de *outage* de cada subportadora pode ser vista como:

$$\mathcal{P}_s(K) = 1 - \exp\left(-\frac{2^{\frac{2,6R_0N_L}{K}} - 1}{SNR}\right). \quad (5.3)$$

Para o esquema GDNC-OFDMA, a partir das equações (2.10), (5.3) e (3.5b) pode ser visto que a mínima potência de transmissão necessária para alcançar um dada probabilidade de *outage* alvo $\mathcal{P}_{o,GO}^*$ é dada por:

$$P_{GO}^a = \frac{(1 - 2^{\frac{R}{R_{GDNC}}}) 2,6 A(l, f) N(f) \Delta f}{\ln\left(1 - \mathcal{P}_{o,GO}^* / \mu^{\left(\frac{1}{M+L(k_2+1)-1}\right)}\right)}, \quad (5.4)$$

Assim, o consumo total de energia do esquema depende do número de transmissões e recepções. No esquema GDNC-OFDMA, todos os nós M transmitem em cada um dos intervalos de tempo k_1 da fase de difusão e k_2 da fase de cooperação. A quantidade de recepções, por sua vez, é igual a $(M+1)k_1$ durante a fase de difusão, incluindo M nós-fonte e o destino, enquanto na fase de cooperação apenas o destino recebe os k_2 PFs. Desse modo, conforme demonstrado o número de transmissões e recepções apresentados na Tabela 3.1, o consumo de energia do esquema GDNC-OFDMA E_{GO} (em Joules/Bit) é:

$$E_{GO} = \frac{1}{R_{GO}} [(k_1 + k_2)(P_t^e + MP_{ctx}) + k_1(M+1) + k_2] P_{ctx} \quad (5.5)$$

Conforme mostrado no Capítulo 3, para a alocação das subportadoras é necessário que o nó destino aloque as subportadoras para que cada um dos nós transmissores possam enviar seus IFs de forma ortogonal na frequência. Essa informação é enviada através de um canal de retorno entre o destino e os nós. O custo energético do envio dessa informação é desconsiderado do cálculo global de eficiência energética, pois conforme apresentado na Seção 5.1 o nó destino encontra-se numa estação de superfície com alimentação elétrica constante e sem a limitação de baterias dos nós transmissores.

5.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Neste capítulo, é realizada a análise numérica da eficiência energética do esquema proposto GDNC-OFDMA em comparação com a transmissão direta e com o esquema proposto em (TON et al., 2017). Os parâmetros do sistema são os mesmos utilizados no capítulo anterior para análise dos esquemas TDMA e para fins de facilitar as consultas são rerepresentados na Tabela 5.1. Neste capítulo, devido a necessidade de validação cenários distintos e a utilização de OFDM como múltiplo acesso, as análises numéricas são feitas considerando outros modelos de modems além do WHOI2. Os modems Marlin, Orca e Benthos foram analisados em (SENDRA et al., 2016) e são modelos comerciais de aplicação em algumas indústrias (DSPCOMM, 2016):

1. **Instrumentação Oceanográfica:** Coleta de dados oceanográficos em tempo real; monitoramento e controle para aplicações marítimas; monitoramento de infiltração de rios; gerenciamento de ativos submarinos.
2. **Óleo e Gás:** Plataforma de produção submarina no controle de atuadores e sistemas redundantes; monitoramento de tubulações para corrosão; coleta, monitoramento e controle de dados durante instalação da plataforma de exploração e produção; Monitoramento de segurança subaquática.
3. **Defesa:** Sistemas de comunicações submarinas; sistemas de comunicações do mergulhador usados pelas forças especiais na remoção de minas; redes de área ampla com interação com sistemas de rádio na superfície.
4. **Monitoramento ambiental:** Substituto de sistema cabeado por sem fio, com maior flexibilidade na escolha da posicionamento; monitoramento de sedimentos em barragens; comunicação confiável com nós móveis.

5. **Aquicultura:** Coleta de dados de sensores em tempo real; comunicações com mergulhadores em fazendas submarinas; sistemas de telemetria e controle para regular alimentação.
6. **Mergulho:** Comunicações com a superfície e outros mergulhadores; chamadas de socorro; instruções e dados em tempo real na realização de tarefas subaquáticas complexas; rastreamento de posição para mergulhadores.

Os parâmetros dos modems utilizados são apresentados na Tabela 5.2. Dentre esses modems os modelos Marlin e Orca apresentam a possibilidade da aplicação da modulação OFDM o que torna factível a implementação de subportadoras em cenários reais.

Tabela 5.1 – Parâmetros do Sistema - Análise OFDMA

Parâmetro	Descrição	Valor
ϕ	Eficiência do amplificador e do transdutor (GAO et al., 2012)	0.25
ν	Parâmetro de forma da distribuição \mathcal{K}_G (YANG; YANG, 2006)	1.5
\mathcal{P}_o	probabilidade de <i>outage</i> alvo	10^{-4}

Tabela 5.2 – Parâmetros dos Modems

Modem	f_c [kHz]	B_s [kHz]	P_{ctx} [W]	P_{crx} [W]	P_{max} [W]
WHOI (GALLIMORE et al., 2010)	20	0.320	0.158	1	48
Marlin (SENDRA et al., 2016)	23	14	1.8	0.252	30
Orca (SENDRA et al., 2016)	14	100	0.252	1.8	30
Benthos (SENDRA et al., 2016)	24.5	5	0.168	0.756	84

5.4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção é realizada a comparação entre o esquema GDNC-OFDMA apresentado na seção 5.2 e o esquema NCC-OFDMA apresentado por (HEIDARPOUR et al., 2017) e modificado em (TON et al., 2017), além dos resultados para a transmissão direta.

5.4.1 Consumo Energético em Relação à distância

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, são apresentadas avaliações do consumo energético pela distância. Especificamente na Figura 5.2, é mostrado o comportamento do modem

WHOI (GALLIMORE et al., 2010), qual possui uma restrição em relação à potência mínima transmitida, a qual é fixada em $8W$.

Em todos os cenários é possível perceber que com o aumento da distância o consumo de energia da transmissão direta comporta-se como esperado, crescendo de acordo com o aumento da distância, o que confirma a característica do meio subaquático de restrição em relação a distância. Contudo, quando se analisa as curvas dos esquemas GDNC-OFDMA e NCC-OFDMA em comparação com a transmissão direta, observa-se que o ganho de diversidade significa claramente em redução de consumo de energia, entretanto, devido ao domínio da energia consumida pelos circuitos eletrônicos de transmissão e recepção a energia consumida pelos esquemas cooperativos se mantém estável por uma certa distância.

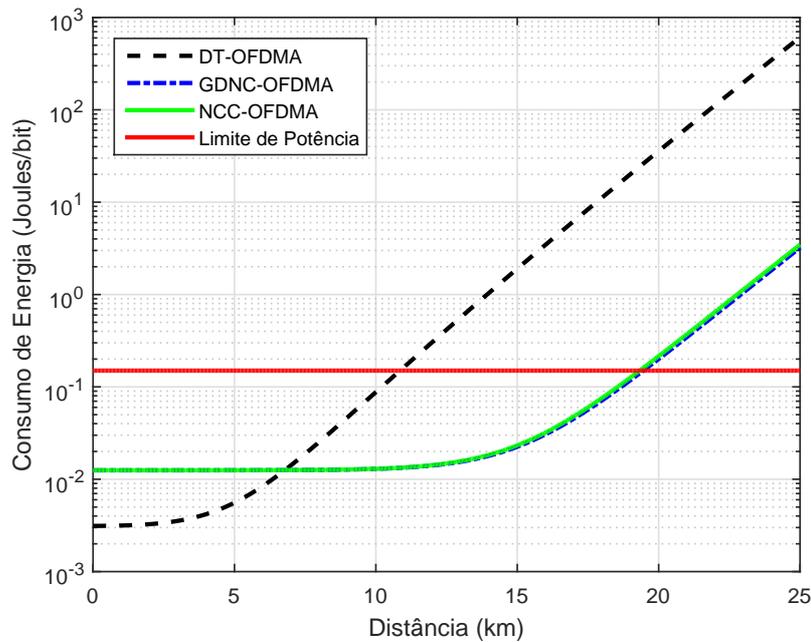


Figura 5.2 – Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem WHOI (GALLIMORE et al., 2010), (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)

5.4.2 Consumo Energético em Relação ao Número de Nós

A análise do consumo de energia para um esquema cooperado deve considerar o número de nós de uma rede, pois através dessa análise é possível projetar uma rede com um número ótimo de nós que minimizam o consumo energético. A Figura 5.6 mostra uma análise através de busca exaustiva para o número ótimo de nós para uma dada distância,

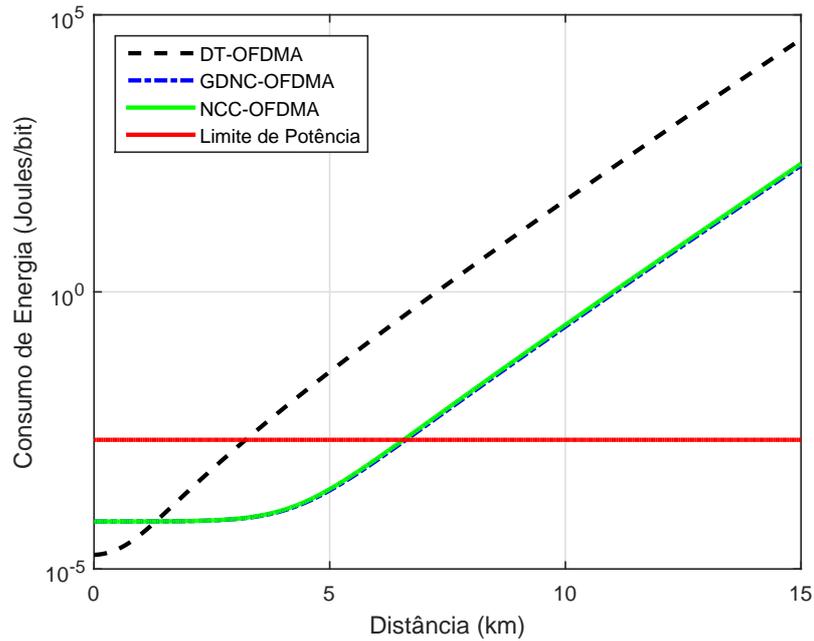


Figura 5.3 – Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Marlin (SENDRA et al., 2016), (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)

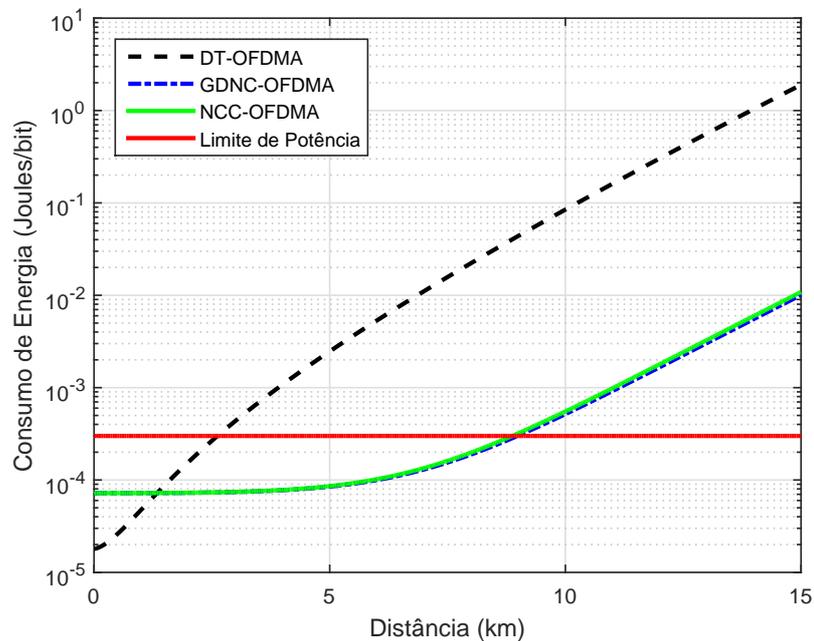


Figura 5.4 – Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Orca (SENDRA et al., 2016) (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)

ou seja, o número de nós que minimizam o consumo de uma rede para dispositivos do tipo Teledyne Benthos (SENDRA et al., 2016).

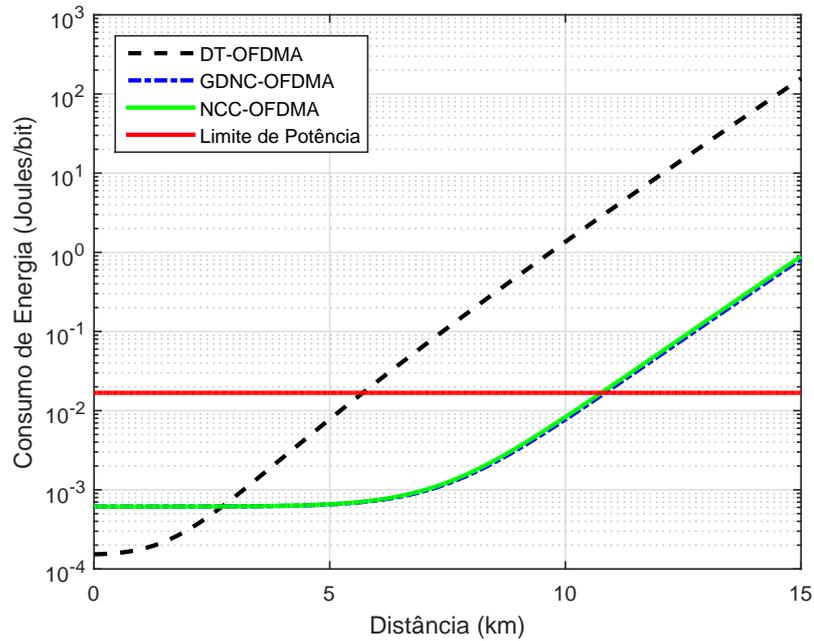


Figura 5.5 – Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela distância para o modem Benthos (SENDRA et al., 2016) (com $L = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $k_1 = k_2 = 2$)

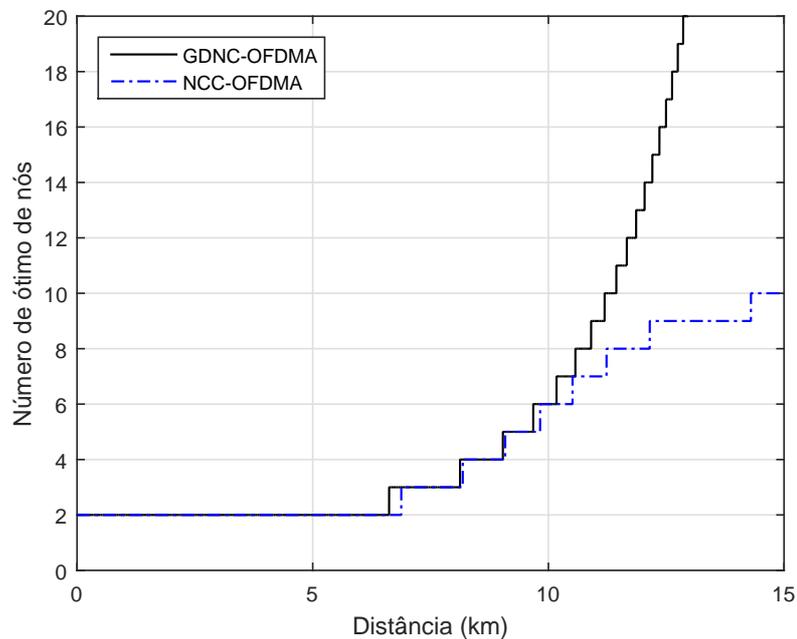


Figura 5.6 – Número ótimo de nós em função da distância para os esquemas GDNC-OFDMA e NCC-OFDMA (com $k_1 = k_2 = 2$).

A partir dessa análise determina-se qual o número ideal de nós para uma certa distância. Assim, é possível realizar outras análises com a certeza que o projeto da rede está dimensionado para o mínimo consumo em relação à quantidade de nós. Uma análise

pertinente é a relação do consumo energético com frequência de operação.

5.4.3 Consumo Energético em Relação à Frequência

Na Figura 5.7, é realizada outro tipo de análise, focando em outra característica crítica das UWANS, a frequência de operação. Nesta análise, a distância foi fixada em 10000m e a frequência variou de 9kHz até 100kHz, de acordo com as especificações dos modems. É bem conhecido a grande dependência da frequência de operação para o desempenho de redes subaquáticas, quanto maior seu valor maior a atenuação e o ruído (STOJANOVIC, 2006). Na Figura 5.7 é possível notar que os esquemas de codificação de rede com OFDMA através de alocação de subportadoras, especialmente o GDNC-OFDMA pode reduzir, em termos de de consumo energético, os efeitos do aumento da frequência de operação. Isso devido ao aumento significativo da diversidade.

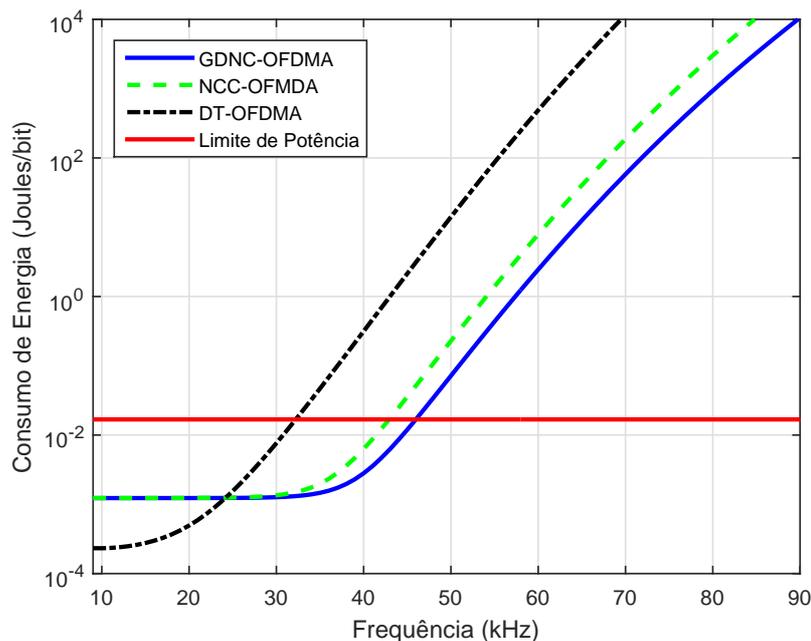


Figura 5.7 – Consumo de Energia dos esquemas GDNC-OFDMA, NCC-OFDMA e transmissão direta pela frequência para o modem Benthos (SENDRA et al., 2016) (com $L = 3$, $M = 6$, $N = 12$, $k_1 = k_2 = 2$, and $d = 10000m$)

A análise da Figura 5.7 mostra que em frequências mais baixas ($< 25kHz$), onde a perda de percurso é menor, a transmissão direta é mais eficiente em termos de energia. Quando a frequência de operação aumenta, os esquemas com codificação de rede se tornam mais eficientes devido a sua capacidade de aumentar a diversidade e consequentemente a confiabilidade das transmissões mesmo na presença de perdas de percurso mais altas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido nesta tese tem como objetivo principal o estudo da aplicação dos esquemas de codificação de rede GDNC em redes de sensores subaquáticas. Além do GDNC original, são aplicadas variações como o FA-GDNC, com um canal de retorno e a GDNC-OFDMA com alocação de subportadoras para os nós-fonte a partir do nó-destino. Nesse cenário, toda a perda de percurso é modelada de acordo com as características do ambiente subaquático, considerando suas especificidades em relação ao ruído e atenuação. Os sinais percorrem um canal com desvanecimento quase-estático modelado pela distribuição \mathcal{K}_G , referência para a representação do canal subaquático. O foco se baseia na eficiência energética, analisada a partir do consumo energético de cada esquema a partir de uma probabilidade de *outage* alvo. Uma transmissão eficiente em termos de energia pode reduzir a necessidade de troca, reposição ou manutenção de baterias em redes subaquáticas.

Os resultados começam com o aprofundamento no estudo das Redes Acústicas Subaquáticas, o conhecimento das principais características do canal acústico subaquático: atenuação e largura de banda dependentes da frequência, ruído e desvanecimento mais severo que o usualmente considerado em sistemas de comunicação via rádio.

Com base nesse conhecimento, investigou-se uma expressão para a Probabilidade de *outage* com técnica de fitting. Desse modo foi possível chegar em uma manipulação matemática para a obtenção da potência requerida para uma certa probabilidade de *outage* alvo.

Também foi possível aplicar técnicas de cooperação já utilizadas em sistemas sem fio terrestres em sistemas subaquáticos utilizados com parâmetros provenientes de experimentos e *hardwares* reais. Constatou-se que os esquemas cooperativos, em especial aqueles com codificação de rede melhoram o consumo energético de uma rede subaquática. Os resultados obtidos pelo GDNC e o FA-GDNC, em termos de eficiência energética, em comparação com esquemas simples de cooperação e com a transmissão direta demonstram que é possível ter claros ganhos com a utilização de tal técnica de codificação de rede.

No esquema GDNC-OFDMA, o algoritmo de alocação de subportadoras é executado no nó-destino, assim a diversidade espaço-temporal do esquema GDNC é

impulsionada pela diversidade adicional em frequência, sem comprometer a taxa do código. Como resultado, o esquema GDNC-OFDMA alcança melhores resultados que o NCC-OFDMA. A análise demonstra que, em termos de eficiência energética, que a abordagem sem restrições onde todos os nós-fonte transmitem na fase de cooperação tem desempenho melhor que o cenário com restrição, onde apenas um conjunto de nós cooperam. Desse modo, constata-se que o esquema GDNC-OFDMA é capaz de alcançar uma maior eficiência energética. Tais considerações levam à possibilidade de utilização de frequências superiores às utilizadas atualmente, porém com consumo de energia reduzido devido ao uso de esquemas cooperativos como o GDNC-OFDMA. Isso pode até mesmo possibilitar o aumento da largura de banda e, conseqüentemente, aumentar a taxa de transmissão.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros envolvendo essa linha de estudo estão os temas listados a seguir.

- A análise de novos modems como o dispositivo apresentado em (QIAO et al., 2017) que apresenta baixo consumo. Também é importante o estudo da evolução de modems de multiportadoras como os apresentados em (LI et al., 2009) e em (YEUNG et al., 2003).
- A avaliação da eficiência energética para diferentes taxas de código, alterando os valores de k_2 , é mais uma abordagem possível na continuidade deste trabalho.
- Outra linha de trabalho possível é a realização de experimentos com os modems apresentados neste trabalho em ambientes de lagos de usinas hidrelétricas e de outras barragens e visualizar sua aplicação para casos reais. Nesse pensamento, está também a implementação dos esquemas apresentados neste trabalho em um cenário real para atender demandas já mapeadas na área de segurança de barragem e monitoramento hidrológico.
- Outra abordagem possível é a aplicação da técnica demonstrada em (REBELATTO et al., 2011) denominada *Full Diversity* GDNC (FD-GDNC), uma técnica derivada do GDNC que utiliza os canais entre os usuários para alcançar a diversidade completa do esquema. A avaliação de desempenho desse esquema em termos de eficiência energética é importante, pois apesar desta técnica ser capaz de alcançar

uma maior ordem de diversidade que o esquema GDNC de (REBELATTO et al., 2012), esse aumento de confiabilidade é obtido às custas de um aumento no consumo energético. Dessa forma, há claramente uma troca de benefícios entre confiabilidade e consumo energético que será estudada em detalhes na sequência deste trabalho.

- Uma última possibilidade é estudar o *trade-off* entre número de antenas e número de nós cooperando. No ambiente subaquático as antenas transmissoras e receptoras são na verdade transdutores eletroacústicos. Tal abordagem analisaria a possibilidade da utilização desses componentes com estratégias MIMO numa comparação com técnicas cooperativas. Para essa comparação poderá ser realizado um *trade-off* entre a eficiência energética e número de nós cooperando.

REFERÊNCIAS

- AHLWEDE, R.; CAI, N.; LI, S. Y. R.; YEUNG, R. W. Network information flow. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 46, n. 4, p. 1204–1216, Jul 2000. ISSN 0018-9448.
- AHMED, R.; STOJANOVIC, M. Random linear packet coding for fading channels. In: **2013 OCEANS - San Diego**. 2013. p. 1–6. ISSN 0197-7385.
- AL-DHARRAB, S.; UYSAL, M.; DUMAN, T. M. Cooperative underwater acoustic communications [accepted from open call]. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 7, p. 146–153, July 2013. ISSN 0163-6804.
- ARLINGHAUS, S. L. W. C. A. W. D. D.; NYSTUEN, J. D. **Practical handbook of curve fitting**. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- BAI, B. B.; CHEN, W.; LETAIEF, K. B.; CAO, Z. Diversity-multiplexing tradeoff in ofdma systems: An h-matching approach. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 11, p. 3675–3687, November 2011. ISSN 1536-1276.
- BIGLIERI, E.; CALDERBANK, R.; CONSTANTINIDES, A.; GOLDSMITH, A.; PAULRAJ, A.; POOR, H. V. **MIMO Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521873282.
- BITHAS, P. S.; SAGIAS, N. C.; MATHIOPOULOS, P. T.; KARAGIANNIDIS, G. K.; RONTOGIANNIS, A. A. On the performance analysis of digital communications over generalized-k fading channels. **IEEE Communications Letters**, v. 10, n. 5, p. 353–355, May 2006. ISSN 1089-7798.
- BITHAS, P. S.; SAGIAS, N. C.; MATHIOPOULOS, P. T.; KOTSOPOULOS, S. A.; MARAS, A. M. On the correlated k -distribution with arbitrary fading parameters. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 15, p. 541–544, 2008. ISSN 1070-9908.
- BREKHOVSKIKH, Y. P. L. L. M. **Fundamentals of Ocean Acoustics**. 3rd. ed. Springer-Verlag, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/b97388>>.
- CHAPMAN, D. M. F.; ELLIS, D. The elusive decibel: Thoughts on sonars and marine mammals. v. 26, p. 29–31, 06 1998.
- DSPCOMM. **DSPComm Devices Features**. [online]. mar 2016. Disponível em: <<http://www.dspcommgen2.com>>.
- FREITAG, L.; GRUND, M.; SINGH, S.; PARTAN, J.; KOSKI, P.; BALL, K. The whoi micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In: **Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE**. 2005. p. 1086–1092 Vol. 2. ISSN 0197-7385.

- GALLIMORE, E.; PARTAN, J.; VAUGHN, I.; SINGH, S.; SHUSTA, J.; FREITAG, L. The whoi micromodem-2: A scalable system for acoustic communications and networking. In: **OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE**. 2010. p. 1–7. ISSN 0197-7385.
- 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, 2012. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/12/4/4715>>.
- GATECH, G. I. o. T. **Two-dimensional Underwater Sensor Networks**. 2016. Disponível em: <<http://www2.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/UWASN/work.html>>.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.
- GRADSHTEYN, I. S.; RYZHIK, I. M. **Table of Integrals, Series, and Products**. 6th. ed. New York: Academic Press, 2000.
- HEIDARPOUR, A. R.; KURT, G. K.; UYSAL, M. Finite-snr diversity-multiplexing tradeoff for network coded cooperative ofdma systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 3, p. 1385–1396, March 2017. ISSN 1536-1276.
- HEIDEMANN, J.; YE, W.; WILLS, J.; SYED, A.; LI, Y. Research challenges and applications for underwater sensor networking. In: **IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006**. 2006. v. 1, p. 228–235. ISSN 1525-3511.
- HOPCROFT, J. E.; KARP, R. M. An $n^{5/2}$ algorithm for maximum matchings in bipartite graphs. **SIAM Journal on Computing**, v. 2, n. 4, p. 225–231, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1137/0202019>>.
- JING, Z.; ZHE-WEI, Z. Chebyshev approximation of the second kind of modified bessel function of order zero. **Applied Mathematics and Mechanics**, v. 25, n. 5, p. 483–487, 2004. ISSN 1573-2754. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02437596>>.
- KAM, C.; KOMPELLA, S.; NGUYEN, G. D.; EPHREMIDES, A.; JIANG, Z. Frequency selection and relay placement for energy efficiency in underwater acoustic networks. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 39, n. 2, p. 331–342, April 2014. ISSN 0364-9059.
- KAUSHAL, H.; KADDOUM, G. Underwater optical wireless communication. **IEEE Access**, v. 4, p. 1518–1547, 2016. ISSN 2169-3536.
- KNOX, M. E. Single antenna full duplex communications using a common carrier. In: **IEEE Wireless Microwave Technol. Conf. (WAMICON'12)**. 2012. p. 1–6.
- KOETTER, R.; MEDARD, M. An algebraic approach to network coding. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 11, n. 5, p. 782–795, Oct 2003. ISSN 1063-6692.
- LAM, W. K.; ORMONDROYD, R. F. A coherent cofdm modulation system for a time-varying frequency-selective underwater acoustic channel. In: **Seventh International Conference on Electronic Engineering in Oceanography, 1997. 'Technology Transfer from Research to Industry'.** 1997. p. 198–203. ISSN 0537-9989.

- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dec 2004. ISSN 0018-9448.
- LAUGHLIN, L.; BEACH, M. A.; MORRIS, K. A.; HAINE, J. L. Optimum single antenna full duplex using hybrid junctions. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 32, n. 9, p. 1653–1661, September 2014.
- LI, B.; HUANG, J.; ZHOU, S.; BALL, K.; STOJANOVIC, M.; FREITAG, L.; WILLETT, P. Mimo-ofdm for high-rate underwater acoustic communications. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 34, n. 4, p. 634–644, Oct 2009. ISSN 0364-9059.
- MURUGAN, S. S. **Analysis of signal processing algorithms for signal enhancement in underwater noise**. mar 2015. Tese (phdthesis) — Anna University, mar 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10603/141454>>.
- NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 10, p. 74–80, Oct 2004. ISSN 0163-6804.
- 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>>.
- POLPRASERT, C.; RITCEY, J. A.; STOJANOVIC, M. Capacity of ofdm systems over fading underwater acoustic channels. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 36, n. 4, p. 514–524, Oct 2011. ISSN 0364-9059.
- PREISIG, J. Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 11, n. 4, p. 2–10, out. 2007. ISSN 1559-1662. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1347364.1347370>>.
- PROAKIS, J. G.; SOZER, E. M.; RICE, J. A.; STOJANOVIC, M. Shallow water acoustic networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 39, n. 11, p. 114–119, Nov 2001. ISSN 0163-6804.
- QIAO, G.; ZHAO, Y.; LIU, S.; BILAL, M. Dolphin sounds-inspired covert underwater acoustic communication and micro-modem. **Sensors**, v. 17, n. 11, 2017. ISSN 1424-8220.
- RAYEL, O. K. **Análise da Eficiência Energética de Codificação de Rede aplicada a Redes Cooperativas**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- RAYEL, O. K.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D.; UCHÔA-FILHO, B. F.; LI, Y. Energy efficiency of network coded cooperative communications in nakagami- m fading. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 20, n. 10, p. 960–963, Oct 2013. ISSN 1070-9908.
- REBELATTO, J. L. **Codificação de Rede baseada em Códigos Corretores de Erros Clássicos**. 2010. Tese (phdthesis) — Federal University of Santa Catarina (USFC), 2010.

REBELATTO, J. L.; UCHOA-FILHO, B. F.; SILVA, D. Full-diversity network coding for two-user cooperative communications. In: **Information Theory Workshop (ITW), 2011 IEEE**. 2011. p. 543–547.

REBELATTO, J. L.; UCHOA-FILHO, B. F.; LI, Y.; VUCETIC, B. Multiuser cooperative diversity through network coding based on classical coding theory. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 60, n. 2, p. 916–926, Feb 2012. ISSN 1053-587X.

REDDY, T. S. B.; SUBADAR, R.; SAHU, P. R. Outage probability of sc receiver over exponentially correlated k fading channels. **IEEE Communications Letters**, v. 14, n. 2, p. 118–120, February 2010. ISSN 1089-7798.

ROY, S.; DUMAN, T. M.; MCDONALD, V.; PROAKIS, J. G. High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space time coding: Receiver structures and experimental results. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 32, n. 3, p. 663–688, July 2007. ISSN 0364-9059.

SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity. part i and part ii. **IEEE Transactions on Communications**, v. 51, n. 11, p. 1927–1948, Nov 2003. ISSN 0090-6778.

SENDRA, S.; LLORET, J.; JIMENEZ, J. M.; PARRA, L. Underwater acoustic modems. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 11, p. 4063–4071, June 2016. ISSN 1530-437X.

SHANKAR, P. Error rates in generalized shadowed fading channels. **Wireless Personal Communications**, v. 28, n. 3, p. 233–238, 2004. ISSN 1572-834X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/B:wire.0000032253.68423.86>>.

SHANKAR, P. M. Statistical models for fading and shadowed fading channels in wireless systems: A pedagogical perspective. **Wireless Personal Communications**, v. 60, n. 2, p. 191–213, 2011. ISSN 1572-834X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11277-010-9938-2>>.

SOUZA, F. A. de; CHANG, B. S.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; PELLENZ, M. E.; ROSAS, F. 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; SOUZA, R. D.; BRANTE, G.; PELLENZ, M. E.; ROSAS, F. Code rate, frequency and snr optimization for energy efficient underwater acoustic communications. In: **2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. 2015. p. 6351–6356. ISSN 1550-3607.

SOZER, E. M.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. G. Underwater acoustic networks. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 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: **Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks**. New York, NY, USA: ACM, 2006. (WUWNet '06), p. 41–47. ISBN 1-59593-484-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161049>>.

STOJANOVIC, M. Mimo ofdm over underwater acoustic channels. In: **2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers**. 2009. p. 605–609. ISSN 1058-6393.

STOJANOVIC, M.; PREISIG, J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. **IEEE Communications Magazine**, v. 47, n. 1, p. 84–89, January 2009. ISSN 0163-6804.

TAROKH, V.; SESHADRI, N.; CALDERBANK, A. R. Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction. **IEEE Trans. Inf. Theor.**, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 44, n. 2, p. 744–765, set. 2006. ISSN 0018-9448. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/18.661517>>.

TON, T. H.; REBELATTO, J. L.; SOUZA, R. D. Comments on “Finite-SNR diversity-multiplexing tradeoff for network coded cooperative OFDMA systems”. **ArXiv e-prints**, June 2017. Disponível em: <arxiv.org/abs/1706.06207>.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-5218-4527-0. Disponível em: <<https://people.eecs.berkeley.edu/~dtse/book.html>>.

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

WENIGER, E. J.; CÍZEK, J. Rational approximations for the modified bessel function of the second kind. **Computer Physics Communications**, v. 59, n. 3, p. 471 – 493, 1990. ISSN 0010-4655. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001046559090089J>>.

XIAO, K.; LU, X. Outage probability and capacity of the k fading channels. In: **2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)**. 2013. p. 1330–1334. ISSN 2164-4357.

XIAO, L.; FUJA, T. E.; KLIEWER, J.; COSTELLO, D. J. A network coding approach to cooperative diversity. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 53, n. 10, p. 3714–3722, Oct 2007. ISSN 0018-9448.

XIAO, M.; SKOGLUND, M. M-user cooperative wireless communications based on nonbinary network codes. In: **Networking and Information Theory, 2009. ITW 2009. IEEE Information Theory Workshop on**. 2009. p. 316–320.

XIAO, M.; SKOGLUND, M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding. **IEEE Transactions on Communications**, v. 58, n. 12, p. 3345–3351, December 2010. ISSN 0090-6778.

YANG, W.-B.; YANG, T. C. Mary frequency shift keying communications over an underwater acoustic channel: Performance comparison of data with models. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Octobe 2006.

YEUNG, L. F.; BRADBEER, R. S.; LAW, E. T. M.; WU, A.; LI, B.; GU, Z. G. Underwater acoustic modem using multicarrier modulation. In: **Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492)**. 2003. v. 3, p. 1368–1375 Vol.3.

YILMAZ, F.; ALOUINI, M. S. A new simple model for composite fading channels: Second order statistics and channel capacity. In: **Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th International Symposium on**. 2010. p. 676–680. ISSN 2154-0217.