



**PROPOSTA DE NOVO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
PARA REDES DE SENSORES SUBAQUÁTICOS**

**RAPHAEL MONTANDON
RENATO AZEVEDO**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE REDES DE
COMUNICAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROPOSTA DE NOVO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
PARA REDES DE SENSORES SUBAQUÁTICOS**

**RAPHAEL MONTANDON
RENATO AZEVEDO**

Orientadora: PROFA. DRA. CLÁUDIA BARENCO ABBAS, ENE/UNB

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE REDES DE
COMUNICAÇÃO**

BRASÍLIA-DF, 20 DE MARÇO DE 2018.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROPOSTA DE NOVO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
PARA REDES DE SENSORES SUBAQUÁTICOS**

RAPHAEL MONTANDON

RENATO AZEVEDO

PROJETO DE GRADUAÇÃO ACADÊMICO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE REDES DE COMUNICAÇÃO.

APROVADO POR:

Profa. Dra. Cláudia Barenco Abbas, ENE/UnB
Orientadora

Prof. Dr. Rafael Timóteo de Sousa Jr., ENE/UnB
Examinador

Prof. Dr. Georges Amvane Nze, ENE/UnB
Examinador

BRASÍLIA, 20 DE MARÇO DE 2018.

Agradecimentos

Raphael Montandon

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e saúde que me conduziram a este momento. Dedico este trabalho final à minha família, cuja base me fortalece e sem a qual os desafios pareceriam intransponíveis. Aos meus pais Dalmo e Fátima, que, com amor, torcem sempre para meu sucesso. A minha mulher Thamara e meu filho Matheus, que me acolhem nos momentos de dificuldade e sem os quais a vida não faz mais sentido. Agradeço ao senhor Vandimur, meu sogro, pelos ensinamentos e confiança. Aos meus professores que pacientemente me guiaram, especialmente à professora Cláudia Barenco, que nos acolheu neste projeto desafiador, sempre com a atenção e motivação necessárias. Ao pesquisador e criador do AquaSim NG Robert Martin, pela ágil resolução dos problemas encontrados. Por fim, agradeço a todos os amigos e companheiros. Obrigado, de todo meu coração!

Renato Azevedo

Este projeto é dedicado aos meus pais, parentes e professores, figuras importantíssimas e que sem as quais eu não teria chegado nem perto de onde estou.

Resumo

Um dos maiores problemas para redes subaquáticas atualmente é o consumo de energia nas comunicações entre os nós sensores. Além disso, operações de resgate de nós que tiveram sua bateria esgotada são uma atividade de alto custo. Com isso em mente, este projeto propõe o EBVBF (*Energy Balanced Vector Based Forwarding*), um novo protocolo de roteamento cujo objetivo principal é o aumento do tempo de vida útil de uma rede subaquática e o balanceamento do consumo de energia dos nós, evitando a criação de "void zones" o que pode levar a interrupção completa da comunicação entre determinados nós sensores e os nós *sink*, trazendo a grande vantagem da diminuição de operações de resgate e manutenção dos nós em um meio aquático. Para tanto, será realizada uma análise de desempenho entre o protocolo proposto e o VBF, utilizando-se de ambiente de simulação.

Abstract

One of the biggest issues with subaquatic networks is the energy consumption in the communication between sensor nodes. Furthermore, retrieval operations on energy starved nodes are a costly operation. With that in mind, this project posits EBVBF (*Energy Balanced Vector Based Forwarding*), a new routing protocol with two goals: enhancing the total network operation time and the normalization of energy consumption in the nodes, avoiding the creation of network void zones, which could cause the network to completely cease its operations, and also reducing the need for node retrieval operations in an aquatic medium. Therefore, a performance analysis between the proposed protocol and VBF will be run in a simulation software.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2	REDES SUBAQUÁTICAS	3
2.1	DIFERENÇAS ENTRE REDES TERRESTRES E SUBAQUÁTICAS	3
2.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS ONDAS SUBAQUÁTICAS	5
2.3	LARGURA DE BANDA E CAPACIDADE DO CANAL	6
2.4	MODELO DE CANAL	9
2.5	TOPOLOGIA DE REDE SUBAQUÁTICA MÓVEL	10
3	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	12
3.1	VBF - <i>Vector-Based Forwarding</i>	12
3.2	FBR - <i>Focused Beam Routing</i>	14
3.3	REBAR - <i>Reliable and Energy Balanced Routing Algorithm</i>	15
3.4	ICRP - <i>Information-Carrying Routing Protocol</i>	16
3.5	DBR - <i>Depth-Based Routing</i>	16
3.6	EEDBR - <i>Energy Efficient Depth-Based Routing</i>	17
3.6.1	A FASE DE DESCOBERTA	18
3.6.2	A FASE DE ROTEAMENTO	18
3.7	CL-VBF - <i>Cross-Layer Vector Based Forwarding</i>	20
3.8	2HOP-AHH-VBF - <i>Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding</i>	21
3.9	QF-2HOP-AHH-VBF - <i>Quality Forward Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding</i>	22
4	PROPOSTA DO PROTOCOLO EBVBF - <i>Energy Balanced Vector Based Forwarding</i>	24
4.1	FUNCIONAMENTO DO EBVBF	24
5	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	30
5.1	FERRAMENTAS PARA SIMULAÇÃO	30
5.1.1	NS-3	30
5.1.2	AQUA-SIM	30
5.2	CONFIGURAÇÕES DE SIMULAÇÃO	32

5.2.1	MODEM	32
5.2.2	AMBIENTE EXTERNO	33
5.2.3	CONFIGURAÇÕES DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	35
6	RESULTADOS.....	37
6.1	MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	37
6.2	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	37
6.2.1	CENÁRIO 1 - <i>Threshold</i> VARIÁVEL.....	37
6.2.2	CENÁRIO 2 - α VARIÁVEL	40
6.2.3	CENÁRIO 3 - NÚMERO DE NÓS VARIÁVEL	43
6.2.4	CENÁRIO 4 - TOPOLOGIA VARIÁVEL.....	45
6.3	VANTAGENS DO EBVBF.....	48
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
7.1	CONCLUSÃO	49
7.2	TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

2.1	Perda de caminho em canal acústico subaquático. Fonte: [1]	4
2.2	Espalhamento Doppler. Fonte: [2]	5
2.3	Relação entre alcance, profundidade e perdas de transmissão em redes acústicas subaquáticas. Fonte: Google Imagens.	6
2.4	Perfis de Velocidade do Som. Adaptado de [3]	7
2.5	Capacidade calculada para o perfil 1 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de areia de grãos de médio diâmetro e com velocidade do vento de 2,5 m/s. Adaptado de [3]	8
2.6	Capacidade para o perfil 1 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]	8
2.7	Capacidade para o perfil 2 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]	8
2.8	Capacidade para o perfil 3 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]	9
2.9	Diagrama de topologia 2D. Adaptado de [4]	11
3.1	Funcionamento do FBR. Fonte: [5]	14
3.2	Funcionamento do REBAR. Fonte: [6]	15
3.3	Funcionamento do DBR. Fonte: [7]	17
3.4	Pacote <i>Hello</i> . Fonte: [8]	18
3.5	Casos possíveis durante transmissão. Fonte: [8].....	19
3.6	Fluxograma do funcionamento do EEDBR. Fonte: [8]	20
3.7	Imagem do funcionamento do CLVBF. Fonte: [9]	20
3.8	Comparações de desempenho entre VBF, HH-VBF e CL-VBF. Fonte: [9].....	21
3.9	Comparações de desempenho (taxa de sucesso vs número de nós) para o QF-2hop-AHH-VBF. Fonte: [10]	22
4.1	Funcionamento do VBF, fonte: [11]	25
4.2	Funcionamento das filas no VBF.	26
4.3	Funcionamento das filas no EBVBF.	26
4.4	Funcionamento das filas no EBVBF com isolamento.	26

4.5	Fluxograma de Funcionamento do VBF.	27
4.6	Fluxograma de Funcionamento do EBVBF.	28
5.1	Funções inclusas no Aqua-Sim. Fonte: [12].....	31
5.2	Micro Modem UWM1000 da LinkQuest. Fonte: [13]	32
6.1	Topologia do Cenário 1.	38
6.2	Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x <i>Threshold</i> Definido.	39
6.3	Tempo de Vida Útil da Rede x <i>Threshold</i> Definido.	39
6.4	Gráfico de Pacotes Entregues no <i>Sink</i> x <i>Threshold</i> Definido.....	39
6.5	Topologia para Cenário 2.	40
6.6	Tempo de Vida Útil da Rede x α	42
6.7	Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x α	42
6.8	Tempo de Entrega vs Número do Pacote para o VBF e $\alpha = 1.6$ e 3	42
6.9	Tempo de Entrega Médio para VBF e EBVBF.	43
6.10	Pacotes Entregues ao <i>Sink</i> Para o Cenário 2.	43
6.11	Topologia para Cenário 3.	44
6.12	Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x Número de Nós.	44
6.13	Porcentagem da Melhoria no Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó.....	45
6.14	Pacotes Entregues ao <i>Sink</i> Para o Cenário 3.	45
6.15	Topologia para Cenário 4.	46
6.16	Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x Nós Adicionados.	47
6.17	Tempo de Vida Útil da Rede x Nós Adicionados.	47
6.18	Porcentagem da Melhoria no Tempo de Vida Útil da Rede Para Cada Nó Adicionado.	48

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela de alcance de sinais acústicos e largura de banda. Fonte: [1]	3
5.1	Especificações do modem UWM1000. Fonte: [13].....	33
5.2	Atenuação de Sinal Devido a Temperatura Para 1km. Fonte: [14].....	34
5.3	Atenuação de Sinal Devido a Temperatura Para 5km. Fonte: [14].....	34
5.4	Variáveis de ambiente para simulação.	35

LISTA DE TERMOS E SIGLAS

α E.O	<i>Energy Optimized α</i>
2Hop-AHH-VBF	<i>Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding</i>
AMCTD	<i>Adaptive Mobility of Courier Nodes in Threshold-Optimized Depth-Based Routing</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
CL-VBF	<i>Cross-Layer VBF</i>
DBMR	<i>Depth-Based Multihop Routing</i>
EBVBF	<i>Energy Balanced Vector Based Forwarding</i>
EEDBR	<i>Energy Efficient Depth-Based Routing</i>
FBR	<i>Focused Beam Routing</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HH-VBF	<i>Hop-by-Hop Vector-Based Forwarding</i>
ICRP	<i>Information-Carrying Routing Protocol</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
kbps	<i>Kilobits Per Second</i>
ns-3	<i>Network-Simulator v3</i>
QF-2hop-AHH-VBF	<i>Quality Forward Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding</i>
REBAR	<i>Reliable and Energy Balanced Routing Algorithm</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
VBF	<i>Vector-Based Forwarding</i>

Capítulo 1

Introdução

Devido à grande concentração de água em sua superfície, o planeta Terra é também conhecido como "Planeta Água". Haja vista sua abundância, a água está presente em diversas atividades da humanidade e o seu monitoramento se faz necessário para variadas funções: a determinação da qualidade da água ou a defesa contra submarinos em tempos de guerra exemplificam este rol.

Atualmente este monitoramento é feito, principalmente, por meio de dois tipos diferentes de conexão [1]. A Conexão *Tethered* emprega um cabo que vai do aparelho (que será chamado de "nó") até uma base na superfície. Entretanto, tendo em vista as altas pressões e variações de fatores físicos às quais os cabos são submetidos em altas profundidades, é necessário o emprego de proteções pesadas e caras, adicionando custos no emprego destas conexões. A Conexão *Wireless* se utiliza de vários nós transmissores com conexão sem fio para compartilhar informações, seja entre nós submersos, seja com uma base na superfície. As redes *wireless* em meio subaquático, no entanto, possuem três problemas principais:

1. Baixo Alcance: Isso ocorre devido a necessidade de se utilizar ondas acústicas, que possuem uma velocidade de propagação cinco ordens de magnitude menor que as ondas de rádio normalmente utilizadas em redes terrestres. Condições de temperatura, pressão e, no caso de oceanos, salinidade da água, fazem com que as ondas RF sofram perdas significativas relacionadas ao canal, impossibilitando seu uso.
2. Baixa Taxa de Transmissão: As taxas de transmissão em redes sem fio estão relacionadas diretamente à frequência em que as ondas são transmitidas. No entanto, as ondas acústicas transmitidas em meio subaquático são rapidamente absorvidas caso suas frequências ultrapassem o valor de 1MHz. Para efeito de comparação, uma rede *Wi-Fi* comum utiliza frequências maiores que 2GHz.
3. Consumo de Energia dos Nós: O meio subaquático e o uso de ondas acústicas ocasionam o alto gasto energético dos nós comunicantes, já que a propagação é habitualmente utilizada em modo *broadcast*. Assim sendo, é necessário que os nós realizem atividades adicionais, como o controle de acesso ao meio, retransmissão de pacotes,

recepção de pacotes duplicados ou atrasados, entre outras atividades que consomem energia. Posto que os nós são distribuídos em um ambiente de difícil acesso, ações de recarga de bateria ou de recuperação dos nós resultam em um alto custo adicional de operação. Por conseguinte, se faz necessária a adoção de medidas para evitar ao máximo a necessidade dessas operações. Evidencia-se que amenizar o prejuízo causado por este último desafio é o principal objetivo deste projeto, através do protocolo EBVBF e o balanceamento do gasto energético dos nós transmissores.

Além dos problemas acima propostos, as redes subaquáticas fornecem alguns percalços adicionais em sua implementação. Por exemplo, os protocolos de acesso ao meio desenvolvidos para redes terrestres não podem prever colisões em tempo hábil quando a velocidade de propagação é tão baixa, uma vez que o atraso médio da rede e seu desvio padrão são muito altos em comparação às redes terrestres.

Em redes *wireless* baseadas em *broadcast* os protocolos de roteamento buscam gerenciar e otimizar os vários recursos e desafios presentes, como aumentar a confiabilidade de entrega, evitar as *void zones*, gerenciar o congestionamento ou escassez dos nós, ou ainda economizar energia, entre outros. O protocolo de roteamento VBF (*Vector-Based Forwarding*), por ser um protocolo de roteamento bastante popular e voltado para a economia de energia [15], possui diversas modificações e extensões, feitas por grupos de diferentes nacionalidades. O objetivo deste projeto é propor um novo protocolo de roteamento baseado no VBF que contribua ainda mais para o aumento do tempo de vida útil de uma rede subaquática.

Para a realização das simulações envolvidas neste estudo, usou-se a plataforma de simulação ns-3 , juntamente com a extensão AquaSim-NG, que é voltada exclusivamente para redes subaquáticas. Com o auxílio destas ferramentas, efetuaram-se as simulações necessárias para a avaliação de desempenho do protocolo proposto.

1.1 Organização do Relatório

Este relatório está organizado como segue: O capítulo 2 apresenta em detalhes as redes subaquáticas, descrevendo as características principais que as distinguem das terrestres. O capítulo 3 apresenta alguns protocolos que antecederam o VBF, assim como as possíveis versões modificadas que podem ser utilizadas e desenvolvidas nas simulações. Em seguida, o capítulo 4 apresenta o protocolo proposto pelo projeto, fazendo análises de seu funcionamento e comparações entre ele e o VBF original. O capítulo 5 faz uma breve apresentação da ferramenta utilizada para realização das simulações. O capítulo 6 apresenta as condições de simulação, os resultados e as devidas análises. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros, propostos para melhorar ainda mais o monitoramento em redes subaquáticas e o protocolo desenvolvido.

Capítulo 2

Redes Subaquáticas

Neste capítulo serão apresentadas as características inerentes ao meio aquático.

2.1 Diferenças Entre Redes Terrestres e Subaquáticas

De acordo com [4], uma rede subaquática de sensores móveis possui duas diferenças fundamentais quando comparada com uma rede terrestre.

- Modo de Comunicação

Sinais de radiofrequência não se propagam em longas distâncias em meios subaquáticos devido às características de temperatura, pressão e salinidade presentes nestes meios. Assim, se faz necessário o uso de sinais acústicos para as comunicações. No entanto, estes sinais, quando comparados com sinais *wireless* de radiofrequência, possuem alta latência e baixa largura de banda para grandes distâncias, como mostra a tabela 2.1.

Devido a estas dinâmicas distintas de redes, protocolos de comunicação utilizados em redes terrestres podem não ser apropriados para redes de sensores subaquáticas. Especificamente, a alta latência e baixa largura de banda resultam em significativos atrasos ponto-a-ponto, o que traz grandes desafios para transferência confiável de dados e

Alcance	Distância (km)	Largura de banda (kHz)
Muito longo	1000	< 1
Longo	10–100	2–5
Médio	1–10	≈ 10
Curto	0.1–1	20–50
Muito curto	<0.1	>100

Tabela 2.1: Tabela de alcance de sinais acústicos e largura de banda. Fonte: [1]

controle de congestionamento. Além disso, existe também o problema de controle de múltiplo acesso, onde os protocolos tradicionais podem não funcionar corretamente em esquemas de redes subaquáticas.

De acordo com [1], existem cinco fatores principais que contribuem para a alta latência presente em redes subaquáticas.

1. Ruído

Existem várias fontes de ruído que podem estar presentes em um meio aquático. Estas fontes podem ser tanto naturais, no caso de marés, tempestades, ou até mesmo o movimento natural das águas, como artificiais, no caso de máquinas ou de veículos de transporte, especialmente em locais onde há tráfego pesado destes.

2. Perda de Caminho

A conversão da energia do sinal acústico em calor é a principal causa de perda de caminho deste. No entanto, reverberações causadas pelas ondas na superfície ou até mesmo no fundo também podem causar perda de caminho no sinal acústico. Isso faz com que, à medida em que se desloca, a onda acústica vá perdendo sua intensidade, como mostra a figura 2.1

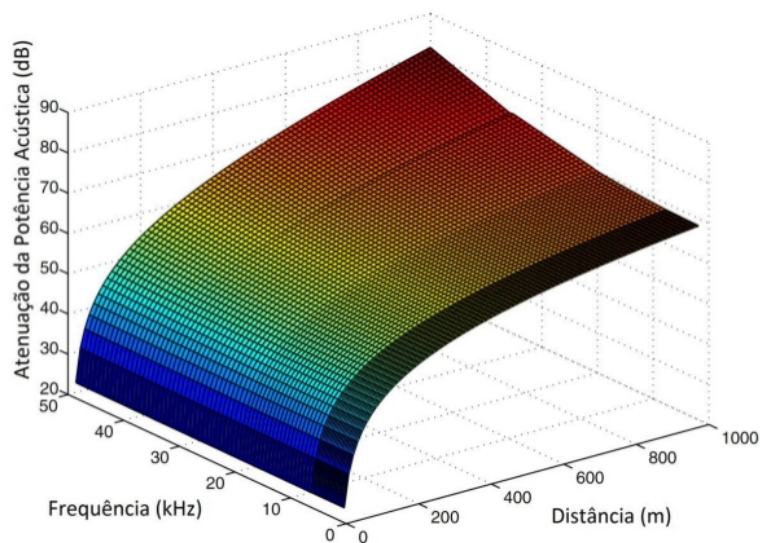


Figura 2.1: Perda de caminho em canal acústico subaquático. Fonte: [1]

3. Perda por Multicaminhos

A propagação do sinal acústico por multicaminhos causa degradação do sinal de comunicação pois gera ISI (*Inter Symbol Interference*), ou seja, um sinal enviado chega por diversos ângulos diferentes ao receptor. Por regra geral, uma transmissão horizontal terá dispersão significativa, enquanto a dispersão em transmissões verticais é relativamente negligível. Isso ocorre devido às características físicas das ondas subaquáticas, que serão explicitadas em detalhes na próxima seção.

4. Alta Variância do Atraso de Propagação

Além do alto atraso de propagação dado anteriormente, temos também o problema da alta variância deste. A maioria dos protocolos de roteamento desenvolvidos requerem estimativas relativamente precisas de RTT (*Round-Trip Time*). Estudos que visam estimar estes valores, como por exemplo o [16], só começaram a surgir recentemente.

5. Espalhamento Doppler

Por fim, temos o espalhamento Doppler, que consiste em uma medida da mudança no espectro causada pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor. Isso causa perturbações, bastante significativas em meios subaquáticos, que resultam em uma degradação no sinal, como mostra a figura 2.2.

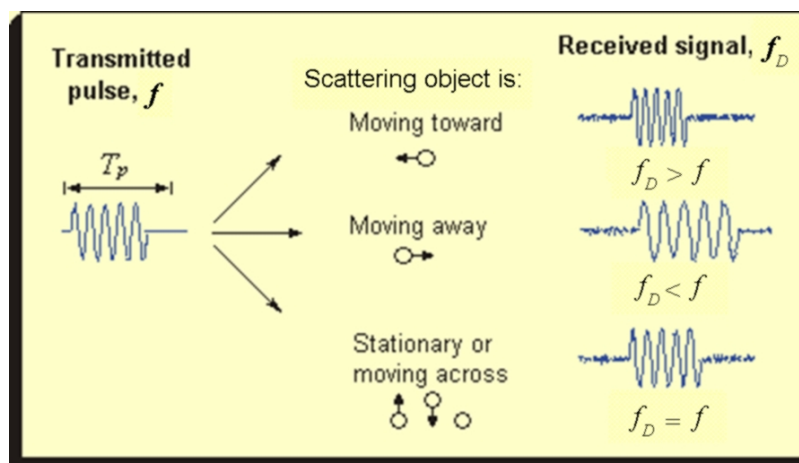


Figura 2.2: Espalhamento Doppler. Fonte: [2]

- Mobilidade dos Nós

A grande maioria das redes de sensores terrestres é estática. Já nas redes subaquáticas, a grande maioria dos nós é móvel, com exceção de alguns possíveis nós ancorados, devido à velocidade de correntezas aquáticas. Uma observação empírica mostra que objetos debaixo d'água podem se mover a uma velocidade de 2-3 nós (3-6 km/h) em uma rede subaquática típica [1]. Assim, é necessário levar este aspecto em consideração quando se propõe um protocolo de roteamento para estes tipos de rede.

2.2 Características Físicas das Ondas Subaquáticas

Uma onda sonora se propagando em um meio subaquático consiste em compressões e rarefações alternadas da água. Essas vibrações são então detectadas por um receptor em forma de variações de pressão. A velocidade de propagação média de ondas acústicas no canal submarino é de 1.500 m/s, o que é muito inferior a velocidade de 299.792.458 m/s das ondas eletromagnéticas no canal de rádio [1].

O principal modo de absorção de ondas sonoras é a elevada viscosidade da água, ou seja, sua resistência a alterações provocadas por fatores externos. Esta absorção aumenta

na medida em que aumenta a frequência da onda, de forma semelhante ao que ocorre em sinais terrestres de radiofrequência, porém com maior intensidade. Isso limita severamente a quantidade de dados que podem ser enviados em um canal, visto que esta é proporcional à frequência da onda e que ondas com frequências maiores que 1MHz são rapidamente absorvidas em um meio subaquático.

Por fim, temos a dispersão, que ocorre devido ao deslocamento do ponto de reflexão causado pelo vento na superfície a qual uma determinada onda é submetida e que depende da direção desta. Uma onda viajando verticalmente possuirá dispersão menor do que uma onda viajando horizontalmente [17]. A figura 2.3 relaciona alcance, profundidade e perdas de transmissão devido a essas características físicas de ondas acústicas subaquáticas.

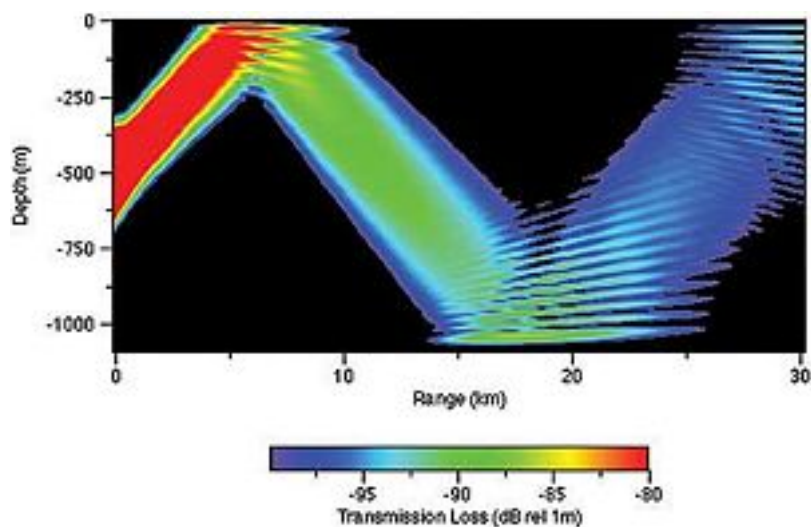


Figura 2.3: Relação entre alcance, profundidade e perdas de transmissão em redes acústicas subaquáticas. Fonte: Google Imagens.

2.3 Largura de Banda e Capacidade do Canal

Como foi mencionado anteriormente, as redes subaquáticas possuem banda significativamente menor do que as redes terrestres. Isso se traduz em baixas velocidades de transmissão, na ordem de poucos kbps.

Em [3], realiza-se um estudo de capacidade de um enlace acústico. Para isso, foram examinados canais que possuem três perfis de velocidade de som distintos. Os perfis de velocidade do som utilizados no cálculo são mostrados na figura 2.4. O primeiro perfil apresenta uma camada de ar quente logo acima da superfície da água, o que faz com que a velocidade do som seja alta próximo à superfície. Logo abaixo dessa camada se encontra uma região chamada de termoclina que apresenta uma variação brusca de temperatura. Esta característica peculiar faz com que a velocidade do som diminua drasticamente nessa região. O segundo perfil apresenta velocidade do som decrescente com a profundidade, mas sem apresentar variações abruptas como no primeiro perfil. O terceiro apresenta velocidade do

som aumentando com a profundidade. As diferenças entre os perfis são resultantes das propriedades físicas e químicas tais como salinidade, temperatura e densidade do oceano onde estes perfis foram medidos. Os perfis foram medidos no ano de 2010, no mês de setembro de no Mar Mediterrâneo, em junho, na Baía de Griffin perto das ilhas de San Juan, e em fevereiro no Mar de Bering, respectivamente. [1]

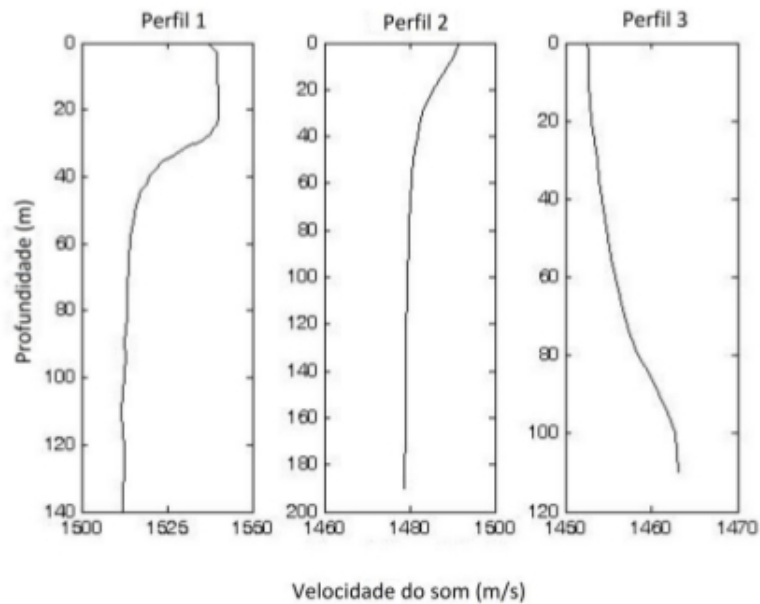


Figura 2.4: Perfis de Velocidade do Som. Adaptado de [3]

As figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 demonstram os resultados dos cálculos de capacidade de canal. Para o experimento, foram utilizados dois tipos de areia presentes no fundo dos oceanos: uma com grãos de médio diâmetro e outra de argila siltosa. Além disso, foram consideradas velocidades do vento de 2,5 e 10 m/s.

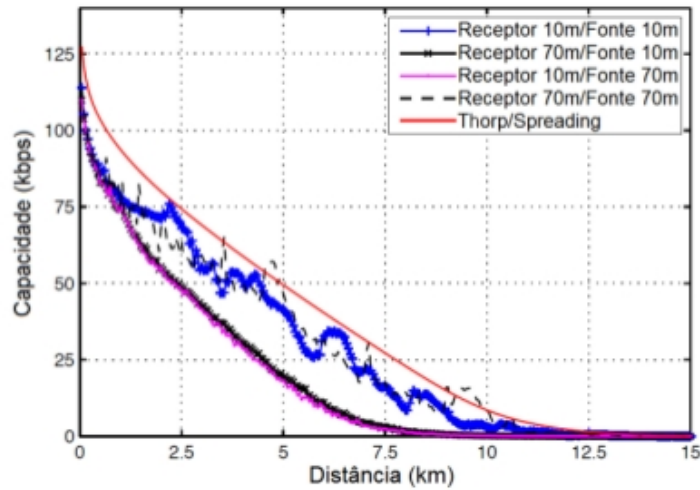


Figura 2.5: Capacidade calculada para o perfil 1 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de areia de grãos de médio diâmetro e com velocidade do vento de 2,5 m/s. Adaptado de [3]

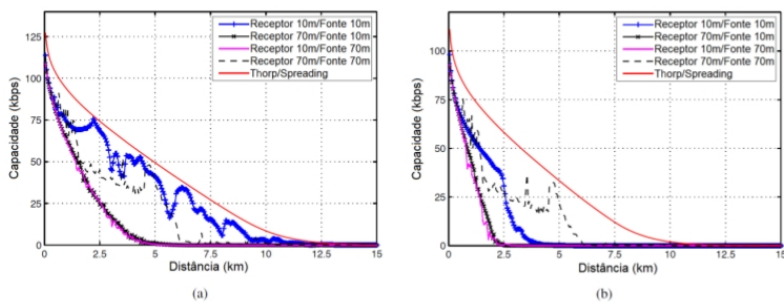


Figura 2.6: Capacidade para o perfil 1 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]

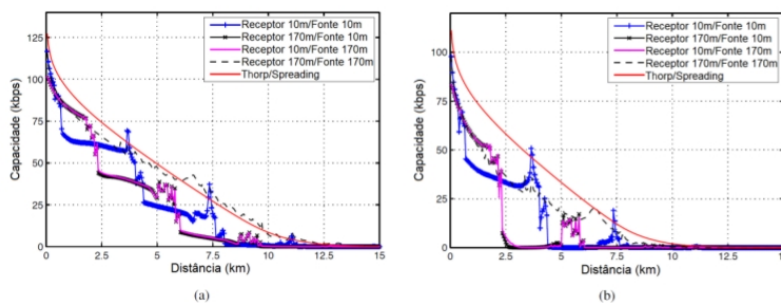


Figura 2.7: Capacidade para o perfil 2 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]

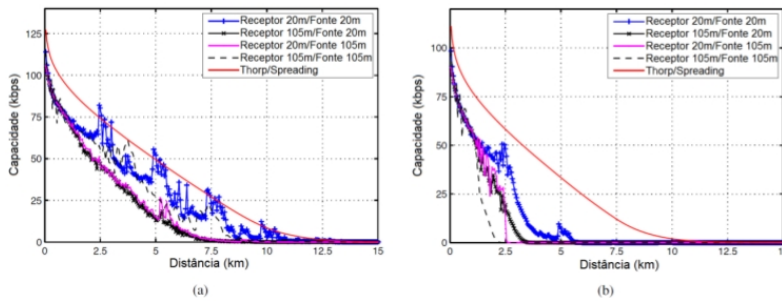


Figura 2.8: Capacidade para o perfil 3 da Figura 2 considerando um terreno submarino constituído de argila do tipo siltosa e com velocidade do vento de 2,5 m/s (a) e 10 m/s (b). Adaptado de [3]

2.4 Modelo de Canal

Um modelo de canal é uma forma de representação matemática da perda de potência de sinal para que se possa estimar a força com que o sinal chega no receptor. Esta força é representada pela SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), que expressa a razão entre a potência do sinal recebido e o ruído que o cerca.

Para redes móveis subaquáticas, modelagem é uma tarefa extremamente complexa, devido aos diversos fatores inerentes ao meio e que influenciam na perda de potência do sinal. Assim, devemos fazer um *tradeoff* entre precisão do modelo e complexidade computacional.

Para este projeto, utilizou-se o modelo BELLHOP [1]. Desenvolvido originalmente no *Naval Ocean Systems Center*, aperfeiçoado no *Naval Research Laboratory* e eventualmente utilizado em várias organizações mundo afora. O modelo foi desenvolvido por considerar a propagação dos raios acústicos em duas dimensões, tendo como saída as coordenadas cartesianas do raio acústico, baseado no tempo de viagem, amplitude, pressão acústica e na perda de caminho. [18].

Outro modelo considerado foi o Thorp. No entanto, o modelo de propagação Thorp caracteriza a onda acústica apenas pela sua perda de caminho e não considera, portanto, os perfis de superfície e fundo que exercem considerável impacto através de perda de energia e dispersão de ondas acústicas; nem tão pouco considera as variações de pressão e de velocidade do som como são considerados no modelo Bellhop. [1]

O modelo BELLHOP lê informações de propagação de um banco de dados. Um arquivo de configuração descrevendo o local, e a resolução das informações arquivadas devem ser fornecidos através de atributos. Ele está disponível no sítio da *Ocean Acoustic Library* [19] e também está disponível no simulador Aqua-Sim, que será utilizado neste trabalho.

2.5 Topologia de Rede Subaquática Móvel

Em geral, as missões de observação submarinas são extremamente caras, devido principalmente à complexidade e custos das operações de lançamento dos equipamentos para coleta de dados no oceano. Por isso, é de extrema importância garantir confiabilidade da rede implantada de forma a prevenir o fracasso dessas missões. A concepção da topologia da rede submarina torna-se crucial de modo a evitar pontos únicos de falha e gargalos na comunicação que possam comprometer o funcionamento global da rede. Além disso, a topologia deve ser projetada de forma cuidadosa, pois ela influencia diretamente no consumo de energia, na capacidade e na confiabilidade de uma rede. [1]

Existem quatro tipos mais comuns de topologia para redes subaquáticas. Elas podem ser 2D ou 3D, assim como móveis ou estáticas. Redes 2D consideram transmissões apenas horizontais, verticais e diagonais em um plano bi-dimensional, enquanto as 3D utilizam volumes tri-dimensionais para transmissões entre nós. Redes estáticas são aquelas em que os nós ficam ancorados à superfície e, por consequência, não têm suas posições alteradas ao longo do funcionamento da rede. Redes móveis consideram que os nós ficam "soltos" no meio e, com isso, estão sujeitos ao movimento natural das águas, tendo suas posições alteradas ao longo do tempo.

Para fins deste projeto, utilizou-se a topologia 2D Móvel, que é a mais aceita e utilizada em projetos deste tipo. A figura 2.9 ilustra esta topologia. Nela, podemos perceber os nós divididos em três grupos de acordo com suas profundidades. No topo, temos os *sinks*, que são os nós finais e que são mais robustos. Com isso, um pacote é considerado como "entregue" quando atinge algum destes nós. O comportamento dos nós nos grupos inferiores varia de acordo com o protocolo utilizado.

Então, com estas características do meio aquático em mente, enunciaremos no próximo capítulo os diversos protocolos de roteamento propostos e como contribuem para ajudar a resolver os desafios inerentes as redes subaquáticas.

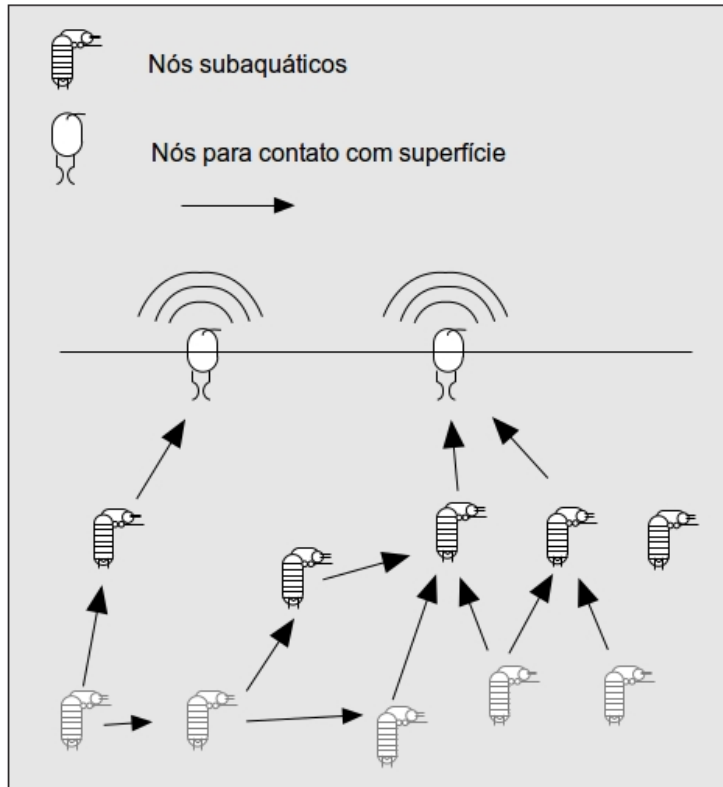


Figura 2.9: Diagrama de topologia 2D. Adaptado de [4]

Capítulo 3

Protocolos de Roteamento

No capítulo anterior, foram apresentados os desafios que devem ser vencidos em qualquer solução para comunicação em redes subaquáticas. Neste capítulo, serão apresentados vários protocolos de roteamento e suas contribuições nesta área. .

Primeiramente, serão enunciadas as características mais marcantes de alguns dos vários protocolos projetados, mantendo em vista que, conforme capítulo 1, por causa do modo *broadcast*, existem vários desafios e necessidades presentes, sendo que cada protocolo busca otimizar algumas destas relações. Por fim, será explicitado o motivo pela escolha de uma extensão do protocolo VBF.

3.1 VBF - *Vector-Based Forwarding*

A mobilidade dos nós em uma rede subaquática causa a constante mudança na topologia da rede, o que traz a necessidade de frequente manutenção e recuperação de rotas, algo bem difícil de ser alcançado, especialmente em topologias 3D.

Criado em 2006, o VBF [15] foi o pioneiro em protocolos de roteamento para redes subaquáticas. Ele se utiliza da posição de cada nó para resolver essa questão de manutenção e recuperação de rotas, uma vez que uma rede, após sua convergência, tende a se utilizar sempre dos mesmo nós para chegar a superfície, deixando outros nós ociosos.

Os pacotes são enviados por vários caminhos redundantes entre a origem e o destino, amenizando o problema de perdas de pacote e falhas de nó. O protocolo parte do pressuposto que cada nó sabe sua localização e que cada pacote contém as informações de localização de todos os nós envolvidos em sua transmissão. Um cabeçalho com os campos *FOWARDER*, *SOURCE* e *TARGET* é usado pelo protocolo. Logo, ao criar o pacote, o *source* insere os dados de sua localização nos campos *FOWARDER* e *SOURCE* e os dados da localização do *sink* no campo *TARGET*, criando-se um vetor de roteamento virtual, usando a posição do *source* e a posição do *sink*. Desta forma, é estabelecida uma distância máxima deste vetor (W), criando-se um túnel virtual para o roteamento da mensagem em que somente os

nós pertencentes ao túnel participam da transmissão. O VBF também usa um *desirableness factor*, dado como α . Esse fator de prioridade será utilizado posteriormente para o protocolo proposto nesse projeto. Este fator é calculado sempre que um pacote é recebido por um nó dentro do túnel, de acordo com a equação 3.1 abaixo:

$$\alpha = p/W + (R - d * \cos\theta)/R \quad (3.1)$$

onde p é a distância do nó ao vetor, W é o raio do túnel virtual, R é a distância máxima de transmissão, d é a distância entre o *source* e o nó receptor e θ é o ângulo de recepção do sinal.

Observando a equação, é possível notar que, para qualquer nó distante até W metros do vetor, α estará definido entre 0 e 3. Para um nó, um fator α grande indica que o receptor está muito próximo ao *source* ou está muito longe do vetor. Por outro lado, se o α for pequeno, isso indica que ele é um bom candidato ao *forwarding*.

Em 2010, foi proposta uma extensão ao VBF, que passa a utilizar um algoritmo de auto adaptação baseado no valor de α . Este valor é calculado de acordo com a equação 3.2 abaixo, onde o tempo de adaptação é uma função da velocidade de propagação de um sinal acústico na água (v_0), distância entre nós, assim como o α explicitado acima. Isso nos permite reduzir o tráfego na rede e gerenciar topologias dinâmicas de maneira mais fácil.

$$T_{adaptation} = \sqrt{\alpha} * T_{delay} + (R - d)/v_0 \quad (3.2)$$

Durante o tempo de adaptação, caso o nó receba pacotes duplicados de N outros nós, então este nó computará o seu α relativo aos outros nós e ao transmissor original. Se o $\min(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) < \alpha_c/2^n$, onde α_c é um valor predefinido de α , então o nó enviará o pacote. Caso contrário, o pacote será descartado. Essencialmente, o algoritmo acima dá maior prioridade ao nó que possui o menor α , de forma que a probabilidade de um nó com maior α enviar o pacote é diminuída exponencialmente para cada cópia recebida do pacote. [11]

No entanto, o VBF carrega uma série de problemas. O primeiro e mais importante é a dificuldade de um nó em obter sua localização, uma vez que sinais de GPS (*Global Positioning System*) não são realizáveis em um meio subaquático. Cada nó, caso devidamente equipado, pode medir o ângulo de recepção dos sinais acústicos e suas intensidades, para obtenção de sua posição relativa, suavizando, assim, a dificuldade relacionada à estimativa do posicionamento. Outro desafio é que a criação de vetores é menos efetiva em redes pouco densas, uma vez que, em caso de ausência de nós dentro do vetor, nenhum nó próximo poderá prosseguir com o encaminhamento dos pacotes e, como consequência, haverá perda de pacotes e necessidade de retransmissão. Por fim, os vetores podem fazer com que alguns nós sejam utilizados frequentemente, causando maior consumo de bateria nestes.

Para tentar resolver estes problemas, foi proposta em 2007 uma versão melhorada do VBR chamada HH-VBF (*Hop-by-Hop Vector-Based Forwarding*) [15]. Ela se utiliza do

mesmo conceito de vetores que o VBF mas, ao invés de usar somente um vetor da origem até o destino, cada nó calcula um novo vetor até o destino, aspirando entrega eficiente do pacote ao próximo nó. Assim, há uma diminuição do número de pacotes perdidos em redes esparsas. No entanto, os cálculos realizados causam um aumento significativo de sobrecarga nos nós, necessitando nós com maior poder de processamento e, portanto, aumentando os custos de sua implementação. Outrossim, soma-se o fato de o protocolo multiplicar os túneis de comunicação até o destino, envolvendo mais nós no processo e, conseqüentemente, gastando mais energia.

3.2 FBR - *Focused Beam Routing*

A necessidade da informação da localização de todos os nós causa um grande número de *broadcasts* que podem congestionar a rede, reduzindo o *throughput* geral. Para reduzir esse *flooding*, foi proposto em 2008 o FBR para redes acústicas [5].

O FBR, assim como o VBF, parte do pressuposto que cada nó conhece sua posição de localização e da localização do nó de destino, sem necessidade de saber a localização de nós intermediários. Com essas informações, o FBR consegue estabelecer rotas dinamicamente enquanto os dados trafegam pela rede, com decisões sobre o próximo passo tomadas a cada nó da rota.

A figura 3.1 explica o funcionamento do método de transmissão utilizado no FBR, assim como os espaços geométricos em forma de cone utilizados na criação de grupos *multicast*. O nó A tem o pacote que deve ser enviado até o destino D. Para isso, ele envia um pacote RTS (*Request To Send*), que contém as localizações de A e D. Inicialmente, esse *multicast* será feito com a menor potência de transmissão possível, que será aumentada caso nenhum nó seja encontrado. Para auxiliar nisso, são criados um número finito de níveis de potência. Após feito esse *multicast*, os nós que receberem o pacote irão calcular suas localizações relativas à origem. Caso o nó perceba que está dentro do cone de transmissão, ele irá responder ao RTS (*Request To Send*) [5].

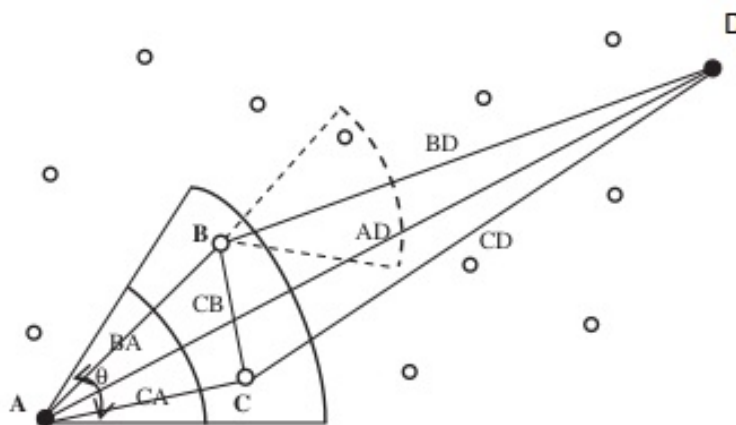


Figura 3.1: Funcionamento do FBR. Fonte: [5]

O FBR traz alguns problemas. Primeiramente, temos o problema do cálculo de localização de nós, também presente no VBF. Além disso, o FBR causa um grande consumo de energia em redes esparsas devido ao constante uso dos maiores níveis de potência. Por fim, o envio de pacotes RTS causa uma sobrecarga de pacotes de controle na rede.

3.3 REBAR - *Reliable and Energy Balanced Routing Algorithm*

Como já mencionamos diversas vezes ao longo deste documento, o movimento natural das águas deixam as redes nesse meio bastante dinâmicas. Em 2008, foi proposto o REBAR, que trata esse movimento de maneira positiva [6]. De acordo com os autores, esse movimento pode ajudar a balancear o consumo de energia na rede, uma vez que os nós se alternam em torno do nó de destino.

O REBAR funciona de maneira semelhante ao VBF e ao FBR, uma vez que requer que os nós conheçam suas localizações e a do destino. No entanto, os autores desenvolveram um esquema adaptativo onde os nós fazem *broadcast* em pequenos domínios selecionados de acordo com informações de localização geográfica. Estes domínios tem seus tamanhos definidos pela distância entre os nós e o destino: Nós mais distantes do destino têm domínios menores para que eles gastem menos energia devido a uma participação menor no processo de roteamento. Analogamente, nós mais distantes do destino possuem domínios maiores. Esse esquema está ilustrado na figura 3.2.

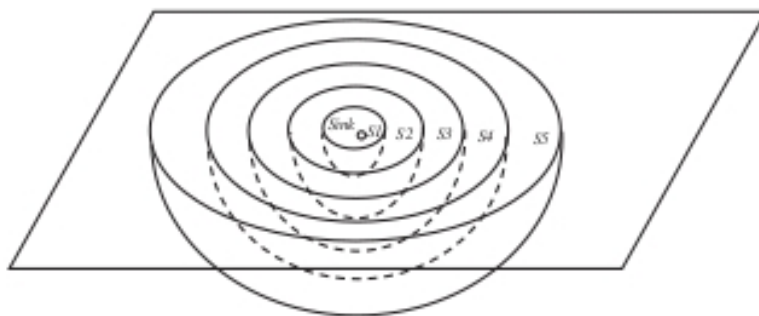


Figura 3.2: Funcionamento do REBAR. Fonte: [6]

Por funcionar como o VBF e o FBR, o REBAR também carrega consigo o problema do cálculo de localização geográfica. Além disso, simulações feitas com o protocolo não levam em consideração movimentos longos dos nós, que poderiam fazer com que a mobilidade destes deixasse de ser um fator positivo, uma vez que causaria zonas de *void* na rede [6]. O estudo também não leva em consideração que, na prática, os movimentos dos nós são em grande parte horizontais, com apenas pequenas flutuações verticais.

3.4 ICRP - *Information-Carrying Routing Protocol*

A maioria dos protocolos de roteamento propostos até então envia pacotes de controle e de dados de maneira separada. Em 2007, foi proposto o ICRP, um protocolo de tempo real com eficiência de energia e escalabilidade aonde as informações de controle são enviadas juntamente com os dados, no mesmo pacote [20]. A maior vantagem do ICRP em relação aos protocolos citados anteriormente é a ausência da necessidade de localização dos nós.

O processo de criação de rotas se inicia no nó de origem. Primeiramente, ele verifica se já existe uma rota utilizada anteriormente. Em caso negativo, o pacote de dados contendo informações de controle será enviado por *broadcast* aos nós até chegar ao destino. Com essas informações, o destino pode utilizar este mesmo caminho inverso para enviar um pacote de confirmação de recebimento. Além disso, cada rota possui uma prioridade diferente, chamada de tempo de vida da rota e que denota quanto tempo a rota é válida e pode ser utilizada.

O ICRP possui dois problemas principais: primeiramente, o alto número de *broadcasts* necessários para estabelecimento de rota implica em um grande consumo de energia e largura de banda e, por fim, o cálculo dos tempos de vida de cada rota pode ser de difícil realização devido ao constante movimento dos nós.

3.5 DBR - *Depth-Based Routing*

O ICRP foi uma primeira tentativa de resolver o problema da necessidade de localização dos nós em um meio subaquático. No entanto, o alto consumo de energia o torna pouco utilizável.

Com isso, foi introduzido em 2008 o DBR, que se utiliza de informação de profundidade de cada nó, essa facilmente observada com sensores de profundidade de baixo custo. Em sua arquitetura, vários nós de destino são colocados na superfície da água e um pacote é considerado enviado quando alcança qualquer um destes nós.

Quando um nó possui um pacote para enviar, ele irá calcular sua atual profundidade relativa à superfície e colocará o valor obtido em um campo do pacote, que será enviado via *broadcast*. O nó que receber esse pacote irá comparar a sua profundidade com a presente no pacote e irá reenviar o pacote, também em *broadcast*, caso o nó se encontre mais próximo da superfície. Caso contrário, o pacote será simplesmente descartado. O funcionamento do DBR está ilustrado na figura 3.3

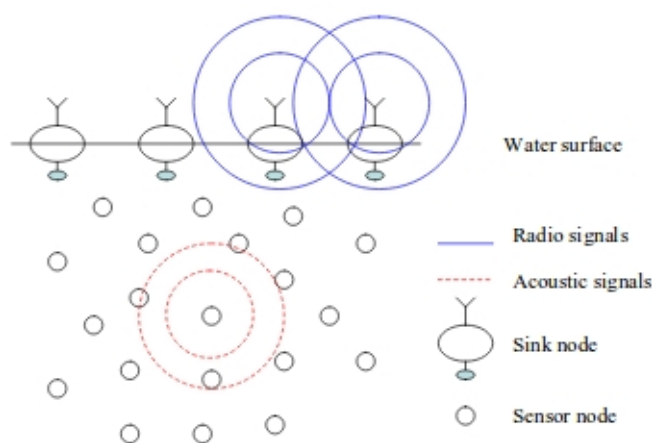


Figura 3.3: Funcionamento do DBR. Fonte: [7]

O DBR possui dois problemas principais:

- O primeiro consiste no alto consumo de energia em razão de todos estes *broadcasts* que são enviados. Para isso, foi proposto em 2012 o EEDBR (*Energy Efficient Depth-Based Routing*), que visa resolver este problema com a utilização de duas fases, de descoberta e roteamento, para aumentar a autonomia da bateria de cada nó da rede. [8]
- O segundo problema ocorre quando ocorrem as *void zones* em redes esparsas. O DBR, por funcionar exclusivamente em modo *greedy*, onde pacotes só são enviados para os níveis mais altos, não consegue se adaptar a estas zonas. Em 2015, foram feitas duas modificações do DBR que visam resolver este problema: *Adaptive Mobility of Courier Nodes in Threshold-Optimized Depth-Based Routing* (AMCTD) e *Depth-Based Multihop Routing* (DBMR) [21].

A primeira alternativa lança mão de contínuas atualizações em sua tabela de roteamento a medida em que alguns nós vão ficando sem energia para calcular novos pesos de transmissão para cada nó. Assim garantindo que os nós restantes se movam para cobrir os espaços deixados pelos nós que foram retirados da rede [21].

O segundo protocolo se utiliza da propriedade de *multihop*, ou seja, diminui o alcance de transmissão de cada nó, diminuindo por consequência a energia necessária para se realizar uma transmissão e aumentando a vida útil da bateria de cada nó [21].

3.6 EEDBR - *Energy Efficient Depth-Based Routing*

Conforme dito anteriormente, o protocolo EEDBR se utiliza de duas fases, de descoberta e de roteamento, para aumentar a autonomia da bateria de cada nó da rede. Na fase de descoberta, os nós compartilham informações de profundidade e energia residual com seus nós vizinhos. Na fase de roteamento, os pacotes são transmitidos com a intenção de chegar

ao *sink*. Isso ocorre pois os *sinks* possuem maior poder de processamento e também podem se comunicar com a base através de outras arquiteturas de rede que possuem maior taxa de entrega e confiabilidade do que as redes acústicas. Com isso, um pacote pode ser considerado "entregue" quando chega ao nó *sink*. [8]

3.6.1 A Fase de Descoberta

Durante esta fase, os nós compartilham informações entre si com o intuito de permitir aos nós sensores a seleção dos melhores candidatos para continuar a transmissão durante a fase de transmissão. Quando um nó possui dados a enviar, as informações coletadas são utilizadas nesta seleção.

As informações são compartilhadas por meio de um pacote *Hello*, demonstrado na figura 3.4, com um identificador específico ao pacote, à profundidade e à energia residual. Os nós mantêm apenas os pacotes pertinentes aos nós com menor profundidade, visto que neste protocolo os dados são transmitidos somente em direção ao nó *sink*. [8]

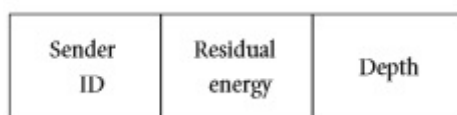


Figura 3.4: Pacote *Hello*. Fonte: [8]

Como mencionamos anteriormente, o movimento vertical dos nós é negligível, fazendo com que não haja necessidade de atualizar com frequência as informações relativas de profundidade dos nós. [17]. Assim, é necessário atualizar apenas os dados de energia residual. Para isso, cada nó checa e atualiza estes dados em intervalos frequentes.

3.6.2 A Fase de Roteamento

Esta fase é a principal adição do EEDBR. Nela, os dados são transmitidos em direção ao *sink* de acordo com a profundidade e energia residual dos nós vizinhos, com prioridade àqueles que possuem maiores valores para ambos os campos, utilizando a equação 3.3. Estes nós são identificados com base em seus números de identificação ou ID.

Ao receber um pacote de dados, os nós manterão o pacote por um tempo antes de sua transmissão. Este tempo é gerado a partir da equação:

$$T = (1 - (currentenergy/initialenergy)) * maxholdingtime + p \quad (3.3)$$

Onde *current energy* é a energia restante no nó, *initial energy* é a energia inicial do nó, *maxholdingtime* é um parâmetro do sistema que indica o tempo máximo que um pacote ficará armazenado em *buffer* e *p* é um valor de prioridade, utilizado para prevenir que vários nós

tentem transmitir ao mesmo tempo, causando redundância e maior consumo de energia. Este valor de prioridade é computado aleatoriamente para garantir que mesmo nós com energia residual idênticas, como no caso (e) da figura 3.5 possam ter prioridades diferentes [8].

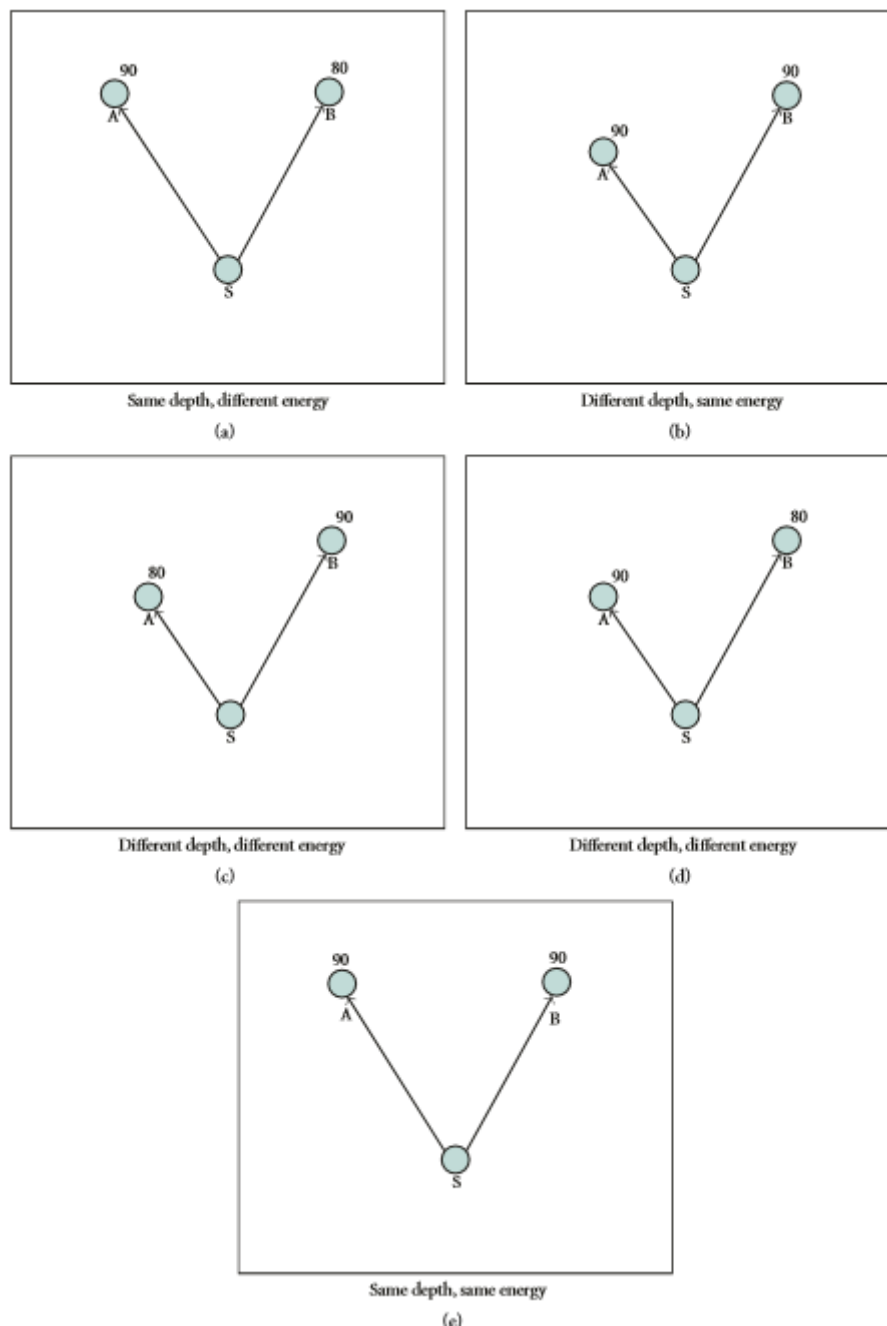


Figura 3.5: Casos possíveis durante transmissão. Fonte: [8]

Na figura, os valores indicam a profundidade enquanto S é a origem do pacote e A e B são os possíveis candidatos a transmissão.

Além disso, o EEDBR também implementa um algoritmo de supressão de pacotes baseado no tipo de aplicação. Ou seja, aplicações que demandam maior taxa de e/ou prioridade na entrega, como por exemplo aplicações militares, podem fazer com que o nó *sink* instrua os outros nós a gastar mais energia ao ignorar os valores de prioridade [8].

A imagem 3.6 resume o funcionamento do protocolo EEDBR.

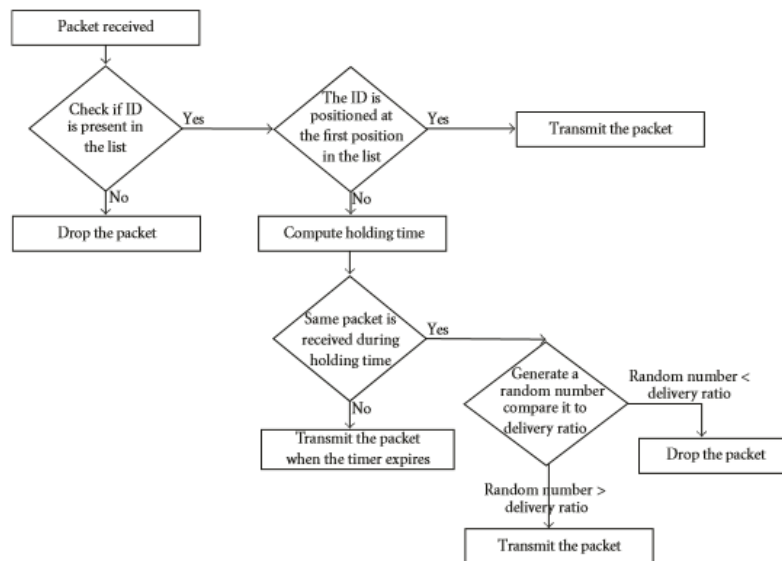


Figura 3.6: Fluxograma do funcionamento do EEDBR. Fonte: [8]

3.7 CL-VBF - *Cross-Layer Vector Based Forwarding*

Em 2016, foi introduzida uma nova proposta de verificação de energia residual como métrica do protocolo VBF. Com isso, ocorre um balanceamento no consumo de energia entre os nós, evitando o sobrecarregamento de uns e subutilização de outros. [9]

Esse balanceamento pode ser visto na figura 3.7.

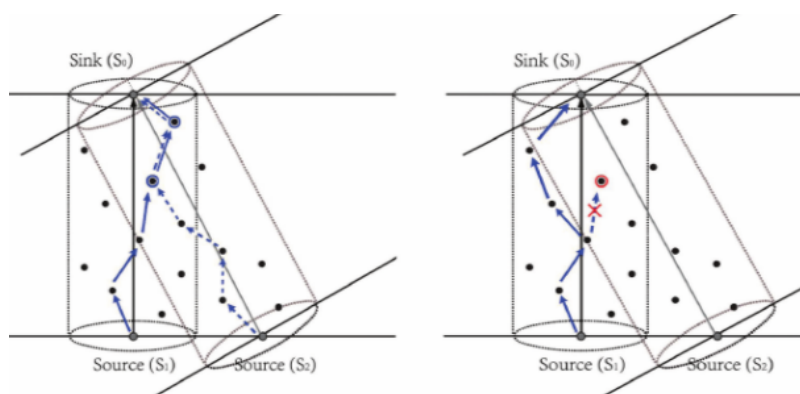


Figura 3.7: Imagem do funcionamento do CLVBF. Fonte: [9]

A figura 3.7 mostra, no lado esquerdo, a escolha de rota sem a informação de energia, fazendo com que o mesmo pacote trafegue por duas rotas diferentes, causando gasto desnecessário de energia, além da possibilidade de colisões. Já no lado direito, foi implementado o protocolo, adicionando a informação de energia residual e fazendo com que apenas uma rota fosse escolhida. A figura 3.8 reflete os ganhos de desempenho para o CL-VBF, em compa-

ração com o VBF puro e o HH-VBF. Em cima, temos a taxa de transmissões bem sucedidas, enquanto em baixo temos o número de nós com carga de bateria restantes na rede.

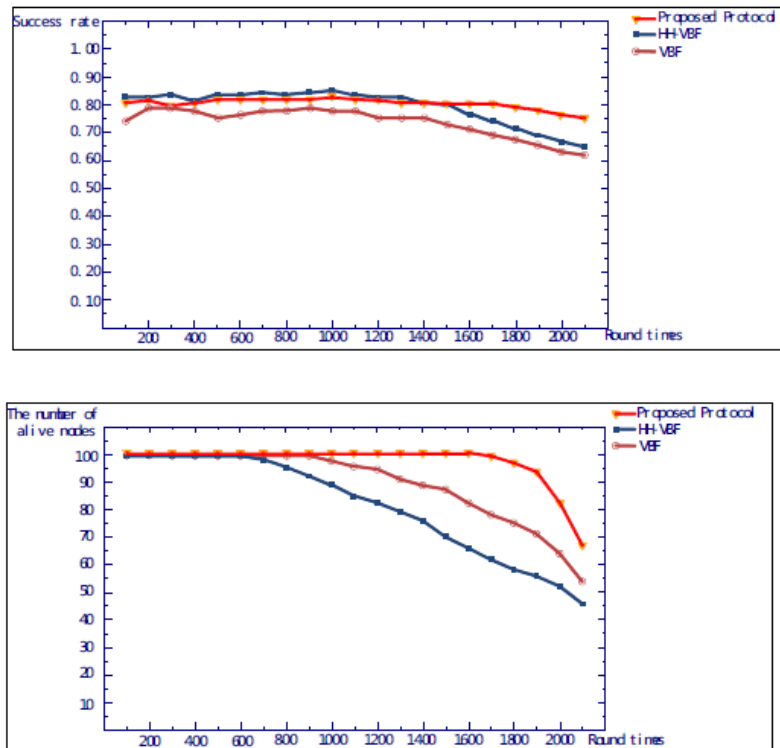


Figura 3.8: Comparações de desempenho entre VBF, HH-VBF e CL-VBF. Fonte: [9]

3.8 2Hop-AHH-VBF - *Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding*

Em 2017, foi proposta mais uma extensão ao HH-VBF, dessa vez com o intuito de minimizar ainda mais os efeitos das *void zones* quanto a proposta do VBF. Isso é feito a partir da coleta de informações de energia residual, como no CL-VBF, além da posição dos nós vizinhos para os próximos dois saltos na rede. A partir dessas informações, é calculado um *Holding Time*, fazendo com que o mesmo nó não seja escolhido para transmissão repetidamente, o que poderia levar a um *Void Hole* após o término da bateria deste nó.

Essa seleção de vizinhos é feita baseada em três parâmetros: primeiramente, o vizinho escolhido deve estar na maior distância possível do nó transmissor dentro do raio de transmissão do nó recipiente, ou seja, o mais próximo possível do *sink*. Em seguida, o número de vizinhos disponíveis ao possível nó receptor é avaliado. Finalmente, o AoA (*Angle of Arrival*) é calculado a partir de um vetor virtual para garantir a posição ótima, ou seja, o próximo nó escolhido para transmissão será o mais apropriado de acordo com as informações coletadas anteriormente [10]. Para a coleta destes parâmetros, são enviados *beacons* de vizinho no começo do processo de roteamento. Esses *beacons* tem a função de encontrar vizinhos

qualificados dentro do alcance de cada nó. [10]

3.9 QF-2hop-AHH-VBF - *Quality Forward Two Hop Adaptive Vector Based Forwarding*

Em conjunto com o 2Hop-AHH-VBF, também foi proposta uma maneira de calcular um *Holding Time* a partir dos vetores de rota para diminuir o número de transmissões ao fazer uma melhor escolha de vizinho para próximo salto, similarmente ao 2Hop-AHH-VBF. No entanto, o QF-AHH-VBF utiliza mais algumas informações para este cálculo, como o número de vizinhos em potencial, a distância entre o transmissor e o receptor do pacote e a distância do receptor para o vetor calculado anteriormente, que pode mudar devido ao movimento das águas [10]. A figura 3.9 nos dá a comparação de taxa de transmissões bem sucedidas do QF-AHH-VBF em comparação a alguns outros protocolos descritos anteriormente.

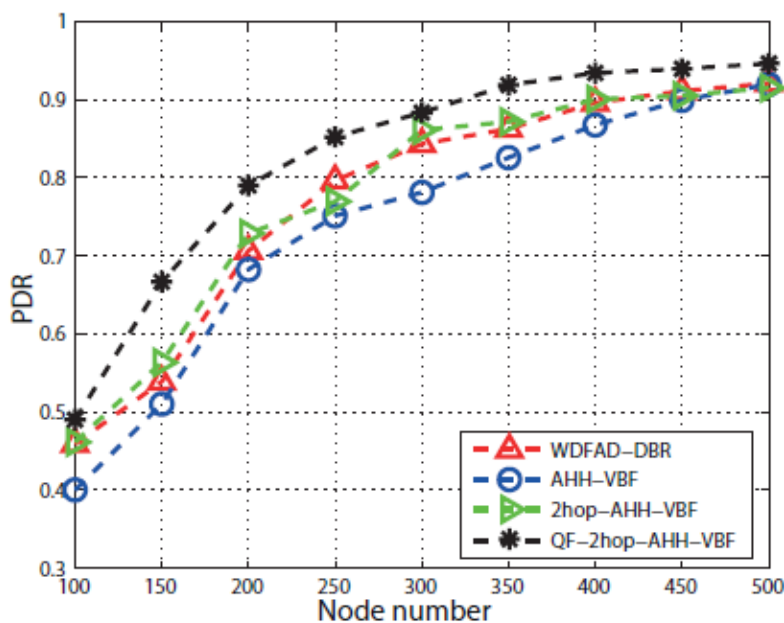


Figura 3.9: Comparações de desempenho (taxa de sucesso vs número de nós) para o QF-2hop-AHH-VBF. Fonte: [10]

A principal desvantagem do 2Hop-AHH-VBF e do QF-AHH-VBF é a introdução de muitos pacotes de controle, causando um maior número de transmissões sem aumento na taxa de entrega de dados. Além disso, esse *overhead* adicional também propicia um aumento no gasto de energia dos nós envolvidos, resultando numa diminuição do tempo de vida útil da rede.

Quando foi proposto, em 2006, o VBF não era muito prático devido à sua necessidade de localização dos nós em relação ao *sender*. Recentemente, o VBF tem voltado a tona, uma vez que a tecnologia de direcionamento necessária para realizar a localização está mais

acessível. Com isso, este projeto propõe uma extensão ao protocolo VBF, com o intuito de aumentar o tempo de vida útil da rede, diminuindo o gasto de energia entre os diversos nós que a compõem de maneira balanceada, tentando evitar também o surgimento das *void zones*, contribuindo assim para o aumento da confiabilidade quanto a entrega de pacotes. No próximo capítulo, será descrito o protocolo proposto.

Capítulo 4

Proposta do protocolo EBVBF - *Energy Balanced Vector Based Forwarding*

No capítulo anterior, fizemos um compilado dos protocolos de roteamento mais importantes para transmissão de dados em redes acústicas subaquáticas. Neste capítulo, serão explicitadas as mudanças e melhorias feitas para a obtenção do protocolo EBVBF.

Neste capítulo, propõe-se uma forma de melhorar ainda mais a eficiência de energia com uma escolha mais balanceada de vizinhos candidatos a transmissão, desfavorecendo a escolha dos nós que tenham menor energia interna remanescente para realização da tarefa de *forwarding*, causando um menor número de retransmissões e, por consequência, uma maior economia de bateria nos nós. Com a escolha devidamente balanceada entre candidatos a retransmissores, O EBVBF vislumbra um aumento no tempo de vida útil da rede, uma vez que será feito um balanceamento do consumo de energia de cada nó individualmente, diminuindo a necessidade de repetidos deslocamentos para resgate e/ou troca dos nós.

4.1 Funcionamento do EBVBF

Como já citado no capítulo anterior, o barateamento dos equipamentos e antenas necessários para aferir a localização dos nós subaquáticos evidenciou o VBF como um protocolo com boa relação de custo-benefício. Não afastando, ainda, o fato de o VBF ser um protocolo sem fase de controle e desenvolvido para a economia de energia. De acordo com os estudos publicados [11], o VBF apresenta menor taxa de sucesso de entrega em redes esparsas, sendo o HH-VBF proposto como solução. Todavia, o HH-VBF, para minimizar o efeito da baixa densidade de nós, permite mais multi-caminhos e retransmissões dos pacotes, gerando maior gasto de energia. Por conseguinte, objetivando a economia de energia, o EBVBF baseia-se no VBF.

O algoritmo de encaminhamento do EBVBF funciona similarmente ao VBF, utilizando-se do α (*desirableness factor*), do túnel virtual e das demais características abrangidas ante-

riormente, tal como na imagem 4.1.

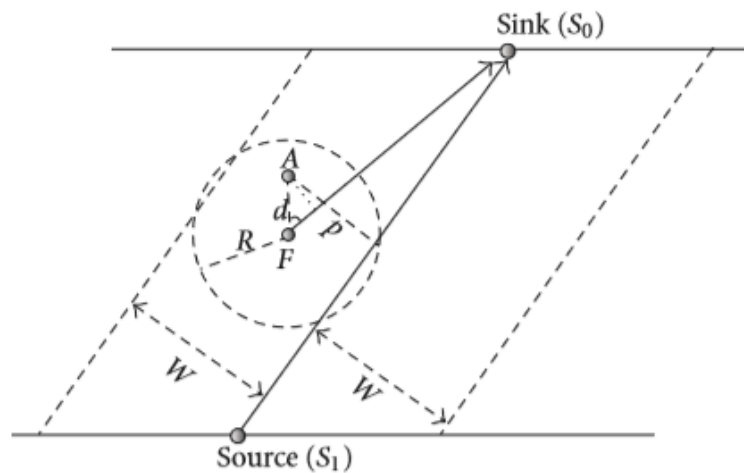


Figura 4.1: Funcionamento do VBF, fonte: [11]

A mudança mais significativa do EBVBF é a criação do parâmetro $\alpha E.O$ (*Energy Optimized*), baseado no α calculado pelo VBF e explicitado na equação 3.1, e onde, se a energia for menor do que um *threshold* predeterminado, $\alpha E.O = \alpha + x$, onde x varia entre 0 e 3. Caso contrário, $\alpha E.O = \alpha$. Como consequência disso, temos o estabelecimento de dois níveis de prioridade para os nós, baseados principalmente na energia remanescente em cada um. Especificamente, o primeiro nível funciona com um parâmetro $\alpha E.O = 0 - 3$, utilizado no cálculo do tempo de adaptação para cada transmissão, enquanto, o segundo nível apresenta $\alpha E.O = (0 + x) - (3 + x)$. No caso de $x = 3$, acontece um isolamento das filas, de forma que nenhum nó terá o mesmo $\alpha E.O$ que outro, evitando colisões e multi-caminhos. Entretanto, dependendo da topologia e de outros fatores da rede, um valor menor de x pode ser benéfico, mesmo adicionando nós em diferentes posições com mesmo $\alpha E.O$, haja vista o menor tempo de atraso adicionado à transmissão dos pacotes. Por meio das figuras 4.2, 4.3 e 4.4 é possível visualizar o funcionamento das filas. Além disso, a diferença de funcionamento entre o VBF e o EBVBF pode ser observada por meio das figuras, 4.5 e 4.6. Ressalta-se que a inclusão da energia do remanescente no cálculo do tempo de adaptação é a principal modificação em relação ao VBF.

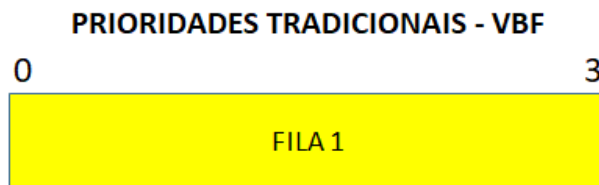


Figura 4.2: Funcionamento das filas no VBF.

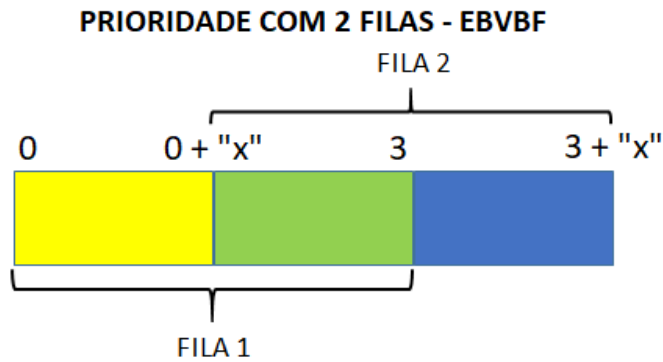


Figura 4.3: Funcionamento das filas no EBVBF.

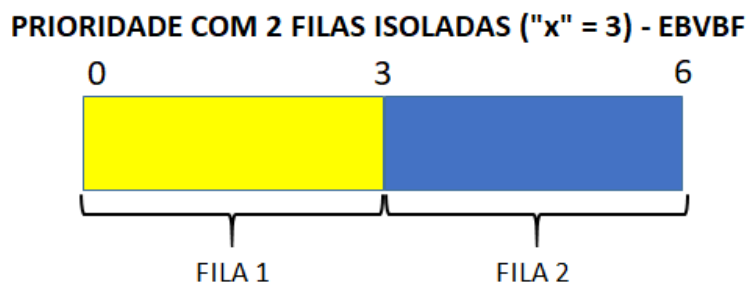


Figura 4.4: Funcionamento das filas no EBVBF com isolamento.

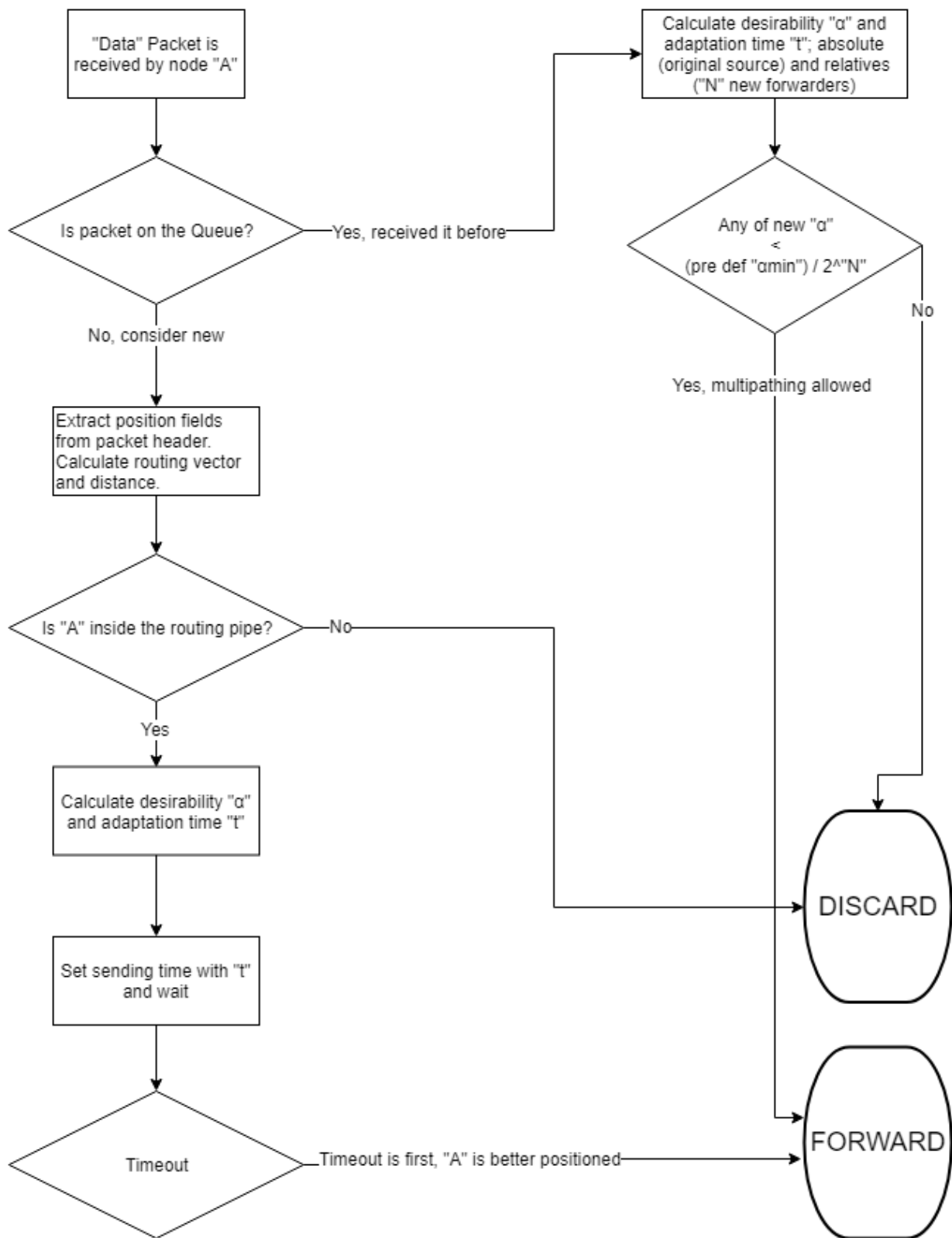


Figura 4.5: Fluxograma de Funcionamento do VBF.

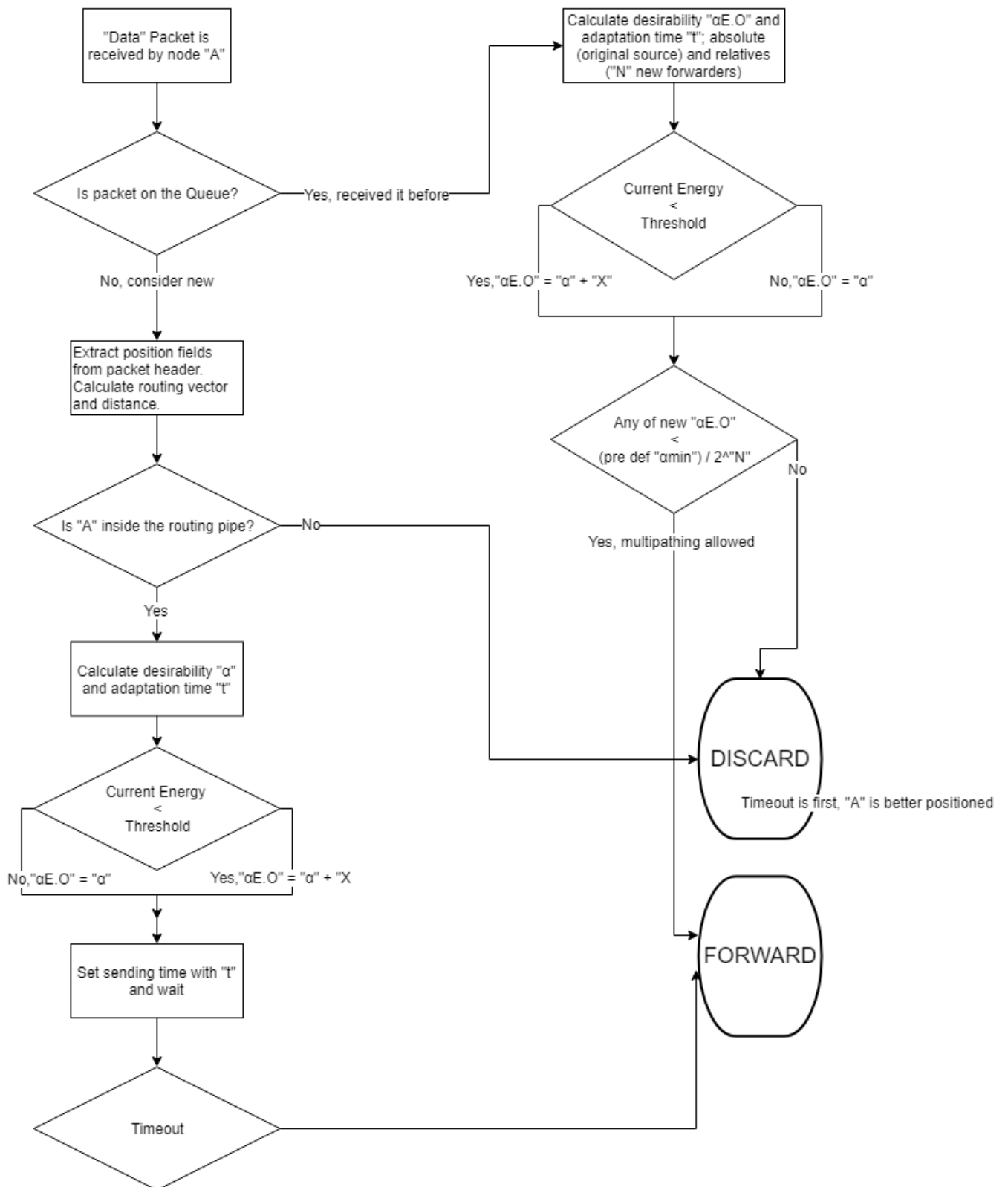


Figura 4.6: Fluxograma de Funcionamento do EBVBF.

A nova política de encaminhamento de pacotes causará um aumento no tempo de transmissão entre o *source* e o *sink*. Destarte, será proposta a criação de um novo tipo de pacote, o pacote de urgência. Este pacote sobreporá a leitura da energia do nó, de forma que $\alpha E.O = \alpha$ para todos os pacotes desta natureza. Essa medida pretende eliminar o problema do aumento do *delay* em caso de necessidade de transmissão prioritária ou urgente.

Capítulo 5

Ambiente de Simulação

5.1 Ferramentas Para Simulação

Com o intuito de fazer uma análise de desempenho do protocolo proposto, utilizaremos o *software* ns-3 juntamente com uma extensão chamada AquaSim-NG para realizar as simulações. Este capítulo é uma introdução a estas duas ferramentas.

5.1.1 ns-3

O ns-3 é um simulador de redes de eventos discretos para sistemas de internet, com objetivos educacionais e de pesquisa. O ns-3 é um *software* de código aberto, licenciado pela GNU GPLv2 e está disponível publicamente para uso. [22]

5.1.2 Aqua-Sim

O Aqua-Sim é uma extensão do ns-3 com o propósito de auxiliar na realização de simulações em redes de sensores acústicos subaquáticos. O Aqua-Sim consegue simular a atenuação de sinais acústicos e colisões entre pacotes em UWSNs. Além disso, ele também consegue suportar topologias de rede tanto 2D como 3D. [12]

Atualmente, o *software* inclui suporte aos seguintes protocolos (ver figura 5.1) [12]:

- Camada MAC: BroadcastMAC, ALOHA subaquático, CopeMAC, FAMA subaquático com e sem *slots*, GOAL, UWAN, Rmac, Tmac.
- Protocolos de Roteamento: DBR estático e dinâmico, DDBR, *Flooding*, VBF e HH-VBF.

Além destes, o programa também suporta funções básicas como *half-duplex*, atrasos longos de propagação e atenuação de sinal.

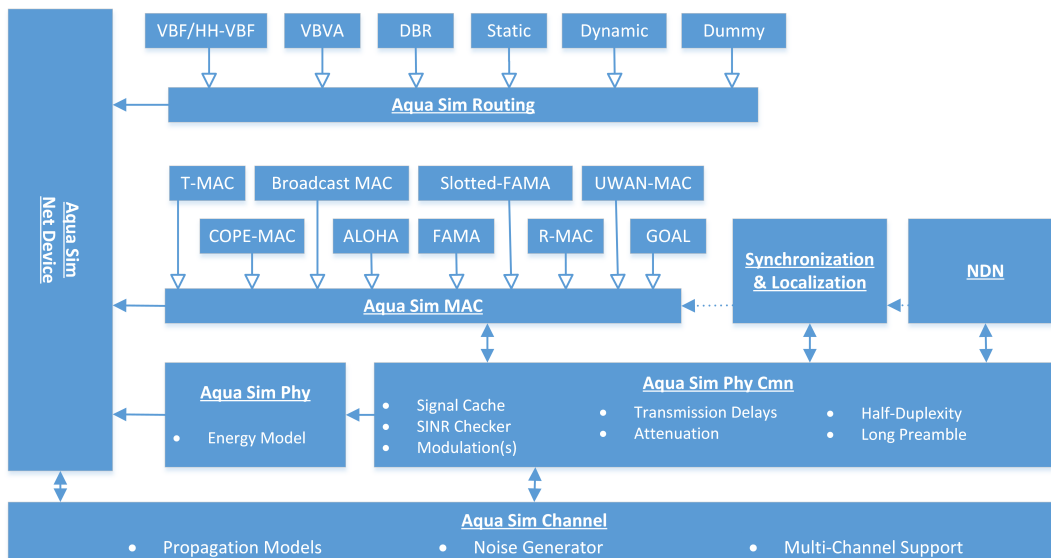


Figura 5.1: Funções inclusas no Aqua-Sim. Fonte: [12]

Oportunamente, algumas destas funções serão descritas ao longo deste capítulo, destinado às simulações em si, assim como seus resultados.

Originalmente, o Aqua-Sim foi desenvolvido para o ns-2. Atualmente, o Ns-3 encontra-se na versão 3.27. O Aqua-sim foi atualizado para o ns-3, levando o nome de AquaSim-NG, que foi a ferramenta utilizada neste projeto. [12]

5.2 Configurações de Simulação

Anteriormente, vimos um aprofundamento do protocolo proposto para diminuição do consumo de energia, melhor utilização da largura de banda disponível em comunicações subaquáticas e aumento da confiabilidade na entrega dos pacotes. Agora, será apresentado o ambiente de simulação configurado para realizar as medições de desempenho do protocolo EBVBF.

Para tal, buscamos o auxílio de parâmetros utilizados por soluções comerciais, já existentes no mercado. Estas opções possuem a vantagem de funcionamento em uma maior variedade de condições de profundidade, pressão e salinidade, fazendo com que não haja a necessidade de maiores testes em regiões específicas do mar. Além disso, a opção por soluções comerciais nos traz uma garantia de que o protocolo proposto poderá ser facilmente implementado em situações reais de transmissões submarinas após feitas as análises de desempenho.

Com estes parâmetros em mãos, foi realizada a simulação de uma situação de transmissão acústica submarina no ns-3, incluindo o EBVBF como nova opção de protocolo de roteamento, com o intuito de estudar o consumo de energia dos nós envolvidos na rede acústica e, assim, verificar o tempo de vida útil da rede como um todo e a taxa de entrega de pacotes, já que ambos envolvem custos na manutenção da rede com o resgate dos nós.

5.2.1 Modem

O modem utilizado no estudo foi o UWM1000 da *LinkQuest*, com documentação disponível em [13]. Este modem nos permite uma taxa de dados de 10kbps, com potência de transmissão de 2W em modo de consumo médio, podendo funcionar em profundidades de até 6 km. O modem, assim como suas especificações completas podem ser vistos na tabela 5.1 e na figura 5.2.



Figura 5.2: Micro Modem UWM1000 da LinkQuest. Fonte: [13]

Embora seja antigo, esse modem foi escolhido pois também é largamente utilizado em estudos de simulação de redes acústicas subaquáticas, como em [11].

LinkQuest Underwater Acoustic Modems
UWM1000 Specifications

RS-232 data rate:	9600 bits/second
Payload data rate:	7000 bits/second
Acoustic link:	17.8 k bits/second
Bit error rate:	less than 10^{-9}
Working range:	350 meters
Maximum depth:	200 meters
Transmit mode power consumption:	1 Watt (wide beam, narrow beam) or 2 Watts (omni-directional)
Receive mode power consumption:	0.75 Watt
Sleep mode power consumption:	8 mW
Beam width of transducer:	120 degrees (wide beam) or 210 degrees (omni-directional) or 70 degrees (narrow beam)
Operating Frequency:	26.77 to 44.62 kHz
RS-232 Configuration:	9600 baud, 1 start bit, 1 stop bit, no parity bit, and no flow control
RS-232 input data buffer:	900 kbytes
Voltage:	12 to 24 volts
Operating temperature:	-5 to 45°C
Storage temperature:	-25 to 75°C
Overall length:	235.7 mm
Housing diameter:	87.2 to 126.2 mm
Weight out of water:	4.2 kg
Weight in water:	2.3 kg
Optional Higher Data Rate:	19,200 baud
Options:	Data Fusion

Tabela 5.1: Especificações do modem UWM1000. Fonte: [13]

5.2.2 Ambiente Externo

Para a realização da simulação, configurou-se parâmetros que representam o ambiente externo do local da simulação. Entre estes fatores, destacamos: Pressão, temperatura e salinidade. Assim, pretendemos aproximar-nos ao máximo das características reais do modem UWM1000 e de um ambiente marinho.

5.2.2.1 Temperatura

Determinar a temperatura da água no local onde a rede será instalada é essencial para a modelagem da simulação, visto que esta característica influencia diretamente na velocidade do som em um local. Isso ocorre devido a natureza mecânica das ondas acústicas, o que as deixa vulneráveis a variações da energia térmica no meio de transmissão.

Como pode-se ver nas tabelas 5.2 e 5.3, variações pequenas de temperatura podem causar grandes atenuações no sinal. Estes valores foram coletados em um estudo no mar Mediterrâneo, em uma profundidade de 200m e com salinidade média. [14]

Para a nossa simulação, será utilizado o valor de 30° C para a temperatura, com o intuito de minimizar a atenuação.

Frequency (KHz)	10	10	10	10
Distance (Km)	1	1	1	1
Temperature (°C)	4	10	13	30
Attenuation (dB)	1.075	0.8284	0.729	0.3695

Tabela 5.2: Atenuação de Sinal Devido a Temperatura Para 1km. Fonte: [14]

Frequency (KHz)	10	10	10	10
Distance (Km)	5	5	5	5
Temperature (°C)	4	10	13	30
Attenuation (dB)	15.86	14.63	14.13	12.33

Tabela 5.3: Atenuação de Sinal Devido a Temperatura Para 5km. Fonte: [14]

5.2.2.2 Pressão

O meio aquático possui variações bruscas de pressão. A cada 10 metros de profundidade é adicionada a pressão equivalente a uma atmosfera terrestre. Com isso, as ondas acústicas sofrem intenso espalhamento a medida em que há variações de pressão no meio do caminho, limitando a distância máxima entre nós para garantir uma transmissão sem muitos erros causados pelo meio físico.

Neste estudo, utilizou-se a topologia 2D Móvel, que é a mais aceita e utilizada em projetos deste tipo e que foi detalhada no capítulo 2. Especificamente, a topologia será em forma de retângulo, com área 1000m x 1010m. Inicialmente, esse retângulo terá uma distribuição uniforme dos nós, mas em outros cenários outros tipos de topologia serão avaliados. Estes cenários serão explicados no próximo capítulo.

5.2.2.3 Salinidade

Saber a salinidade do oceano é um fator importante para qualquer transmissão. Isso se dá pois os cristais de sal dissolvidos na água espalham as ondas acústicas, causando atenuação do sinal e diminuição no SNR (*Signal-To-Noise Ratio* ou Relação Sinal-Ruído)

Neste estudo, será considerada uma distância entre nós máxima de 100 m, temperatura de 30 °C e salinidade média (valor padrão do simulador), com velocidade do som em 1500 m/s.

A pequena distância entre nós traz algumas vantagens. Por exemplo, isso nos possibilitará minimizar os efeitos das variações de pressão devido a mudança de profundidade, uma vez que nossas transmissões serão primariamente verticais em função da posição do nó final *sink* em relação aos demais. Além disso, a pequena distância nos permitirá minimizar também a atenuação devido a temperatura, uma vez que esta também é função da distância entre os nós.

5.2.2.4 Outros Fatores

Além destes três fatores, é importante ressaltar a probabilidade de ocorrência de atividades na superfície, como a passagem de barcos, assim como a velocidade do vento, visto que qualquer atividade desse tipo irá movimentar mais a água, causando possíveis perdas no sinal. Nesta simulação, esta probabilidade será denotada por "s". Para fins desta simulação, utilizaremos um valor de $s=0.5$, ou seja, atividade média na superfície e velocidade do vento $w=1$ m/s.

5.2.3 Configurações do Ambiente de Simulação

Na simulação, serão utilizadas as seguintes configurações (ver tabela 5.4), visando a aproximação aos valores reais de uma rede acústica em um meio subaquático. Todos estes valores são configuráveis no Aqua-Sim.

Tipo de Antena	Omnidirecional
Potência de Transmissão	2W
Raio do Túnel(W)	100m
Potência de Recepção	0.75W
Probabilidade de Movimento na Superfície	0.5
Temperatura	30 °C
Tempo Entre Transmissões	5 segundos
Tempo de Simulação	1000 segundos
Distância Máxima Entre Nós	100m
Velocidade do Som	1500 m/s
Velocidade do Vento	1 m/s

Tabela 5.4: Variáveis de ambiente para simulação.

Neste estudo, será configurada uma aplicação On-Off básica, padrão do simulador ns-3, com pacotes de 50 bits (40 de dados e 10 de cabeçalho acrescentados automaticamente pelo AquaSim-NG). O protocolo de camada MAC configurado nas simulações foi o Broadcast-MAC, como visto no capítulo 5. A topologia implementada será uma 2D móvel, mostrada no capítulo 2, onde os nós serão distribuídos de acordo com quatro cenários diferentes, que serão explicitados no próximo capítulo. O modelo de erro no meio físico será o BELLHOP,

já implementado por padrão no AquaSim-NG e discutido anteriormente. Enquanto o modelo de movimento dos nós será dado por meio de um padrão onde os nós se movem de forma uniforme com velocidade de 1,5 m/s. Apesar deste padrão de movimento não alterar a distância entre os nós, ele foi adotado para simular a presença de distorções relativas ao movimento nas transmissões. Cada uma das simulações foi executada 100 vezes, para maior precisão dos modelos randômicos existentes no ns-3, da mesma forma utilizada em [15] objetivando a aproximação e comparação dos resultados.

As simulações contarão com o modelo de energia padrão do AquaSim-NG, com energia inicial configurável e gastos com *idle*, transmissão e recepção. Os valores são descritos em W/Hr, sendo proporcionalmente descontados pelo tempo de cada atividade. Os valores de consumo de energia estão explicitados na tabela 5.4 e os valores iniciais dos dispositivos estão descritos em cada cenário.

Além disso, teremos um *data source* e um *sink*, com posições definidas de acordo com cada cenário, sempre de forma a garantir que o *source* terá pelo menos dois nós ao seu alcance. Não houve necessidade de configuração de tempo de "warm-up", pois o protocolo proposto não possui mensagens de controle e, da mesma forma, não precisa de conhecimento prévio da topologia ou de outras características da rede.

No capítulo seguinte, serão evidenciados os cenários, assim como os resultados das simulações executadas para cada um.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo, explicita-se os cenários simulados assim como seus resultados de avaliação de desempenho do protocolo proposto em relação ao protocolo VBF.

6.1 Métricas de Desempenho

Como o objetivo final do nosso protocolo é estudar o tempo de vida útil da rede, utilizamos a energia restante na bateria como uma das métricas de desempenho. A taxa de sucesso de entrega também foi medida e será explicitada adiante. Analisou-se também o atraso na entrega dos pacotes mesmo sabendo-se previamente que o αE .O geraria aumento neste.

6.2 Cenários de Simulação

Além dos dados acima, a comparação entre os protocolos VBF e EBVBF foi feita com a utilização de quatro cenários diferentes, de forma a avaliar principalmente o impacto da nova política de encaminhamento com relação ao gasto de energia do nós e no tempo de vida útil da rede.

6.2.1 Cenário 1 - *Threshold* Variável

O cenário contém uma área dimensões de 1000m x 1010m com 625 nós distribuídos uniformemente. A posição do *source* é (50, 25), enquanto o *sink* está em (950, 1010). A energia inicial dos nós será de 15 W/Hr, enquanto o *threshold* para o protocolo proposto será variado de 0 W/Hr a 12,5 W/Hr. Estes valores são deliberadamente menores do que os encontrados em situações reais. Isso foi feito com o intuito de se ativar rapidamente o *threshold* de energia e diminuir os tempos necessários para realizar cada simulação. O *sink* e o *source* possuem energia inicial de 1000 W/Hr, para que não interrompam o seu trabalho

durante a simulação. O fator α será acrescido do valor 3, de forma que $\alpha E.O = \alpha + 3$ conforme descrito no capítulo 4. Nota-se que, quando o *threshold* é 0 W/Hr, o protocolo se comporta exatamente como o VBF puro. O intuito deste cenário é verificar o impacto do valor *threshold* nas métricas utilizadas e a determinação de um valor adequado para as simulações seguintes. O desenho da topologia está na figura 6.1.

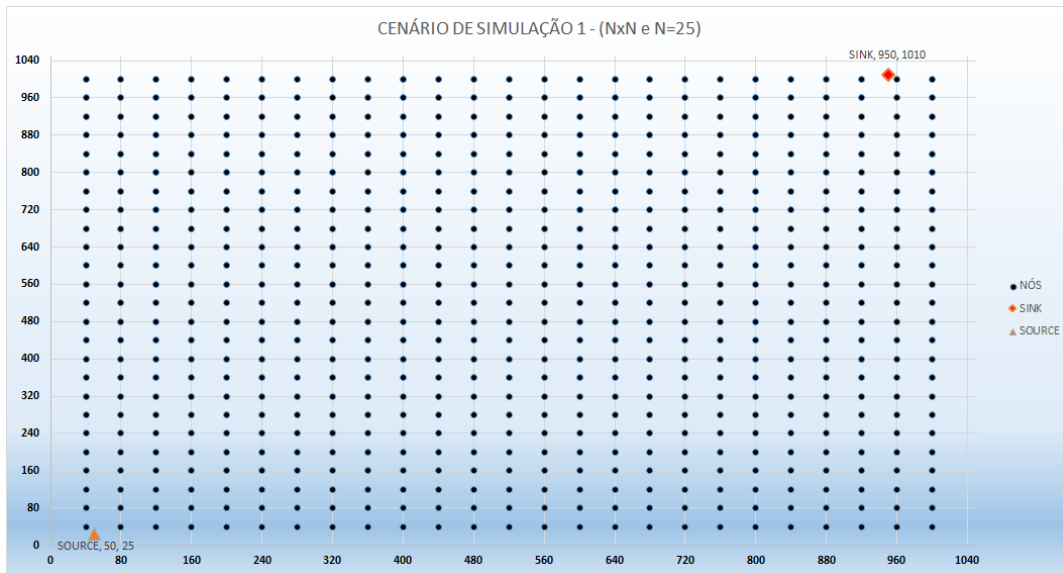


Figura 6.1: Topologia do Cenário 1.

Através dos gráficos 6.2 e 6.3, é possível inferir que existe um tempo ótimo de *threshold* para a maximização do EBVBF. Para valores muito baixos, o EBVBF não fica ativo tempo suficiente para economizar energia. Por outro lado, para valores muito altos, o EBVBF ativa-se muito cedo, fazendo com que todos os nós migrem para o segundo nível de filas, aumentando o delay da rede mas não balanceando o gasto de energia. Portanto, para as métricas de tempo de vida útil, os valores de 7.5 W/Hr e 10 W/Hr mostram-se mais adequados para a observação do funcionamento do protocolo.

Conforme 6.4 existe uma relação entre o valor do *threshold* e o aumento do número de pacotes entregues ao *sink*. A variação das rotas e a participação de mais nós são responsáveis por este aumento. Entretanto, levando em conta também o tempo de vida útil, o valor mais adequado para este cenário é de 10 W/Hr, que será utilizado nas próximas simulações e cenários.

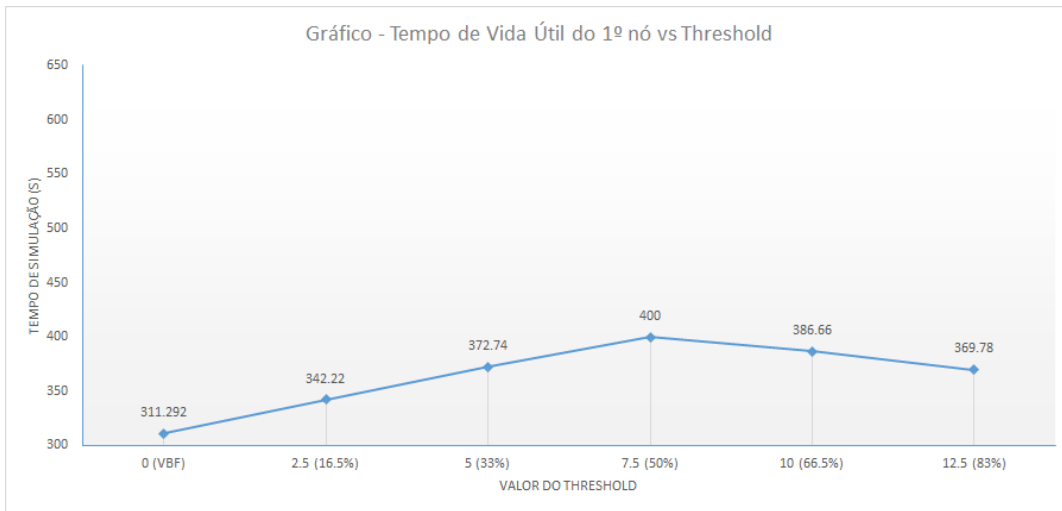


Figura 6.2: Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x *Threshold* Definido.

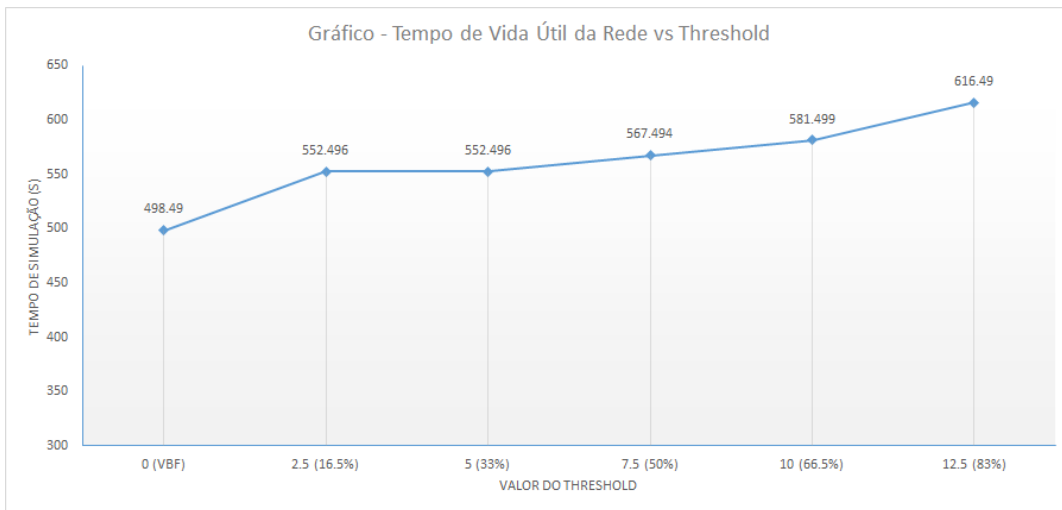


Figura 6.3: Tempo de Vida Útil da Rede x *Threshold* Definido.

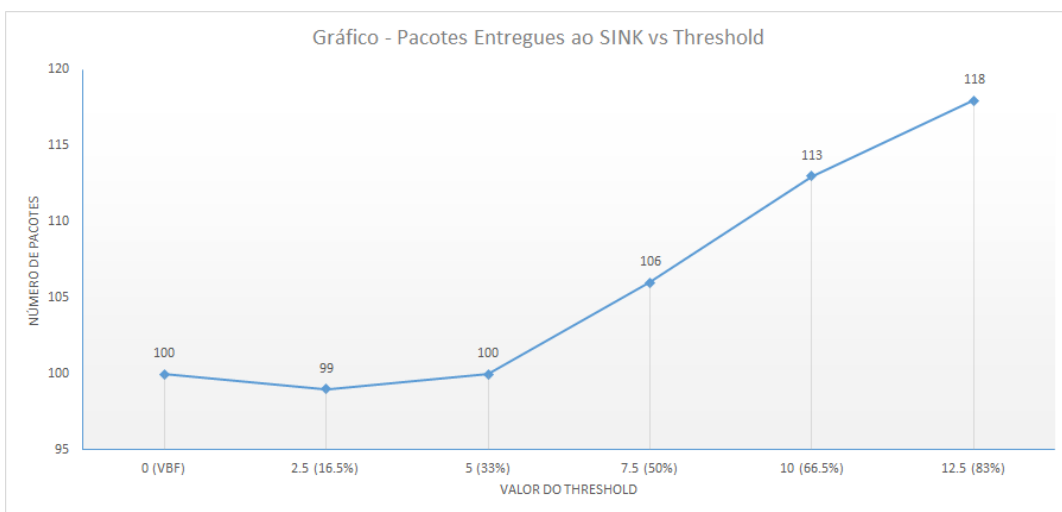


Figura 6.4: Gráfico de Pacotes Entregues no Sink x *Threshold* Definido.

6.2.2 Cenário 2 - α Variável

O cenário contém uma área dimensões de 1000m x 1010m com 625 nós distribuídos uniformemente. A posição do *source* é (50, 25), enquanto o *sink* está em (950, 1010). A energia inicial dos nós será de 15 W/Hr, enquanto o *threshold* para o protocolo proposto será de 10 W/Hr. Estes valores são deliberadamente menores do que os encontrados em situações reais. Isso foi feito com o intuito de se ativar rapidamente o *threshold* de energia e diminuir os tempos necessários para realizar cada simulação. O *sink* e o *source* possuem energia inicial de 1000 W/Hr, para que não interrompam o seu trabalho durante a simulação. O fator α será acrescido de um valor entre 0 e 3, sendo que α não poderá ser maior do que 3. Ressalta-se que este comportamento não é do VBF, uma vez que o EBVBF, para fins deste cenário, não possui valor máximo. Nota-se que, quando α é acrescido de 0, o protocolo se comporta exatamente como o VBF puro. O intuito deste cenário é descartar qualquer outro método de aumento do fator α e determinar o impacto do acréscimo ao tempo de vida útil dos nós, assim como avaliar o melhor valor de α E.O. Observa-se, ainda, que esta simulação pretende determinar se a criação de duas filas de prioridade (EBVBF) é efetiva, ou se, ao adicionar valores ao α e limitando o resultado da soma a 3 (mantendo assim apenas 1 fila de prioridade), encontraremos melhores resultados. O esquema das filas encontra-se nas figuras 4.2 e 4.4.

Tendo em vista os nós estarem distribuídos no quadrado de 1000m x 1000m, temos nós com coordenadas X e Y múltiplas de 40. Assim, para o nó *source*, existem pelo menos quatro candidatos para o primeiro *forwarding* do pacote. Por isso, os gráficos abaixo foram feitos em função deste valor, observando que, quando o valor adicionado a α é de 0, o funcionamento é idêntico ao VBF e que, nos dois últimos valores do eixo X nos gráficos deste cenário, o funcionamento é igual ao do EBVBF. O desenho da topologia está na figura 6.5.

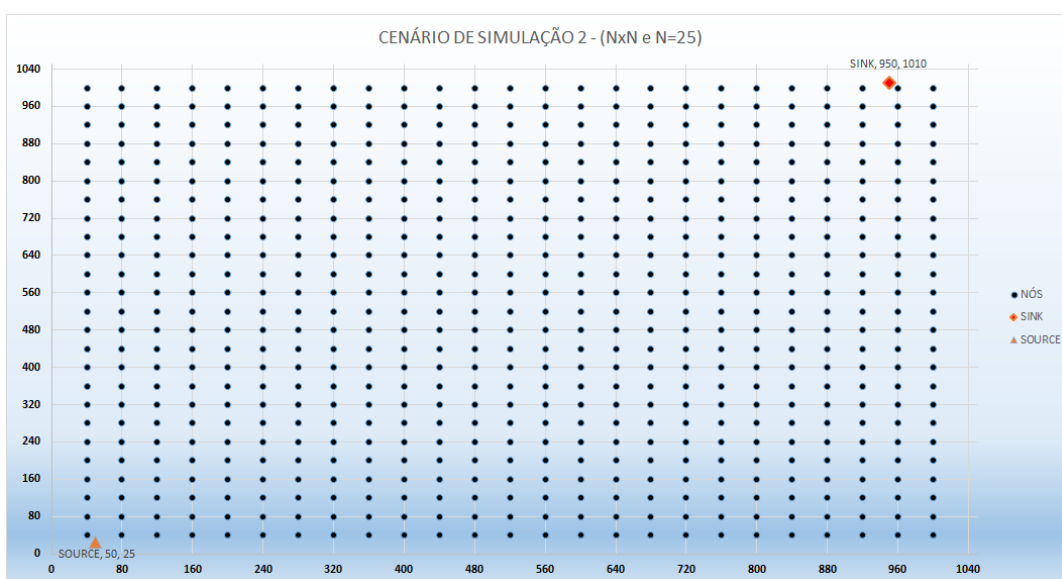


Figura 6.5: Topologia para Cenário 2.

A figura 6.6 mostra que, com o aumento do valor adicionado a α , o tempo de vida da rede sofre variação geralmente positiva. Por causa da topologia da rede, dependendo do valor adicionado, não é possível fazer com que o nó com mais energia receba prioridade em detrimento ao nó com menos energia. Logo, o parâmetro adicionado a α altera variadamente o tempo de vida útil da rede.

A figura 6.7 mostra que, assim como no resultado anterior, o valor de α altera variadamente o tempo de vida útil do primeiro nó. Evidencia-se que o valor $\alpha = 1.4$ obteve o melhor resultado nessa métrica, resultado este que manteve-se positivo para valores maiores. O valor ótimo acrescido a α é dependente das distâncias entre os nós redundantes e o nó mais exigido da topologia. A determinação do impacto da densidade de nós será objeto de estudo dos próximos cenários.

Durante a proposta do protocolo EBVBF, constatou-se que a introdução do $\alpha E.O$ aumentaria o tempo necessário para entrega de um pacote. A figura 6.9 mostra o tempo médio necessário para entrega de todos os pacotes que chegaram ao *sink* e procura evidenciar que, quando os nós passam para o segundo nível de prioridade, o atraso aumenta significativamente. Vale lembrar que, caso seja necessário, é possível configurar a rede para utilizar os pacotes de urgência, como em aplicações que geram informação com limites de tempo de entrega, como por exemplo o aumento da temperatura em um poço de petróleo *off-shore*, com a finalidade de reduzir esse atraso. A figura 6.9 mostra, para cada protocolo, o tempo médio de entrega dos pacotes que foram entregues ao destino.

Como podemos ver nas figuras 6.8 e 6.9, o tempo de entrega médio do EBVBF é um pouco maior que o do VBF, visto que é introduzido um atraso com a utilização do $\alpha E.O$. No entanto, vale ressaltar que parte do atraso para ambos os protocolos se dá devido ao atraso de propagação para redes acústicas subaquáticas.

Por fim, a figura 6.10 nos mostra uma relação entre os pacotes entregues e o valor de α , mostrando que a economia de energia e os novos caminhos gerados pelo EBVBF aumentaram a taxa de entrega em relação ao VBF. Percebeu-se também que esta taxa não sofreu grandes variações com os diversos valores de α simulados.

Os resultados do cenário 2 revelam que, para a topologia escolhida, os valores de $\alpha E.O$ devem contar com acréscimo de 1.5 ou 3, já que configuraram as escolhas mais equilibradas em relação às métricas escolhidas. Os outros valores acrescidos não demonstraram aumentar significativamente o tempo de vida útil da rede em relação a $\alpha + 1.6$, porém demonstraram aumentar o tempo de vida útil do 1º nó. Não se deve afastar ainda que quanto maior o valor adicionado, maior o atraso para o tempo de entrega, conforme Figura 6.8. Portanto, o cenário seguinte verificará o impacto da densidade de nós utilizando estes dois valores de $\alpha E.O$.

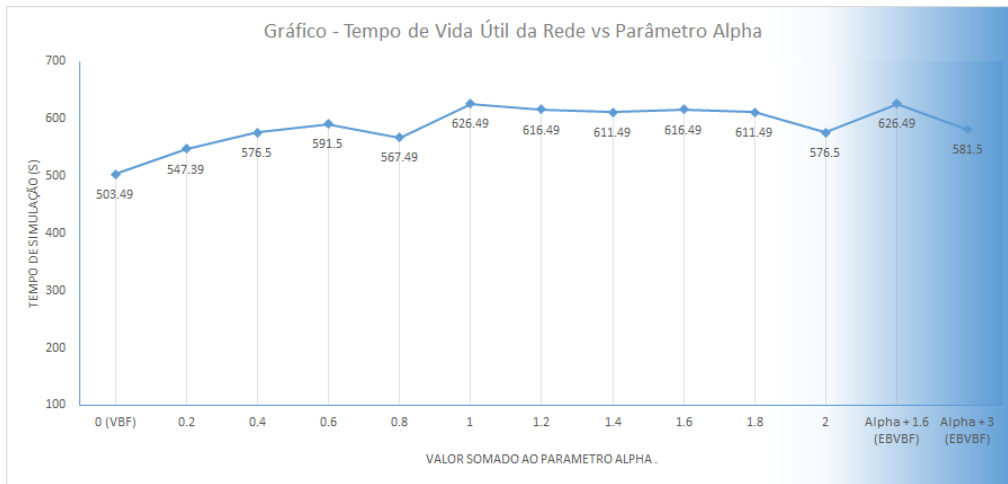


Figura 6.6: Tempo de Vida Útil da Rede x α .

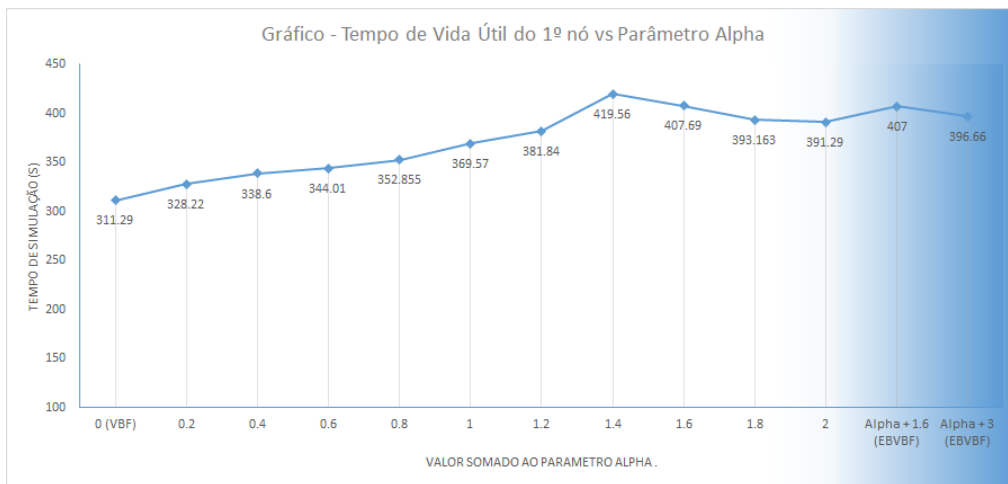


Figura 6.7: Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x α .

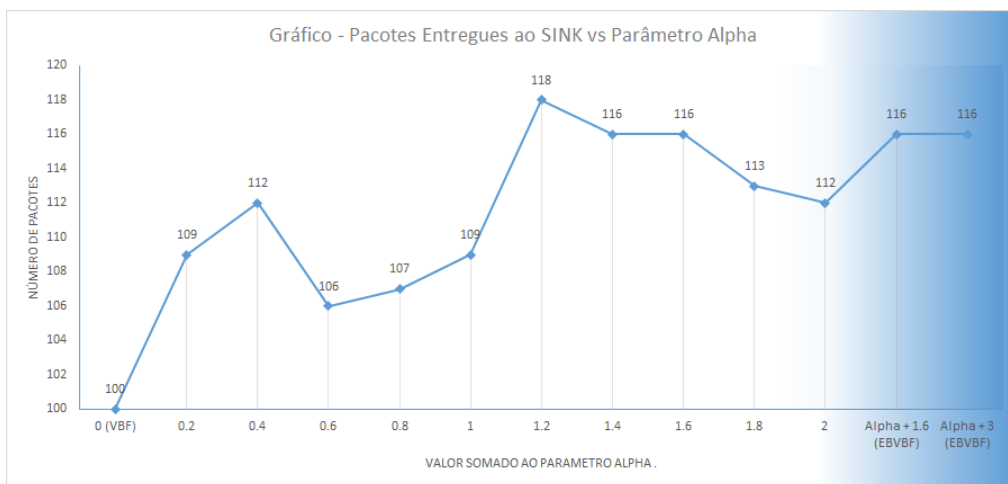


Figura 6.8: Tempo de Entrega vs Número do Pacote para o VBF e $\alpha = 1.6$ e 3 .

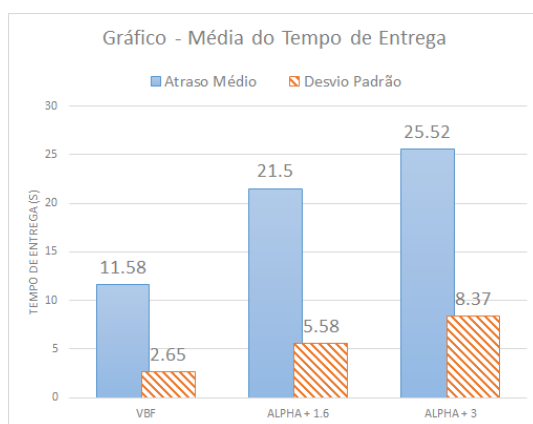


Figura 6.9: Tempo de Entrega Médio para VBF e EBVBF.

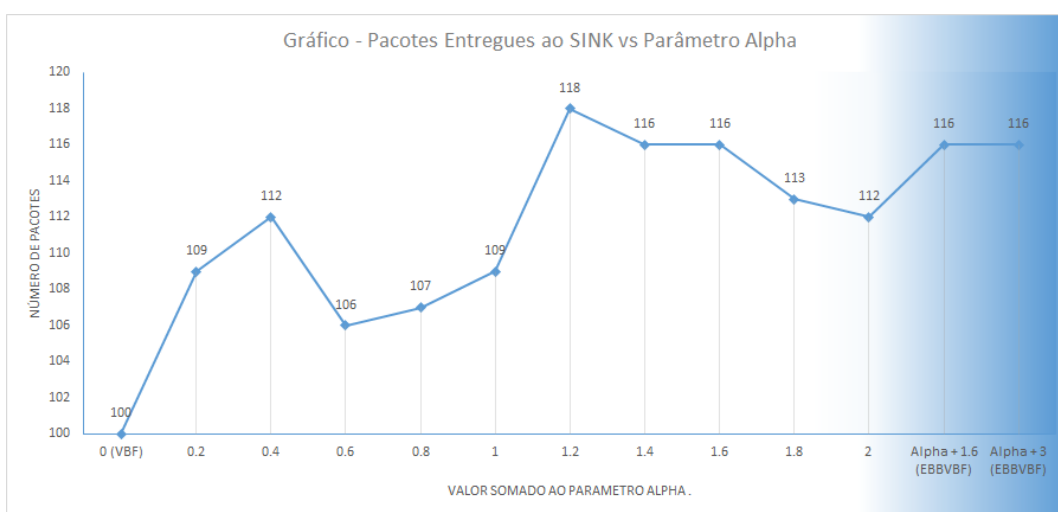


Figura 6.10: Pacotes Entregues ao Sink Para o Cenário 2.

6.2.3 Cenário 3 - Número de Nós Variável

O cenário contém uma área de dimensões de 1000m x 1010m com os nós distribuídos uniformemente. A posição do *source* é (50, 25), enquanto o *sink* está em (950, 1010). A energia inicial dos nós será de 15 W/Hr, enquanto o *threshold* será de 10 W/Hr. O *sink* e o *source* possuem energia inicial de 1000 W/Hr, para que não interrompam o seu trabalho durante a simulação. Serão simulados os protocolos VBF e EBVBF separadamente. O número de nós será alterado de forma a estabelecer a relação entre a densidade da rede e o tempo de vida útil dos nós e da rede. Os nós serão distribuídos em um retângulo com "n" linhas e "n" colunas. Serão feitas simulações com os seguintes valores de "n": 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50. Na figura 6.11, pode-se ver o a topologia utilizada neste cenário de simulação.

O terceiro cenário foi criado para avaliação do impacto da densidade de nós no consumo de energia dos dois protocolos. Os resultados evidenciaram o aumento no tempo de vida útil da rede com o EBVBF, onde constatou-se aumentos de até 36% para "n"= 15, como mostram as figuras 6.12 e 6.13. A figura 6.14 nos dá o número de pacotes entregues ao *sink*. Da

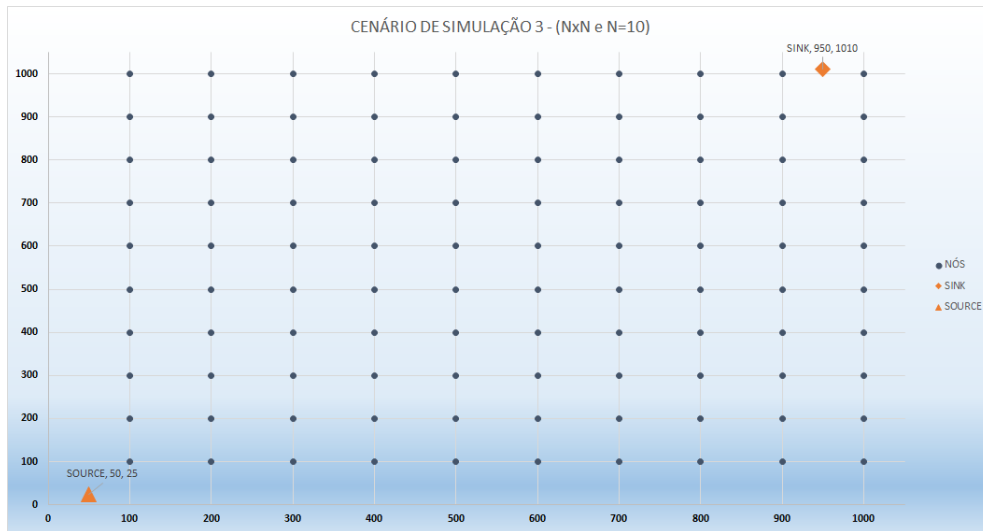


Figura 6.11: Topologia para Cenário 3.

mesma forma observada no cenário anterior, o EBVBF apresentou maior confiabilidade para redes menos congestionadas. De maneira geral, quanto maior o "n" maior será a semelhança entre o EBVBF e o VBF em relação a esta métrica. Estes gráficos também mostram que o ganho proporcionado pelo EBVBF está relacionado não somente a densidade dos nós bem como à topologia da rede. Assim, da mesma forma que ficou evidenciado nos resultados do cenário 2, a distância entre os nós e o número de nós redundantes para cada salto determina o ganho obtido pelo protocolo, ou seja, quanto mais densa a rede, menor o gasto de energia do EBVBF, até um certo limite, onde passa a ocorrer uma saturação de redundância. Ressalta-se, ainda, que a alteração das rotas tradicionais escolhidas pelo VBF, para uma certa topologia, possibilita a adaptação da rede a múltiplos nós *source* e ao possível cruzamento entre seus túneis, conforme observado no protocolo CL-VBF na figura 3.7.

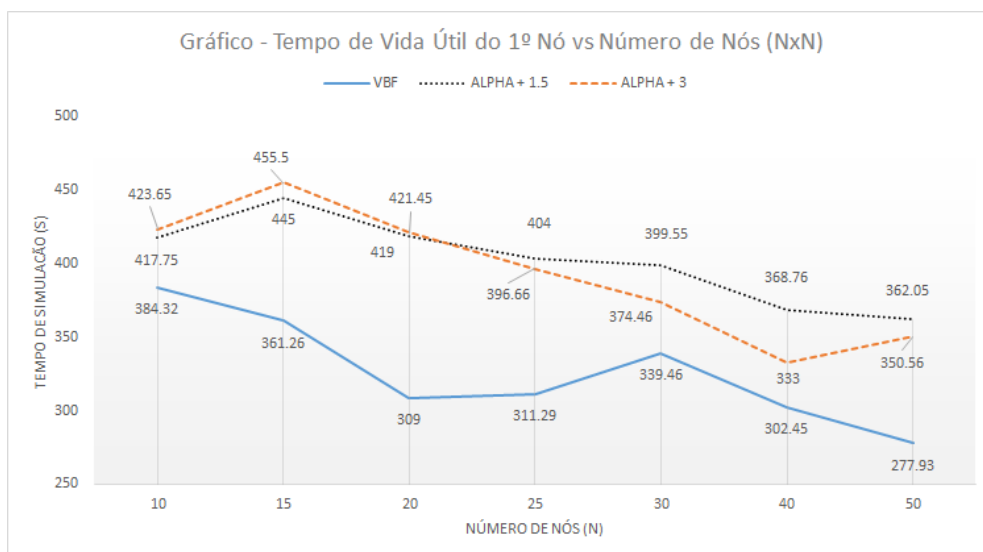


Figura 6.12: Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x Número de Nós.

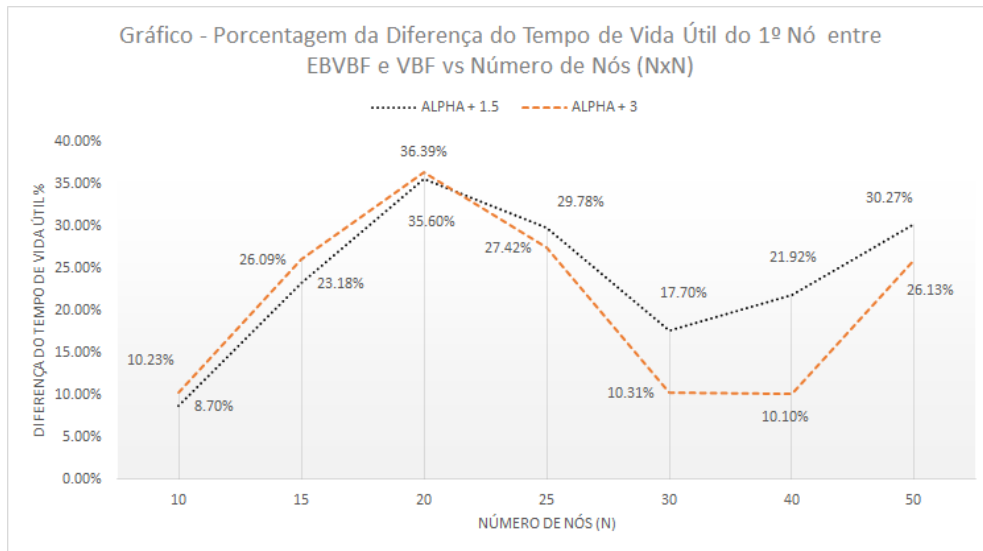


Figura 6.13: Porcentagem da Melhoria no Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó.

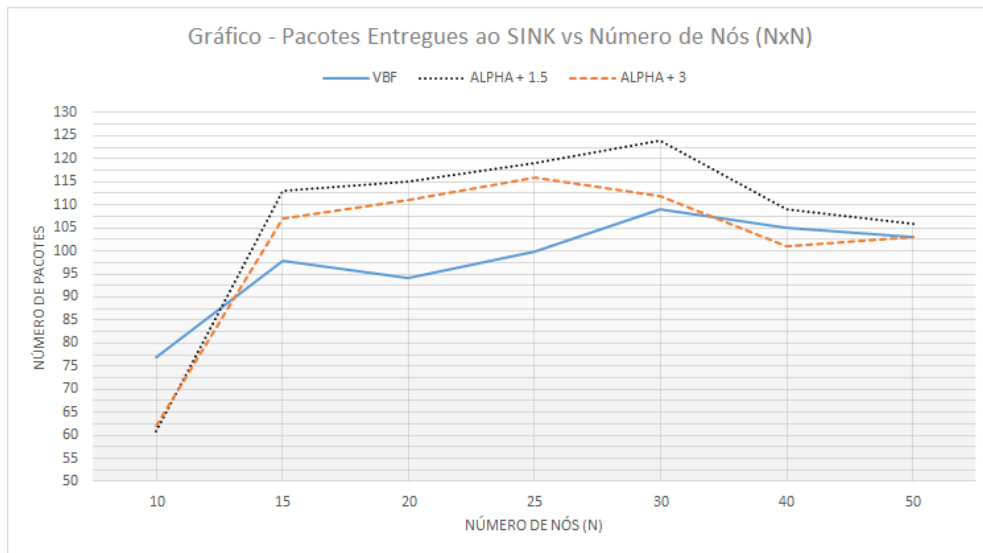


Figura 6.14: Pacotes Entregues ao Sink Para o Cenário 3.

6.2.4 Cenário 4 - Topologia Variável

Este cenário conta com a posição do *source* em (30, 0), enquanto o *sink* está em (30, 115). A energia inicial dos nós será de 150 W/Hr, enquanto o *threshold* será de 100 W/Hr. O tempo de simulação será alterado para 10.000 segundos, pois o objetivo deste cenário é justamente acabar com a energia de todos os nós. O *sink* e o *source* possuem energia inicial de 10000 W/Hr, para que não interrompam o seu trabalho durante a simulação. Serão simulados os protocolos VBF e EBVBF separadamente. Serão adicionados nós de acordo com as equações 6.1 e 6.2, onde "N" é o número de nós e X e Y são as coordenadas:

$$X = ((3 * N) * (N^{-1}) + 33) \quad (6.1)$$

$$Y = 88 - (3 * N) \quad (6.2)$$

Também serão adicionados "N" nós, onde "N": 2, 4, 6, 8 e 10. O parâmetro $\alpha E.O = \alpha + x$, onde "x" terá valores de 0, 0.75, 1.5, 2.25 e 3. O intuito deste cenário é determinar qual o acréscimo no tempo de vida útil dos nós e da rede para cada nó adicionado. Da mesma forma, busca-se comprovar, tendo em vista a menor quantidade de nós, o funcionamento dos dois níveis de prioridade do EBVBF. Ainda, deseja-se verificar qual o melhor valor de "x" e a relação de "N" (redundância) com o perfil energético da rede. O desenho da topologia está na figura 6.15.

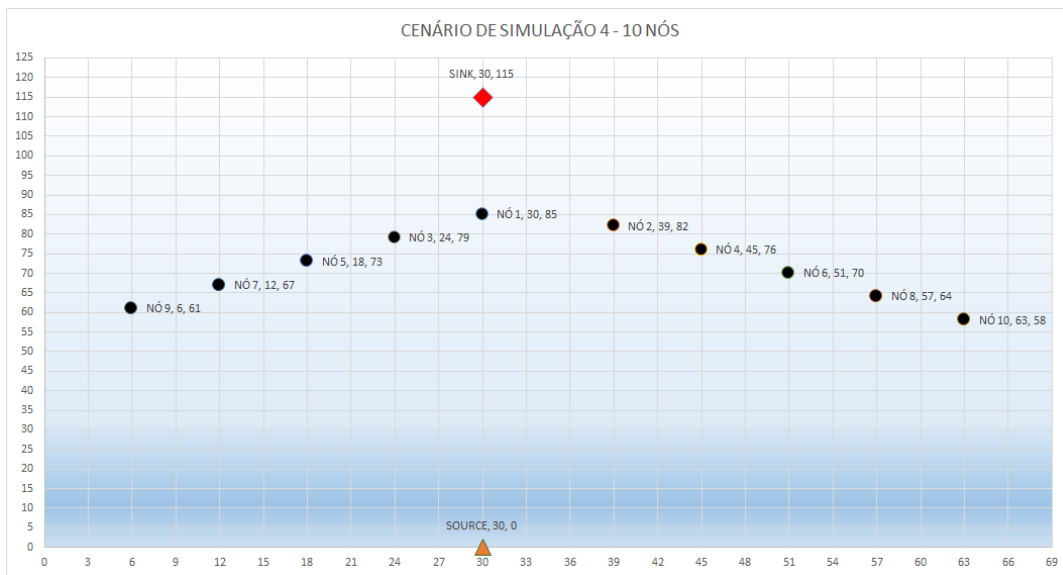


Figura 6.15: Topologia para Cenário 4.

O cenário anterior mostrou a necessidade de determinar o quanto o aumento do número de nós redundantes afeta os ganhos do protocolo EBVBF. O cenário 4 comprovou que, quando o nó consumiu energia até o *threshold*, outro nó passou a encaminhar os pacotes que chegavam naquela região. Assim, os gráficos 6.16 e 6.17 mostram como o funcionamento do EBVBF melhora as métricas utilizadas. Consequentemente, pode-se observar que a adição de nós redundantes não possui uma relação linear com o tempo de vida útil dos nós e da rede. Para cada novo nó, um ganho menor de tempo é atingido, até que a redundância de nós passe a consumir mais energia com as retransmissões do que economizá-la através da adição de novos nós.

A figura 6.18 aponta que, para cada nó adicionado, o protocolo EBVBF demonstra um ganho de eficiência energética em relação ao VBF. Igualmente, é possível constatar que cada nó adicionado acaba por diminuir a eficiência energética, já que forçará seus vizinhos a perder energia com recepções e eventualmente retransmissões. Entretanto, o protocolo EBVBF, por balancear o gasto de energia, demonstra um melhor gerenciamento do tempo de vida útil dos nós, estabelecendo uma melhor relação entre redundância e ganho energético. Enquanto isso, o VBF demonstra queda no tempo de vida útil para redes pouco densas.

Isto posto, para ambos os protocolos, a perda de melhoria para adição de muitos nós se dá devido à natureza das transmissões acústicas em modo *broadcast*, ou seja, um número muito elevado de nós fará com que cada nó receba mais transmissões duplicadas, o que também causa consumo extra de energia e eventualmente sobrepõe o ganho da redundância. Enfatiza-se que o número ideal de nós vizinhos para cada salto é sempre composto por menos nós no EEVBF do que no VBF, sendo que para cada topologia algum valor de "x" será mais eficiente nesta otimização.

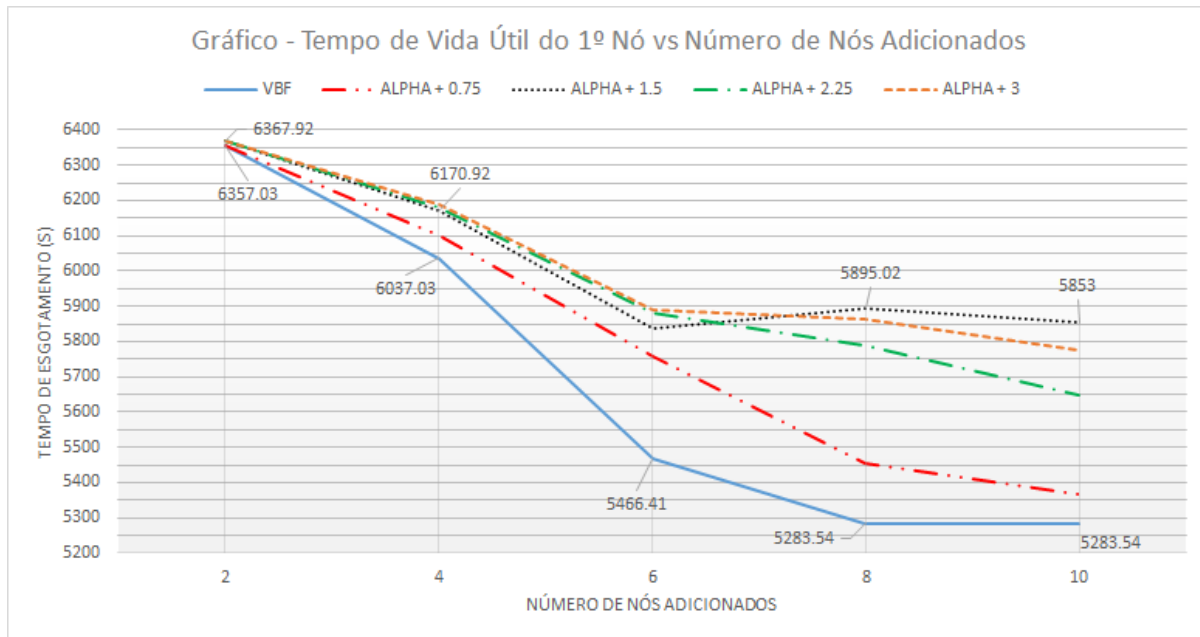


Figura 6.16: Tempo de Vida Útil do Primeiro Nó x Nós Adicionados.

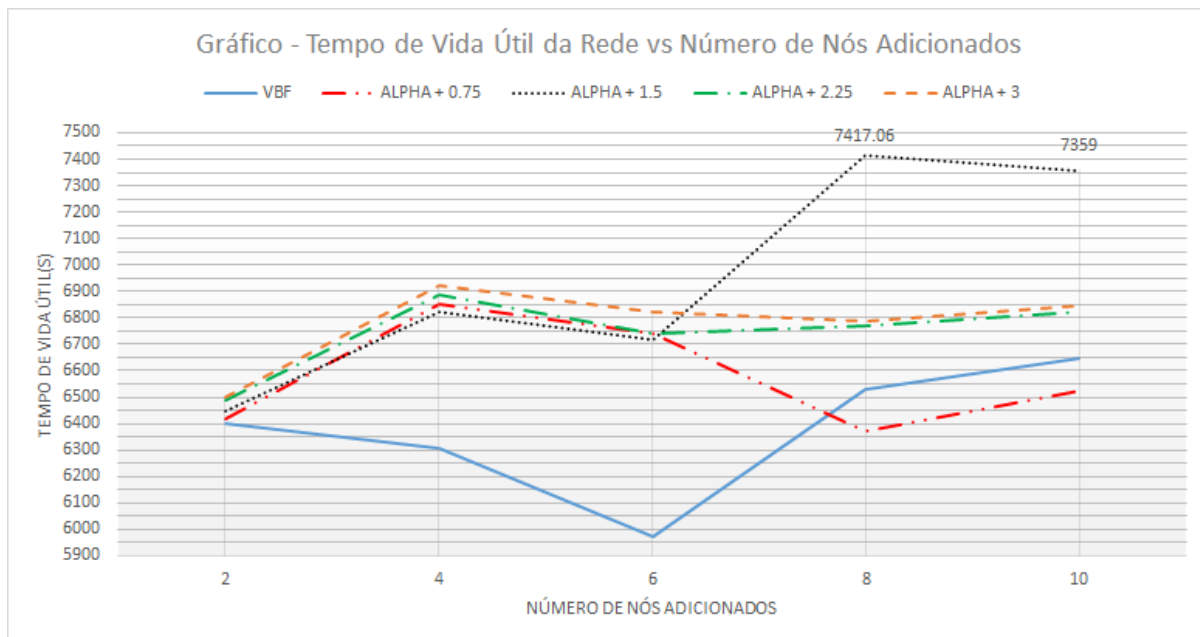


Figura 6.17: Tempo de Vida Útil da Rede x Nós Adicionados.

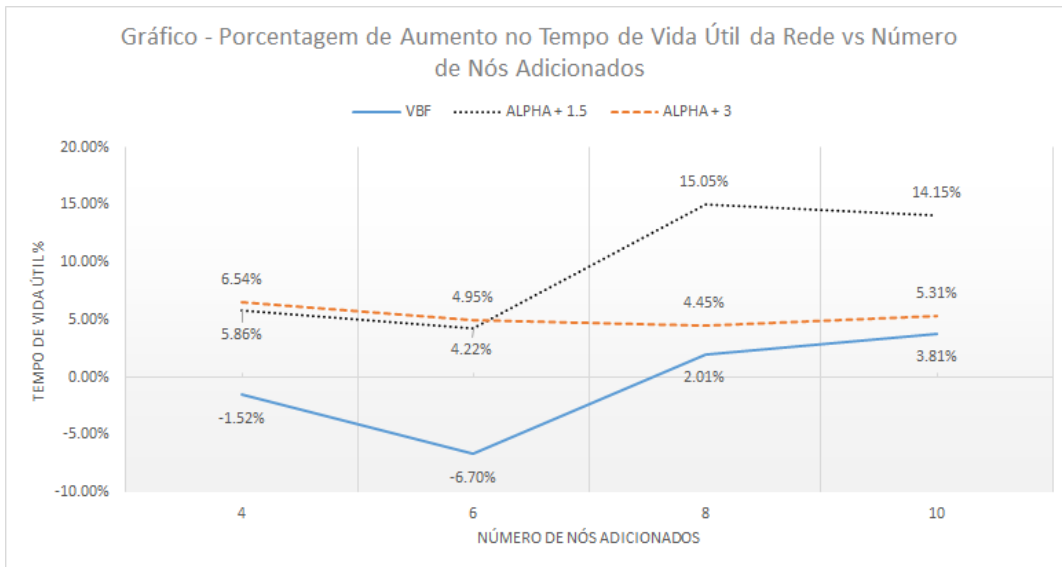


Figura 6.18: Porcentagem da Melhoria no Tempo de Vida Útil da Rede Para Cada Nó Adicionado.

6.3 Vantagens do EBVBF

O protocolo VBF tende a escolher um nó ótimo (com menor α) para cada salto de encaminhamento do pacote. Desse modo, os nós envolvidos na transmissão, salvo interferência por parte da mobilidade dos nós, terão sua energia esgotada até que outro nó possa assumir o encaminhamento. O EBVBF, com a adição dos dois níveis de prioridade, busca, a partir do *threshold*, poupar este nó ótimo, colocando-o com um maior tempo de adaptação. Assim, caso outro nó com melhor bateria possa fazer a transmissão, certamente ele terá um tempo de adaptação menor e mandará o pacote primeiro.

O resultado desta nova política de encaminhamento do EBVBF é o esgotamento mais uniforme dos recursos energéticos da rede. Lembrando que a substituição de nós é uma atividade de alto custo, deseja-se que os nós possam ser trocados a menor quantidade de vezes possível. Além disso, esgotar a capacidade energética de um nó poderá influenciar na capacidade de comunicação da rede caso, devido ao movimento dos nós, tal nó torne-se indispensável para o funcionamento da rede como um todo.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusão

Os resultados obtidos no capítulo anterior nos permitem concluir que o EBVBF balanceou o consumo de energia entre os nós, aumentando o tempo necessário para esgotamento energético do primeiro nó e o tempo de vida útil da rede. O balanceamento mostrou-se dependente da topologia e da densidade de nós, assim como do número de nós redundantes disponíveis em cada salto. Da mesma forma que o VBF, conforme [15], o EBVBF possui taxa de sucesso de entrega de pacotes relacionada à densidade da rede, todavia o EBVBF possui melhor confiabilidade e taxa de entrega por obra do balanceamento de energia. Para tanto, os parâmetros *threshold* e $\alpha E.O$ podem ser otimizados para cada topologia, atendendo a necessidades diferentes de cada aplicação.

Por mérito da sua simplicidade, onde nenhuma fase de controle ou conhecimento prévio da rede ou dos nós vizinhos é necessária, o protocolo proposto mostrou-se mais recomendável para aplicações de longo prazo, uma vez que o *trade-off* relacionado entre aumento no tempo de vida útil da rede e maior atraso na entrega de pacotes proporcionou ganhos de até 36%. Em um ambiente real, o custo relacionado a substituição/resgate dos nós e a sua evidente necessidade de minimização propicia a utilização de um protocolo de ganho energético como o EBVBF. Similarmente foram percebidos ganhos relativos à diminuição do número necessário de nós redundantes vizinhos.

Por outro lado, o EBVBF também procura manter a maior quantidade possível de nós com bateria remanescente antes de esgotar o primeiro nó. Por conseguinte, para redes em que os nós alteram suas posições relativas aos outros, a manutenção de energia em um nó poderá determinar uma sobrevida à rede em relação ao VBF.

7.2 Trabalhos Futuros

Durante o projeto, foram prestadas contribuições ao AquaSim NG, através de *debugging* e validação de códigos e modelos usados nas simulações.

Futuramente, podem ser feitos projetos que aplicam esse protocolo a modems mais atuais, com maior capacidade energética e taxa de transmissão. Além disso, podem também ser feitas comparações entre o EBVBF e outros protocolos, como o DBR, o REBAR e, especialmente, o CLVBF, com o qual nós acreditamos que haveria um ganho de performance significativo.

Finalmente, seria interessante um trabalho com nós com mobilidade modelada aleatoriamente, diversa da utilizada neste projeto. A adoção de topologias aleatórias e diferentes das já utilizadas poderia tipificar novas leituras do protocolo EBVBF e de seus benefícios. Por fim, o protocolo proposto pode ser estendido com o desenvolvimento de um algoritmo de adaptação dinâmica em relação ao α . Para o caso da ferramenta de simulação, *AquaSim-NG*, um trabalho de documentação da ferramenta e do desenvolvimento do protocolo poderia auxiliar grupos em trabalhos posteriores.

Referências Bibliográficas

- [1] BRITO, L. S. de; SILVA, R. M. *Protocolo de Controle de Acesso ao Meio com Transferência Confiável para Redes de Comunicação Submarinas*. 2011.
- [2] Census of Marine Life. *Doppler Effect*. Disponível em: <<http://www.gulfofmaine-census.org/education/research-technology/acoustical-instruments/doppler-based-velocimeters/>>.
- [3] PARISH, N.; TRACY, L.; ARABSHAHI, R. S. System Design Considerations for Undersea Networks: Link and Multiple Access Protocols. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, 2008.
- [4] KONG, J.; GERLA, M.; ZHOU, S. *The Challenges of Building Scalable Mobile Underwater Wireless Sensor Networks for Aquatic Applications*. 2006.
- [5] JORNET, J.; STOJANOVIC, M.; ZORZI, M. *Focused Beam Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks*. 2008.
- [6] JINMING, C.; XIAOBING, W.; GUIHAI, C. *REBAR: A Reliable and Energy Balanced Routing Protocol for UWSNs*. 2008.
- [7] YAN, H.; SHI, Z. J.; CUI, J.-H. DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks. *A. Das et al. (Eds.): NETWORKING 2008.*, v. 4982, p. 72–86, 2008.
- [8] WAHID, A.; KIM, D. An energy efficient localization-free routing protocol for underwater wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2012, 2012.
- [9] SUN, N.; HAN, G.; WU, T. A reliable and energy efficient vbf-improved cross-layer protocol for underwater acoustic sensor networks. 2017.
- [10] N, J.; F, A.; Z, W. Two hop adaptive vector based quality forwarding for void hole avoidance in underwater wsns. *Sensors*, 2017.
- [11] XIE, P.; ZHOU, Z.; NICOLAOU, N. *Efficient Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks*. 2010.
- [12] MARTIN, R. *AquaSim NG - Next Generation*. Disponível em: <<https://github.com/rmartin5/aqua-sim-ng>>.

- [13] LINKQUEST. *UWM1000*. Disponível em: <<http://www.linkquest.com/html/uwm1000.htm>>.
- [14] ZAÏBI, G.; NASRI, N.; KACHOURI, A. Survey of temperature variation effect on underwater acoustic wireless transmission. *5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*, v. 2009, 2009.
- [15] XIE, P.; ZHOU, Z.; NICOLAOU, N. *Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks*.
- [16] CHEN, Y.; JI, F.; GUAN, Q. a new mac based on rtt prediction for underwater acoustic networks.
- [17] URICK, R. J. *Principles of Underwater Sound, 3rd Edition*. [S.l.: s.n.], 1983.
- [18] PORTER, M. B.; BUCKER, H. P. *Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields*. 1987.
- [19] PORTER, M. *Ocean Acoustic Library Toolbox*. Disponível em: <<http://oalib.hlsresearch.com/Modes/AcousticsToolbox/>>.
- [20] WEI, L. *Information Carrying Based Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Network*. 2007.
- [21] HAN, G.; BAO, N.; LIU, L. Routing protocols in underwater acoustic sensor networks: A quantitative comparison. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2015, 2015.
- [22] Vários Autores. *ns-3 - Network Simulator 3*. Disponível em: <<http://www.nsnam.org/>>.