

## PROJETO DE REDES HIERÁRQUICAS VIA SUAVIZAÇÃO HIPERBÓLICA

Gentil Veloso Barbosa

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Adilson Elias Xavier  
Helder Manoel Venceslau

Rio de Janeiro  
Outubro de 2015

# PROJETO DE REDES HIERÁRQUICAS VIA SUAVIZAÇÃO HIPERBÓLICA

Gentil Veloso Barbosa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Adilson Elias Xavier, D.Sc.

---

Prof. Artur Alves Pessoa, D.Sc.

---

Prof. Edmundo de Souza e Silva, Ph.D.

---

Prof. Geraldo Bonorino Xexéo, D.Sc.

---

Prof. Helder Manoel Venceslau, D.Sc.

---

Prof. Patrick Letouzé Moreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2015

Barbosa, Gentil Veloso

Projeto de Redes Hierárquicas via Suavização Hiperbólica/Gentil Veloso Barbosa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XI, 83 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Adilson Elias Xavier

Helder Manoel Venceslau

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 77 – 83.

1. Suavização Hiperbólica. 2. Agrupamento.
3. Minimização. I. Xavier, Adilson Elias *et al.*
- II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*Em memória de minha mãe,  
Josina Veloso Barbosa.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus pela proteção durante toda a minha vida.

Agradeço aos meus pais João Pedro Veloso Barbosa e Josina Veloso Barbosa, pelo carinho, o amor e os exemplos de caráter, honestidade e respeito ao próximo.

Minha gratidão aos meus irmãos Deusdete, Mercês, João José, Oscar, Maria do Amparo e Raimundo pelo incentivo e apoio irrestrito ao longo da minha vida.

Agradeço a minha esposa, Iara Núbia Felix de Sousa, pelo companheirismo e dedicação aos meus filhos e a mim.

Aos meus filhos João Pedro e Maria Clara, por serem fontes inspiradoras.

Agradeço a meu orientador, Adilson Elias Xavier, pelas orientações necessárias à realização deste trabalho. Em especial, por acreditar no desenvolvimento sustentável de nosso país.

Agradeço ao amigo Patrick Letouzé, pelo apoio e as colaborações ao longo desse processo de qualificação profissional. Meu reconhecimento ao professor Helder Venceslau pelas colaborações fundamentais ao fechamento da tese.

A todos os meus sobrinhos, em especial a Cláudia Veloso, pela motivação durante realização deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente com essa tese, em especial ao Guilherme, Marcelo Lins, Guty, George Lauro, David, Paulo Alexandre e Paulo Cléber. Agradeço aos meus sogros José Francisco e Lindamar, pelo apoio e companheirismo. Meu reconhecimento as cunhadas e aos cunhados.

Agradeço ao PESC por colaborar na minha qualificação profissional, em especial aos professores Geraldo Xexéo e Nelson Maculan, por acreditarem no desenvolvimento tecnológico da região Norte. Meu reconhecimento ao LAND por acreditar no projeto de melhoria da qualidade de ensino no Tocantins, em especial aos professores Edmundo e Daniel. Minha gratidão a todos os professores que tive ao longo da vida. Cada ensinamento foi necessário e fundamental.

Agradeço a CAPES por financiar parte deste estudo e a Universidade Federal do Tocantins por viabilizar a minha liberação para doutoramento.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com este trabalho. Meu reconhecimento aos amigos de infância, adolescência e juventude, especialmente, aqueles ligados a educação e ao esporte.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## PROJETO DE REDES HIERÁRQUICAS VIA SUAVIZAÇÃO HIPERBÓLICA

Gentil Veloso Barbosa

Outubro/2015

Orientadores: Adilson Elias Xavier

Helder Manoel Venceslau

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Nesta tese é proposto um método de otimização contínua para a concepção de projetos de redes hierárquicas, com aplicação em redes subaquáticas de águas rasas. A topologia da rede é definida através do posicionamento de concentradores e uma estação base para um conjunto de coletores fixos, definidos num plano euclidiano bidimensional. O projeto ótimo é definido como aquele que minimiza a função de custo como a soma das distâncias dos coletores a seu concentrador mais próximo, mais o custo adicional de otimização do posicionamento da estação base. A metodologia adotada é a Suavização Hiperbólica, usada com bastante sucesso na resolução do problema de agrupamento e cobertura, segundo diversos critérios, em particular o método dos mínimos quadrados. A especificação do problema corresponde a uma formulação baseada no critério de minimização da soma de distâncias, que é não diferenciável e que pertence à classe de problemas NP-completo.

A modelagem do problema usando uma região planar é aceitável devido às características de águas rasas. O processo de minimização da distância entre os nós pode ser usado como uma técnica para posicionamento de concentradores, que é uma aproximação para o problema de economia de energia em redes subaquáticas de águas rasas.

O método proposto foi testado com alguns experimentos computacionais e os resultados confirmaram a robustez e a precisão da completa diferenciabilidade da abordagem.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## DESIGN OF HIERARCHICAL NETWORKS BY HYPERBOLIC SMOOTHING

Gentil Veloso Barbosa

October/2015

Advisors: Adilson Elias Xavier

Helder Manoel Venceslau

Department: Systems Engineering and Computer Science

This thesis proposes a method of continuous optimization for the conception of hierarchical network designs, with application on shallow water acoustic networks. The network's topology is defined by positioning the concentrators and a base station for a set of fixed collectors, defined in a Euclidean bidimensional space. The optimum design will be the one that minimizes the cost function as the sum of distances of the collectors to their nearest concentrator, plus the additional cost of positioning the base station. The proposed solution uses a hyperbolic smoothing approach. This has been successfully used in solving problems regarding grouping and coverage, in accordance with various criteria, particularly the Method of Least Squares.

The specification of the problem is a formula based on the minimization criterion of the sum of distances, which is non-differentiable and belongs to the NP-complete problems class. Modeling of the problem using a planar region is acceptable due to the particulars of shallow waters. The process of minimizing the distance between the nodes can be used as a technique for the positioning of concentrators, which is an approach to the problem of energy saving in shallow water acoustic networks. The proposed approach has been tested using computer experiments and the results confirm its robustness and accuracy.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais . . . . .	1
1.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	5
1.2.1 Correlação Entre os Trabalhos . . . . .	8
1.3 Contribuições . . . . .	9
1.4 Estrutura da tese . . . . .	10
<b>2 Modelos de Redes</b>	<b>11</b>
2.1 Redes Hierárquicas . . . . .	11
2.2 Formulação de Rede segundo o Custo Mínimo . . . . .	14
2.3 Formulação de Rede segundo a Minimização da Maior Distância . . . . .	15
2.4 Redes Hierárquicas com Capacidades nos Enlaces . . . . .	17
2.5 Exemplo de Redes Hierárquicas . . . . .	19
<b>3 Redes Subaquáticas</b>	<b>22</b>
3.1 Aplicações . . . . .	22
3.2 Desafios de Projetos . . . . .	23
3.3 Arquiteturas de Redes Subaquáticas . . . . .	24
3.3.1 Rede Bidimensional Estacionária . . . . .	25
3.3.2 Rede Tridimensional Estacionária . . . . .	26
3.3.3 Rede Híbrida . . . . .	27
3.4 Canal de Comunicação Acústico . . . . .	28
3.5 Consumo de Energia . . . . .	30
<b>4 Projeto de Redes Hierárquicas</b>	<b>35</b>
4.1 Topologia da Rede . . . . .	35
4.2 Formulação do Problema de Minimização de Distâncias . . . . .	40
4.3 Suavizando o Problema . . . . .	41

4.4	Processo de Otimização . . . . .	46
4.5	Descrição do Algoritmo . . . . .	46
4.6	Formulação do Problema em Termos de Energia . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>53</b>
5.1	Análise Comparativa de Resultados . . . . .	55
5.2	Experimentos de Pequeno Porte . . . . .	61
5.3	Experimentos de Médio Porte . . . . .	68
5.4	Experimentos de Grande Porte . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>75</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>77</b>

# **Lista de Figuras**

2.1	Rede hierárquica em estrela . . . . .	12
2.2	Roteamento em rede hierárquica em estrela . . . . .	13
2.3	Rede hierárquica em estrela de dois níveis . . . . .	13
2.4	Rede hierárquica com capacidade nos enlaces . . . . .	18
2.5	Roteamento em redes hierárquicas com capacidade nos enlaces . . . . .	19
3.1	Rede subaquática de 2D estacionária . . . . .	25
3.2	Rede subaquática de 3D estacionária . . . . .	27
3.3	Rede hibrida. . . . .	28
3.4	Gráfico da função de Energia . . . . .	34
4.1	Rede subaquática bidimensional hierárquica . . . . .	36
4.2	Primeira fase: definição das redes de acessos . . . . .	37
4.3	Segunda fase: definição da rede entre concentradores . . . . .	38
4.4	Efeito de suavização hiperbólica na concepção de redes hieráquicas. .	39
4.5	Representação conceitual do método otimização . . . . .	39
4.6	Representação dos três primeiros termos da equação 4.7 . . . . .	42
4.7	Representação original e suavizada dos três primeiros termos de 4.7 .	43
4.8	Gráfico de interpolação linear entre as formulações energia e distância	51
5.1	Custos totais médios produzidos por 6 métodos de otimização . . . . .	58
5.2	Custos totais produzidos por 4 métodos de otimização . . . . .	59
5.3	Soluções gráficas para as redes com 51 coletores . . . . .	60
5.4	Soluções gráficas para as redes com 100 coletores . . . . .	65
5.5	Soluções gráficas para as redes com 200 coletores . . . . .	66
5.6	Soluções gráficas para as redes com 400 coletores . . . . .	67
5.7	Resultados para as redes com 1002 coletores . . . . .	70
5.8	Resultados para as redes com 3038 coletores . . . . .	71

# **Lista de Tabelas**

3.1	Largura de banda disponível para diferentes abrangências . . . . .	30
3.2	Taxa de dados disponível para a técnica de modulação DPSK . . . . .	30
5.1	Melhores soluções para o problema teste <i>Waters51</i> . . . . .	56
5.2	Processo iterativo para o problema <i>Waters51</i> com 10 concentradores	56
5.3	Melhores soluções produzidas por 6 métodos de otimização . . . . .	57
5.4	Custos totais produzidos por 4 métodos de otimização . . . . .	58
5.5	Melhores soluções para 100 coletores em 100 tentativas . . . . .	62
5.6	Melhores soluções para 200 coletores em 100 tentativas . . . . .	62
5.7	Melhores soluções para 400 coletores em 100 tentativas . . . . .	62
5.8	Valores de cada iteração numa rede com 100 coletores . . . . .	63
5.9	Valores de cada iteração numa rede com 200 coletores . . . . .	63
5.10	Valores de cada iteração numa rede com 400 coletores . . . . .	64
5.11	Melhores soluções para 1002 coletores em 100 tentativas . . . . .	68
5.12	Melhores soluções para 3038 coletores em 100 tentativas . . . . .	68
5.13	Valores de cada iteração numa rede com 1002 coletores . . . . .	69
5.14	Valores de cada iteração numa rede com 3038 coletores . . . . .	69
5.15	Melhores soluções para 33810 coletores em 100 tentativas . . . . .	72
5.16	Melhores soluções para 85900 coletores em 100 tentativas . . . . .	72
5.17	Valores de cada iteração numa rede com 33810 coletores . . . . .	73
5.18	Valores de cada iteração numa rede com 85900 coletores . . . . .	73

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

Redes hierárquicas baseadas em centro de distribuição, comutação ou simplesmente concentradores tiveram sua origem na indústria de telecomunicações, em situações em que várias estações de origem e destino enviam e recebem algum tipo de informação. A característica fundamental dessas redes é rotear informações através de um subconjunto específico de enlaces, ao invés de realizar o envio individual de cada informação usando um enlace direto desde a origem até o seu destino. Em particular, essas redes usam um conjunto de concentradores para consolidar e rotear os fluxos e um reduzido número de enlaces são adotados para conectar o conjunto de estações, visando economia de escala [1, 2]. Os sistemas de logística, transporte aéreo e empresas de serviços postais são uns dos principais usuários desse conceito. Atualmente, existem muitas outras áreas que podem se beneficiar desse modelo de rede, como a indústria marítima, as companhias de transporte de carga, transporte público e redes de entrega de mensagens [3].

Vários modelos matemáticos para projetos de redes baseadas em concentradores têm sido propostos na literatura, conforme levantamento recente realizado por Farahani e Hekmatfar em [3]. Para o propósito desta tese e sem perda de generalidade, serão discutidos somente aqueles que evidenciam particularidades apropriadas à concepção de redes hierárquicas em estrela. Nesse tipo de rede cada estação é conectada a um dos concentradores de acessos e estes são interligados diretamente ao concentrador central [1, 4–7].

Assim, a abordagem será concentrada na concepção de projetos de redes hierárquicas em estrela com aplicação em redes acústicas subaquáticas. Estas redes são projetadas para aplicações voltadas à coleta de dados subaquáticos, monitoramento de poluição, exploração da costa marítima, prevenção de desastres, navegação assistida e aplicações de vigilância especializada [8–13].

A abordagem tradicional usada para o monitoramento subaquático é feita de maneira estática, usando sensores subaquáticos para registrar dados durante a missão de monitoramento, e em seguida recuperar os instrumentos de coleta [8, 9]. Nessa abordagem, os dados obtidos só podem ser disponibilizados após a recuperação dos sensores, o que pode acontecer após vários meses. Ela não permite realizar ajustes adaptativos dos instrumentos e nem reconfigurar o sistema depois da ocorrência de determinados eventos. Configurações inadequadas ou ocorrências de falhas só podem ser detectadas após a recuperação dos instrumentos. Além disso, a quantidade de dados registrados durante uma atividade de monitoramento é limitada à capacidade de armazenamento do disco rígido e à memória de cada sensor.

De acordo com as características do ambiente subaquático a ser monitorado, os especialistas determinam a quantidade e a localização dos sensores também chamados de coletores, tanto para supervisão do ambiente quanto para geração de modelos biológicos e de ecossistemas. Contudo, a quantidade e localização de concentradores para esses coletores são uma questão a determinar.

Assim, a otimização de concentradores em termos de localização e de quantidade impacta tanto nos custos de implantação quanto nos custos de manutenção do sistema de monitoramento subaquático. Para exemplificar, considere-se uma bacia hidrográfica que tenha coletores fluviais ancorados, concentradores flutuantes ancorados e uma estação base terrestre. Busca-se, então, reduzir o número de concentradores não apenas pelo seu custo de aquisição e implantação, mas especificamente pelo custo de manutenção. O trabalho de Ribeiro em [14] apresenta um estudo bastante detalhado sobre o custo de implantação e operação para um sistema de monitoramento subaquático real. O autor considera uma estimativa de custos e tempo referentes às manutenções dos modems acústicos e sensores na infraestrutura submarina. Ribeiro [14] considera, entre outros aspectos, os custos de contratação dos serviços especializados para manutenção da rede em diferentes profundidades do oceano. Assim, existe uma necessidade de desenvolver algoritmos voltados à topologia de redes subaquáticas destinadas ao monitoramento em tempo real de áreas selecionadas do oceano, configuração remota e interação com operadores humanos em terra.

Topologia de redes subaquáticas é um tema de pesquisa em aberto e vem sendo discutido por vários autores [8, 15, 16], que as classificam em estacionária bidimensional, estacionária tridimensional e híbridas. Em redes de duas dimensões estáticas, os coletores são organizados em grupos e são interconectados através de enlaces acústicos a concentradores, que são responsáveis pela retransmissão de dados da rede subaquática para uma estação que fica localizada na superfície. Em redes subaquáticas de três dimensões estáticas, os coletores flutuam em diferentes profundidades de maneira a observar um determinado fenômeno. Uma maneira de

implementar é conectar cada sensor a uma bóia de superfície, usando fios, cujo comprimento possa ser regulado de maneira a ajustar a profundidade de cada sensor. Finalmente, as redes híbridas consistem num conjunto de coletores estáticos que atuam conjuntamente com alguns coletores móveis, tais como veículos subaquáticos autônomos, veículos controlados remotamente ou qualquer outro tipo de veículo que navegue em ambiente aquático.

Uma questão importante é o problema de otimizar a implantação de concentradores na superfície da água. Esse é um problema NP-completo, intimamente relacionado com o problema de localização de fábricas, conhecido como Problema Fermat-Weber, e com o problema de localização de depósitos [2, 3, 17]. Recentemente, uma abordagem heurística para este problema foi proposto por Ibrahim *et al.* em [17]. Nesse tipo de rede, cada sensor pode monitorar e detectar eventos ambientais localmente e transmitir os dados através da rede para um concentrador de superfície, que se encarrega de avançá-los para a estação base. Em vez de usar longos caminhos para alcançar o concentrador de superfície, numa rede com vários concentradores, os coletores podem enviar os dados para o concentrador mais próximo. Um concentrador de superfície usa ondas de rádio para enviar os dados para a estação base. Considerando que a propagação de ondas eletromagnéticas é algumas ordem de grandeza mais rápida do que a propagação de sinais acústicos, é seguro assumir que concentradores de superfície podem enviar dados em tempos insignificantes e com consumo de energia relativamente pequeno, já que a comunicação acústica consome mais energia do que a comunicação de rádio. Desta forma, os concentradores de superfície constituem uma rede virtual.

Apesar de os ambientes subaquáticos reais serem tridimensionais, por razões de simplificação, frequentemente são tratados como bidimensionais [17–21]. A validade dessa abordagem é compreensível quando observa-se que o método proposto pode ser aplicado diretamente no contexto de águas rasas, como em Ibrahim *et al.* em [17] e [18] no qual os concentradores e a estação base são localizados no nível da superfície da água.

Um exemplo de rede que implementa tal modelo é o Sistema de Observação das Condições Ambientais do Rio Hudson (HRECOS), composto de estações meteorológicas e de qualidade da água [22]. Esse sistema é gerenciado por um consórcio de instituições parceiras do governo e comunidade de pesquisa para disponibilizar alta frequência de dados em tempo real, distribuído geograficamente nos principais rios da bacia hidrográfica do rio Hudson em Nova Iorque [23–26]. A rede de estações registra a qualidade da água e os dados meteorológicos uma vez a cada quinze minutos, os coletores são instalados a pelo menos 0,5 metro de profundidade do rio e todas as estações são alimentadas por painel solar com uma bateria marítima secundária. Assim, a arquitetura da rede HRECOS é definida por três elementos: (1)

coletores que são conectados às (2) estações meteorológicas e de qualidade de água, e o (3) coordenador, respectivamente, coletores, concentradores e estação base.

A importância de otimizar a topologia da rede para sistemas de monitoramento de bacias hidrográficas é mais evidente para o contexto de países em desenvolvimento. Neste caso, o orçamento pode ser restritivo e minimizar o número de estações é um requisito fundamental. Por exemplo, a Agência Nacional de Águas (ANA) é responsável pela coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional, composta de 4.633 estações pluviométricas e fluviométricas, onde se monitoram o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas. Tal rede monitora 2.176 dos 12.978 rios cadastrados no Sistema de Informações Hidrológicas da ANA [27, 28]. Assim, nesta tese é proposto um método que não apenas minimize o número de concentradores, mas também determine o posicionamento ideal para os concentradores e a estação base, diminuindo a distância entre os elementos de comunicação da rede.

No contexto de águas profundas, destaca-se a agência de pesquisas dos Estados Unidos, *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), voltada ao desenvolvimento de métodos e ferramentas para reduzir o risco de *tsunami* e para proteger a vida [12, 29–34]. Inserido no plano estratégico (2008–2017) da NOAA, o *Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis* (DART) é um sistema para monitoramento de *tsunami* em tempo real, composto por coletores de pressão ancorados no fundo no oceano e bóias de superfície ancoradas, ambos posicionados em locais estratégicos ao longo do oceano [35, 36]. Um enlace acústico é usado para transmitir dados dos coletores para as bóias de superfície. Os dados são retransmitidos através de um enlace de satélite para estações terrestres, para divulgação imediata pelos centros de alertas de *tsunamis* da agência NOAA e do *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL). Os dados de monitoramento do sistema DART estão disponíveis na *web* no seguinte endereço: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>.

Outro problema fundamental a ser resolvido em projetos de redes subaquáticas é o consumo de energia [8, 9, 37–41]. A razão é a enorme atenuação no meio subaquático. Consequentemente, radiofrequência não é recomendada como sinal de transmissão e a maioria das tecnologias de transmissão empregadas para comunicação subaquática é baseada em acústica. Esta forma de comunicação requer maior potência de transmissão do que as redes sem fio terrestres geralmente adotam [42]. Ou seja, a razão para minimizar o consumo de energia da rede de coletores subaquáticos é prolongar o tempo de vida da rede, e uma forma de conseguir isso é estender a vida útil das baterias [19]. Na realidade, aumentar o tempo de vida útil da rede é reduzir a frequência de manutenção dos coletores. Isso implica diretamente na redução do custo de manutenção da rede.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

O trabalho de Labbé e Yaman em [4] formulam o problema de projetar redes hier  quicas em estrela, usando programaci  o inteira e resolvem com métodos heurísticos. Os autores adotam um custo associado    localiza  o dos concentradores em pontos específicos da grade e um custo associado    atribui  o de uma estaci  o a um determinado concentrador. Por último, um custo referente ao roteamento do tráfego nos enlaces definidos entre os concentradores de acessos e o central.

O trabalho de Yaman e Elloumi em [5] considera o problema de projetar uma rede de telecomunica  es de dois níveis, usando a distância como parâmetro para otimizar a qualidade de serviço. Um conjunto de usuários ou estaci  es de trabalho deseja comunicar-se com todas as estaci  es da rede. Um concentrador central fixo    dado e  $p$  concentradores adicionais devem ser escolhidos entre os usuários. Assim, cada concentrador    conectado por enlaces diretos ao concentrador central e cada estaci  o de trabalho    conectada diretamente a exatamente um concentrador. A rede hier  quica resultante    uma estrela de dois níveis, onde a rede que conecta os concentradores de acessos ao concentrador central, denominada de *backbone*,    uma estrela e cada uma das redes que conectam as estaci  es a um concentrador, denominado rede de acesso,    uma estrela. O objetivo    encontrar a localiza  o dos concentradores e alocar as estaci  es de tal forma que o caminho mais longo entre duas estaci  es da rede resultante tem que possuir o menor valor possível. Em outras palavras, a finalidade    minimizar o comprimento máximo do caminho conectando qualquer par de estaci  es distintas. Numa segunda abordagem, o trabalho de Yaman e Elloumi em [5] incorpora o custo de roteamento na concep  o do projeto. O objetivo    definir uma rede, tal que o custo total de roteamento na rede seja mínimo e o comprimento do caminho conectando qualquer par de estaci  es distintas não exceda um valor preestabelecido. Isso resulta em uma soluço com um determinado nível de qualidade de serviço e custo mínimo.

O trabalho de Yaman em [6] aborda o problema de encontrar os locais dos concentradores de maneira a minimizar o custo de instala  o de enlaces, que surge em projetos de redes hier  quicas em estrela. O custo de instala  o dos enlaces    dado por unidade de distância. J  o o custo de atribuir uma estaci  o a um concentrador    dado pela rela  o entre a quantidade de tráfego roteado entre duas estaci  es e a capacidade do enlace em fun  o da distância entre elas.

O trabalho de Contreras *et al.* em [1] discute a situa  o em que um conjunto de concentradores devem ser localizados em uma rede, representada por uma \'rvore não dirigida. Assim, cada v  rtice comum deve ser conectado a um concentrador e todo o fluxo entre os n  os deve usar essas conexões para serem transferidos. Existe um custo por unidade de transporte associado a cada aresta. A fun  o objetivo visa

minimizar o custo de operação do sistema.

Em Rodriguez-Martin *et al.* [7] é discutido o problema de determinar as rotas e os concentradores a serem utilizados, a fim de enviar, a um custo mínimo, um conjunto de mercadorias de origem a destinos em uma rede com determinada capacidade. Os custos e as capacidades dos enlaces e concentradores são dados. O *backbone* da rede não é completamente conectado.

O trabalho de Jia *et al.* em [43] enfatiza o uso de otimização baseada em algoritmos de agrupamento para determinar uma árvore *multicast* hierárquica. Esse problema foi formulado como um problema de otimização irrestrito adotando uma função objetivo não suavizada, não convexa. Para simplificar essa discussão, Jia *et al.* em [43] considera apenas uma estrutura hierárquica de dois níveis para a árvore *multicast* e só considera as posições geográficas das estações: todas as estações são igualmente ponderadas e a distância percorrida pela árvore é o custo total da topologia da rede. Nesse mesmo sentido, Kratica *et al.* em [44] discute o problema de posicionamento de concentradores para enlaces ponderados, que é uma variante do problema de posicionamento clássico.

O trabalho de Ibrahim *et al.* em [17] apresenta uma formulação para o problema de posicionamento de concentradores na superfície da água usando programação inteira e resolve usando métodos heurísticos. Neste modelo os nós do grafo representam os coletores subaquáticos e as posições dos concentradores de superfície candidatos. O problema é escolher um subconjunto de concentradores de superfície candidatos, satisfazendo um conjunto de restrições relacionado a conservação do fluxo, interferência e restrições sobre o número de concentradores de superfície ou o desempenho da rede necessário. Ibrahim *et al.* em [17, 18] afirma que a seleção das posições candidatas é sofisticada o suficiente para ser considerada um problema separado e que deve ser avaliada em pesquisas futuras. Duas principais suposições de seu trabalho são que os coletores são estacionários ou suas posições relativas são fixas e que todos os transmissores acústicos são homogêneos e, portanto, a área de comunicação é constante para todos os nós. Portanto, nesta tese também assume-se que a rede é estacionária e que os transmissores acústicos são homogêneos.

Nesse mesmo sentido, Ibrahim *et al.* em [18] apresenta diretrizes para decidir a quantidade e as posições dos concentradores de superfície para uma rede de coletores subaquáticos, usando programação inteira e resolve com métodos heurísticos. O trabalho se concretiza em otimizar o custo de implantação, usando o mínimo de concentradores de superfície possível, visando reduzir atraso de propagação, consumo de energia, aumentar a tolerância a falhas ou uma combinação deles. O problema é formulado modelando o roteamento de pacotes dos coletores subaquáticos até os concentradores de superfície, considerando a capacidade do enlace e as restrições para conservação de fluxo. A profundidade dos coletores é arbitrariamente definida

a 100 metros, de modo que cada um deles, independentemente de sua localização horizontal, se encontre na área de comunicação de pelo menos um concentrador de superfície candidato, satisfazendo assim, o requisito de conectividade.

A estimativa de vida útil da bateria e sua otimização para redes de coletores subaquáticos foi apresentada em Jurdak *et al.*[45]. As estimativas dos autores foram realizadas em termos de quatro parâmetros independentes: distância, frequência, frequência de atualizações de dados e o número de nós no grupo. Os requisitos estabelecidos para uma rede de águas rasas foram que os coletores deveriam ser recuperados e limpos a cada 100 dias, aproximadamente. Eles observaram, em relação à topologia em níveis, que o maior tempo de vida da bateria foi alcançado com o método de distância entre nós variável em comparação aos métodos independentes de camada e atribuição de frequência. Além disso, para o mesmo tempo de duração da bateria o método de distância entre nós variável oferece melhor amostragem para granularidade fina quando comparado a outros métodos.

O trabalho de Domingo e Prior em [46] discutiu o consumo de energia em redes subaquáticas em ambientes de águas rasas e profundas, empregando o pior cenário para o tempo de vida útil da rede. Eles consideraram uma rede linear, onde  $N + 1$  elementos de comunicação são posicionados ao longo de um trajeto e a estação base fica localizada como o último elemento da rede. A distância entre os elementos é fixa e pacotes de  $K$  bits são transmitidos dos coletores para a estação base. Os autores avaliaram o consumo de energia total como uma função da distância entre os elementos da rede, usando comunicação direta do coletor com a estação base e retransmissão com múltiplos saltos.

Para águas rasas, a inclusão de coletores adicionais aumentou o consumo de energia, porque a distância é fixa e a estação base se torna mais distante na rede linear. Além disso, para um número fixo de coletores, quando a distância entre eles aumenta, o total de energia consumida na rede é maior, porque a potência de transmissão é relacionada com a distância. Não houve diferença significativa entre comunicação direta e retransmissão, pois em águas rasas a potência de transmissão é diretamente proporcional à distância entre os coletores. Os autores também avaliaram o consumo de energia usando um método de agrupamento, no qual os coletores são distribuídos em uma rede linear e coletores adjacentes são organizados em grupos. Um concentrador é selecionado a cada três coletores com exceção do vizinho da estação base, que encaminha seu pacote diretamente. Os coletores enviam os dados para o concentrador mais próximo e estes dados são encaminhados de concentrador a concentrador até alcançar a estação base. Eles observaram que, adotando o método de agrupamento, o consumo de energia é menor do que o método de retransmissão para o mesmo número de coletores, e o custo de energia aumenta quando a distância entre os coletores também aumenta. Além disso, a inclusão de elementos

adicionais aumenta o consumo de energia em ambos os casos, embora o método de agrupamento mostre sempre os melhores resultados.

Em águas profundas o consumo de energia é reduzido, usando o método de retransmissão em vez de acesso direto. Além disso, para uma distância fixa entre coletores, se o número de coletores aumenta, a energia total consumida é maior porque mais coletores estão distantes da estação base de superfície e a potência necessária para transmitir é proporcional ao quadrado da distância. Para o método de agrupamento, a energia total consumida é ligeiramente menor do que no método de retransmissão de pacotes para o mesmo número de coletores e o gasto de energia é aumentado com a distância entre os coletores. Além disso, a inclusão de coletores adicionais aumenta o consumo de energia em ambos os casos. Finalmente, ao comparar os resultados obtidos em ambientes de águas rasas com águas profundas, eles observaram que protocolos de roteamento baseados em agrupamento são mais eficientes em termos de consumo de energia e o desempenho é melhor em águas rasas.

### 1.2.1 Correlação Entre os Trabalhos

Os trabalhos de Labbé e Yaman em [4], Yaman e Elloumi em [5], Yaman em [6], Contreras *et al.* em [1], Rodriguez-Martin *et al.* [7] formulam o problema de projetar redes subaquáticas usando Programação Inteira e resolve com métodos heurísticos de maneira a discretizar a região em forma de grade. Este tipo de arquitetura impõe a restrição adicional desnecessária de localização dos concentradores nos pontos da grade. Além disso, os autores consideram que a posição do concentrador central são supostamente conhecida. Já o trabalho Jia *et al.* em [43] formula o problema de localização de concentradores de acessos e o central, usando uma abordagem de penalização e resolve através de otimização global.

No cenário de redes acústicas subaquáticas, os trabalhos de Ibrahim *et al.* em [17] [18], Jurdak *et al.* em [45] e Domingo e Prior em [46] discutem o consumo de energia em redes de águas rasas estacionárias, adotando métodos heurísticos de maneira a discretizar o espaço em estrutura de grade. Os autores demonstram que o consumo de energia é um problema de grande relevância em redes subaquáticas e altamente dependente da distância. Ibrahim *et al.* em [17, 18] destaca que o posicionamento de concentradores em redes subaquáticas é um problema fundamental e que deve ser avaliado em pesquisas futuras.

## 1.3 Contribuições

Neste trabalho foi proposto um método de otimização contínua para a concepção de projetos de redes hierárquicas em estrela, com aplicação em redes subaquáticas de águas rasas, usadas em monitoramento ambiental, tal como o HRECOS. A topologia da rede é modelada estabelecendo o posicionamento de concentradores e uma estação base para conjunto de coletores fixos, definidos num plano euclidiano de duas dimensões. O projeto ótimo é definido como aquele que minimiza a função de custo como a soma das distâncias dos coletores a seu concentrador mais próximo, mais o custo de otimização do posicionamento da estação base.

A metodologia adotada é a Suavização Hiperbólica, usada com bastante sucesso em [47–54] na resolução do problema de agrupamento e cobertura, segundo diversos critérios, em particular o da soma dos mínimos quadrados. A especificação do problema corresponde a uma formulação baseada no critério de minimização da soma de distâncias, que é não diferenciável e que pertence à classe de problemas NP-completo [55, 56]. Assim, deve-se deixar evidente que a aplicação de suavização hiperbólica na concepção de redes hierárquicas estrela não estar registrado na literatura, portanto, a tese apresenta o caráter de originalidade.

Destaca-se que esta tese é uma adaptação do trabalho proposto por Xavier [47], onde se resolve o problema de agrupamento em termos de minimização da distância para o primeiro nível da rede (soma das distâncias dos coletores a seu concentrador mais próximo). Assim, a principal contribuição acerca do problema de localização de concentrador, se refere a definição do concentrador central durante o processo de otimização, através da minimização das somas de distâncias entre os concentradores.

Do ponto de vista de resultados computacionais, deve-se acrescentar que a estabilidade numérica e o desempenho consistente da metodologia proposta foram plenamente exitosas. Essas afirmações são decorrentes do número expressivo de ocorrência da melhor solução, valores baixos do desvio médio em relação a melhor solução e os tempos de CPU muito pequenos evidenciados na solução de problemas de pequeno, médio e grande portes. Além disso, a robustez do método proposto foi evidenciada ao resolver o problema teste com 85900, que é exatamente 1.684,31 vezes maior do que o maior problema resolvido na literatura. Quando comparado com o único trabalho encontrado na literatura, observou-se que o método proposto apresenta os melhores resultados em termos de custo total exigido na concepção de redes hierárquicas em estrela.

A aplicação da metodologia de suavização hiperbólica em projetos de redes subaquáticas é uma contribuição inédita e revela-se uma técnica promissora ao problema de implantação de concentradores e estação base. Essa afirmação é reforçada por Ibrahim *et al.* em [17, 18], quando restringem a localização de concentradores em

pontos específicos da grade e afirmam que esse é um problema fundamental em redes acústicas subaquáticas e que deve ser avaliado em pesquisas futuras. Além disso, a minimização de distância em dois níveis é uma ferramenta adequada para situações onde pode ser complexo avaliar numericamente o consumo de energia, as capacidades dos enlaces, as potências de transmissões e as larguras de bandas requeridas para a topologia. Em particular, o consumo de energia é um problema de grande relevância em redes subaquáticas, e de acordo com Jurdak em [45] para bacias hidrográficas, a minimização da distância corresponde ao melhor método para reduzir o consumo de energia. Portanto, este trabalho colabora com esta constatação ao realizar um estudo por aproximação, onde observou-se que a minimização da distância indiretamente expressa economia de energia.

Outra contribuição do método proposto, em relação aos trabalhos sobre redes subaquáticas encontrados na literatura científica é que a estação base também atua como concentrador de acesso, permitindo a conexão de coletores. Isto impacta diretamente nos custos de implantação e manutenção da rede, conforme pode-se observar no estudo realizado por [14].

Finalmente, o método proposto nesta tese baseia-se em perturbações das posições dos concentradores, o que permite o seu deslocamento no plano durante o processo de minimização. Assim, é uma técnica promissora para lidar com a mobilidade devida a correntes de águas, ou pelos menos mais adequada do que a técnica de programação inteira adotada em [17, 18].

## 1.4 Estrutura da tese

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 2 discute o problema de localização de concentradores para a concepção de redes hierárquicas. O capítulo 3 apresenta uma discussão sobre aplicações, desafios e topologias de redes subaquáticas. Destaca-se a otimização de distâncias como uma maneira aproximada a redução do consumo de energia nesse tipo de rede. No capítulo 4 é apresentado o método proposto neste trabalho, que consiste num esquema para posicionamento de concentradores num espaço contínuo, usando a técnica de suavização hiperbólica. O resultado é uma rede subaquática bidimensional estacionária adequada a sistemas de monitoramento de bacias hidrográficas. Os resultados computacionais obtidos de uma primeira implementação do algoritmo são apresentados no capítulo 5. Finalmente no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Modelos de Redes

### 2.1 Redes Hierárquicas

O problema de projetar redes hierárquicas baseado em localização de concentradores tem sido investigado por diversos autores [2–5, 57]. Em geral, este problema é discutido considerando um conjunto de estações, um conjunto de possíveis locais para os concentradores de acessos e um conjunto de possíveis locais para os concentradores centrais. O número de concentradores de acessos e centrais a serem estabelecidos, a demanda de tráfego, o custo de roteamento entre pares de estações, os fatores de descontos devido à economia de escala também são fatores a serem observados. Na solução do problema têm-se a determinação dos locais dos concentradores de acessos e centrais, a atribuição das estações aos concentradores e atribuição dos concentradores de acessos aos centrais, que minimizem o custo total de roteamento da rede. Entretanto, nesse capítulo serão discutidos apenas trabalhos científicos que evidenciam particularidades apropriadas à concepção de redes hierárquicas em estrela, que é o problema fundamental resolvido na tese.

O trabalho de Labbe e Yaman em [4] aborda o problema de localização de concentradores como uma rede de telecomunicações com topologia hierárquica em estrela. Cada estação é conectada a um dos concentradores e estes são interligados diretamente ao concentrador central. Assim, a rede completa é conhecida como hierárquica em estrela, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

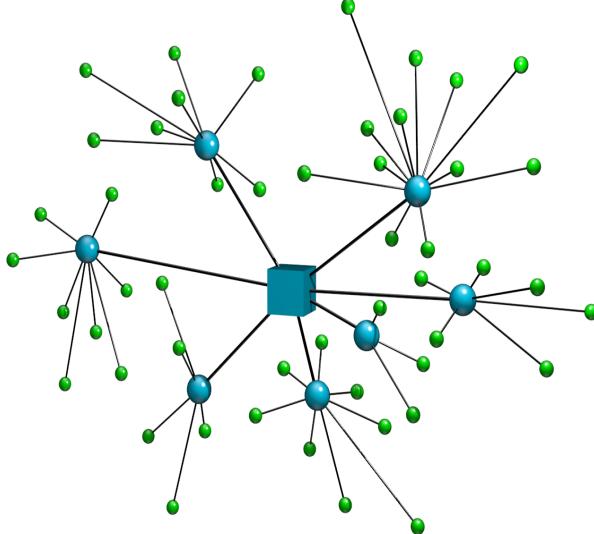


Figura 2.1: Rede hierárquica em estrela

Nessa rede qualquer par de estações pode se comunicar, usando os concentradores para rotear o tráfego entre elas. Existe um custo associado à localização de um concentrador e um custo associado à atribuição de uma estação a um determinado concentrador. Por último, um custo referente ao roteamento do tráfego dos enlaces definidos entre os concentradores e o concentrador central.

Dessa maneira, se as estações  $i$  e  $m$  estão conectadas ao mesmo concentrador  $j$ , o tráfego entre elas segue o caminho  $i \rightarrow j \rightarrow m$ . Assim, o tráfego não circula nos enlaces estabelecidos entre os concentradores e o concentrador central. No entanto, se a estação  $i$  está conectada ao concentrador  $j$  e a estação  $m$  está conectada concentrador  $l$ , então o tráfego entre elas segue o caminho  $i \rightarrow j \rightarrow 0 \rightarrow l \rightarrow m$ , onde 0 significa o concentrador central.

A Figura 2.2, apresenta uma rede com 10 estações, onde as estações 1, 2, 5 e 7 são definidas como concentradores. O tráfego entre a estação 3 e 10 segue o caminho  $3 \rightarrow 2 \rightarrow 0 \rightarrow 7 \rightarrow 10$ , visto que a estação 3 está conectada ao concentrador 2 e a estação 10 está conectada ao concentrador 7. O tráfego da estação 1 para a estação 6 segue o caminho  $1 \rightarrow 0 \rightarrow 5 \rightarrow 6$  e o tráfego da estação 8 para a estação 9 segue o caminho  $8 \rightarrow 7 \rightarrow 9$ . Portanto, o tráfego total no enlace entre o concentrador  $j$  e o concentrador central é a soma do tráfego entre as estações que estão conectadas a  $j$  e as demais estações da rede. O concentrador central é responsável pela comunicação entre as redes de acesso realizando roteamento de tráfego entre elas.

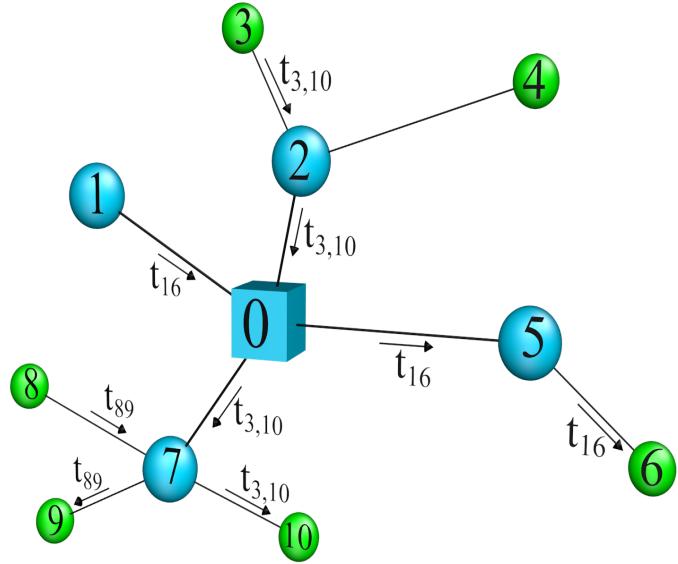


Figura 2.2: Roteamento em rede hierárquica em estrela

O problema consiste em localizar as posições dos concentradores e em estabelecer os enlaces às estações. O objetivo é minimizar o custo de localização, atribuição e roteamento. Esse modelo é apropriado para a concepção de redes de telecomunicações, nas quais a rede que conecta os concentradores, denominada de *backbone*, é uma estrela e as redes de acesso, que conectam as estações aos concentradores, também são estrelas.

Esse modelo também é apropriado para projetos de redes hierárquicas em estrela de dois níveis. Nesse problema as estações são conectadas a concentradores de acessos no primeiro nível e estes são conectados a concentradores centrais no segundo nível. Na Figura 2.3 os concentradores centrais são representados por quadrados e estão conectados ao *backbone* da rede, definido por uma estrutura física de dois anéis. Cada concentrador central possui uma rede de acesso de dois níveis.

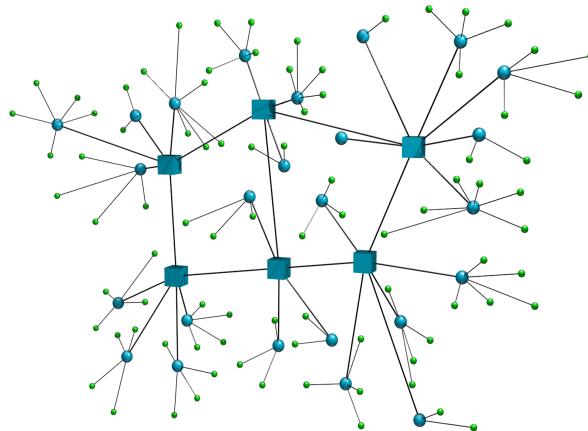


Figura 2.3: Rede hierárquica em estrela de dois níveis

Aplicações para esse modelo hierárquico também surgem em redes de transporte. Por exemplo, elas aparecem em aplicação de distribuição de cargas entre cidades. Algumas das cidades são definidas como concentradores e são responsáveis por atender as demais cidades. O tráfego originado na cidade é enviado ao concentrador ao qual está conectada. No concentrador, as cargas de diferentes origens são coletadas e ordenadas. Se o destino é atendido pelo mesmo concentrador, a carga é simplesmente roteada para o seu destino. Do contrário, o carregamento é transportado para um concentrador central e encaminhado para o concentrador que se encarrega de enviá-lo para a estação de destino. Os enlaces entre os concentradores de acessos e o concentrador central são atendidos por veículos de maior capacidade. Assim, o objetivo desse modelo hierárquico é minimizar o custo de instalação de concentradores e o custo de roteamento da carga na rede.

Segundo Labbe e Yaman em [4], o roteamento de informações entre estações de origem e destino depende da localização dos concentradores e da maneira que as estações são conectadas a eles. Numa rede hierárquica em estrela, quando os concentradores estão localizados e as estações conectadas através desses concentradores, existe um único caminho entre qualquer par de estações da rede.

## 2.2 Formulação de Rede segundo o Custo Mínimo

O trabalho de Labbe e Yaman em [4] demonstra matematicamente que o problema de projetar redes hierárquicas é NP-Completo e pode ser resolvido usando a formulação do problema de localização de concentrador. Os autores apresentam a seguinte notação:

Dado um conjunto de  $N$  estações e um conjunto de possíveis locais para  $M$  concentradores, localize os concentradores em um subconjunto de  $M$  e atribua cada estação de  $N$  a um concentrador de maneira a minimizar o custo de localização e atribuição. Considere  $F_j$  o custo de localizar uma estação como um concentrador  $j \in M$  e  $C_{ij}$  o custo de atribuir uma estação  $i$  ao concentrador  $j$ . Defina  $y_j$  igual a 1 se uma estação for localizada como concentrador  $j$  e 0 caso contrário.  $x_{ij}$  será 1 se a estação  $i$  estiver atribuída ao concentrador  $j$  e 0 caso contrário. Assim, o problema de projetar redes hierárquicas com atribuição simples pode ser formulado a partir da seguinte notação:

$$\text{minimizar} \sum_{j \in M} F_j y_j + \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} C_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\text{sujeito a} \sum_{j \in M} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in N, j \in M \quad (2.3)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in M. \quad (2.4)$$

As restrições 2.2, 2.3 e 2.4 estabelecem que cada uma das estações seja definida como um concentrador ou atribuída a exatamente um concentrador previamente definido na rede.

## 2.3 Formulação de Rede segundo a Minimização da Maior Distância

O trabalho de Yaman-2012 e Elloumi em [5] considera o problema de projetar uma rede de telecomunicações em dois níveis, usando a distância como parâmetro para otimizar a qualidade do serviço. Um conjunto de usuários ou estações de trabalho deseja se comunicar com todas as estações da rede. Nesse tipo de rede,  $p$  concentradores devem ser escolhidos entre os usuários e um deles fixado como concentrador central. Assim, cada concentrador é conectado por enlaces diretos ao concentrador central e cada estação de trabalho é conectada diretamente a exatamente um concentrador. A rede hierárquica resultante é uma estrela de dois níveis, onde a rede que conecta os concentradores de acessos ao concentrador central, denominada de *backbone*, é uma estrela e cada uma das redes que conectam as estações a um concentrador, denominado rede de acesso, é uma estrela.

O objetivo desse tipo de problema é encontrar a localização dos concentradores e alocar as estações de tal forma que o caminho mais longo entre quaisquer duas estações da rede resultante tenha o menor valor possível. Em outras palavras, a finalidade é minimizar o comprimento máximo do caminho conectando qualquer par de estações distintas.

Este problema consiste em localizar  $p$  concentradores e atribuir as estações a cada um deles, de modo que o comprimento máximo do caminho para todos os pares de estações seja minimizado. Para este propósito, Yaman e Elloumi em [5] estabelecem  $I$  como o conjunto de estações de demanda e 0 o concentrador central. Eles fizeram  $d_{ij}$  representar a distância da estação  $i$  a estação  $j$ . Assumiram que

$d_{ij} = d_{ji} \geq 0$  para todo  $i, j \in I \cup \{0\}$ , e que a desigualdade triangular é satisfeita, ou seja,  $d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik}$  para todo  $i, j, k \in I \cup \{0\}$ .

O autores definem também  $x_{ij}$  igual a 1 se a estação  $i$  for atribuída ao concentrador  $j$  e 0 em situação contrária. Se uma estação  $i$  é localizada como um concentrador, então a variável  $x_{ij}$  é definida com o valor 1. A variável  $\beta_{min}$  representa o comprimento do caminho mais longo entre pares origem e destino, na rede hierárquica em estrela resultante. Usando essas variáveis, o problema de projetar a rede hierárquica pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\text{minimizar} \quad \beta_{min} \quad (2.5)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{j \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.6)$$

$$\sum_{j \in I} x_{jj} = p \quad (2.7)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall ij \in I : i \neq j \quad (2.8)$$

$$(d_{ij} + d_{0j}) x_{ij} + (d_{0l} + d_{lm}) x_{ml} \leq \beta_{min} \quad \forall i, m, j \in I : i \leq m, j \neq l \quad (2.9)$$

$$d_{ij} x_{ij} + d_{mj} x_{mj} \leq \beta_{min} \quad \forall i, m, j \in I : i < m \quad (2.10)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I \quad (2.11)$$

As restrições 2.6 e 2.11 asseguram que cada estação seja conectada a exatamente um concentrador. O número de concentradores é igual a  $p$  devido à restrição 2.7. A restrição 2.8 garante que as estações só podem ser conectadas a concentradores.

Os autores assumem que todos os pares de estações precisam se comunicar. Desta maneira, se a estação  $i$  está conectada ao concentrador  $j$  e a estação  $m$  ao concentrador  $l$ , então o comprimento do caminho entre essas duas estações é igual a  $d_{ij} + d_{0j} + d_{0l} + d_{lm}$ . A restrição 2.9 mostra que  $\beta_{min}$  é pelo menos tão grande quanto o comprimento desse caminho. Se as estações  $i$  e  $m$  são conectadas no mesmo concentrador  $j$ , então o comprimento do caminho entre elas é igual a  $d_{ij} + d_{mj}$  e devido à restrição 2.10,  $\beta_{min}$  não pode ser menor do que o comprimento deste caminho. Para alcançar uma solução ótima através deste processo de minimização, o valor de  $\beta_{min}$  deve ser igual ao comprimento do maior caminho simples na rede estrela resultante. Os autores assumiram que a localização do concentrador central é conhecida *a priori*. Eles discutem a problemática de incorporação da localização do concentrador central neste modelo.

Numa segunda abordagem, o trabalho de Yaman e Elloumi [5] incorpora o custo de roteamento na concepção do projeto. O objetivo é definir uma rede, tal que

o custo total de roteamento seja mínimo e o comprimento do caminho conectando qualquer par de estações não exceda um valor preestabelecido. Esse modelo é equivalente ao problema projetar redes hierárquicas com custo total dado pela localização de concentradores e atribuição de estações. A diferença é a definição de limites nos comprimentos dos trajetos e também o custo de roteamento do tráfego entre os concentradores de acessos e o central é nulo.

## 2.4 Redes Hierárquicas com Capacidades nos Enlaces

O trabalho de Yaman em [6] aborda o problema de encontrar os locais dos concentradores de maneira a minimizar o custo de instalação de enlaces, que surge em projetos de redes hierárquicas em estrela. O custo de instalação dos enlaces é dado por unidade de distância. Já o custo de atribuir uma estação a um concentrador é definido pela relação entre a quantidade de tráfego roteado entre duas estações e a capacidade do enlace em função da distância entre elas.

A Figura 2.4 ilustra as características estruturais dessa rede. O concentrador 0 é o central e os concentradores de acessos são representados por 1, 2, 3 e 4. Cada estação encaminha uma unidade de tráfego para cada um dos elementos de comunicação da rede, incluindo o concentrador central. Como existem 15 elementos na rede, cada elemento se torna origem e destino de 14 unidades de tráfego. Portanto, o tráfego num enlace conectando uma estação a seu concentrador é de 14 unidades. Como nenhuma estação é conectada ao concentrador 1, o tráfego deste concentrador ao concentrador central é de 14 unidades. Portanto, o tráfego num enlace conectando uma estação a seu concentrador é de 14 unidades. A subrede do roteador 2 contém 6 elementos de comunicação, incluindo o próprio. Estrutura de rede iniciando no concentrador central contém 9 elementos de comunicação. Portanto, o concentrador 2 pode encaminhar  $6 \times 9 = 54$  unidades de tráfego para o concentrador central. A quantidade de tráfego em cada enlace é apresentada na Figura 2.5. As conexões devem ser estabelecidas na rede para permitir o roteamento do tráfego. A capacidade do enlace deve ser definida como um inteiro para permitir o roteamento de tráfego na rede. O problema reside em encontrar os locais dos concentradores e atribuir as suas respectivas estações. A finalidade é minimizar o custo de instalação do enlace, de uma maneira similar ao problema de localização de concentrador em redes hierárquicas em estrela, com enlace de capacidade modular.

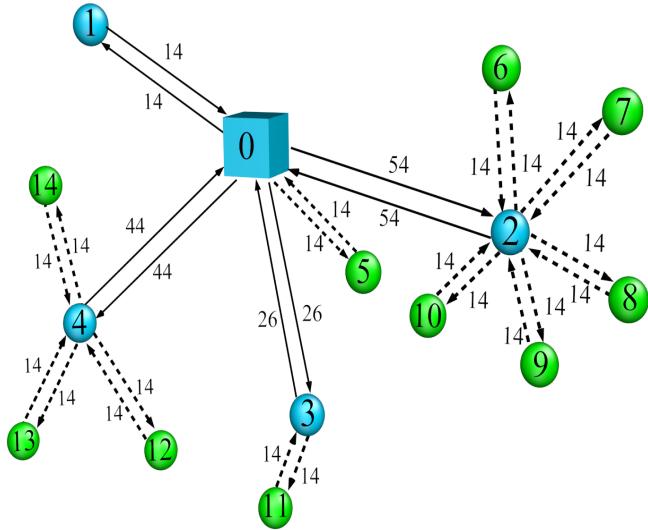


Figura 2.4: Rede hierárquica com capacidade nos enlaces

A Figura 2.5 apresenta o número de conexões a serem estabelecidas em cada enlace para permitir o funcionamento da rede ilustrada na Figura 2.4. Nesse cenário, é suposto que as capacidades dos enlaces entre os concentradores de acessos e o concentrador central seja 15. Já as capacidades dos enlaces entre as estações e os concentradores são definidas igual a 10. Como o tráfego no enlace conectando uma estação a seu concentrador é definido como 14, são necessárias duas conexões nesse enlace. Por outro lado, existe a necessidade de estabelecer apenas uma conexão do concentrador 1 ao concentrador central, pois o enlace tem capacidade igual a 15. O número de conexões a serem estabelecidas no enlace do concentrador 2 ao concentrador central é 4 para permitir o roteamento de 54 unidades de tráfego, pois cada elemento de comunicação pode enviar até 14 unidades de tráfego na rede.

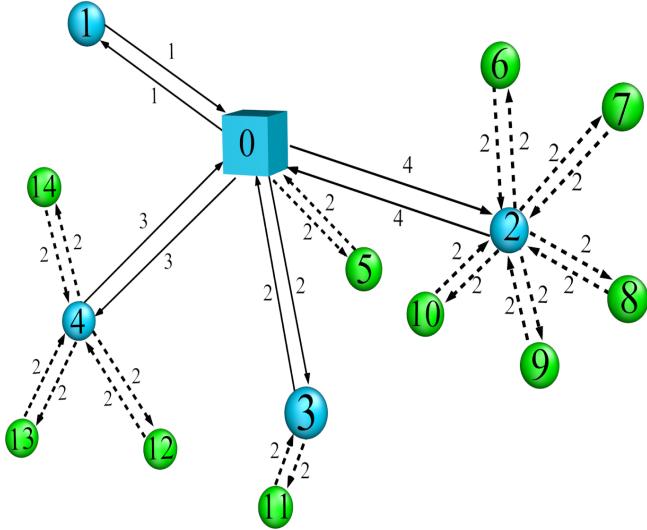


Figura 2.5: Roteamento em redes hierárquicas com capacidade nos enlaces

As discussões sobre o problema de projetar redes hierárquicas apresentadas até o momento, faz uso de Programação Inteira e resolve com métodos heuríticos discretizando a região em forma de grade. Entretanto, na próxima seção será apresentado o único trabalho encontrado na literatura com abordagem bastante similar ao método proposto nessa tese.

## 2.5 Exemplo de Redes Hierárquicas

Segundo Jia *et al.*[43], o objetivo principal do mecanismo de comunicação *multicast* é oferecer o serviço de comunicação entre grupos com requisitos de qualidade de serviço, reduzindo o custo de transferência de dados, isto é, diminuindo o número de cópias de dados enviados para um grupo. No entanto, dois problemas precisam ser resolvidos quando se implementa *multicast* sobre múltiplas redes. Um mecanismo de roteamento eficiente precisa ser desenvolvido e o custo de manutenção deve ser reduzido para suportar a escalabilidade e os serviços de *multicast*.

Uma das abordagens de roteamento *multicast* é tratar o problema como árvores Steiner ótima em grafos. A função de custo pode incorporar restrições de qualidade de serviço. O problema de árvore Steiner ótima foi demonstrado ser NP-difícil [43]. O aspecto central da arquitetura *multicast* é equacionar o problema de agrupamento hierárquico. O trabalho de Jia *et al.* [43] discute o uso de otimização baseada em algoritmos de agrupamento para resolver esse problema. Para simplificar essa discussão, os autores consideraram apenas uma estrutura hierárquica de dois níveis para a árvore *multicast*. Além disso, eles só consideraram a questão do posicionamento geográfico das estações. Todos as estações são igualmente ponderadas e a

distância percorrida pela árvore é o custo total da topologia da rede. A abordagem também permite considerar diferentes tipos de funções de custo.

Os autores consideraram que um conjunto  $A$  de  $m$  estações sobre um plano Euclidiano seja dado:  $A = \{a^1, \dots, a^m\}$ . Particiona-se  $A$  em um determinado número de  $k$  subconjuntos disjuntos  $A^i$ ,  $i = 1, \dots, k$ . Eles estabeleceram que a união de todos os grupos deve ser igual ao conjunto original, não devendo existir nenhuma estação pertencente a mais de um grupo e também não podendo existirem grupos vazios, conforme expressão a seguir:

$$\begin{aligned} A &= \bigcup_{i=1}^k A_i \\ A_i \bigcap A_j &= \emptyset, \quad \forall i, j \in A, \quad i \neq j \\ A_i &\neq \emptyset, \quad \forall i = \{1, \dots, k\}. \end{aligned} \tag{2.12}$$

A escolha do número de partições  $k$  é arbitrária, normalmente feita de acordo com o tamanho da rede e restrição de saltos (níveis hierárquicos). Pode-se considerar diferentes valores de  $k$  e escolher aquele que apresentar o melhor resultado. Em cada grupo define-se uma estação como concentrador  $x_i$  e todas as outras estações do grupo se conectam a esse concentrador. Além disso, deve-se escolher uma estação  $x_*$  como concentrador central. Todos os concentradores serão conectados a este concentrador central.

Jia *et al.* em [43] definiram um modelo matemático para determinação ótima da posição de todos os concentradores  $(x_1, \dots, x_k, x_*)$ . Neste modelo consideraram a minimização da distância dada por uma função de custo total da rede *multicast*. Os autores arbitraram como custo a soma das distâncias de cada estação a seu concentrador mais a soma das distâncias dos concentradores ao concentrador central.

Suponha que os grupos  $A^1, \dots, A^k$ , seus concentradores  $x_1, \dots, x_k$  e o concentrador central  $x_*$  sejam dados. Assim, o custo total  $C$  dessa árvore pode ser calculado da seguinte maneira:

$$C(A^1, \dots, A^k, x_1, \dots, x_k, x_*) = \sum_{i=1}^k \sum_{a \in A^i} \|a - x_i\| + \sum_{i=1}^k \|x_i - x_*\|. \tag{2.13}$$

onde  $a \in A^i$  representa o conjunto de estações pertencentes à partição  $i$ .

Na equação 2.13 acima, o primeiro termo corresponde ao custo dos enlaces entre as estações e seus respectivos concentradores. O segundo termo corresponde ao custo dos enlaces estabelecidos entre os concentradores e o concentrador central.

A meta é resolver o seguinte problema: encontrar grupos  $\bar{A}^i$ , seus concentradores  $\bar{x}_i$  e o concentrador central  $\bar{x}_*$  tal que

$$C(\bar{A}^1, \dots, \bar{A}^k, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k, \bar{x}_*) \leq C(A^1, \dots, A^k, x_1, \dots, x_k, x_*) . \quad (2.14)$$

para cada conjunto de grupos  $A^i$ , seus concentradores  $x_i$  e o concentrador central  $x_*$ .

Este é um problema de otimização global, ademais, essa formulação não é amigável para a aplicação direta de técnicas tradicionais de otimização que são baseadas na utilização de gradiente. Assim, os autores reformulam o problema para ser resolvido por métodos de otimização não suave ou não diferenciável. Na primeira abordagem, os autores assumem que o concentrador de um grupo não é necessariamente uma estação real, pode ser um ponto arbitrário no plano. O custo total da árvore depende apenas das posições dos concentradores que são dadas pela minimização da função de custo. Assim, substituíram em cada grupo o concentrador pela estação mais próxima. O concentrador central é substituído pela estação mais próxima das demais. Na segunda abordagem os concentradores são calculados diretamente do conjunto de dados  $A$ . Assim, computam-se os concentradores dos grupos e o concentrador central, como uma solução para o problema de otimização com a função objetivo a seguir:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \min_{1 \leq j \leq k} \|x^j - a^i\| + \tau_1 \sum_{j=1}^k \min_{1 \leq i \leq m} \|x^j - a^i\| + \tau_2 \min_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^k \|a^i - x^j\| \quad (2.15)$$

A função  $f$  consiste em três termos: o primeiro termo é uma função de agrupamento, o segundo termo apresenta uma penalização para obter os concentradores dos grupos a partir das estações do conjunto A e o terceiro termo é uma penalização para se obter o concentrador central também do conjunto A. Os parâmetros  $\tau_1, \tau_2 > 0$  são coeficientes de penalização.

# Capítulo 3

## Redes Subaquáticas

A denominação de redes acústicas subaquáticas é um termo genérico que descreve uma rede com diferentes elementos de comunicação, com transmissão acústica em ambiente aquático. A rede pode consistir de coletores subaquáticos, veículos autônomos subaquáticos, concentradores de superfície, tais como navios e estação base. Redes subaquáticas tradicionais são formadas por dois enlaces acústicos entre os elementos que compõem a rede. Dependendo da arquitetura implementada, esses enlaces podem alcançar longas distâncias, ou podem ter enlaces de curto alcance, semelhantes às redes de área local terrestre. O uso de redes subaquáticas fornece uma abordagem eficiente e econômica para monitoramento em diferentes profundidades do oceano ou em bacias hidrográficas.

Redes de coletores subaquáticos são projetadas para aplicações voltadas à coleta de dados oceanográficos, monitoramento de poluição, exploração da costa marítima, prevenção de desastres, navegação assistida e aplicações de vigilância especializada [8–13]. Também podem ser adotadas em aplicações que visam à exploração de recursos submarinos naturais e à coleta de dados científicos em projetos de monitoramento colaborativo [11, 58, 59].

### 3.1 Aplicações

Várias aplicações envolvendo redes subaquáticas são mencionadas na literatura [8, 9].

- redes de amostragem do oceano: permitem realizar amostragem sinóptica, visando melhorar a capacidade de observar e prever as características do ambiente oceânico.
- monitoramento ambiental: as redes subaquáticas permitem o monitoramento da poluição química, biológica e nuclear. Por exemplo, é possível detalhar a lama química, tipos de hormônios e inseticidas em córregos, rios, lagos e

baías do oceano. O monitoramento das correntes oceânicas e ventos oferece uma previsão de tempo mais precisa, detecção das mudanças climáticas, compreensão e previsão do efeito das atividades humanas sobre os ecossistemas marinhos, monitoramento biológico, tais como acompanhamento de peixes ou micro-organismos, são outras aplicações possíveis.

- explorações submarinas: redes de coletores subaquáticos podem contribuir na detecção de campos petrolíferos submarinos ou reservatórios, determinar rotas para posicionar cabos submarinos e auxiliar na exploração de minerais valiosos.
- prevenção de desastres: redes de coletores que medem atividades sísmicas de locais remotos podem fornecer alertas de *tsunami* para as zonas costeiras ou estudar os efeitos de terremotos submarinos (maremotos).
- navegação assistida: coletores podem ser usados para identificar os perigos no fundo do mar, localizar rochas ou bancos de areia em águas rasas, posições de ancoragens, destroços submersos e verificar o perfil da profundidade de córregos, lagos, rios ou mares.
- vigilância especializada distribuída: veículos autônomos e coletores subaquáticos fixos podem colaborativamente monitorar áreas de vigilância para realizar reconhecimento, localização e sistemas de detecção de intrusão. Por exemplo, uma rede de coletores subaquática em 3D, projetada para vigilância especializada, pode ser usada para detectar e classificar submarinos, pequenos veículos de entrega e mergulhadores com bases nos dados detectados de mecânica, radiação, microcoletores magnéticos e acústicos.
- reconhecimento de minas: a operação simultânea de vários veículos autônomos com coletores ópticos e acústicos pode ser usada para realizar avaliação ambiental rápida e detectar minas.

Consequentemente, existe uma necessidade de instalar redes subaquáticas para o monitoramento em tempo real de áreas selecionadas do ambiente marítimo, configuração remota e interação com operadores humanos em terra. Isto pode ser obtido através da interligação de instrumentos subaquáticos sem fio baseados em comunicação acústica.

## 3.2 Desafios de Projetos

Pesquisas recentes de Heidemann *et al.*[9], Pompili e Akyildiz[60] e Akyildiz *et al.*[8] enfatizam que os principais desafios a serem resolvidos em redes acústicas subaquáticas são os seguintes:

- consumo de energia: o tempo de vida da rede baseia-se na sobrevivência do número de coletores. Os coletores subaquáticos são limitados em termos de energia, geralmente bateria é usada como fonte de alimentação. Assim, é importante prolongar o tempo de vida com baixo consumo de energia, especialmente no monitoramento a longo prazo.
- custo: as aplicações subaquáticas, especialmente em alto mar, possuem atividades de monitoramento que podem ser dispendiosas devido ao alto custo dos dispositivos subaquáticos e às tarefas de implantação e manutenção.
- capacidade da rede: a largura de banda disponível em um canal acústico subaquático é severamente limitada.
- enlace de comunicação não confiável: o canal subaquático é severamente prejudicado, especialmente, em virtude de múltiplos caminhos e diminuição temporária de sinais radioelétricos em razão de variações das condições de propagação.
- cobertura: por causa da mobilidade, a arquitetura da rede é mais variável e complexa. O problema de cobertura é uma das questões mais importantes para aplicações sensíveis à cobertura. Como garantir a demanda de cobertura é outra questão que ser enfrentada.

Assim sendo, serão apresentados alguns tipos de arquiteturas para redes subaquáticas, bem como um modelo de consumo de energia para esse tipo de rede.

### 3.3 Arquiteturas de Redes Subaquáticas

A topologia de redes é em geral um aspecto determinante em relação ao consumo de energia, à capacidade e à confiabilidade de uma rede. Assim, a topologia da rede deve ser cuidadosamente projetada e a sua otimização após a implantação deve ser realizada, quando possível [8, 9].

As atividades de monitoramento subaquático podem ser extremamente caras devido ao custo elevado de dispositivos subaquáticos. Deste modo, é importante que a rede implantada seja altamente confiável, de maneira a evitar inoperância de monitoramento, devido a falhas de um ou mais dispositivos. Por exemplo, é determinante evitar desenvolver o projeto da topologia da rede com pontos de falhas isolados que possam comprometer o funcionamento global da rede.

A capacidade de comunicação da rede também é influenciada pela topologia, visto que o canal subaquático é severamente limitado. Portanto, é muito importante

organizar a topologia da rede de tal forma que nenhum gargalo de comunicação seja introduzido.

As arquiteturas de comunicação apresentadas neste trabalho são usadas como base para discussão sobre os desafios associados com as redes de coletores acústicos subaquáticos. A topologia de redes de coletores subaquáticos é uma questão de pesquisa em aberto, que necessita de investigação analítica e de simulação pela comunidade de pesquisa.

### 3.3.1 Rede Bidimensional Estacionária

Em arquitetura de duas dimensões, os coletores são organizados em grupos e são interconectados através de enlaces acústicos a concentradores, que são responsáveis pela retransmissão de dados da rede subaquática para uma estação que fica localizada na superfície [8, 15, 16], conforme pode ser observado na Figura 3.1.

Para alcançar esse objetivo, os concentradores são equipados com dois transmissores acústicos, um horizontal e outro vertical. O transmissor horizontal é usado pelo concentrador para se comunicar com os coletores da seguinte maneira: enviar comandos e dados de configuração; coletar dados monitorados. A estação na superfície é equipada com um transmissor acústico, que é capaz de manipular várias conexões em paralelo com os concentradores da rede subaquática. Também dispõe de uma radiofrequência de longo alcance e/ou um transmissor para satélite com um concentrador em terra e/ou para um concentrador na superfície.

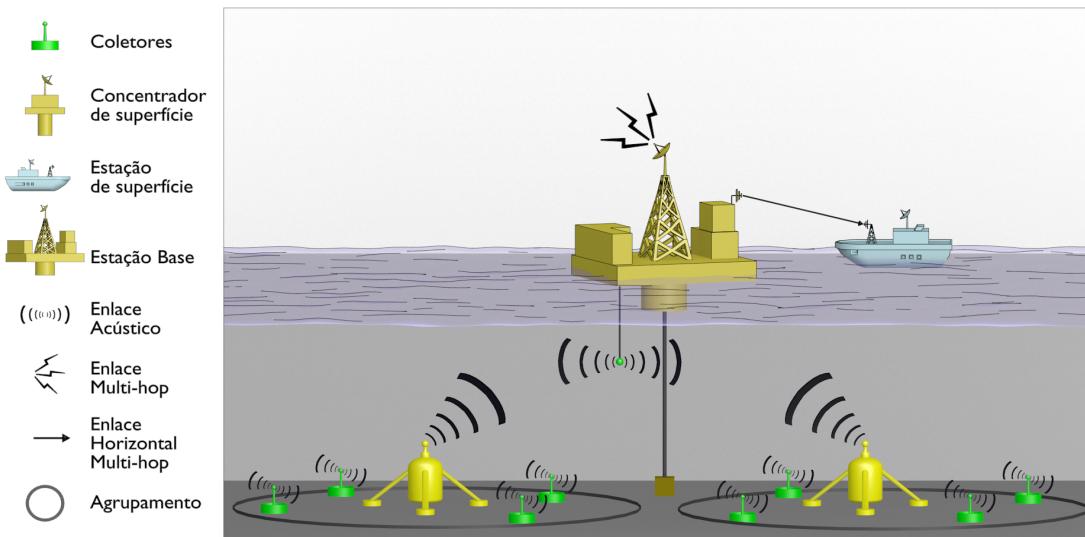


Figura 3.1: Rede subaquática de 2D estacionária

Os coletores podem ser conectados a concentradores através de um enlace direto ou usando caminhos *multi-hop*. No primeiro caso, cada coletor envia diretamente os

dados obtidos para o concentrador selecionado. Em caminhos *multi-hop*, como em redes de coletores terrestres, os dados produzidos por um coletor fonte são retransmitidos por coletores intermediários até alcançar o concentrador. Na verdade, cada dispositivo da rede geralmente se envolve em um processo colaborativo, cujo objetivo é difundir informações sobre a topologia de maneira que as decisões de eficiência e roteamento possam ser realizadas em cada nó intermediário. Esse processo envolve sinalização e computação.

### 3.3.2 Rede Tridimensional Estacionária

Redes de coletores subaquáticos de três dimensões são usadas para monitorar e detectar fenômenos que não podem ser observados adequadamente por coletores ancorados no fundo do mar. Neste tipo de rede, os coletores flutuam em diferentes profundidades de maneira a observar um determinado fenômeno [8, 15, 16]. Uma maneira de se implementar é conectar cada coletor a uma bóia de superfície, usando fios, cujo comprimento pode ser regulado de maneira a ajustar a profundidade de cada coletor. Embora essa solução seja simples e a implantação da rede de coletores seja rápida, várias bóias flutuantes podem obstruir a navegação de embarcações na superfície, ou elas podem ser facilmente detectadas e desativadas por inimigos em ambientes militares. Além disso, bóias flutuantes são vulneráveis ao clima e adulteração ou furto.

Por essas razões, uma abordagem diferente pode ser ancorar coletores no fundo do oceano. Nesta arquitetura, ilustrada na Figura 3.2, cada sensor é ancorado no fundo do oceano e equipado com uma bóia flutuante, que pode ser inflada por uma bomba. A bóia empurra o sensor em direção à superfície do oceano. A profundidade do coletor pode ser regulada, ajustando o comprimento do fio que conecta o coletor à âncora através de um motor controlado eletronicamente que reside no coletor. Um desafio a ser resolvido nesta arquitetura é o efeito das correntes marítimas em relação ao mecanismo para regular a profundidade dos coletores.

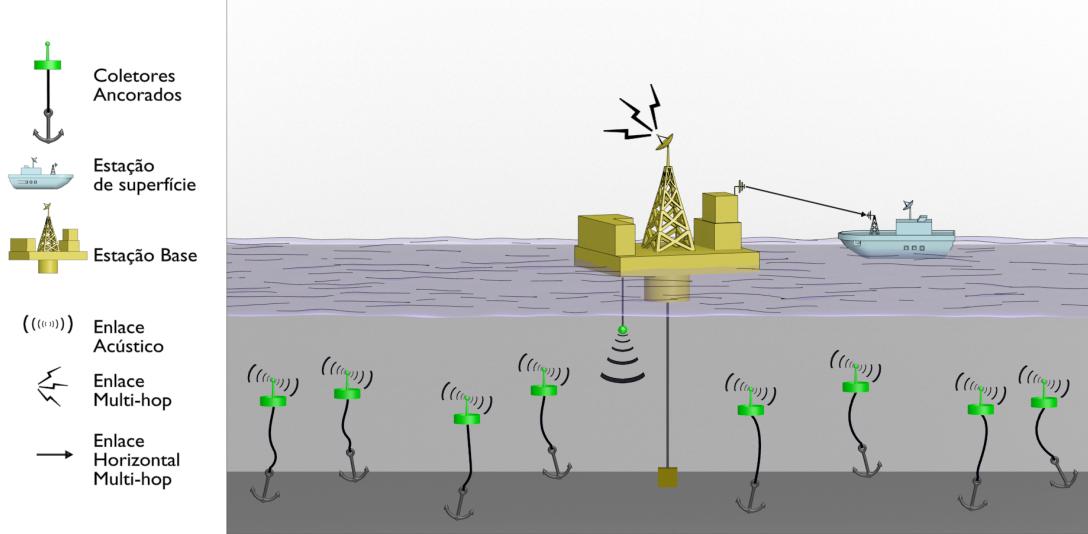


Figura 3.2: Rede subaquática de 3D estacionária

Muitos desafios surgem com tal arquitetura e precisam ser resolvidos a fim de permitir a monitoramento em três dimensões, incluindo:

- cobertura de sensoriamento: os coletores devem regular as suas profundidades colaborativamente de maneira a alcançar uma cobertura em três dimensões em relação à coluna do oceano, de acordo com as suas regiões de sensoriamento. Assim, é possível a obtenção de amostragem do fenômeno desejado em todas as profundidades.
- cobertura de comunicação: em redes subaquáticas de três dimensões não existe o conceito de concentrador, de tal forma que os coletores devem ser capazes de transmitir informações para a estação de superfície através de caminhos *multi-hop*. Assim, os dispositivos de rede devem coordenar suas profundidades de maneira que a topologia esteja sempre conectada, ou seja, pelo menos um caminho de cada sensor à bóia de superfície deve existir.

### 3.3.3 Rede Híbrida

Arquitetura subaquática híbrida consiste em um conjunto de coletores estáticos atuando conjuntamente com alguns coletores móveis, tais como veículos subaquáticos autônomos, veículos controlados remotamente ou qualquer outro tipo de veículo que navegue em ambiente aquático. Em arquitetura híbrida, os coletores móveis desempenham um papel fundamental, atuando como suporte em tarefas, tais como coleta de dados ou melhoria da capacidade da rede. Coletores móveis podem ser considerados como concentradores centrais que possuem mais energia e podem se mover

de forma independente, e estes podem funcionar como um roteador entre coletores fixados, ou como um gerente responsável pela configuração da rede ou ainda com um sensor de sensoriamento de dados [8, 15]. As redes híbridas podem ser empregadas em uma série de aplicações em oceanografia, monitoramento ambiental e estudo dos recursos naturais subaquáticos[8, 15, 16].

A Figura 3.3 ilustra uma arquitetura usada no sistema de vigilância do oceano. Os nós móveis são equipados com dois transmissores, um na direção horizontal e outro na vertical. Com o auxílio de coletores móveis, a rede pode realizar vigilância em três dimensões e ajustar a topologia para atender a demanda da aplicação. Os coletores móveis também podem otimizar a topologia para maximizar a capacidade da rede e assegurar a confiabilidade quando alguns coletores perderem suas funcionalidades.

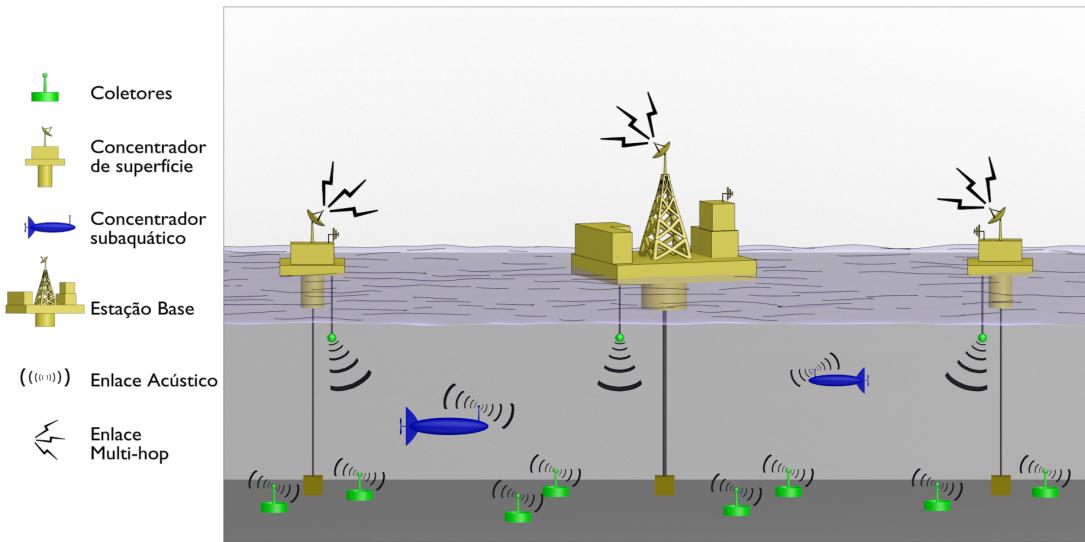


Figura 3.3: Rede híbrida.

Uma arquitetura de rede híbrida necessita de quatro tipos de nós para disponibilizar um ambiente hierárquico. Na camada inferior, um número elevado de coletores é instalado no fundo do mar para realizar a coleta de dados. Um ou mais nós responsáveis pela conexão com à Internet são instalados na superfície do oceano ou em plataforma na costa marítima. Os outros dois tipos são os super nós que podem realizar conexões com redes de alta velocidade e transmitirem dados eficientemente, e robôs que podem submergir no oceano.

## 3.4 Canal de Comunicação Acústico

Segundo Akyildiz *et al.* [8] a comunicação acústica subaquática é influenciada principalmente por atenuação, ruído, espalhamento de *Doppler*, multicaminhos e atraso

de propagação. Todos esses fatores determinam a variabilidade espacial e temporal do canal acústico e tornam a largura de banda disponível no canal subaquático limitada e dramaticamente dependente da distância e da frequência. Consequentemente, um enlace de comunicação acústico curto, oferece mais largura de banda do que um enlace de longo alcance em um ambiente subaquático.

Para Stojanovic [61], os canais de comunicação acústicos subaquáticos são caracterizados pela atenuação, que depende da distância e da frequência do sinal, como é caso de muitas outras redes sem fio. A frequência do sinal determina a perda por absorção, que ocorre por causa da transferência de energia acústica em calor. Esse fato implica que a largura de banda acústica possui uma dependência intrínseca da distância. A definição da largura de banda é um problema fundamental, visto que é determinada pelas características físicas da propagação acústica e não por restrições de dispositivos que converte uma forma de energia para outra.

O trabalho de Stojanovic [61] avaliou a dependência da largura de banda em relação a distância, usando um método analítico que leva em consideração modelos físicos da perda de propagação acústica e ruído do ambiente. Para avaliar o problema fundamental da limitação da largura de banda, os autores adotaram uma abordagem teórica e definiram a largura de banda correspondente à alocação de energia ideal para o sinal, ou seja, uma banda que maximiza à capacidade do canal sujeito a restrição de que a potência de transmissão é finita.

Avaliação numérica de Stojanovic [61] quantifica a largura de banda e a capacidade do canal, bem como a potência de transmissão necessária para alcançar uma relação sinal/ruído preestabelecida, como funções da distância. Os resultados numéricos revelam que a largura de banda diminui quase linearmente com a distância em um escala logarítmica. Uma observação similar pode ser observada para a capacidade do canal. A potência de transmissão aumenta com a distância, também seguindo uma tendência linear na escala logarítmica.

Dependendo da abrangência, os enlaces de comunicação acústicos subaquáticos podem ser classificados em muito longo, longo, médio, curto e muito curto. As larguras de bandas típicas de enlaces subaquáticos para várias áreas de abrangências são apresentadas na tabela 3.1, obtida de [62]. Em geral, o termo águas rasas é utilizado para ambiente subaquático com profundidade inferior a 100 metros, enquanto águas profundas é usado para descrever o oceano.

Tabela 3.1: Largura de banda disponível para diferentes abrangências

Classificação	Abrangência[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

Em relação à eficiência da largura de banda  $\alpha$ , essa é dependente da técnica de modulação adotada. Por exemplo, para técnica de modulação *Differential phase-shift keying - DPSK*, tem-se a tabela 3.2 obtida de [62], contendo os valores para a taxa de transmissão, a largura de banda, a eficiência da largura de banda, a abrangência e a taxa de erros de bits adequados a um canal acústico subaquático em ambientes de águas rasas e profundas.

Tabela 3.2: Taxa de dados disponível para a técnica de modulação DPSK

Taxa [kbits/s]	Banda [kHz]	Eficiência da banda	Abrangência [km]	BER
4.8	8/14	0.6	4.8 <i>p</i>	$10^{-6}$
2	2/10	1.0	6.0 <i>p</i>	$< 10^{-3}$
1.6	10/50	0.16	0.1 <i>r</i>	$< 10^{-3}$
16	8/20	2.0	6.5 <i>p</i>	$10^{-4}$
20	10/50	2.0	1.0 <i>p</i>	$10^{-2}$

Pela tabela 3.2, observa-se que para águas rasas, de acordo [9], para um enlace acústico com a banda 10/50 em  $kHz$ , a eficiência da modulação da largura de banda é  $\alpha = 0.16$ . Na tabela 3.2, na coluna de abrangência, as letras *r* e *p* são usadas para representar águas rasas e profundas, respectivamente.

Considerando o caso particular de águas rasas, que é aplicação de referência deste trabalho, pelas tabelas 3.1 e 3.2, tem-se que o valor máximo para a largura de banda  $B(u)$  é  $100kHz$ .

### 3.5 Consumo de Energia

Diversas formulações para se avaliar o consumo de energia em redes subaquáticas têm sido usadas na literatura [19, 45, 46, 63] de acordo com as características de cada problema. Segundo Yang *et al.*[64] para transmitir um pacote de dados de um

elemento de comunicação para outro a uma distância  $u$ , o consumo de energia no canal subaquático de cada elemento de comunicação é dado por:

$$E(u) = E_t(u) + E_r(u) \quad (3.1)$$

onde  $E(u)$  é a energia total consumida em função da distância  $u$ , entre transmissor e receptor. O termo  $E_t(u)$  é a energia consumida na transmissão e  $E_r(u)$  é o consumo de energia na recepção do sinal acústico.

Tem-se que  $E_t(u)$  é função da potência necessária para transmissão da informação para determinada distância. Também é função do tamanho do pacote transmitido  $L$ , da largura de banda disponível  $B(u)$ , dada a distância  $u$  de comunicação, e da eficiência da largura de banda  $\alpha$ . Assim sendo, o consumo de energia na transmissão é dado por:

$$E_t(u) = P_t(u) \left( \frac{L}{\alpha B(u)} \right) \quad (3.2)$$

No caso de comunicação acústica subaquática, a potência de transmissão pode ser considerada como potência acústica  $P_s$ , sendo calculada em função da distância  $u$ , pela expressão dada por Stojanovic [61] a seguir:

$$P_t(u) = P_s(u) = \omega u^\pi \quad (3.3)$$

onde  $\omega$  é um coeficiente relativo à potência de transmissão em  $1\mu Pa$ , dado em  $dB$  e  $\pi$  é um expoente dado em  $dB/km$ , dependente da relação sinal-ruído, ou seja, uma taxa de dissipação dependente do meio de comunicação e da forma de transmissão.

No entanto, deve-se traduzir a potência acústica em potência elétrica, sendo a relação empírica dada por [65]:

$$P_e(u) = P_t(u) \times 10^{-17.2} / \delta \quad (3.4)$$

onde  $-17.2$  é o fator de conversão de potência acústica em  $dB$  relativo a  $\mu Pa$ , para potência elétrica em *watt*. O parâmetro  $\delta$  representa a eficiência geral do circuito elétrico, definido por um amplificador de potência e um dispositivo que converte um sinal de uma forma de energia para outra. Por exemplo, um sensor

pode detectar pressão da água e convertê-la em sinal elétrico para exibição em um sistema de monitoramento remoto.

Por outro lado, a largura de banda disponível nas comunicações subaquáticas é afetada pela variabilidade da frequência do canal acústico e diminui com a distância. Isso acontece principalmente devido às perdas na transmissão do som e ruídos captados pelo destinatário, causados principalmente pelo espalhamento da energia e absorção do som na água [14, 61, 63, 66]. A perda de energia depende da distância entre o transmissor e receptor e aumenta também com a frequência. Assim, a largura de banda da rede pode ser calculada pela expressão estabelecida por Stojanovic [61] a seguir:

$$B(u) = \gamma u^{-\beta} \quad (3.5)$$

onde  $\gamma$  é um coeficiente dado em  $dB$  relativo a  $1kHz$  para largura de banda e o expoente  $\beta$  é dado em  $dB/km$ .

Nas expressões para estimar a potência de transmissão requerida 3.3 e a largura de banda disponível 3.5, os parâmetros  $\omega$ ,  $\pi$ ,  $\gamma$  e  $\beta$  são constantes positivos dependentes da relação sinal-ruído. Essas expressões empíricas, revelam-se uma ferramenta útil na concepção e análise de redes acústicas subaquáticas, onde pode ser complexo avaliar numericamente as capacidades dos enlaces e as potências requeridas para a topologia, como é o caso da rede hierárquica proposta nessa tese. Por exemplo, permite ajustar a potência de transmissão e a largura de banda de acordo com as características do projeto. Exemplos de valores para os parâmetros são apresentados por Stojanovic em [61], onde realiza um estudo sobre o relacionamento entre a capacidade de um canal de comunicação acústico subaquático e a distância.

Nesse contexto, uma série de transformações serão realizadas para se obter uma equação apropriada ao consumo de energia, para enlaces acústicos subaquáticos em ambientes de águas rasas. Portanto, tem-se que  $P_s(u)$  é equivalente  $P_e(u)$  e, aplicando as equações de potência acústica 3.3 e largura de banda 3.5 em 3.2, obtém-se a equação a seguir:

$$\begin{aligned} E_t(u) &= P_t(u) \left( \frac{L}{\alpha B(u)} \right) \\ E_t(u) &= \omega u^\pi \left( \frac{L}{\alpha \gamma u^{-\beta}} \right) \\ E_t(u) &= \left( \frac{\omega L}{\alpha \gamma} \right) u^{\beta+\pi} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Considerando que o coeficiente relativo à potência de transmissão  $\omega$ , o tamanho do pacote  $L$ , a eficiência da largura de banda  $\alpha$  e o coeficiente da largura de banda  $\gamma$  são constantes, pode-se definir um coeficiente de transmissão agregado a seguir:

$$K_t = \left( \frac{\omega L}{\alpha \gamma} \right) \quad (3.7)$$

Substituindo o coeficiente de transmissão agregado, dado pela equação 3.7 em 3.6, obtém-se a expressão simplificada para o consumo de energia de transmissão a seguir:

$$E_t(u) = K_t u^{\beta + \pi} \quad (3.8)$$

Já a dissipação de energia no processo de recepção do sinal  $E_r(u)$  é dada por:

$$E_r(u) = P_r \left( \frac{L}{\alpha B(u)} \right) \quad (3.9)$$

onde  $P_r$  é a potência de recepção que independe da distância, mas que depende da complexidade das operações de recepção. Por exemplo, equipamentos que utilizam protocolos de comunicação diferentes implicam em potências de recepção diferentes, quanto maior a complexidade ou o número de operações requeridos para receber a informação, maior será a dissipação de potência de recepção.

Agora, aplicando a equação de largura de banda 3.5 em 3.9, tem-se que:

$$\begin{aligned} E_r(u) &= P_r \left( \frac{L}{\alpha B(u)} \right) \\ E_r(u) &= \left( \frac{P_r L}{\alpha \gamma u^{-\beta}} \right) \\ E_r(u) &= \left( \frac{P_r L}{\alpha \gamma} \right) u^\beta \end{aligned} \quad (3.10)$$

e denominando um coeficiente agregado de recepção como:

$$K_r = \left( \frac{P_r L}{\alpha \gamma} \right) \quad (3.11)$$

Substituindo o coeficiente de recepção agregado, dado pela equação 3.11 em 3.10, obtém-se a expressão simplificada para o consumo de energia de recepção a seguir:

$$E_r(u) = K_r u^\beta \quad (3.12)$$

Aplicando as equações de consumo de energia na transmissão 3.8 e recepção 3.12 em 3.1, obtém-se a equação de consumo de energia para um enlace acústico subaquático particular para cada elemento de comunicação a seguir:

$$E(u) = (K_t u^{\beta+\pi}) + (K_r u^\beta) \quad (3.13)$$

Pela formulação de energia dada em 3.13, percebe-se que  $E(u)$  é monotonamente crescente em relação à distância  $u$ , visto que todos os coeficientes são positivos, a distância é positiva e  $E(u)$  é uma função potência  $u^k$ , conforme mostrado pela Figura 3.4.

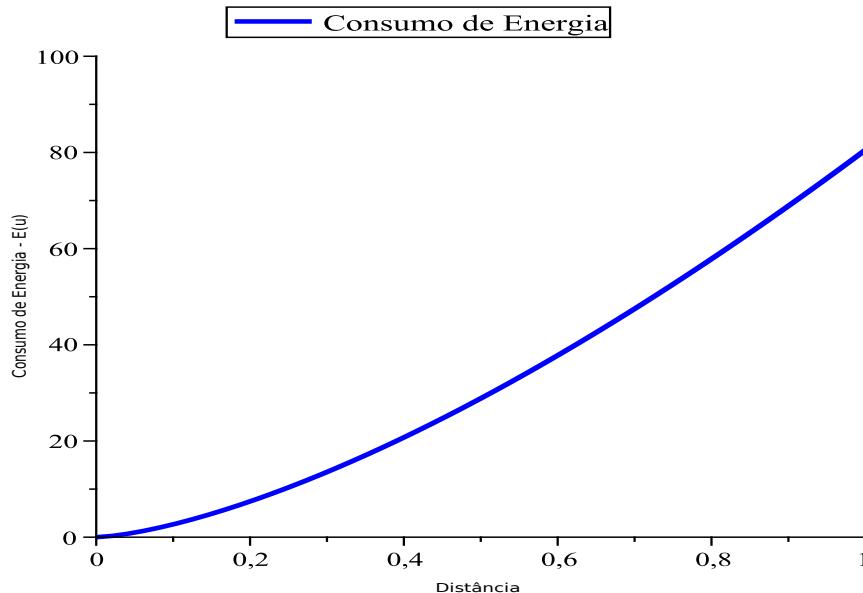


Figura 3.4: Gráfico da função de Energia

# Capítulo 4

## Projeto de Redes Hierárquicas

### 4.1 Topologia da Rede

Um projeto de redes subaquáticas de águas rasas para monitoramento ambiental, tal como o HRECOS, inicia-se com a determinação da quantidade e localizações dos coletores, que são tipicamente determinadas por especialistas. No entanto, a quantidade e a localização de concentradores para esses coletores são uma questão a determinar. Neste trabalho, adotou-se a distância como a medida de qualidade para determinar uma típica rede subaquática bidimensional estacionária com topologia hierárquica. Essa adoção, além de ser muito natural, está subsidiada pela equivalência ao critério de energia dada pela equação 3.13 nos enlaces individuais. A Figura 4.1 ilustra uma rede subaquática bidimensional estacionária. Os coletores são organizados em grupos e estão interconectados através de enlaces acústicos a concentradores, que são responsáveis pela transmissão de dados da rede subaquática para uma estação base, localizada na superfície. Os coletores são representados por círculos, os concentradores por diamantes e a estação base por um triângulo. As distâncias dos coletores ao concentrador são representadas por linhas sólidas e as distâncias dos concentradores à estação base são representadas por linhas tracejadas.

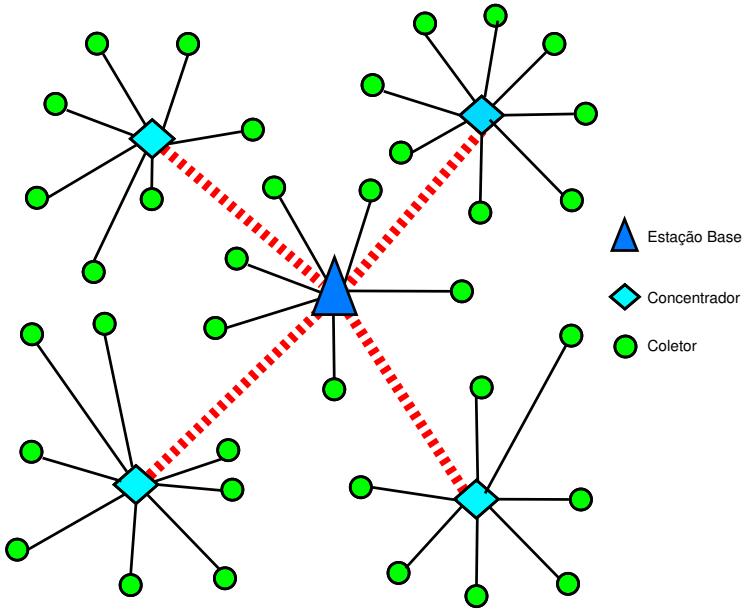
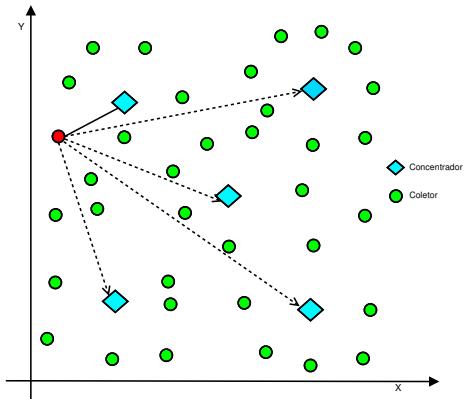


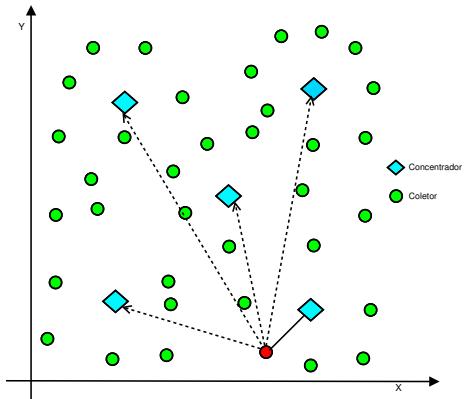
Figura 4.1: Rede subaquática bidimensional hierárquica

A topologia da rede é definida através do posicionamento dos concentradores e da estação base de maneira a minimizar uma medida de distância global entre os elementos de comunicação da rede. Cada um dos concentradores é posicionado estrategicamente em locais que determinem uma menor distância para todos os coletores de seu grupo. A posição da estação base, por sua vez, determina uma menor distância para todos os concentradores. Assim, os coletores distantes da estação base precisam consumir energia apenas para transmitirem a informação para o concentrador do seu grupo e os concentradores, por sua vez, se encarregam de agregar e encaminhar os dados para a estação base. Esta maneira de organizar a topologia da rede permite definir grupos bastante homogêneos em termos de distância e quantidade de coletores.

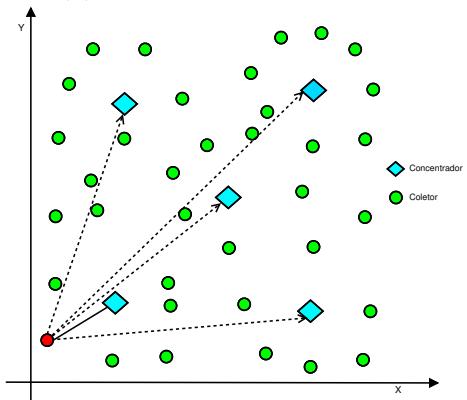
As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram de maneira bastante simplificada e didática o procedimento intrínseco à determinação de um valor da solução associada a uma posição genérica dos concentradores. O exemplo é composto por 35 coletores fixos e 5 concentradores estabelecidos de maneira exógena numa região planar. Na primeira fase, que corresponde à especificação das redes de acessos, para cada coletor calcula-se a distância de sua posição para todos os concentradores da rede, ilustrado pelas linhas tracejadas e pela sólida. O coletor é conectado ao concentrador mais próximo, ilustrado pela linha sólida. Assim, são projetadas cinco redes de acessos com topologia hierárquica apropriadas ao monitoramento de bacias hidrográficas.



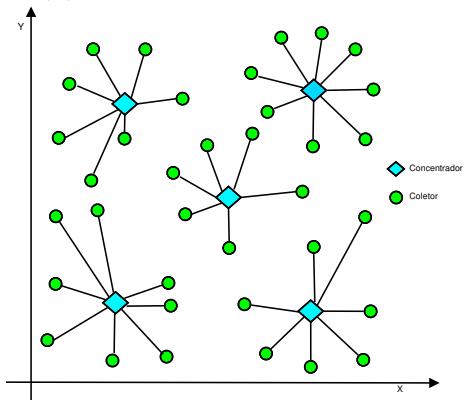
(a) Cálculo da distância de  $s_1$  a  $x_i$ .



(b) Cálculo da distância de  $s_{m-1}$  a  $x_i$ .



(c) Cálculo da distância de  $s_m$  a  $x_i$ .



(d) Redes de acessos subaquáticas.

Figura 4.2: Primeira fase: definição das redes de acessos

Na segunda fase, para cada concentrador, calcula-se a distância de sua posição para os demais concentradores da rede. A estação base será aquela que apresentar a menor distância aos demais concentradores da rede. O resultado é uma rede subaquática de duas dimensões estacionária, onde a rede que conecta os concentradores à estação base é denominada de *backbone* e cada uma das redes que conectam os coletores a um concentrador é denominada de redes de acessos.

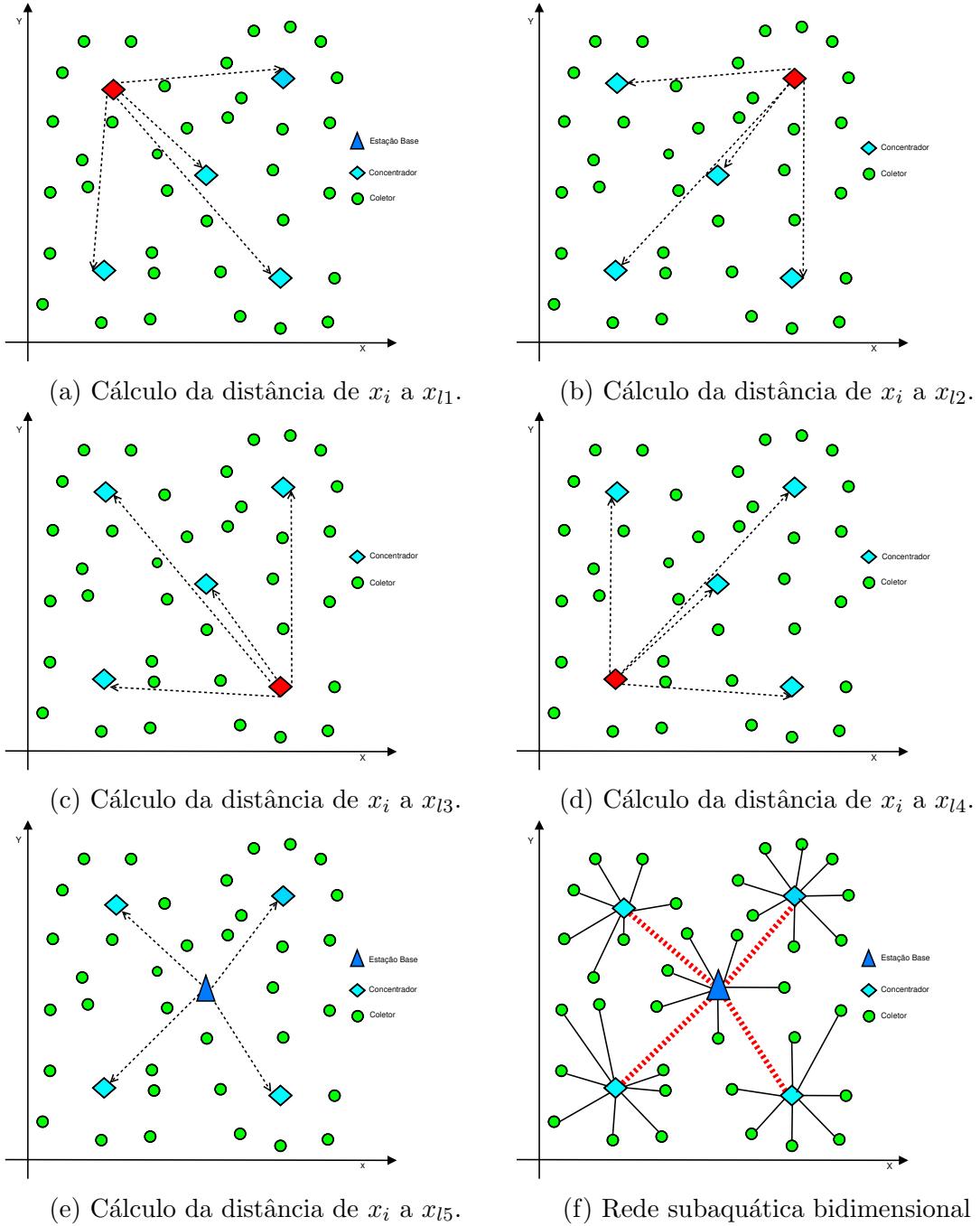


Figura 4.3: Segunda fase: definição da rede entre concentradores

Em outras palavras, o projeto ótimo é definido como aquele que minimiza o custo com a soma das distâncias dos coletores a seu concentrador mais próximo, mais o custo para definição do *backbone*. A especificação do problema corresponde a uma formulação baseada no critério de minimização da soma dessas distâncias apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3, que constitue um problema não diferenciável pertencente à classe de problemas NP-completo [55, 56]. Para o propósito de resolução desse problema adotou-se o Método de Suavização Hiperbólica. Esse método, conforme ilustra a Figura 4.4, transforma a resolução de um problema original não diferenciável com

restrições na resolução de um problema irrestrito da classe  $C^\infty$ , graças ao auxílio de um conjunto de parâmetros externos.

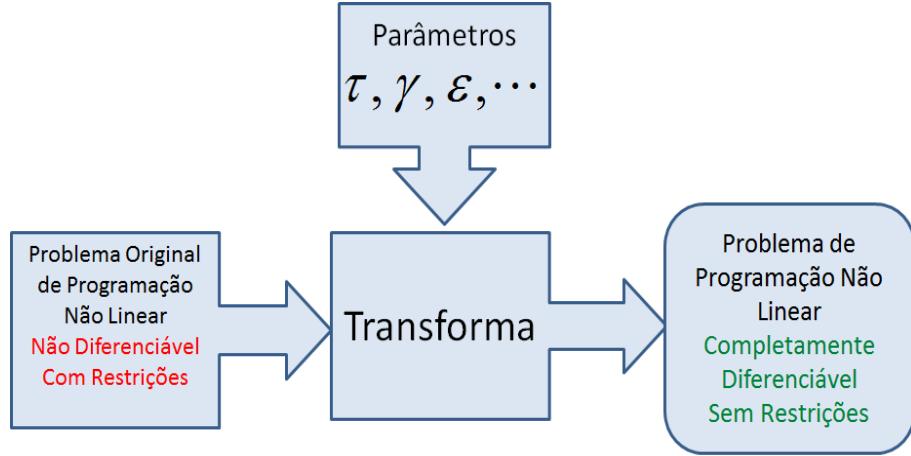


Figura 4.4: Efeito de suavização hiperbólica na concepção de redes hierárquicas.

Dessa maneira, é possível otimizar o problema modificado usando métodos de otimização irrestrita mais poderosos, que são baseados em informações das derivadas de primeira e segunda ordens. O objetivo principal é encontrar um mínimo local profundo da função, ou seja, o ponto em que a função atinge um valor bem baixo. A Figura 4.5 exemplifica conceitualmente toda a sofisticação do mecanismo de otimização adotado. Inicialmente é necessário atribuir valores altos para os parâmetros externos para obter um efeito de suavização significativo. Neste estágio, resolve-se uma sequência de sub-resoluções do problema sem restrição, seguida de uma redução dos parâmetros de suavização. Esses procedimentos são repetidos até que os parâmetros sejam suficientemente pequenos.

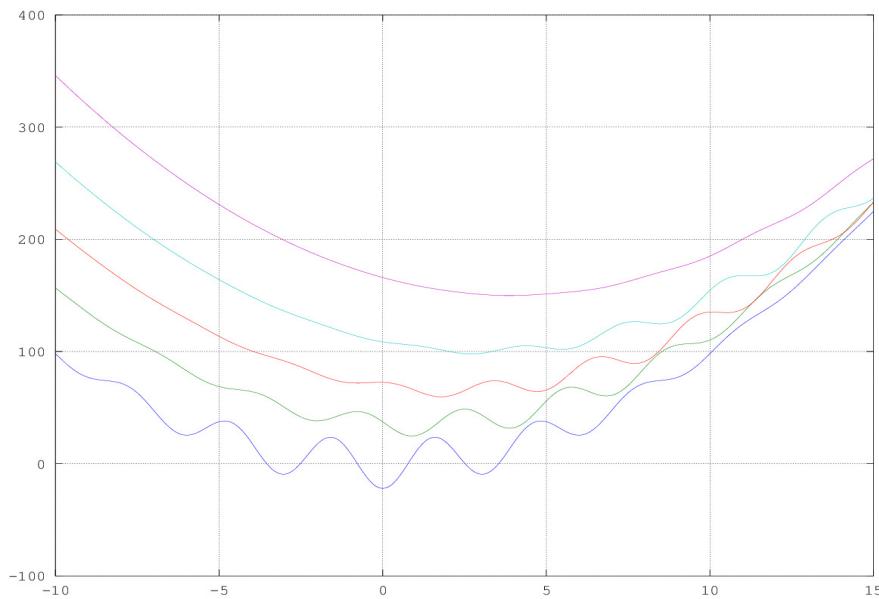


Figura 4.5: Representação conceitual do método otimização

## 4.2 Formulação do Problema de Minimização de Distâncias

Este problema consiste em calcular a posição de um determinado número  $p$  de concentradores numa região planar, visando definir uma rede que conecta  $m$  coletores. O objetivo é minimizar o custo da rede tomado como proporcional aos comprimentos dos enlaces, ou seja, distâncias entre os elementos de comunicação. Um dos concentradores é conhecido como estação base porque os demais concentradores são conectados a ele.

Para formular este problema, procede-se da seguinte maneira. Considere que  $S = \{s_1, \dots, s_m\}$  indique um conjunto de  $m$  coletores numa região planar, onde  $s_i \in \mathbb{R}^2$ . Considere que  $x_i, i = 1, \dots, p$  sejam os concentradores, onde cada  $x_i \in \mathbb{R}^2$ . O conjunto destes concentradores  $x = (x_1, \dots, x_p)$  é representado por  $X \in \mathbb{R}^{2p}$ . Cada coletor  $s_j$  deve ser conectado a um concentrador e cada concentrador deve ser conectado à estação base. O custo a ser minimizado é a soma das distâncias dos coletores aos concentradores mais as distâncias entre os concentradores e a estação base. Um dos concentradores é definido como a estação base durante o processo de minimização, portanto, também possui coletores conectados a ela. O processo de minimização permite naturalmente conceber um projeto de rede hierárquica bastante similar em termos de distância entre os elementos de comunicação da rede e número de coletores em cada subrede. Mais do que isso, pode ser considerado como uma maneira aproximada para a redução do consumo de energia em redes subaquáticas de águas rasas.

O custo unitário associado a um enlace entre o coletor  $s_j$  e o concentrador  $x_i$  é a distância Euclidiana entre eles:

$$z_{ij} = \|s_j - x_i\|_2 \quad (4.1)$$

O custo unitário que realmente é considerado pela função de custo, no processo de minimização, é a distância de um coletor  $j$  para o concentrador mais próximo  $i$ , obtido através da equação:

$$z_j = \min_{i=1, \dots, p} z_{ij}. \quad (4.2)$$

O problema consiste em calcular as posições dos concentradores  $x_i$  para minimizar o custo total da rede, isto é, a soma dos custos totais de cada um dos coletores ao seu concentrador mais próximo. Adicionalmente, calcula-se o custo dos enlaces estabelecidos entre os concentradores e a estação base, conforme especificado

a seguir:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} && \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\
& \text{sujeito a} && z_j = \min_{i=1, \dots, p} z_{ij}, \quad j = 1, \dots, m. \\
& && v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{4.3}$$

onde  $x_b$  se refere à localização da estação base.

A formulação do problema 4.3 efetua a minimização das distâncias entre coletores e concentradores mais as distâncias entre concentradores e estação base.

Na primeira parcela da função objetivo, para cada estação  $j$  calcula-se a sua distância ao concentrador mais próximo. A localização da estação base é definida pela expressão

$$b = \arg \min_i \left( \sum_{l=1}^p \|x_l - x_i\|_2 \right) \tag{4.4}$$

Qualquer que seja a configuração, o processo de minimização intrínseco a 4.4 produzirá a posição da estação base, que minimiza o custo levando em consideração a segunda parcela do custo da função objetivo, correspondente às interligações entre os concentradores.

### 4.3 Suavizando o Problema

Este problema tem uma estrutura denominada *min – sum – min*, com características não diferenciáveis e não convexas, tendo um número extremamente grande de mínimos locais. Uma série de transformações é realizada a fim de se obter uma formulação contínua. Primeiro, considerando sua definição, cada  $z_{ij}$  deve necessariamente satisfazer o seguinte conjunto de inequações:

$$z_j - z_{ij} \leq 0, \quad i = 1, \dots, p. \tag{4.5}$$

Substituindo estas desigualdades pela restrição de igualdade do problema 4.3, realizamos um relaxamento e o problema seguinte é obtido:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} && \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\
& \text{sujeito a} && z_j - z_{ij} \leq 0, \quad i = 1, \dots, p; \quad j = 1, \dots, m. \\
& && v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{4.6}$$

As variáveis  $z_j$  da equação 4.2 devem ser não negativas, visto representar o mínimo de normas euclidianas. Entretanto, na última formulação, as variáveis  $z_j$  não são limitadas inferiormente, portanto, são passivas de ser minimizadas a menos infinito. Assim, para obter uma equivalência desejada com o problema original, deve-se modificar a primeira restrição do problema 4.6 para criar um limite inferior adequado para as variáveis  $z_j$ . Para este propósito, definimos a função  $\psi(y) = \max\{0, y\}$ . Aplicando essa função para substituir o conjunto de restrições de desigualdades na equação 4.6, obtemos o problema:

$$\sum_{i=1}^p \psi(z_j - z_{ij}) = 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (4.7)$$

Para qualquer ponto fixo  $j$ , assumindo uma sequência estritamente crescente das  $p$  distâncias  $z_{ij}$  representadas por  $d_1 < d_2 < \dots < d_p$ . A Figura 4.6 ilustra os três primeiros termos de 4.7 como uma função de  $z_j$ .

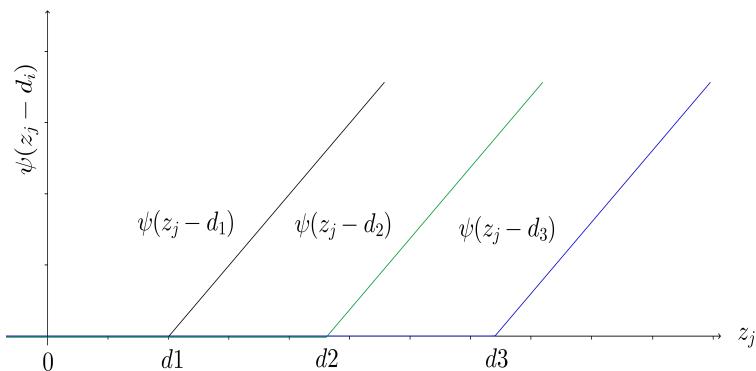


Figura 4.6: Representação dos três primeiros termos da equação 4.7

Usando a equação 4.7 em substituição ao conjunto de restrições de desigualdades em 4.6, obteria um problema equivalente, mantendo, todavia, a propriedade indesejada que  $z_j$  ainda não possui limite inferior. Considerando, entretanto, que a função objetivo do problema 4.6 forçará para baixo cada  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , pode-se pensar em delimitar as últimas variáveis inferiores pela inclusão de uma perturbação  $\varepsilon > 0$  em 4.7. Neste sentido, o problema modificado seguinte é obtido

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\ \text{sujeito a} \quad & \sum_{i=1}^p \psi(z_j - z_{ij}) \geq \varepsilon, \quad j = 1, \dots, m. \\ & v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (4.8)$$

Visto que o conjunto viável do problema 4.7 é o limite de 4.8 quando  $\varepsilon \rightarrow 0_+$ , pode-se considerar a solução 4.3 resolvendo uma sequência de problemas como em 4.8 para uma sequência de valores decrescentes de  $\varepsilon$  que se aproxima de zero. Portanto, a definição da função  $\psi$  estabelece ao problema 4.8 uma estrutura não diferenciável extremamente rígida, que torna a sua solução computacional muito difícil. Em vista disso, o método numérico adotado para a solução do problema 4.8 se fundamenta na suavização por aproximação. Desta perspectiva, definiu-se a função:

$$\phi(y, \tau) = \left( y + \sqrt{y^2 + \tau^2} \right) / 2, \quad (4.9)$$

para  $y \in \mathbb{R}$  e  $\tau > 0$ .

A função  $\phi$  tem as seguintes propriedades:

- (a)  $\phi(y, \tau) > \psi(y)$ ,  $\forall \tau > 0$ ;
- (b)  $\lim_{\tau \rightarrow 0} \phi(y, \tau) = \psi(y)$ ;
- (c)  $\phi(y, \tau)$  é uma função convexa crescente que pertence à classe  $C^\infty$  na variável  $y$ .

Portanto, a função  $\phi$  se constitui como uma aproximação da função  $\psi$ . Adotando as mesmas hipóteses usadas na Figura 4.6, os três primeiros termos de 4.7 e suas aproximações suavizadas correspondentes, dadas por 4.9, são representados pelas curvas na Figura 4.7.

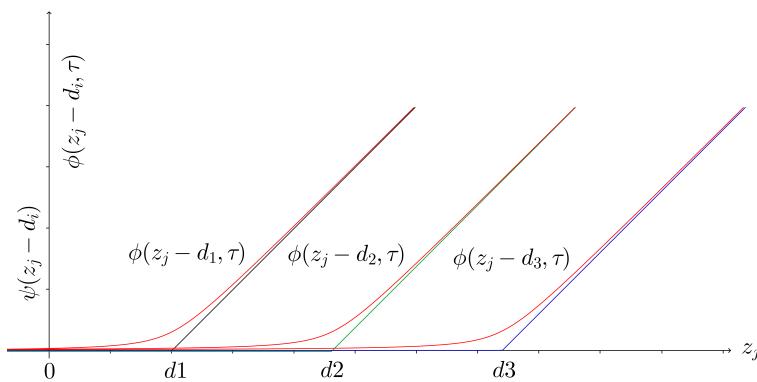


Figura 4.7: Representação original e suavizada dos três primeiros termos de 4.7

Usando a função  $\phi$  em substituição à função  $\psi$  em 4.8, chegamos ao problema:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} \quad \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\
& \text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^p \phi(z_j - z_{ij}, \tau) \geq \varepsilon, \quad j = 1, \dots, m. \\
& \quad v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Para se obter um problema diferenciável, é ainda necessário suavizar as distâncias Euclidianas  $z_{ij}$ . Para este propósito, definimos a função

$$\theta(s_j, x_i, \gamma) = \sqrt{\sum_i^n (s_{jl} - x_{il})^2 + \gamma^2}, \tag{4.11}$$

onde  $s_j, x_i \in \mathbb{R}^2$  e  $\gamma > 0$ .

A função  $\theta$  tem as seguintes propriedades:

$$(a) \lim_{\gamma \rightarrow 0} \theta(s_j, x_i, \gamma) = \|s_j - x_i\|_2;$$

(b)  $\theta$  é uma função da classe  $C^\infty$ .

Aplicando a função  $\theta$  em substituição às distâncias euclidianas, obtemos o problema completamente diferenciável:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} \quad \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\
& \text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^p \phi(z_j - \theta(s_j, x_i, \gamma), \tau) \geq \varepsilon, \quad j = 1, \dots, m. \\
& \quad v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p.
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Agora, as propriedades das funções  $\phi$  e  $\theta$  nos permitem encontrar uma solução para o problema 4.8, através da resolução de uma sequência de subproblemas semelhantes a 4.12, produzida pelo decréscimo dos parâmetros  $\gamma \rightarrow 0$ ,  $\tau \rightarrow 0$  e  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

O processo de minimização da função objetivo trabalhará a fim de reduzir os valores  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , ao limite mínimo possível. Por outro lado, dado qualquer conjunto de concentradores,  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ , devido à propriedade (c) da função de suavização hiperbólica  $\phi$ , as restrições do problema 4.12 são funções monotonamente crescentes em  $z_j$ . Desta maneira, estas restrições certamente serão ativas e o problema 4.12 finalmente será equivalente ao problema a seguir:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} \quad \left( \sum_{j=1}^m z_j \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\
& \text{sujeito a} \quad h_j(z_j, x) = \sum_{i=1}^p \phi(z_j - \theta(s_j, x_i, \gamma), \tau) - \varepsilon = 0, \quad j = 1, \dots, m. \\
& \quad v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{4.13}$$

A dimensão do espaço no domínio das variáveis do problema 4.13 é igual a  $(2p + m)$ . Assim, o problema possui um número muito grande de variáveis, pois o valor do parâmetro  $m$ , que representa a cardinalidade do conjunto  $S$  de coletores  $s_j$ , é geralmente muito grande. Portanto, observa-se que o problema 4.13 possui uma estrutura separável, porque cada variável  $z_j$  aparece somente em uma única restrição de igualdade. Além da estrutura separável, a derivada parcial de  $h_j(z_j, x)$  em relação a  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  é diferente de zero, assim todas as condições necessárias para o uso do Teorema da Função Implícita são estabelecidas, possibilitando calcular cada componente  $z_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  como função das variáveis de localização dos concentradores  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ . Dessa forma, é possível formular o problema irrestrito:

$$\text{minimizar} \quad f(x) = \left( \sum_{j=1}^m z_j(x) \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i(x) \right) \tag{4.14}$$

onde cada  $z_j(x)$  é obtido através de cálculo da raiz de cada equação

$$h_j(z_j, x) = \sum_{i=1}^p \phi(z_j - \theta(s_j, x_i, \gamma), \tau) - \varepsilon = 0, \quad j = 1, \dots, m \tag{4.15}$$

e o termo  $v_i(x)$  é calculado diretamente pela expressão

$$v_i(x) = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p \tag{4.16}$$

Até o momento o problema de projetar redes hierárquicas sofreu diversas transformações, deixando de ser um problema restrito não diferenciável e se tornando um problema completamente diferenciável e irrestrito.

## 4.4 Processo de Otimização

Em razão a propriedade (c) da função de suavização hiperbólica, cada termo  $\phi$  de 4.15 é estritamente crescente com a variável  $z_j$ , e, portanto, a equação possui apenas uma raiz.

Novamente, devido ao teorema da função implícita,  $z_j(x)$  possui todas as derivadas em relação às variáveis  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ , possibilitando o cálculo do gradiente da função objetivo do problema a seguir:

$$\nabla f(x) = \left( \sum_{j=1}^m \nabla z_j(x) \right) + \left( \sum_{i=1}^p \nabla v_i(x) \right), \quad (4.17)$$

onde:

$$\nabla z_j(x) = - \nabla h_j(z_j, x) / \frac{\partial h_j(z_j, x)}{\partial (z_j, x)}, \quad (4.18)$$

enquanto os termos  $\nabla h_j(z_j, x)$  e  $\partial h_j(z_j, x) / \partial (z_j, x)$  são obtidos diretamente das equações 4.9, 4.11 e 4.15.

Na equação 4.17, o termo  $v(x)$  é de fato não diferenciável, no entanto, o índice da estação base  $b$  raramente sofre alterações durante o processo de otimização. Nesta condição,  $v(x)$  é contínuo e pode ser facilmente calculado pela equação a seguir:

$$v(x) = \sum_{l=1}^p \frac{x_l - x_b}{\|x_l - x_b\|_2}. \quad (4.19)$$

Desta maneira, é possível resolver o problema 4.14, fazendo o uso de qualquer método baseado na informação de derivada de primeira ordem. Finalmente, deve ser enfatizado que o problema 4.14 é definido em um espaço de  $2p$ -dimensões, de maneira que o problema se torna pequeno, pois o número de concentradores geralmente é pequeno para aplicações reais.

## 4.5 Descrição do Algoritmo

A solução para o problema de localização de concentradores, como projeto de redes subaquáticas estacionária de duas dimensões discutido neste capítulo, pode ser obtida usando o algoritmo a seguir:

É possível observar que o algoritmo faz  $\tau$  e  $\gamma$  se aproximarem de zero, de modo que as restrições 4.15 dos subproblemas resolvidos tendem às do problema 4.8.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo de otimização

---

```
inicio
  Defina os valores iniciais para  $x^0, \varepsilon^1, \tau^1, \gamma^1$ 
  Defina os valores  $0 < \rho_1 < 1, 0 < \rho_2 < 1, 0 < \rho_3 < 1$ 
   $k \leftarrow 1;$ 
  repita
    Resolva o problema 4.14 com  $\gamma = \gamma^k, \tau = \tau^k$  e  $\varepsilon = \varepsilon^k$ , iniciando em
    um ponto inicial  $x^{k-1}$  e seja  $x^k$  a solução obtida.
     $\gamma^{k+1} \leftarrow \rho_1 \gamma^k;$ 
     $\tau^{k+1} \leftarrow \rho_2 \tau^k;$ 
     $\varepsilon^{k+1} \leftarrow \rho_3 \varepsilon^k;$ 
     $k \leftarrow k + 1;$ 
  até que uma regra de parada arbitrária seja atendida;
fin
```

---

Adicionalmente, o algoritmo faz  $\varepsilon$  se aproximar de zero, de modo que o problema 4.8 se aproxime gradualmente do problema 4.3.

Nas implementações do algoritmo foi adotada como regra de parada a realização de um número fixo de  $T$  tentativas.

## 4.6 Formulação do Problema em Termos de Energia

Dado um ambiente de águas rasas com  $m$  coletores já posicionados, deseja-se identificar a localização de  $p$  concentradores de maneira a definir uma rede hierárquica de custo mínimo em termo de consumo de energia. Considerando que a distância entre um coletor e seu concentrador mais próximo seja denominada por  $u_j$  e a distância entre um concentrador e a estação base seja denominada por  $u_i$ .

A equação 3.13 considera o custo do consumo de energia em um único enlace da rede. O custo total de energia de uma rede deve considerar a energia consumida em todos os enlaces. Deve, portanto, contemplar os custos dos enlaces entre os coletores e seus respectivos concentradores, assim como os custos dos enlaces entre os concentradores e a estação base, conforme topologia da rede ilustrada pela Figura 4.1, em conformidade com a formulação do problema a seguir:

$$E = \left( \sum_{j=1}^m E_{cc}(u_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^p E_{ceb}(u_i) \right) \quad (4.20)$$

onde, dadas as tecnologias empregadas nos coletores, concentradores e estação base, considera-se que a energia consumida entre o  $j$ -ésimo coletor,  $j = 1, \dots, m$ , e seu

concentrador dependa apenas da distância  $u_j$  entre eles através da função  $E_{cc}$  e, da mesma forma, que a energia consumida entre o  $i$ -ésimo concentrador,  $i = 1, \dots, p$ , e a estação base dependa apenas da distância  $u_i$  entre eles através da função  $E_{ceb}$ .

Visando a otimização da topologia da rede quanto ao consumo de energia, este será dividido entre duas parcelas, o consumo fixo e o consumo variável.

O consumo fixo é o consumo mínimo de energia dos coletores, concentradores e estação base quando estes estão inativos quanto à comunicação, ou seja, sem transmitir nem receber dados. Este consumo existe porque, por exemplo, os coletores consomem energia para coletar, codificar e registrar as informações que posteriormente serão transmitidas. Seus receptores, por outro lado, devem estar prontos a receber comandos dos concentradores, oriundos da estação base.

O consumo variável é o consumo de energia dos coletores, concentradores e estação base quando estes estão se comunicando, ou seja, quando os circuitos transmissores e receptores de um enlace estão ativos. O consumo dos transmissores é dado pela equação 3.8 e o consumo dos receptores é dado pela equação 3.12. O consumo de um enlace é dado pela soma destes consumos, descrito pela equação 3.13. Deve-se notar que tanto  $K_t$  quanto  $K_r$  dependem do comprimento  $L$  do pacote de dados.

Para uma determinada rede, com um número pré-determinado de coletores, concentradores e estação base, será considerado que o consumo fixo de energia não é passível de otimização, pois representa o consumo mínimo da rede. Por outro lado, o consumo variável, que depende da topologia da rede e da distância entre seus elementos, é passível de otimização.

Para viabilizar a formulação do problema de otimização da topologia de uma rede tendo por objetivo a redução do consumo total de energia, faz-se mister a introdução de algumas hipóteses simplificadoras:

- (a) Existe uma programação de coleta de dados dos coletores. Segundo esta programação, todos os coletores são lidos um certo número de vezes em um período pré-estabelecido (15 minutos como no HRECOOS, por exemplo). Isto envolve a transmissão dos dados dos coletores para os concentradores, os quais são recebidos e retransmitidos para a estação base. Desta forma, as temporizações para a ativação dos circuitos transmissores são pré-estabelecidas e fornecem a base para o consumo variável de energia
- (b) O envio de comandos de configuração e reprogramação para os concentradores e coletores segue o caminho inverso ao da coleta de dados. Considera-se que esta atividade seja relativamente rara quando comparada com a atividade de leitura dos coletores e, portanto, não será considerada na otimização.

- (c) Será considerado que, quando ativos, o consumo de energia dos circuitos receptores seja algumas ordens de magnitude inferior ao consumo de energia dos circuitos transmissores, e que, adicionalmente, o consumo de energia dos circuitos receptores varie pouco entre os estados ativo e inativo [14]. Podemos, portanto, adotar a hipótese simplificadora de que somente o consumo de energia dos circuitos transmissores, quando ativos, deva ser considerado no problema de otimização.
- (d) Conforme já explicitado pela equação 4.20, o consumo de energia por parte da estação base será considerado consumo fixo porque, neste contexto de otimização, envolve apenas o consumo de energia dos circuitos receptores segundo a programação pré-estabelecida de leitura dos coletores.

As hipóteses apresentadas acima apresentam um cenário em que o consumo total de energia pela rede é constituído por um consumo fixo aproximadamente constante (por incluir o consumo dos circuitos receptores) ao qual é adicionado o consumo de energia dos circuitos transmissores nos momentos em que os mesmos estão ativos. Em termos de otimização do consumo de energia, o consumo fixo será desprezado na função objetivo por se tratar de um termo aditivo que, por hipótese, é constante.

Pelo exposto, na formulação do problema de otimização iremos abandonar a equação 3.13, que inclui o consumo dos circuitos receptores, e utilizar diretamente a equação 3.8, que somente considera o consumo dos circuitos transmissores, conforme reproduzido abaixo:

$$E(u) = K_t u^{\beta+\pi} \quad (4.21)$$

A computação do fator  $K_t$  considera que o tamanho  $L$  do pacote de dados seja o mesmo em todos os enlaces. O  $i$ -ésimo concentrador, no entanto, é responsável por retransmitir à estação base os pacotes recebidos dos  $w_i$  coletores a ele conectados. Na prática, considerando-se que os coletores e concentradores utilizem a mesma tecnologia em seus circuitos transmissores, o  $i$ -ésimo concentrador ativará seu transmissor  $w_i$  vezes em cada leitura completa dos coletores a ele conectados.

Utilizando todas as hipóteses apresentadas pode-se então escrever:

$$\begin{aligned} E_{cc}(u_j) &= E_t(u_j), \quad j = 1, \dots, m \\ E_{ceb}(u_i) &= w_i E_t(u_i), \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (4.22)$$

Isto permite reescrever a equação 4.20 do consumo variável como:

$$E = \left( \sum_{j=1}^m E_t(u_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^p w_i E_t(v_i) \right) \quad (4.23)$$

O problema de otimização do consumo de energia da rede pode então ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \left( \sum_{j=1}^m E_t(z_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^p w_i E_t(v_i) \right) \\ \text{sujeito a} \quad & z_j = \min_{i=1, \dots, p} z_{ij}, \quad j = 1, \dots, m. \\ & w_i = \sum_{j=1}^m (z_{ij} == z_j), \quad i = 1, \dots, p \\ & v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (4.24)$$

onde  $(z_{ij} == z_j) = 1$ , se  $z_{ij}$  é igual a  $z_j$  e 0, caso contrário.

Esta formulação é bastante similar à formulação de otimização por distância, exceto pelo aparecimento na função objetivo de parcelas que são potências das distâncias consideradas e do “peso”  $w_i$  na parcela referente aos enlaces entre concentradores e estação base.

Em termos práticos, para um conjunto de coletores com uma distribuição razoavelmente uniforme na região de coleta de dados, pode-se considerar que o processo de otimização irá naturalmente distribuir de forma homogênea os  $m$  coletores entre os  $p$  concentradores. Desta forma, torna-se possível simplificar o problema definindo-se um único  $w = m/p$ , o qual pode ser utilizado para todos os enlaces entre concentradores e estação base.

Com mais um fator simplificador, será considerado que a tecnologia empregada nos concentradores é diferente da tecnologia empregada nos coletores, no sentido de que o concentrador armazene todos os pacotes de dados dos coletores a ele conectados e, mediante algoritmo de compressão de dados, consiga agregar toda a informação recebida em um pacote de tamanho aproximadamente igual a  $L$ . Algoritmos de compressão da ordem de 10 : 1 são comuns quando a informação a ser comprimida apresenta alta redundância. A alta redundância pode ser inferida pelo fato de que coletores próximos irão apresentar leituras altamente correlacionadas por efeito da localidade dos fenômenos sujeitos à coleta de dados. Diante deste cenário, o peso  $w$  será drasticamente reduzido e, por simplicidade, será considerado aproximadamente igual a um.

Considerando-se esta simplificação, o problema de otimização do consumo de energia da rede pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
\text{minimizar} \quad & \left( \sum_{j=1}^m E_t(z_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^p E_t(v_i) \right) \\
\text{sujeito a} \quad & z_j = \min_{i=1, \dots, p} z_i j, \quad j = 1, \dots, m. \\
& v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{4.25}$$

As potências das distâncias, que aparecem na função objetivo por intermédio das funções  $E_t$ , são agora o fator diferenciador entre a formulação em termos da minimização das distâncias e a formulação em termos da minimização da energia.

No entanto, funções potência podem ser aproximadas por funções lineares dentro de intervalos de tamanhos razoáveis. Na Figura 4.8, os pontos  $u_{min}$  e  $u_{max}$  expressam, respectivamente, as distâncias mínima e máxima entre dois nós de um enlace de comunicação. Assim, essas distâncias se situam, pelo menos em sua maioria, dentro do intervalo  $[u_{min}, u_{max}]$ : Se o intervalo  $[u_{min}, u_{max}]$  não for excessivamente grande, o consumo de energia para distâncias dentro deste intervalo pode ser satisfatoriamente aproximado por uma interpolação linear, como mostrado na Figura 4.8, através do segmento de reta tracejado. Esta hipótese é válida tanto para o enlace entre coletores e concentradores como para o enlace entre os concentradores e a estação base.

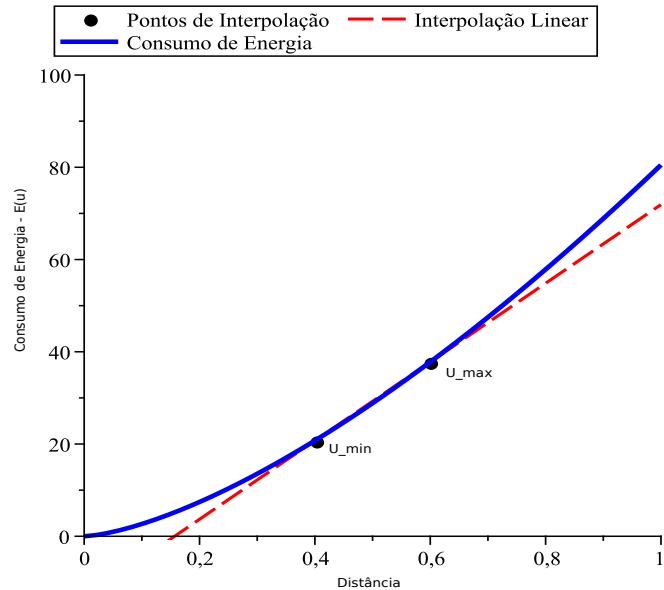


Figura 4.8: Gráfico de interpolação linear entre as formulações energia e distância

Assumindo esta hipótese, podemos escrever:

$$E_t(u) \approx Au + B; \tag{4.26}$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes que representam a inclinação e o deslocamento vertical da reta gerada pela interpolação linear da função  $Et(u)$  original.

Pode-se então considerar a substituição da versão original de  $Et(u)$  pela versão linearizada na função objetivo do problema. Como o número de enlaces é constante (dado por  $m + p$ ), a constante  $B$  contribuirá para uma parcela fixa de valor  $(m + p)B$ , a qual pode ser desprezada da função objetivo. Por outro lado, a constante  $A$  aparecerá multiplicando os  $m + p$  enlaces considerados, podendo ser posta em evidência na função objetivo. Desta forma, esta constante também pode ser eliminada da função objetivo pois seu valor não interfere no processo de otimização das distâncias envolvidas. Chegamos portanto à seguinte versão do problema de otimização da energia consumida pela rede subaquática:

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \left( \sum_{j=1}^m (z_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^p v_i \right) \\ \text{sujeito a} \quad & z_j = \min_{i=1, \dots, p} z_{ij}, \quad j = 1, \dots, m \\ & v_i = \|x_i - x_b\|_2, \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \tag{4.27}$$

Esta formulação é exatamente igual à formulação 4.3 utilizada para a minimização das distâncias.

Nesse contexto de hipóteses simplificadoras, chega-se portanto a uma equivalência aproximada entre as duas alternativas de especificação de custos, por distância e por consumo de energia. Consequentemente, pode-se afirmar que o problema de minimizar a energia total consumida na rede pode ser aproximado pelo problema de minimizar a soma das distâncias dos enlaces estabelecidos na rede.

# Capítulo 5

## Resultados e Discussões

Os experimentos numéricos foram realizados usando um computador Intel(R) Core(TM) i3-3240 CPU 3.40GHz, com 16GB de RAM e 340GB de disco rígido. O Sistema Operacional foi Ubuntu 3.13.0-32-generic GNU/Linux 64 bits. O compilador usado foi o GNU's gfortran versão 4.8.2. As tarefas de minimização sem restrição foram executadas através de um algoritmo *Quasi-Newton*, com atualização da matriz hessiana dada pela fórmula BFGS na implementação da *Library Harwell*, que é uma coleção de pacotes para computação científica [67]. Os gráficos que ilustram a topologia da rede foram gerados a partir do MATLAB - R2011b (7.13.0.564) para o Linux.

Os resultados computacionais apresentados neste capítulo foram obtidos de uma primeira implementação do algoritmo. As posições iniciais dos concentradores na primeira tentativa de resolução  $x_i^0, i = 1, \dots, p$  foram geradas, através de perturbações aleatórias em torno do centro de gravidade do conjunto de coletores, segundo as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\bar{s} &= \sum_{j=1}^m s_j / m, \\ \sigma &= \left( \sum_{j=1}^m \|s_j - \bar{s}\|_2^2 / m \right)^{1/2}, \\ x_i &= \bar{s} + a \sigma.\end{aligned}$$

As duas primeiras expressões calculam a média e o desvio padrão do conjunto de posições dos coletores, respectivamente. A terceira expressão calcula o posicionamento de cada um dos  $p$  concentradores iniciais,  $x_i^0, i = 1, \dots, p$ , onde os componentes do vetor  $a$  são variáveis aleatórias com distribuição uniforme no intervalo  $[-0.5, +0.5]$ . Desse modo, tem-se uma variação em torno da média que é proporcional ao desvio padrão, multiplicado pelo número aleatório.

As demais tentativas de resolução são obtidas a partir da solução anterior. Assim, aplica-se uma perturbação nessa solução para gerar um novo conjunto de ponto iniciais, herdando propriedades estruturais intrínsecas à solução anterior. Uma perturbação pequena é considerada adequada quando a solução de pontos iniciais obtida é de boa qualidade. Por outro lado, se a solução apresenta um mínimo local de qualidade baixa, uma perturbação grande seria mais adequada.

Um dos aspectos fundamentais do algoritmo proposto refere-se à escolha adequada dos parâmetros iniciais, bem como os valores dos fatores de redução desses parâmetros. O parâmetro  $\tau$  é fundamental no processo de Suavização Hiperbólica, pois determina o nível da suavização do problema. A escolha de um valor pequeno estabelece um problema muito rígido, próximo à natureza não diferenciável do problema original. Por outro lado, a determinação de um valor grande implica na suavização excessiva, que estabelece um grande distanciamento do problema original e falta de sensibilidade no processo de convergência.

O parâmetro  $\tau$  foi fixado como  $1/100$  do desvio padrão em relação às posições dos coletores. O parâmetro da suavização da distância euclidiana foi estabelecido como  $\gamma^1 = \tau^1/100$ . O valor do parâmetro de perturbação foi fixado como  $\varepsilon^1 = 4\tau^1$ . Em relação aos fatores de redução dos parâmetros, adotaram-se os mesmos valores para todos:  $\rho_1 = 1/4$ ,  $\rho_2 = 1/4$  e  $\rho_3 = 1/4$ . A escolha desses parâmetros baseou-se em alguns experimentos empíricos realizados e também por já terem sido usados com sucesso em [47, 48] na resolução do problema de agrupamento, segundo o critério da soma de mínimos quadrados.

Como este é um problema de otimização global, foi usada uma estratégia de agrupamento para gerar uma rede subaquática bidimensional, na qual diferentes tentativas aleatórias foram escolhidas para determinar os pontos iniciais para cada exemplo. O número de tentativas foi fixado como 100. O desvio médio percentual é calculado em relação a melhor solução em  $T$  tentativas pela seguinte expressão:

$$\text{Desvio Médio} = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - f_{\min}}{f_{\min}} \right),$$

onde  $f_t$  representa o valor ótimo da função objetivo na tentativa  $t$ ,  $f_{\min}$  é o menor valor encontrado em todas as tentativas e  $T$  é o número de tentativas.

O esforço necessário para a resolução de 4.14 depende, em primeiro lugar, da dimensão do problema, igual a  $2p$ . Contudo, cada avaliação da função objetivo envolve o cálculo de  $m$  distâncias. Uma de cada vez, cada distância  $z_j$  é obtida através do cálculo de um zero da equação 4.15, que tem  $p$  termos. Assim, a complexidade de avaliação da função resultante é  $O(mp)$ . Assumindo que o número de iterações tomadas no passo principal do algoritmo é proporcional à dimensão do

espaço de domínio variável, o tamanho da complexidade de resolução do problema seria  $O(mp^2)$ .

A fim de ilustrar a consistência e o desempenho do método proposto, um conjunto de experimentos de pequeno, médio e grande porte foram realizados. Os problemas testes usados no processamento do algoritmo foram obtidos de [68]. Para cada conjunto de dados o problema foi resolvido em séries de 2 a 10 concentradores. Além disso, comparou-se os resultados obtidos com outros métodos de otimização disponíveis na literatura. Por questões práticas e sem perda de generalidade serão apresentados somente alguns dos problemas testes resolvidos.

## 5.1 Análise Comparativa de Resultados

Essa seção apresenta uma discussão comparativa entre o método proposto e trabalhos publicados na literatura científica. Deve-se registrar que o único trabalho encontrado na bibliografia com alguma possibilidade de comparação, foi o apresentado por Jia *et al.* em [43]. Deste modo, essa comparação se limita ao problema de 51 pontos, extraídos de uma figura contida no trabalho de Waters em [69], citado também por Jia *et al.* [43]. Assim, em razão da relevância dessa base de dados em termos comparativos com os resultados obtidos na execução do método proposto, daqui por diante esse problema teste também será denominado de *Waters51*, em referência ao autor do artigo de onde os pontos foram obtidos.

A tabela 5.1 ilustra em cada linha o número de concentradores, os valores da função objetivo, o número de ocorrências da melhor solução, o desvio médio percentual e o tempo médio produzidos na execução do algoritmo proposto para o problema teste *Waters51*. Pode-se observar, também, a consistência da metodologia proposta em razão do número expressivo de ocorrências da melhor solução. A estabilidade numérica do algoritmo é constatado pelos valores baixos do desvio médio das 10 soluções em relação à melhor solução. O problema foi resolvido em tempos de CPU muito pequenos.

A tabela 5.2 apresenta os resultados de cada iteração da melhor solução para a rede com 51 elementos de comunicação com 10 concentradores. O número de iterações é descrito na primeira coluna, os valores para o parâmetro  $\tau$  são ilustrados na segunda coluna, os valores da função suavizada são apresentados na terceira coluna e os valores da função objetivo exata são descritos na última coluna. Pode-se observar que os valores da função objetivo suavizada diminuem monotonicamente em cada iteração, seguindo a redução do parâmetro  $\tau$ . Além disso, observa-se que a sequência de valores para a função objetivo exata convergem a partir da segunda iteração com 5 dígitos significativos de precisão. A convergência entre as iterações três e cinco atinge 7 dígitos significativos de precisão. Finalmente, a partir da

sexta iteração o método alcança 8 dígitos significativos de precisão.

Tabela 5.1: Melhores soluções para o problema teste *Waters51*

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.479702E3	98	1.08	0.03
3	0.385163E3	74	6.38	0.05
4	0.347488E3	76	2.35	0.01
5	0.325988E3	13	5.59	0.01
6	0.311612E3	4	2.66	0.04
7	0.301890E3	3	2.03	0.03
8	0.291121E3	34	2.67	0.03
9	0.287302E3	17	2.52	0.03
10	0.286068E3	2	2.97	0.13

Tabela 5.2: Processo iterativo para o problema *Waters51* com 10 concentradores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.591E+00	0.4232173874367126E3	0.3150331194788005E3
2	0.148E+00	0.3410925065612777E3	0.3116170667615303E3
3	0.369E-01	0.3190196382948085E3	0.3116118998602143E3
4	0.923E-02	0.3134655555001828E3	0.3116118231790055E3
5	0.231E-02	0.3120753450160672E3	0.3116118040448563E3
6	0.577E-03	0.3117276916072604E3	0.3116117992606684E3
7	0.144E-03	0.3116407715677448E3	0.3116117980657234E3
8	0.361E-04	0.3116190411675155E3	0.3116117977657817E3

Nos experimentos numéricos para o cálculo do custo total da rede com  $k$  concentradores, Jia *et al.*[43] aplicaram o método k-means com pontos iniciais diferentes e escolheram aqueles que ofereceram os melhores resultados. Eles realizaram uma série de tentativas no intervalo de 20 – 30 pontos iniciais.

No primeiro experimento, Jia *et al.*[43] avaliaram o custo total para se definir uma rede hierárquica para o caso particular de 6 concentradores, usando 8 experimentos com 20 – 30 pontos iniciais diferentes para cada um. A tabela 5.3 apresenta os resultados contidos em Jia *et al.*[43] e os obtidos na execução do método proposto para a mesma quantidade de concentradores. A primeira coluna ilustra o número do experimento. A segunda coluna ilustra os resultados oferecidos pelo

método k-means. A terceira coluna apresenta os resultados para a primeira abordagem de Jia *et al.*[43], onde o custo total da rede depende apenas do posicionamento do concentradores e esses são definidos arbitrariamente no plano. A quarta coluna ilustra da segunda abordagem de Jia *et al.*[43], onde as posições dos concentradores são calculadas diretamente da base de dados. Os valores da quinta coluna foram obtidos de uma combinação dos métodos k-means e a primeira abordagem de Jia *et al.*[43], sendo os pontos iniciais definidos pela primeira abordagem de Jia *et al.*[43] e as posições finais dos concentradores determinadas pelo k-means. Os valores da sexta coluna foram obtidos de maneira oposta, as posições iniciais são dadas pelo k-means e a posições finais pela primeira abordagem de Jia *et al.*[43]. Finalmente a última coluna ilustra os valores obtidos na execução do método de otimização proposto nessa tese, *rh-sh*, em 8 experimentos para o caso particular de 6 concentradores. Em cada experimento, utiliza-se 25 pontos iniciais, valor médio do intervalo utilizado por Jia *et al.* em [43], e as melhores soluções são escolhidas para efeitos comparativos. O número de tentativas é o ponto médio em relação aos valores adotados por Jia *et al.*[43], em vista que os autores não divulgam exatamente o número de tentativas utilizadas para obter as melhores soluções.

Tabela 5.3: Melhores soluções produzidas por 6 métodos de otimização

Exp	k-means	op2	op1	1k-means	k-means1	rh-sh
1	374	313	392	308	371	311
2	344	314	415	322	371	311
3	344	316	392	325	322	312
4	344	308	389	322	317	312
5	318	308	390	317	312	312
6	323	313	352	320	325	311
7	320	309	384	315	336	311
8	338	313	383	324	333	311
Média	338,13	311,75	387,13	319,13	335,88	311,38
Desvio	18,33	3,01	17,31	5,62	23,03	0,52

Na penúltima linha da tabela 5.3 são apresentados os custos totais médios em relação às 8 execuções de cada algoritmo. Pode-se observar que o algoritmo proposto nessa tese apresenta a menor média entre os métodos comparados. O valor muito pequeno para o desvio padrão em relação aos resultados obtidos com o método proposto confirma a consistência numérica do método. Esse comportamento pode ser observado graficamente através da Figura 5.1.

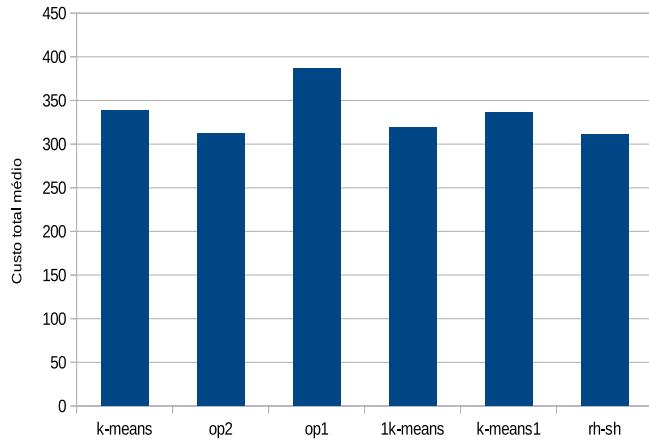


Figura 5.1: Custos totais médios produzidos por 6 métodos de otimização

A tabela 5.4 representa os custos totais produzidos na execução de quatro métodos de otimização para uma série de 3 à 8 concentradores. A primeira coluna representa o número de concentradores, a segunda o custo produzidos na execução do algoritmo proposto nessa tese, a terceira o custo produzido com o algoritmo k-means, a quarta ilustra o custo produzido com a execução do algoritmo proposto na segunda abordagem de Jia *et al.*[43]. Finalmente, a quinta coluna representa os valores obtidos na execução do algoritmo definido pela combinação do método k-means com a segunda formulação de Jia *et al.* em [43]. Os valores para os três últimos métodos foram extraídos da Figura 1 contida no trabalho Jia *et al.*[43]. Para esse propósito, utilizou-se uma ferramenta de edição de imagens para segmentar a figura e posteriormente, foi possível contabilizar o custo produzido em cada método.

Tabela 5.4: Custos totais produzidos por 4 métodos de otimização

Concentradores	rh-sh	k-means	op2	op2-kmeans
3	385,16	403,15	402,10	401,20
4	347,49	348,50	348,70	348,40
5	325,99	333,40	329,80	326,90
6	311,61	318,10	309,50	308,50
7	301,89	308,20	307,30	302,90
8	291,12	294,85	292,76	291,50

Em geral, pode-se observar que o método proposto apresenta os melhores resultados em termos de custo total exigido na concepção de redes hierárquicas em estrela, exceto para o caso particular de 6 concentradores em que a diferença é bem pequena, cerca de 1% (um por cento). A figura 5.2 ilustra claramente essa relação comparativa. O eixo das abscissas representa a série de concentradores e o eixo

das ordenadas representa o custo total da rede. Causa estranheza que os resultados da combinação dos métodos op2 e k-means não são apresentados na Tabela 1 de experimentos de Jia *et al.* em [43]. Todavia, essa combinação é apresentada como o melhor método da Figura 1 de Jia *et al.* em [43], sendo explicitamente declarado no texto que seu desempenho é superior. Ademais, não foi revelado na experimentação como os pontos iniciais foram determinados.

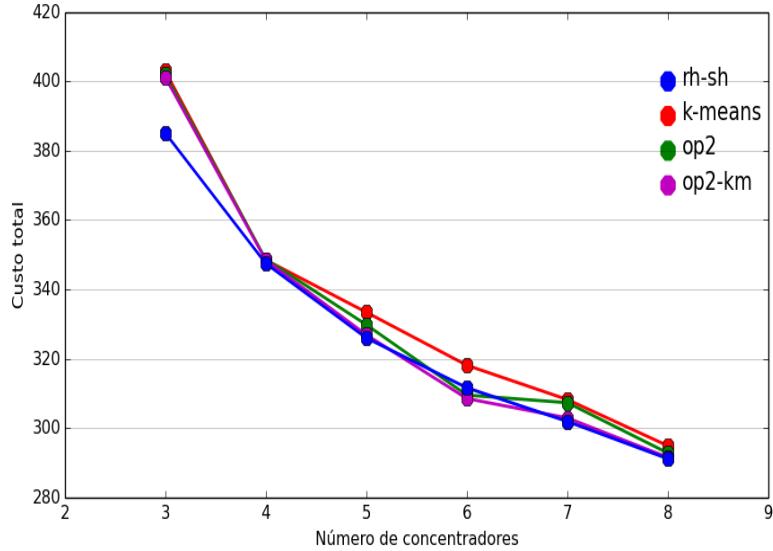
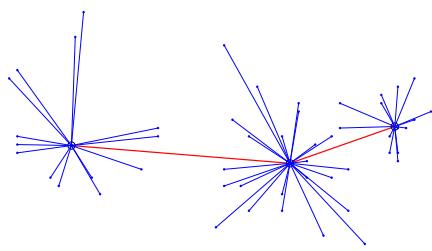
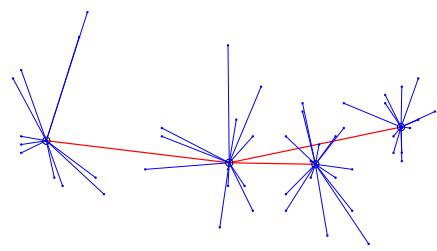


Figura 5.2: Custos totais produzidos por 4 métodos de otimização

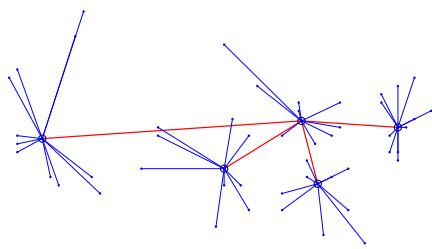
As soluções gráficas para as redes discutidas na tabela 5.1 são apresentadas na Figura 5.3. Por questões de organização do texto, as redes são apresentadas numa estrutura de matriz, com cinco linhas e duas colunas. A rede com dois concentradores não é apresentada em razão da limitação de espaço. Pode-se observar em cada rede uma estrutura hierárquica em estrela, onde os coletores são interligados a um concentrador e estes são interligados diretamente ao concentrador central.



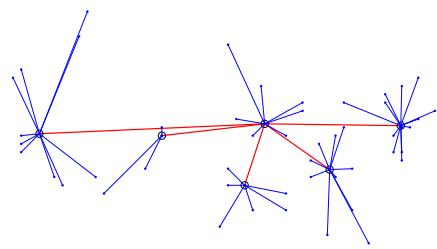
(a) 3 concentradores



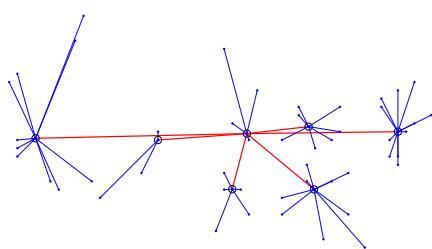
(b) 4 concentradores



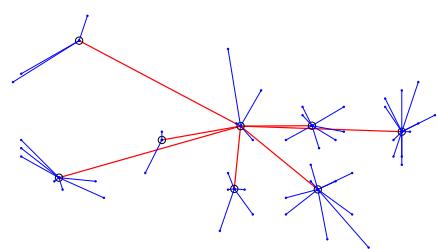
(c) 5 concentradores



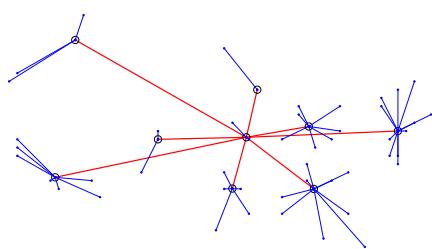
(d) 6 concentradores



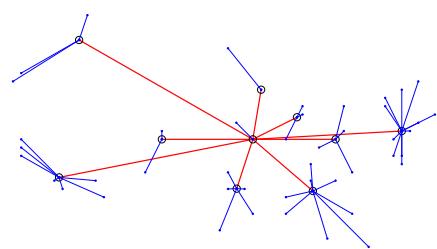
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores



(g) 9 concentradores



(h) 10 concentradores

Figura 5.3: Soluções gráficas para as redes com 51 coletores

O trabalho de Jia *et al.*[43] comenta a realização de experimentos computacionais, usando um problema teste com 2000 pontos gerados aleatoriamente no plano. Infelizmente, esses dados não foram disponibilizados, tampouco o detalhamento dos resultados computacionais obtidos. Assim, não é possível realizar qualquer outra comparação além do caso previamente discutido com 51 coletores.

Cabe salientar que Jia *et al.*[43] não discutem o desempenho do algoritmo em termos de tempo de processamento. Os autores também não discutem a consistência e a estabilidade numérica do algoritmo, como argumentado maciçamente ao longo desse capítulo para o método proposto. A seguir serão apresentados os resultados obtidos na resolução de problemas de maior porte. Para facilidade de apresentação e de entendimento os problemas testes de pequeno, médio e grande portes são divididos em três seções.

## 5.2 Experimentos de Pequeno Porte

Para avaliar o algoritmo na solução de problemas de pequeno porte, realizou-se o processamento de três conjunto de dados com 100, 200 e 400 coletores. Os resultados computacionais encontrados são apresentados nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7. A estrutura de cada tabela é a mesma, onde a primeira coluna representa o número especificado de concentradores  $p$ . A segunda coluna ilustra o melhor valor da função objetivo suavizada produzida na execução do algoritmo em 100 tentativas. As próximas três colunas representam o número de ocorrências da melhor solução, o desvio médio percentual e o tempo médio dado em segundos, respectivamente.

A partir dos resultados apresentados nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, observa-se que a primeira implementação do algoritmo para resolver problema de posicionamento de concentradores em redes de pequeno porte, confirma a consistência da metodologia proposta. O número expressivo de ocorrências da melhor solução nesses experimentos mostra o desempenho consistente do algoritmo. Os valores baixos do desvio médio das 100 soluções em relação à melhor solução obtida mostram a consistência e estabilidade numérica do algoritmo.

Tabela 5.5: Melhores soluções para 100 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.314189E5	45	5.46	0.02
3	0.238769E5	7	3.55	0.02
4	0.202579E5	11	2.27	0.06
5	0.184968E5	1	0.73	0.04
6	0.169695E5	64	1.11	0.05
7	0.158949E5	36	1.76	0.08
8	0.149649E5	49	1.91	0.04
9	0.143534E5	52	1.72	0.10
10	0.139606E5	12	2.02	0.13

Tabela 5.6: Melhores soluções para 200 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.153861E6	100	0.00	0.01
3	0.131324E6	93	1.20	0.02
4	0.115768E6	89	0.18	0.06
5	0.102590E6	1	0.61	0.02
6	0.934138E5	36	0.94	0.05
7	0.870422E5	9	0.52	0.13
8	0.816914E5	55	0.83	0.13
9	0.777485E5	27	0.66	0.15
10	0.756290E5	19	0.46	0.19

Tabela 5.7: Melhores soluções para 400 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.119189E6	78	2.51	0.07
3	0.929533E5	91	2.54	0.01
4	0.778381E5	94	1.18	0.05
5	0.698896E5	91	0.24	0.07
6	0.642001E5	42	0.25	0.09
7	0.594199E5	29	0.14	0.21
8	0.547598E5	72	0.19	0.15
9	0.515214E5	90	0.24	0.26
10	0.496168E5	9	0.31	0.30

Os valores apresentados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 ilustram os processos iterativos para cada uma das melhores soluções para as redes com 100, 200 e 400 coletores com 10 concentradores. O número de cada iteração é descrito na primeira coluna, os valores para parâmetro  $\tau$  são ilustrados na segunda coluna, os valores da função suavizada são apresentados na terceira coluna e os valores da função objetivo exata são descritos na última coluna. Pode-se observar que os valores da função suavizada diminuem monotonicamente em cada iteração, seguindo a redução do parâmetro  $\tau$ . Adicionalmente, observa-se que a sequência de valores para a função objetivo exata convergem a partir da quinta iteração para a rede com 200 coletores com 7 dígitos significativos de precisão. As redes com 100 e 400 coletores também convergem na quinta iteração, mas com 8 algarismos de precisão.

Tabela 5.8: Valores de cada iteração numa rede com 100 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.992E1	0.1771341081870862E5	0.1397770121005914E5
2	0.248E1	0.1493062089469975E5	0.1396354378439785E5
3	0.620E0	0.1420457255614110E5	0.1396065322838647E5
4	0.155E0	0.1402168501466436E5	0.1396064966960688E5
5	0.388E-1	0.1397591099337752E5	0.1396064878266493E5
6	0.969E-2	0.1396446432316366E5	0.1396064856089733E5
7	0.242E-2	0.1396160245910025E5	0.1396064850545464E5
8	0.606E-3	0.1396088698169179E5	0.1396064849159294E5

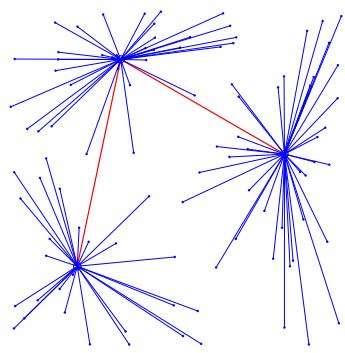
Tabela 5.9: Valores de cada iteração numa rede com 200 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.422E2	0.1072669095363376E6	0.7722321514756030E5
2	0.106E2	0.8381229216216350E5	0.7575192085154193E5
3	0.264E1	0.7769964155346525E5	0.7563125900230653E5
4	0.660E0	0.7614942276027738E5	0.7563118406624687E5
5	0.165E0	0.7575885893559102E5	0.7562895883380115E5
6	0.412E-1	0.7566143630521573E5	0.7562895805647846E5
7	0.103E-1	0.7563707762413273E5	0.7562895786212169E5
8	0.258E-2	0.7563098776649385E5	0.7562895781352570E5

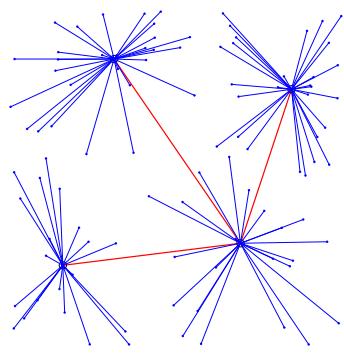
Tabela 5.10: Valores de cada iteração numa rede com 400 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.196E2	0.7721446116166958E5	0.5064432126309315E5
2	0.489E1	0.5710995267973765E5	0.4964959188672399E5
3	0.122E1	0.5153378670528247E5	0.4961884614665260E5
4	0.305E0	0.5009760881204187E5	0.4961685057407904E5
5	0.764E-1	0.4973710740524824E5	0.4961684985807821E5
6	0.191E-1	0.4964691819220515E5	0.4961684968606383E5
7	0.477E-2	0.4962436702532559E5	0.4961684964307078E5
8	0.119E-2	0.4961872899384268E5	0.4961684963232061E5

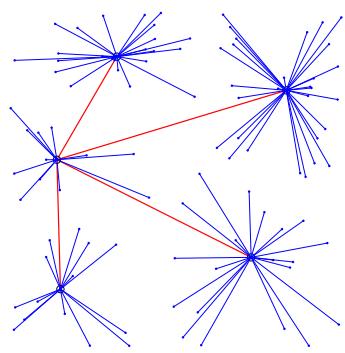
Finalmente, as soluções gráficas para as redes de pequeno porte discutidas nessa seção, são apresentadas nas figuras 5.4,5.5 e 5.6.



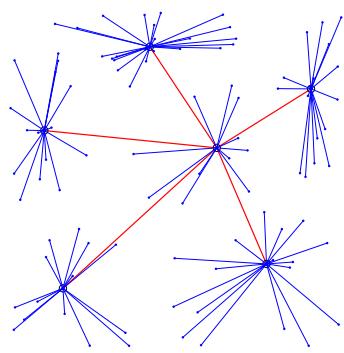
(a) 3 concentradores



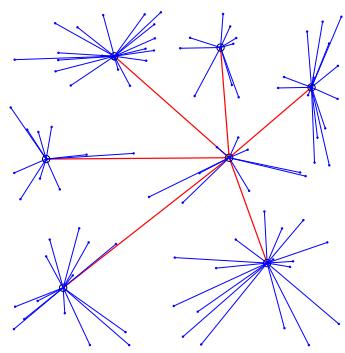
(b) 4 concentradores



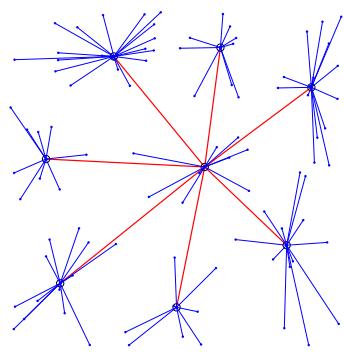
(c) 5 concentradores



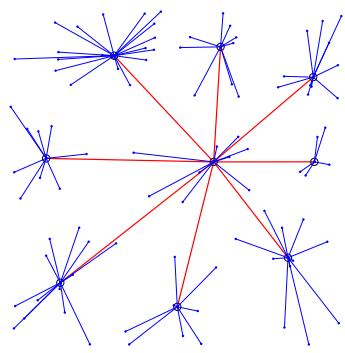
(d) 6 concentradores



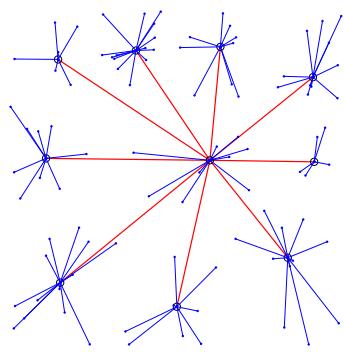
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores

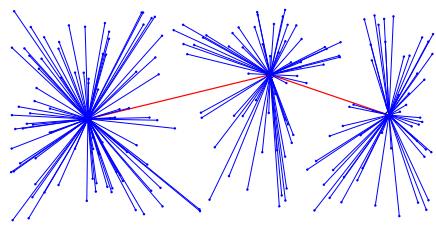


(g) 9 concentradores

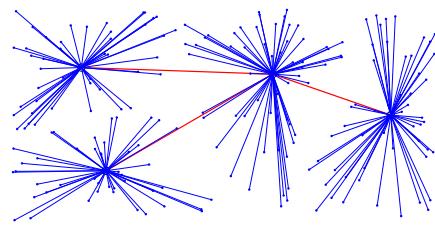


(h) 10 concentradores

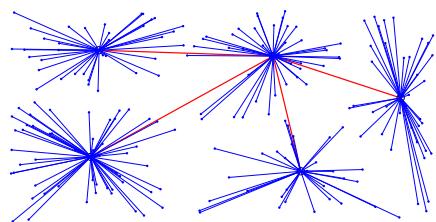
Figura 5.4: Soluções gráficas para as redes com 100 coletores



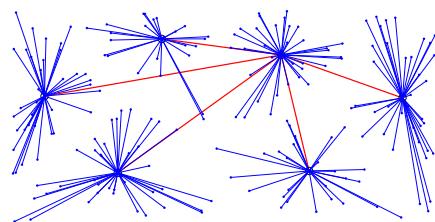
(a) 3 concentradores



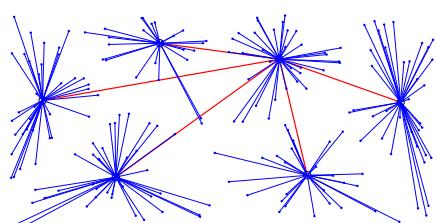
(b) 4 concentradores



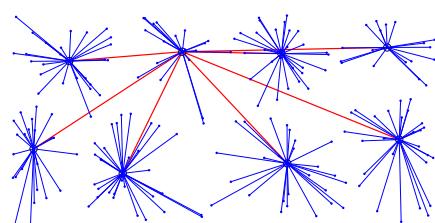
(c) 5 concentradores



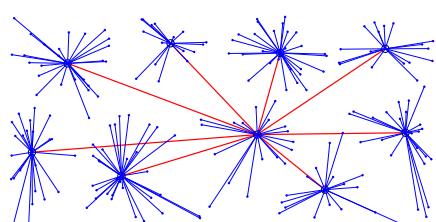
(d) 6 concentradores.



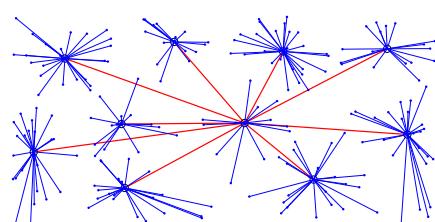
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores

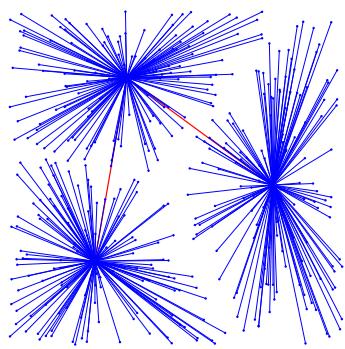


(g) 9 concentradores

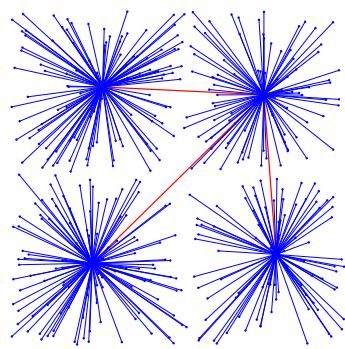


(h) 10 concentradores

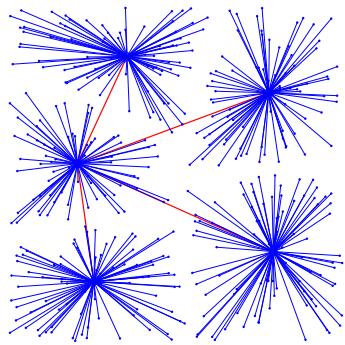
Figura 5.5: Soluções gráficas para as redes com 200 coletores



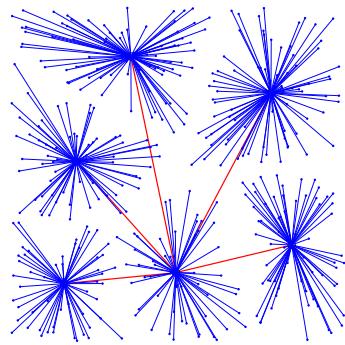
(a) 3 concentradores



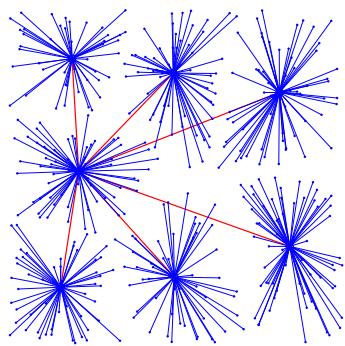
(b) 4 concentradores



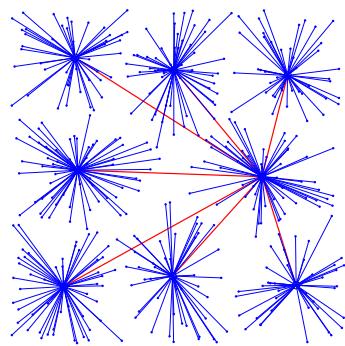
(c) 5 concentradores



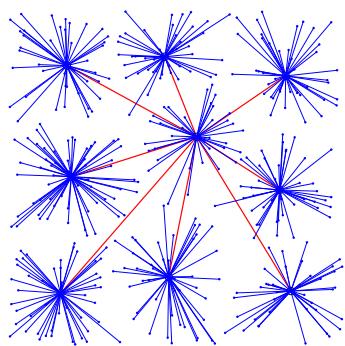
(d) 6 concentradores



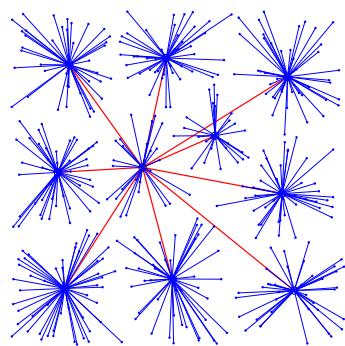
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores



(g) 9 concentradores



(h) 10 concentradores

Figura 5.6: Soluções gráficas para as redes com 400 coletores

### 5.3 Experimentos de Médio Porte

Os experimentos para avaliar o algoritmo na concepção de projetos de redes de médio porte, foram realizados através do processamento de 2 conjuntos de dados com 1002 e 3038 coletores. Os resultados computacionais encontrados são apresentados nas tabelas 5.11 e 5.12. Pode-se observar um comportamento bastante similar a resolução de problemas de pequeno porte, ou seja, um número elevado de ocorrências de melhor solução, desvio médio com valores baixos e tempo de processamento de CPU muito pequeno.

Tabela 5.11: Melhores soluções para 1002 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.340215E7	100	0.00	0.03
3	0.281685E7	22	0.25	0.17
4	0.232770E7	89	0.40	0.13
5	0.194299E7	83	0.98	0.27
6	0.170837E7	50	0.80	0.41
7	0.158897E7	30	0.21	0.53
8	0.147249E7	45	0.80	0.54
9	0.136153E7	60	2.10	0.60
10	0.130772E7	37	1.25	0.96

Tabela 5.12: Melhores soluções para 3038 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.289960E7	100	0.00	0.13
3	0.237731E7	96	0.26	0.32
4	0.198306E7	99	0.00	0.48
5	0.178475E7	62	0.00	0.68
6	0.161381E7	100	0.00	0.93
7	0.149582E7	73	0.38	1.16
8	0.139504E7	1	0.34	1.55
9	0.130796E7	71	0.11	1.78
10	0.122525E7	3	0.19	2.21

Ao avaliar nas tabelas 5.13 e 5.14 o comportamento do parâmetro  $\tau$  em relação aos valores das funções suavizada e exata em cada iteração, pode-se observar objetivamente um comportamento bastante similar aos resultados obtidos na resolução

de redes de pequeno porte. Os valores da função suavizada diminuem linearmente em cada iteração, seguindo a redução do parâmetro  $\tau$ . Os valores da última coluna ilustram o processo de convergência em cada iteração para a função objetivo exata. A rede com 1002 coletores atinge uma convergência de 10 dígitos significativos de precisão a partir da quinta iteração e na sétima o nível de precisão alcança 16 dígitos. Nesse mesmo contexto, a rede com 3038 coletores alcança 11 algarismos significativos de precisão na sexta iteração e na sétima iteração atinge os 14 dígitos de precisão.

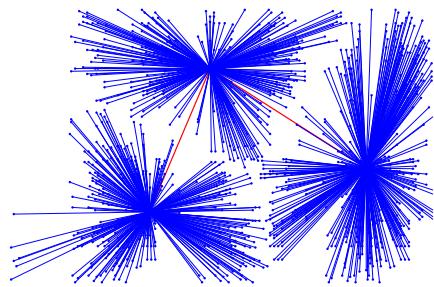
Tabela 5.13: Valores de cada iteração numa rede com 1002 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.246E3	0.2161510710185257E7	0.1312563139192997E7
2	0.616E2	0.1543855796852389E7	0.1308055168605229E7
3	0.154E2	0.1368060188235437E7	0.1307837717721601E7
4	0.385E1	0.1322882523913430E7	0.1307722218215221E7
5	0.962E0	0.1311512171569261E7	0.1307718069104756E7
6	0.240E0	0.1308666730852708E7	0.1307718069076892E7
7	0.601E-1	0.1307955242881257E7	0.1307718069076824E7
8	0.150E-1	0.1307777363048383E7	0.1307718069076824E7

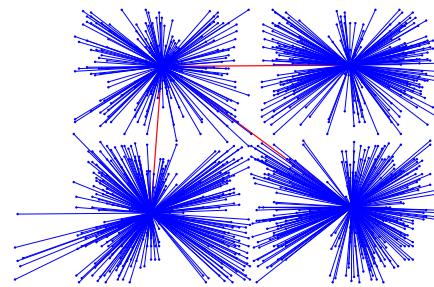
Tabela 5.14: Valores de cada iteração numa rede com 3038 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.767E2	0.2002112763463432E7	0.1228710477448287E7
2	0.192E2	0.1446075817679532E7	0.1225445265518613E7
3	0.480E1	0.1282088153074166E7	0.1225266142887059E7
4	0.120E1	0.1239557552122090E7	0.1225255482954322E7
5	0.300E0	0.1228831338333077E7	0.1225247849567004E7
6	0.749E-1	0.1226143636494058E7	0.1225247453750455E7
7	0.187E-1	0.1225471510257577E7	0.1225247453749374E7
8	0.468E-2	0.1225303468544424E7	0.1225247453749367E7

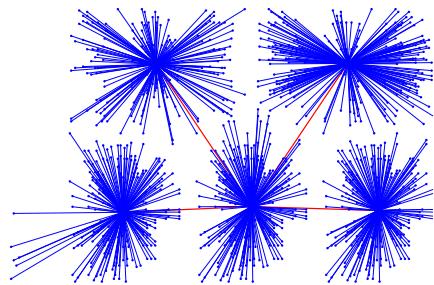
As soluções gráficas para as redes de médio portes discutidas na seção são apresentadas na Figura 5.3. Por questões de organização estrutural do texto a rede com 2 concentradores não é apresentada.



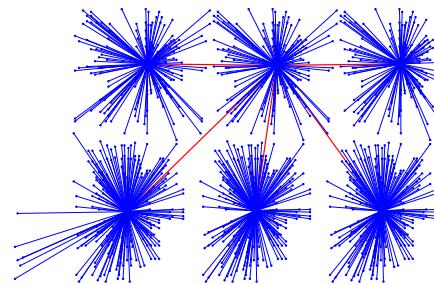
(a) 3 concentradores



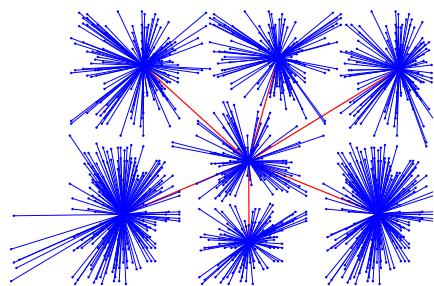
(b) 4 concentradores



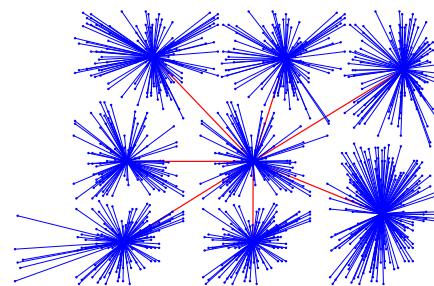
(c) 5 concentradores



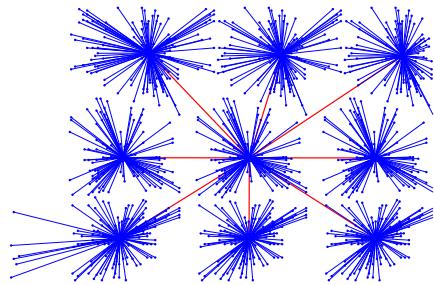
(d) 6 concentradores



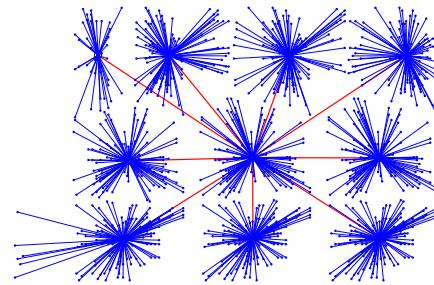
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores

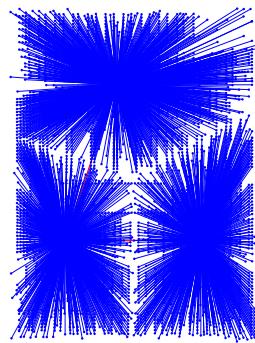


(g) 9 concentradores

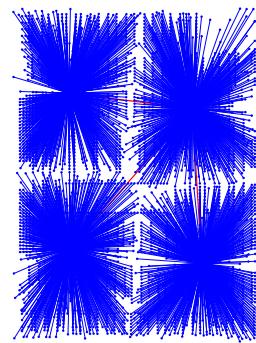


(h) 10 concentradores

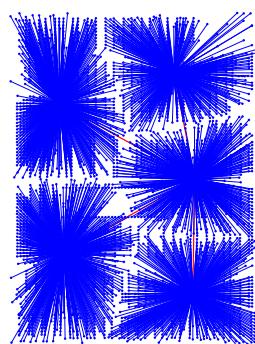
Figura 5.7: Resultados para as redes com 1002 coletores



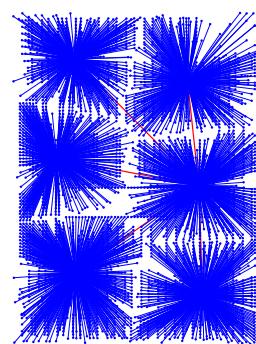
(a) 3 concentradores



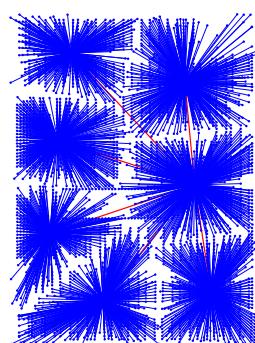
(b) 4 concentradores



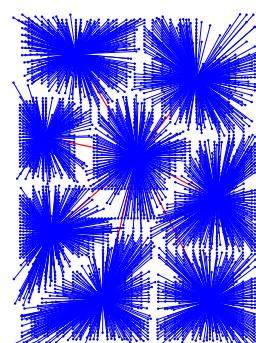
(c) 5 concentradores



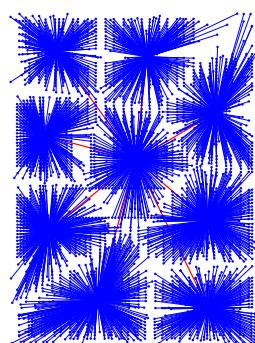
(d) 6 concentradores



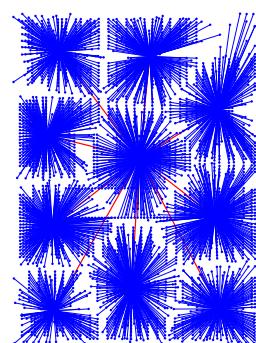
(e) 7 concentradores



(f) 8 concentradores



(g) 9 concentradores



(h) 10 concentradores

Figura 5.8: Resultados para as redes com 3038 coletores

## 5.4 Experimentos de Grande Porte

Para avaliar o método proposto na concepção de redes hierárquicas de grande porte, utilizou-se problemas testes com 33810 e 85900 coletores. Nas tabelas 5.15 e 5.16 é possível observar um comportamento bastante similar aos resultados obtidos na resolução de problemas de pequeno e médio portes em termos de consistência e desempenho. Por exemplo, na tabela 5.16 a ocorrência da melhor solução é muito expressiva, o desvio médio é baixo e o tempo de CPU é muito pequeno. Mais do que isso, a resolução do problema para 3, 4, e 8 concentradores apresenta 100% (cem por cento) de acerto para a melhor solução, portanto, o desvio médio inexiste.

Deve ser destacado que esta base de dados com 85900 coletores é o maior problema teste adequado a projetos de redes hierárquicas, que se tem conhecimento na literatura.

Tabela 5.15: Melhores soluções para 33810 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.513231E10	100	0.00	4.39
3	0.410404E10	100	0.00	6.99
4	0.342228E10	100	0.00	10.42
5	0.309297E10	20	0.16	15.93
6	0.282079E10	98	0.03	21.28
7	0.260291E10	63	0.28	28.10
8	0.242199E10	92	0.13	35.16
9	0.228160E10	64	0.53	43.77
10	0.217713E10	62	0.12	56.07

Tabela 5.16: Melhores soluções para 85900 coletores em 100 tentativas

Concentradores	Função suavizada	Ocorrência	Desvio médio	Tempo médio
2	0.163628E11	58	1.13	11.08
3	0.127842E11	100	0.00	21.03
4	0.108074E11	100	0.00	28.44
5	0.984656E10	86	0.05	44.50
6	0.902662E10	97	0.03	61.49
7	0.836567E10	31	0.18	76.39
8	0.778417E10	100	0.00	100.36
9	0.737468E10	87	0.11	126.73
10	0.704361E10	20	0.09	153.18

Um comportamento bastante similar também pode ser observado em relação ao processo de convergência dos valores das funções suavizada e exata, quando comparados com os resultados obtidos na resolução de problemas de pequeno e médio portes, conforme ilustrado nas tabelas 5.17 e 5.18. No processo iterativo, os valores da função suavizada diminuem linearmente, seguindo a redução do parâmetro  $\tau$ . A rede com 33810 atinge 9 algarismos significativos de precisão na sexta iteração, já a rede com 85900 alcança 9 dígitos de precisão na sétima iteração.

Tabela 5.17: Valores de cada iteração numa rede com 33810 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.158E5	0.3837740321486197E10	0.2185764250415703E10
2	0.396E4	0.2675035163969288E10	0.2181071614962908E10
3	0.990E3	0.2307530216360703E10	0.2177161675948373E10
4	0.248E3	0.2210000012371606E10	0.2177133364109299E10
5	0.619E2	0.2185364917073951E10	0.2177130230191487E10
6	0.155E2	0.2179189630415131E10	0.2177129819404118E10
7	0.387E1	0.2177644809023872E10	0.2177129816739038E10
8	0.967E0	0.2177258566999485E10	0.2177129816738870E10

Tabela 5.18: Valores de cada iteração numa rede com 85900 coletores

Iteração	Parâmetro $\tau$	Função suavizada	Função exata
1	0.171E5	0.1169148608763208E11	0.7073049707171802E10
2	0.428E4	0.8414894383846369E10	0.7043869182244514E10
3	0.107E4	0.7400756091199002E10	0.7043623840151269E10
4	0.268E3	0.7133846236526661E10	0.7043611150173388E10
5	0.669E2	0.7066229603964444E10	0.7043608245719849E10
6	0.167E2	0.7049267004058076E10	0.7043607534395515E10
7	0.418E1	0.7045022465321573E10	0.7043607318863098E10
8	0.105E1	0.7043961107751809E10	0.7043607310073969E10

Infelizmente, não foi possível encontrar na literatura, resultados computacionais para os problemas testes com 100, 200, 400, 1002, 3038, 33810 e 85900 coletores. Dessa maneira, não foi possível fazer qualquer tipo de comparação. Assim, os resultados obtidos nas solução de problemas testes de pequeno, médio e grande portes são um desafio para pesquisas futuras.

Dante desse cenário, faz-se um conjunto de registros. A consistência da metodologia proposta foi constatada na concepção de projetos de redes hierárquicas de pequeno, médio e grande portes. Essa afirmação é decorrente do número bastante elevado de ocorrências da melhor solução, especialmente, para os problemas de médio e grande portes. Os valores baixos do desvio médio das 10 soluções em relação à melhor solução obtida mostram a consistência e estabilidade numérica do algoritmo. O desempenho eficiente do algoritmo também pode ser observado, em razão do tempo de CPU ser muito pequeno para os problemas resolvidos.

Em particular, destaca-se que o problema teste com 85900 coletores, resolvido com o método proposto é 1.684,31 vezes maior do que o maior problema encontrado na literatura. Isto reflete de maneira bastante categórica a eficiência da metodologia proposta. Além disso, a escassez de problemas similares ao método proposto nessa tese, ratifica a natureza complexa do problema de concepção de redes hierárquicas num espaço contínuo.

Finalmente, o problema de posicionamento de concentradores em redes subaquáticas para bacias hidrográficas foi apropriadamente resolvido em tempos de CPU adequados, como consequência da baixa dimensão do problema não linear da equação 4.14, definido em um espaço dimensional ( $2p$ ), e do uso de um algoritmo de minimização que obtém vantagem da sua propriedade diferenciável  $C^\infty$ .

Cabe salientar que a quantidade de coletores dos problemas testes impacta no entendimento visual das redes hierárquicas em estrela resolvidas nessa tese. Essa afirmação pode ser constatada nas figuras 5.7 e 5.8, onde é possível observar um aumento de densidade a medida que o número de coletores aumenta. Nos problemas de grande portes, as densidades das redes tornam-se totalmente compactas ao ponto de inviabilizar o entendimento gráfico em relação às topologias das redes. Assim, as soluções gráficas para os problemas de grande portes resolvidos nessa seção não são apresentadas.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi proposto um método de otimização contínua para resolver o problema de posicionamento de concentradores com aplicação em redes subaquáticas de águas rasas, tal como o HRECOS. A topologia da rede é definida pela determinação do posicionamento de um determinado número  $p$  de concentradores e uma estação base para conjunto de  $m$  coletores, definidos no espaço Euclidiano bidimensional. O projeto ótimo é definido como aquele que minimiza a função de custo como a soma das distâncias dos coletores a seu concentrador mais próximo, mais o custo de posicionamento da estação base.

A especificação do problema corresponde a uma formulação fortemente não diferenciável de difícil solução. Assim, o método proposto adota a estratégia de suavização hiperbólica para reformular o problema, em uma abordagem de aproximação, como um problema de otimização sem restrições completamente diferenciável. A solução é finalmente obtida resolvendo uma sequência de subproblemas de otimização sem restrições diferenciável no espaço Euclidiano de duas dimensões.

Essa tese é uma extensão natural do trabalho de agrupamento proposto por Xavier [47]. A principal contribuição em relação ao problema de localização de concentrador é a definição do concentrador central durante o processo de otimização, através da minimização das somas de distâncias entre os concentradores. A modelagem do problema usando uma região planar é aceitável devido às características de águas rasas. A minimização da distância entre nós pode ser usada como uma técnica para posicionamento de concentradores que, conforme aproximações apresentadas, indiretamente expressa economia de energia em redes subaquáticas [45].

A aplicação da metodologia de suavização hiperbólica provou ser robusta e consistente na resolução de redes hierárquicas em estrela de pequeno, médio e grande portes, segundo o critério soma dos mínimos quadrados [47–49]. Merece destaque a solução da rede com 85900 coletores, que é 1.684,31 vezes maior do que o maior problema resolvido na literatura. O desempenho consistente e a estabilidade numérica do algoritmo pode ser atribuída à completa diferenciabilidade da abordagem.

Ao comparar os resultados obtidos na execução do método proposto com o único trabalho encontrado na literatura [43], que apresenta alguma condição de comparação, constatou-se que o método proposto apresenta os melhores resultados em relação ao custo total exigido na concepção de redes hierárquicas em estrela. Destaca-se que o trabalho de Jia *et al.* [43] não discute o desempenho em termos de tempo de processamento, a consistência e a estabilidade numérica do algoritmo. Portanto, os resultados apresentados nessa tese caracteriza-se como um desafio para trabalhos futuros.

Diferentemente dos trabalhos de Ibrahim *et al.* em [17, 18] que abordam o problema de projetar redes subaquáticas como uma arquitetura grade e que restringem a solução a um subconjunto de posições para os concentradores, esta tese oferece uma solução contínua que permite posicionar os concentradores e a estação base estrategicamente, gerando uma rede bastante homogênea em termos de distância e quantidade de coletores. Assim, a solução proposta oferece um espaço contínuo para a especificação da rede. Além disso, o método proposto nesta tese baseia-se em perturbações das posições dos concentradores, que permitem o seu deslocamento no plano durante o processo de minimização. Desse modo, apresenta-se como uma técnica promissora para lidar com a mobilidade devida a correntes de águas, ou pelos menos mais adequada do que a técnica de programação inteira adotada em Ibrahim al. *et al.* [17, 18]. Finalmente, o problema de posicionamento da estação base tem sido pouco considerado na literatura de redes subaquáticas.

Embora apenas a formulação especial para concepção de projetos de redes hierárquicas em estrela 4.15 tenha sido considerada, deve ser enfatizado que esta abordagem pode ser adotada para resolver problemas de redes com custo majoritário linearmente dependente das distâncias entre seus elementos. Problemas em que a dependência é aproximadamente linear, como o consumo de energia tratado neste trabalho, também podem ser resolvidos. Poucas adaptações correspondentes precisam ser realizadas

De imediato, o algoritmo implementado pode ser utilizado para analisar o consumo de energia em redes subaquáticas, com a inclusão do modelo de energia definido neste trabalho na função objetivo 4.15. Isto possibilita determinar, por exemplo, o número de concentradores que minimiza o consumo de energia na rede. Também pode ser utilizado para projetos de redes subaquáticas de três dimensões estacionárias.

# Referências Bibliográficas

- [1] CONTRERAS, I., FERNÁNDEZ, E., MARÍN, A. “The tree of hubs location problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 2, pp. 390–400, 2010.
- [2] ALUMUR, S., KARA, B. Y. “Network hub location problems: The state of the art”, *European Journal of Operational Research*, v. 190, n. 1, pp. 1–21, 2008.
- [3] FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M., ARABANI, A. B., et al. “Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 64, n. 4, pp. 1096–1109, 2013.
- [4] LABBÉ, M., YAMAN, H. “Solving the hub location problem in a star–star network”, *Networks*, v. 51, n. 1, pp. 19–33, 2008.
- [5] YAMAN, H., ELLOUMI, S. “Star p-hub center problem and star p-hub median problem with bounded path lengths”, *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 11, pp. 2725–2732, 2012.
- [6] YAMAN, H. “Star p-hub median problem with modular arc capacities”, *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 9, pp. 3009–3019, 2008.
- [7] RODRIGUEZ-MARTIN, I., SALAZAR-GONZALEZ, J. J. “Solving a capacitated hub location problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 184, n. 2, pp. 468–479, 2008.
- [8] AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T. “Underwater acoustic sensor networks: research challenges”, *Ad hoc networks*, v. 3, n. 3, pp. 257–279, 2005.
- [9] HEIDEMANN, J., STOJANOVIC, M., ZORZI, M. “Underwater sensor networks: applications, advances and challenges”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 370, n. 1958, pp. 158–175, 2012.

- [10] KHAN, A., JENKINS, L. “Undersea wireless sensor network for ocean pollution prevention”. In: *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on*, pp. 2–8. IEEE, 2008.
- [11] KOLAR, H., CRONIN, J., HARTSWICK, P., et al. “Complex real-time environmental monitoring of the Hudson river and estuary system”, *IBM Journal of Research and Development*, v. 53, n. 3, pp. 378–387, 2009.
- [12] CASEY, K., LIM, A., DOZIER, G. “A sensor network architecture for tsunami detection and response”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 4, n. 1, pp. 28–43, 2008.
- [13] CAYIRCI, E., TEZCAN, H., DOGAN, Y., et al. “Wireless sensor networks for underwater surveillance systems”, *Ad Hoc Networks*, v. 4, n. 4, pp. 431–446, 2006.
- [14] RIBEIRO, F. J. L. *Sistema de Monitoramento Subaquático para Exploração de Petróleo Usando Redes de Sensores Subaquáticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [15] LIN, W., LI, D., TAN, Y., et al. “Architecture of underwater acoustic sensor networks: a survey”. In: *Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2008. ICINIS’08. First International Conference on*, pp. 155–159. IEEE, 2008.
- [16] KHAN, M. E., KHAN, F., OTHERS. “An Empirical Study of Underwater Acoustic Sensor Network and Terrestrial Wireless Network”, *International Journal of Computer Science Issues(IJCSI)*, v. 9, n. 1, 2012.
- [17] IBRAHIM, S., LIU, J., AL-BZOOR, M., et al. “Towards efficient dynamic surface gateway deployment for underwater network”, *Ad Hoc Networks*, v. 11, n. 8, pp. 2301–2312, 2013.
- [18] IBRAHIM, S., AL-BZOOR, M., LIU, J., et al. “General optimization framework for surface gateway deployment problem in underwater sensor networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2013, n. 1, pp. 1–13, 2013.
- [19] LUO, H., GUO, Z., WU, K., et al. “Energy balanced strategies for maximizing the lifetime of sparsely deployed underwater acoustic sensor networks”, *Sensors*, v. 9, n. 9, pp. 6626–6651, 2009.

- [20] PADMAVATHY, T., GAYATHRI, V., INDUMATHI, V., et al. “Network Lifetime Extension Based on Network Coding Technique in Underwater Acoustic Sensor Networks”, *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS)*, v. 3, n. 3, 2012.
- [21] JURDAK, R., BALDI, P., LOPES, C. V. “Software-driven sensor networks for short-range shallow water applications”, *Ad Hoc Networks*, v. 7, n. 5, pp. 837–848, 2009.
- [22] HRECOS, H. R. E. C. O. S. *HRECOS Water Quality and Weather Station Quality Assurance Project Plan*. New York, 2012.
- [23] BEACON, I. R. E. “REON makes strides with year-round Hudson Monitoring”, *Waterways*, 2013.
- [24] BEACON, I. R. E. “Three years to a visualized Hudson REON to expand to 40 sensor nodes”, *Waterways*, 2012.
- [25] BEACON, I. R. E. “Beacon Institute and Clarkson University Form Strategic Alliance”, *Waterways*, 2011.
- [26] BEACON, I. R. E. “REON expands to the Upper Hudson”, *Waterways*, 2010.
- [27] ANA, A. N. A. “Balanço das águas - Exercício 2011”, *Balanço das Aguas*, 2011.
- [28] ANA, A. N. A. “ANA completa dez anos e ganha novas atribuições”, *Aguas Brasil*, 2011.
- [29] BERNARD, E., MAIER, C., MCCREERY, C., et al. *NOAA’s Tsunami Program 2008–2017 Strategic Plan*. Relatório técnico, 2008.
- [30] WEI, Y., ARCAS, D. “A Tsunami Forecast Model for Kodiak, Alaska”, 2010.
- [31] USLU, B., ARCAS, D. R., TITOV, V. V., et al. “A tsunami forecast model for San Francisco, California”, 2010.
- [32] TANG, L., TITOV, V. V., CHAMBERLIN, C. D. “A tsunami forecast model for Hilo, Hawaii”, 2010.
- [33] RIGHI, D., ARCAS, D. “A Tsunami Forecast Model for Newport, Oregon”, 2010.
- [34] ARCAS, D. R., USLU, B. “A tsunami forecast model for Crescent City, California”, 2010.

- [35] BERNARD, E. N., MEINIG, C. “History and future of deep-ocean tsunami measurements”. In: *OCEANS 2011*, pp. 1–7. IEEE, 2011.
- [36] LAWSON, R., GRAHAM, D., STALIN, S., et al. “Next generation Easy-to-Deploy (ETD) tsunami assessment buoy”. In: *OCEANS, 2012-Yeosu*, pp. 1–9. IEEE, 2012.
- [37] APARICIO, J., JIMÉNEZ, A., ALVAREZ, F. J., et al. “Modeling the behavior of an underwater acoustic relative positioning system based on complementary set of sequences”, *Sensors*, v. 11, n. 12, pp. 11188–11205, 2011.
- [38] LLOR, J., MALUMBRES, M. P. “Underwater Wireless Sensor Networks: how do acoustic propagation models impact the performance of higher-level protocols?” *Sensors*, v. 12, n. 2, pp. 1312–1335, 2012.
- [39] MANJULA, R., MANVI, S. S. “Issues in underwater acoustic sensor networks”, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, v. 3, n. 1, pp. 1793–8163, 2011.
- [40] MORADI, M., REZAZADEH, J., ISMAIL, A. S. “A reverse localization scheme for underwater acoustic sensor networks”, *Sensors*, v. 12, n. 4, pp. 4352–4380, 2012.
- [41] GAO, M., FOH, C. H., CAI, J. “On the selection of transmission range in underwater acoustic sensor networks”, *Sensors*, v. 12, n. 4, pp. 4715–4729, 2012.
- [42] CLIMENT, S., CAPELLA, J. V., MERATNIA, N., et al. “Underwater sensor networks: A new energy efficient and robust architecture”, *Sensors*, v. 12, n. 1, pp. 704–731, 2012.
- [43] JIA, L., BAGIROV, A., OUVEYSI, I., et al. “Optimization based clustering algorithms in multicast group hierarchies”. In: *Proceedings of the Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 2003.
- [44] KRATICA, J., MILANOVIĆ, M., STANIMIROVIĆ, Z., et al. “An evolutionary-based approach for solving a capacitated hub location problem”, *Applied Soft Computing*, v. 11, n. 2, pp. 1858–1866, 2011.
- [45] JURDAK, R., LOPES, C. V., BALDI, P. “Battery lifetime estimation and optimization for underwater sensor networks”, *IEEE Sensor Network Operations*, v. 2006, pp. 397–420, 2004.

- [46] DOMINGO, M. C., PRIOR, R. “Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks”, *Computer Communications*, v. 31, n. 6, pp. 1227–1238, 2008.
- [47] XAVIER, A. E. “The hyperbolic smoothing clustering method”, *Pattern Recognition*, v. 43, n. 3, pp. 731–737, 2010.
- [48] XAVIER, A. E., XAVIER, V. L. “Solving the minimum sum-of-squares clustering problem by hyperbolic smoothing and partition into boundary and gravitational regions”, *Pattern Recognition*, v. 44, n. 1, pp. 70–77, 2011.
- [49] XAVIER, A. E., GESTEIRA, C. M., XAVIER, V. L. “Solving the continuous multiple allocation p-hub median problem by the hyperbolic smoothing approach”, *Optimization*, , n. ahead-of-print, pp. 1–17, 2014.
- [50] XAVIER, A. E., XAVIER, V. L. “Flying elephants: a general method for solving non-differentiable problems”, *Journal of Heuristics*, pp. 1–16, 2014.
- [51] XAVIER, V. L., FRANÇA, F. M., XAVIER, A. E., et al. “A hyperbolic smoothing approach to the Multisource Weber problem”, *Journal of Global Optimization*, v. 60, n. 1, pp. 49–58, 2014.
- [52] BAGIROV, A., ORDIN, B., OZTURK, G., et al. “An incremental clustering algorithm based on hyperbolic smoothing”, *Computational Optimization and Applications*, pp. 1–23, 2014.
- [53] VENCESLAU, H. M., LUBKE, D. C., XAVIER, A. E. “Optimal covering of solid bodies by spheres via the hyperbolic smoothing technique”, *Optimization Methods and Software*, v. 30, n. 2, pp. 391–403, 2014.
- [54] SOUZA, M., XAVIER, A. E., LAVOR, C., et al. “Hyperbolic smoothing and penalty techniques applied to molecular structure determination”, *Operations Research Letters*, v. 39, n. 6, pp. 461–465, 2011.
- [55] GONZALEZ, T. F. “On the computational complexity of clustering and related problems”. In: *System modeling and optimization*, Springer, pp. 174–182, 1982.
- [56] JOHNSON, D. S., LENSTRA, J. K., KAN, A. “The complexity of the network design problem”, *Networks*, v. 8, n. 4, pp. 279–285, 1978.
- [57] YAMAN, H. “The hierarchical hub median problem with single assignment”, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 43, n. 6, pp. 643–658, 2009.

- [58] RICE, H., KELMENSON, S., MENDELSON, L. “Geophysical navigation technologies and applications”. In: *Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004*, pp. 618–624. IEEE, 2004.
- [59] CUI, J.-H., KONG, J., GERLA, M., et al. “The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications”, *Network, IEEE*, v. 20, n. 3, pp. 12–18, 2006.
- [60] POMPILI, D., AKYILDIZ, I. F. “Overview of networking protocols for underwater wireless communications”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 47, n. 1, pp. 97–102, 2009.
- [61] STOJANOVIC, M. “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel”, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, v. 11, n. 4, pp. 34–43, 2007.
- [62] MELODIA, T., KULHANDJIAN, H., KUO, L.-C., et al. “Advances in underwater acoustic networking”, *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, pp. 804–852, 2013.
- [63] ZORZI, M., CASARI, P., BALDO, N., et al. “Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks”, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 26, n. 9, pp. 1754–1766, 2008.
- [64] YANG, G., XIAO, M., CHENG, E., et al. “A cluster-head selection scheme for underwater acoustic sensor networks”. In: *Communications and Mobile Computing (CMC), 2010 International Conference on*, v. 3, pp. 188–191. IEEE, 2010.
- [65] URICK, R. J. “Principles of Underwater Sound 3rd Edition 3rd Edition Edition”. 1983.
- [66] STOJANOVIC, M., PREISIG, J. “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 47, n. 1, pp. 84–89, 2009.
- [67] LIBRARY, H. “The HSL Mathematical Software Library”. 2014. Disponível em: <<http://www.hsl.rl.ac.uk/>>. Online; acessado em 23 de Maio 2014.
- [68] REINELT, G. “TSPLIB: a traveling salesman library”, *ORSA Journal of Computing*, pp. 376–384, 1991.

- [69] WATERS, G. “Hierarchies for network evolution”. In: *Sixteenth UK Teletraffic Symposium on Management of Quality of Service-the New Challenge, Harlow, UK*, 2000.
- [70] XAVIER, A. E., DE OLIVEIRA, A. A. F. “Optimal covering of plane domains by circles via hyperbolic smoothing”, *Journal of Global Optimization*, v. 31, n. 3, pp. 493–504, 2005.