



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Modelos de Comunicação Cooperativa e Equidade no  
Consumo de Energia em Enlaces Cooperativos  
Aplicados à RSSF**

Camila Feitosa Rêgo

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
conclusão do Mestrado em Informática

Orientador  
Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília  
2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RR343m Rêgo, Camila Feitosa  
Modelos de Comunicação Cooperativa e Equidade no  
Consumo de Energia em Enlaces Cooperativos Aplicados  
à RSSF / Camila Feitosa Rêgo; orientador Jacir Luiz  
Bordim. -- Brasília, 2016.  
84 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Informática) -  
Universidade de Brasília, 2016.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Comunicação  
cooperativa . 3. Balanceamento energético. 4. Seleção  
de nós auxiliares. 5. Conectividade. I. Bordim, Jacir  
Luiz, orient. II. Título.



# Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, pois como diz a palavra do Senhor: “Tudo posso Naquele que me fortalece” Filipenses 4:13. À minha mãe que é meu exemplo de pessoa, mulher e cristã e que tem sido meu apoio e minha rocha durante os momentos difíceis. Ao meu querido esposo cujo amor, companheirismo, apoio e dedicação tornaram esta jornada mais alegre, valiosa e, principalmente, possível.

# Agradecimentos

Ao meu orientador agradeço pelo companheirismo, dedicação e disponibilidade de ensinar e todo estímulo dado ao crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço aos meus familiares, irmãos em Cristo e amigos pelo apoio e incentivo. Agradeço aos professores Ugo Silva Dias e Célia Ghedini Ralha pela análise crítica e sugestões construtivas. À toda equipe do Departamento de Ciência da Computação, agradeço aos técnicos pela inestimável ajuda nas tarefas administrativas e aos professores pelo ensino e dedicação. Agradeço também à CAPES pela bolsa de estudos que foi fundamental para que este trabalho pudesse ser concluído com sucesso.

# Resumo

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são utilizadas para monitorar o ambiente, como por exemplo, queimadas em florestas, informações sísmicas ou temperatura. Essas redes são compostas de nós sensores que, em geral, tem dimensões pequenas, operam por bateria e tem alcance de rádio limitado. Considerando uma RSSF de múltiplos saltos, alguns nós podem não obter uma rota para o escoamento dos dados sensorizados devido ao alcance de transmissão limitado, falha dos enlaces, esgotamento natural da bateria ou eventos externos. Recentemente, técnicas de comunicação cooperativa (CC) tem sido exploradas como alternativa para aumentar a conectividade da rede, tendo em vista sua capacidade de aumento do raio de transmissão. Este aumento está associado a capacidade dos nós transmissores em compartilhar recursos da camada física, obtendo assim os benefícios de um sistema de MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). Trabalhos relacionados exploram o uso de CC com o intuito de aumentar a conectividade. No entanto, estes trabalhos visam apenas a conectividade sem preocupação com o custo para escoar dados e a indisponibilidade de nós que possuem maiores demandas para estabelecer os enlaces CC. Este trabalho tem como foco o estudo a equidade no custo energético para o estabelecimento dos enlaces CC. Estes enlaces são utilizados para prover um aumento na conectividade e possibilitar a criação de rotas mais eficientes para o escoamento dos dados em um RSSF. A primeira contribuição deste trabalho é propor um mecanismo que explora CC para reduzir o número de saltos para alcançar o nó sorvedouro. Em seguida, propomos um modelo de CC e uma heurística de seleção de nós auxiliares que promove o balanceamento energético. Por fim, propomos uma heurística de seleção de nós auxiliares que promove tanto o balanceamento energéticos dos enlaces CC quanto a conectividade em uma RSSF. As técnicas propostas apresentam ganho de conectividade de até 134% estabelecendo enlaces cooperativos balanceados onde os nós possuem uma diferença em custo de energia de apenas 8% nos cenários avaliados.

**Palavras-chave:** Redes de sensores sem fio, comunicação cooperativa, seleção de nós auxiliares, conectividade, balanceamento energético.

# Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) are used to monitor the environment, such as fires in forests, seismic information or temperature. These networks consist of sensor nodes that are generally small in size, have limited radio range and operate by battery. Considering a multihop WSN, some sensors may not obtain a route to send the collected data due to limited transmission range, failure of nodes or links, external events or battery natural depletion. Recently, cooperative communication (CC) technique has been explored as an alternative to improve the signal to noise ratio. CC has also seen as an option for increasing connectivity, given its ability to increase the transmission. This increase is associated with the capacity of the source nodes to share resources from the physical layer thus obtaining the advantages of the MIMO systems (*Multiple-Input Multiple-Output*). Related works exploit the use of CC with intent to increase connectivity. However, these works aim at increase connectivity without concern with the cost to send the data to the sink node and the unavailability of nodes that have higher demand to establish CC links. This work aims to study the equity in the energy cost to establish CC links. This links are used to promote increase in connectivity and more efficient routes to the sink node. The first contribution of this work is to propose a mechanism to exploit CC to reduce the number of hops to reach the sink node and increase connectivity. The second contribution is to propose a CC model and a helper set selection heuristics which promote the energy balance by reducing the energy cost of the source nodes. Finally, we propose a helper set selection heuristic to establish energy balance CC links and increase connectivity. The proposed techniques presented connectivity gain up to 134% and established energy balance cooperative links which nodes have a difference in energy cost of only 8% in the evaluated scenarios.

**Keywords:** Wireless sensor networks, cooperative communication, helper set selection, connectivity, energy balance.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Objetivos . . . . .	5
1.2	Metodologia . . . . .	5
1.3	Estrutura do Documento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Teórica</b>	<b>7</b>
2.1	Redes de Sensores Sem Fio . . . . .	7
2.1.1	Conectividade em uma RSSF . . . . .	10
2.2	Comunicação Cooperativa . . . . .	12
2.2.1	Modelo de Rede Cooperativa . . . . .	13
2.2.2	Técnicas de Transmissão Cooperativa . . . . .	14
2.2.3	Seleção de Nós Auxiliares . . . . .	17
2.3	Discussão . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Utilização de CC na Obtenção de Rotas Alternativas em RSSF</b>	<b>20</b>
3.1	Modelo de Comunicação Cooperativa de Yu . . . . .	21
3.2	Descrição da Proposta . . . . .	23
3.2.1	<i>CSC</i> Passo 1 - Construção do grafo $\bar{G}$ . . . . .	25
3.2.2	<i>CSC</i> Passo 2 - Construção do grafo $\tilde{G}$ . . . . .	25
3.2.3	<i>CSC</i> Passo 3 - Remoção de Enlaces de $G$ . . . . .	26
3.2.4	<i>CSC</i> Passo 4 - Ajuste na Potência de Transmissão . . . . .	29
3.3	Resultados de Simulação . . . . .	29
3.3.1	Média de Saltos (M1) . . . . .	30
3.3.2	Média de Transmissões(M2) . . . . .	30
3.3.3	Conectividade(M3) . . . . .	32
3.3.4	Custo Médio dos Nós Fonte (M4) . . . . .	32
3.3.5	Custo Médio dos Nós Auxiliares(M5) . . . . .	33
3.3.6	Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo(M6) . . . . .	35
3.3.7	Custo Médio por Rota(M7) . . . . .	36

3.4	Discussão . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Mecanismos de Balanceamento de Energia</b>	<b>39</b>
4.1	Proposta de Modelo de Comunicação Cooperativa . . . . .	39
4.1.1	Comparativo Modelos de CC de Yu e Modelo de CC Proposto . . . . .	41
4.2	Heurística de Equidade Energética para Seleção de Nós Auxiliares . . . . .	43
4.2.1	Comparativo <i>GHSS</i> e <i>IHSS</i> . . . . .	45
4.3	Resultados de Simulação . . . . .	46
4.3.1	Média de Saltos (M1) . . . . .	47
4.3.2	Média de Transmissões (M2) . . . . .	47
4.3.3	Conectividade (M3) . . . . .	48
4.3.4	Custo Médio dos Nós Fonte (M4) . . . . .	49
4.3.5	Custo Médio dos Nós Auxiliares (M5) . . . . .	50
4.3.6	Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo (M6) . . . . .	51
4.3.7	Custo Médio por Rota (M7) . . . . .	51
4.4	Discussão . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Proposta para Seleção de Nós em Redes Esparsas</b>	<b>54</b>
5.1	Heurística de Seleção de Nós Auxiliares em Topologias Esparsas . . . . .	54
5.2	Resultados de Simulação . . . . .	55
5.2.1	Média de Saltos (M1) . . . . .	56
5.2.2	Média de Transmissões (M2) . . . . .	56
5.2.3	Conectividade (M3) . . . . .	58
5.2.4	Custo Médio dos Nós Fonte (M4) . . . . .	58
5.2.5	Custo Médio dos Nós Auxiliares (M5) . . . . .	59
5.2.6	Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo (M6) . . . . .	60
5.2.7	Custo Médio por Rota (M7) . . . . .	60
5.3	Discussão . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>63</b>
6.1	Considerações Finais . . . . .	63
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	65
	<b>Referências</b>	<b>67</b>

# Lista de Figuras

1.1	Exemplo de aplicações de RSSF. . . . .	4
2.1	Exemplo de uma rede de sensores. . . . .	8
2.2	Técnicas de transmissão cooperativa [1]. . . . .	16
3.1	Exemplo de modelo de CC. . . . .	21
3.2	Cenário e primeiro momento da CC. . . . .	22
3.3	Segundo momento da CC e aumento do alcance de transmissão do nó $v_1$ . . . . .	22
3.4	(a) Exemplo de topologia de rede com $n = 70$ nós e $ E  = 0$ . (b) Grafo direto $\bar{G}$ criado a partir de (a) onde os nós operam com a potência máxima de transmissão $P_{MAX}$ . . . . .	26
3.5	Grafo $G$ criado a partir do grafo 3.4(b) e que contém todas as arestas diretas e cooperativas possíveis. . . . .	27
3.6	(a) Exemplo da técnica <i>CSC</i> . (b) Exemplo da técnica <i>CSC(HS)</i> . . . . .	28
3.7	Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	31
3.8	Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	31
3.9	Conectividade com o nó sorvedouro. . . . .	32
3.10	Custo médio dos nós fonte. . . . .	33
3.11	Custo médio dos nós auxiliares. . . . .	34
3.12	Custo balanceamento energético do enlace cooperativo. . . . .	35
3.13	Exemplo de potência média da rota . . . . .	36
3.14	Custo médio por rota. . . . .	37
4.1	Cenário de CC utilizando o modelo proposto. . . . .	40
4.2	Cenário utilizado para comparação entre o Modelo CC(Yu) e o Modelo CC(BE). . . . .	41
4.3	Comparativo entre Modelo CC(Yu) e Modelo CC(BE). . . . .	44
4.4	Cenário utilizado para comparação entre o GHSS e o IHSS. . . . .	46
4.5	Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	47
4.6	Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	48

4.7	Conectividade com o nó sorvedouro. . . . .	49
4.8	Custo médio dos nós fonte. . . . .	50
4.9	Custo médio dos nós auxiliares. . . . .	51
4.10	Custo balanceamento energético do enlace cooperativo. . . . .	52
4.11	Custo médio por rota. . . . .	52
5.1	Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	57
5.2	Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro. . . . .	57
5.3	Conectividade com o nó sorvedouro. . . . .	58
5.4	Custo médio dos nós fonte. . . . .	59
5.5	Custo médio dos nós auxiliares. . . . .	60
5.6	Custo balanceamento energético do enlace cooperativo. . . . .	61
5.7	Potência média da rota por nó. . . . .	62

# Lista de Tabelas

6.1	Lista das contribuições feitas durante o período de mestrado. . . . .	65
-----	---	----

# Lista de Algoritmos

- 1 *GreedyHelperSetSelection* . . . . . 18
- 2 *CSC\_Step(1)(V, P<sub>MAX</sub>)* . . . . . 25
- 3 *CSC\_Step(2)( $\overline{G}$ )* . . . . . 27
- 4 *CSC\_Step3(G, v<sub>o</sub>,  $\mathcal{R}$ )* . . . . . 28
- 5 *CSC\_Step(4)(G')* . . . . . 29
- 6 *Intermediate Helper Set Selection* . . . . . 45
- 7 *Hybrid Helper Set Selection* . . . . . 55

## Lista de Siglas

AF	Amplificar e Encaminhar (do Inglês, <i>Amplify and Forward</i> )
CC	Comunicação Cooperativa (do Inglês, <i>Cooperative Communication</i> )
CF	Comprimir e Encaminhar (do Inglês, <i>Compress and Forward</i> )
CoopBridges	Pontes Cooperativas (do Inglês, <i>Cooperative Bridges</i> )
CoopSink	<i>Cooperative Sink</i>
CSC	<i>Cooperative Sink Communication</i>
CSC-HS	<i>Cooperative Sink Communication - Helper Set</i>
DBHSS	<i>Distance Based Helper Set Selection</i>
DF	Decodificar e Encaminhar (do Inglês, <i>Decode and Forward</i> )
GHSS	<i>Greedy Helper Set Selection</i>
HHSS	<i>Hybrid Helper Set Selection</i>
HSPA	Acesso de Pacotes Evoluído a Alta Velocidade (do Inglês, <i>Evolved High-Speed Packet Acces</i> )
IHSS	<i>Intermediate Helper Set Selection</i>
MIMO	Técnica de transmissão sem fio que utiliza múltiplas antenas para transmissão e recepção (do Inglês, <i>Multiple-Input, Multiple-Output</i> )
Modelo CC(BE)	Modelo de Comunicação Cooperativa (Balanceamento Energético)
Modelo CC(Yu)	Modelo de Comunicação Cooperativa de Yu
PLE	Expoente de perda de percurso (do Inglês, <i>Path Loss Exponent</i> )
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
WiMAX	Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-ondas (do Inglês, <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> )

# Capítulo 1

## Introdução

Na última década, diversos avanços tecnológicos nas áreas de eletrônica, rádios e comunicação sem fio estimularam o desenvolvimento e uso de sensores em áreas ligadas a processos físicos, químicos, biológicos, entre outros [2]. A Figura 1.1 apresenta as diversas aplicações dos nós sensores que são utilizados para coletar informações sobre o ambiente como temperatura, pressão, volume de precipitações, sensor de movimento [3, 4, 5]. As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são exemplos de redes *ad hoc* sem fio compostas por nós sensores, em geral, de dimensões pequenas, limitados em processamento e memória sendo usualmente alimentados por baterias. Os nós sensores cooperam entre si para atingir um objetivo, realizar uma tarefa em comum [6]. A comunicação ocorre entre os nós sensores por meio de rádio de curto alcance e os dados são enviados, em geral, para nós específicos denominados nós sorvedouros. Estes nós possuem maior capacidade de processamento, maior alcance do rádio e capacidade de comunicação com outras redes [7].

Algumas aplicações das RSSF são críticas como monitoramento de informações sísmicas e de maremotos, sinais vitais ou temperatura já que a perda de qualquer informação pode resultar na falha em informar que temos queimada em uma floresta, por exemplo. Nestas aplicações, a falha de um nó sensor pode resultar em perda das informações sensorizadas do próprio nó sensor ou de outros nós que o usam como caminho para o nó sorvedouro. Assim, garantir a conectividade dos nós sensores com o nó sorvedouro é essencial. Além disso, esta comunicação deve ser executada de forma rápida e energeticamente eficiente [8].

Uma RSSF pode ficar desconexa devido a falha dos enlaces ou dos nós sensores, eventos externos ou até o esgotamento natural da bateria. Para garantir a conectividade em RSSF algumas propostas foram apresentadas na literatura. Li *et al.* [9] propõem a adição de mínima quantidade possível de nós que resultem em uma topologia de rede resultante conexa. Goyal *et al.* [10] propuseram o uso de mobilidade limitada e coordenada de modo promover a recuperação de enlaces e nós. Entretanto, nem sempre é possível adicionar

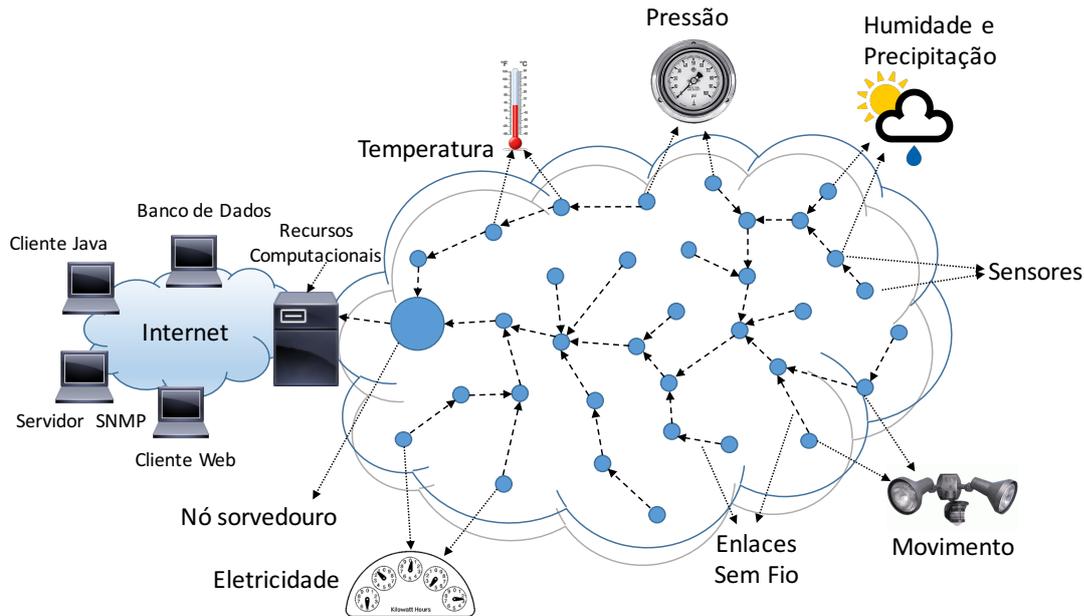


Figura 1.1: Exemplo de aplicações de RSSF.

mais nós ou movê-los de modo a recuperar ou aumentar a conectividade de uma RSSF. Assim, a Comunicação Cooperativa (CC) surge como uma alternativa para aumentar a conectividade da rede [11, 12, 13]. A CC é uma técnica da camada física que permite que dispositivos como uma única antena possam usufruir das vantagens dos sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), com a diversidade espacial. Deste modo, os nós sensores que não suportam múltiplas antenas, em virtude de suas restrições de tamanho e potência, podem criar um arranjo MIMO virtual. Na CC, o nó fonte envia o dado para os nós auxiliares e estes, em sincronismo, enviam o dado para o nó de destino. Caso, a combinação dos sinais recebidos estiver acima de um limiar de detecção, o sinal é decodificado e é obtida a mensagem original. Desta forma, o nó fonte que antes não poderia se comunicar com o nó de destino tem uma rota para este nó. Alguns trabalhos da literatura abordam a utilização de CC para: aumentar a conectividade [11], garantir eficiência energética [14] ou ambos [12]. Nos trabalhos que utilizam CC para aumentar a conectividade [11, 12], ou seja, aumentar o alcance de transmissão dos nós, podemos notar que o custo do enlace cooperativo é maior que dos enlaces diretos. Além disso, no modelo de CC proposto por Yu *et al.* [11] e utilizado por [12, 13], não há equidade energética nos enlaces cooperativos com o nó fonte gastando mais energia que os nós auxiliares. A falta de equidade dos enlaces cooperativos pode causar o esgotamento prematuro da bateria do nó fonte, inviabilizando o enlace cooperativo e, por fim, particionando a rede.

Embora tenham trabalhos que utilizam CC para aumentar a conectividade dentro do contexto de RSSF, não identificamos nenhum trabalho cujo objetivo seja a equidade

energética em enlaces cooperativos. Assim, esta dissertação aborda o problema do “desbalanceamento energético dos enlaces cooperativos”.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo e avaliação de técnicas de CC e sua utilização como alternativa para aumentar a conectividade em RSSF e criar enlaces cooperativos balanceados. Para atingir este objetivo principal, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- Avaliação das técnicas de CC e suas características;
- Estudo da viabilidade do emprego de CC em RSSF e seus custos de comunicação;
- Definição de modelos de comunicação e métricas de avaliação;
- Implementação e avaliação de propostas de CC em RSSF;
- Propor melhorias as propostas, em especial, no balanceamento energético dos enlaces cooperativos e na conectividade da rede.

## 1.2 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho consistirá inicialmente de uma revisão do estado da arte dos principais tópicos relacionados, como RSSF e CC. Em seguida, serão avaliadas as técnicas existentes, seus benefícios e limitações no que tange aos objetivos traçados. Com base nestas avaliações, será definido mecanismos alternativos que possibilitem um ganho de conectividade e, ao mesmo tempo, permitam um melhor equilíbrio na utilização dos recursos disponíveis, em especial a bateria. Os mecanismos propostos serão avaliados por meio de simulação. Para tal, utilizaremos o *software* Matlab [15], o qual possui diversas funções e funcionalidades que possibilitam uma maior celeridade no desenvolvimento e análise dos resultados obtidos. Os resultados, após validados, servirão de indicativo para eventuais melhorias e ajustes.

## 1.3 Estrutura do Documento

Este trabalho é estruturado como segue. O Capítulo 2 faz uma introdução às RSSF e a CC. Dentro do tópico de CC é dada ênfase ao modelo de rede cooperativa, as técnicas de transmissão cooperativa e a seleção de nós auxiliares. O Capítulo 3 apresenta e avalia

duas contribuições deste trabalho: a primeira tem como objetivo aumentar a conectividade e reduzir a quantidade de saltos para o nó sorvedouro; a segunda tem como objetivo aumentar a conectividade e reduzir a quantidade de transmissões para o nó sorvedouro enquanto mantém o consumo energético no menor nível possível. O Capítulo 4 apresenta duas propostas: um modelo de CC cujo objetivo é reduzir o consumo energético dos nós fonte e uma heurística de seleção de nós auxiliares com o objetivo de criar enlaces cooperativos balanceados. O Capítulo 5 apresenta uma heurística de seleção de nós auxiliares em topologias esparsas com objetivo de aumentar a conectividade sem repercutir negativamente no balanceamento energético dos enlaces cooperativos. Capítulo 6 faz uma breve revisão do documento, conclui o trabalho e apresenta direções para futuras investigações e evoluções deste trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão Teórica

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre algumas das características das RSSF bem como da técnica de CC. Como será discutido na Seção 2.1, as RSSF têm como foco o monitoramento, coleta e disponibilização dos dados sensoriados. No entanto, a execução destas tarefas dependem da conectividade do nó sensor com o destinatário destas informações. Para obter sucesso nesta tarefa, em uma RSSF com múltiplos saltos, o nó sensor depende da conectividade da rede. A Seção 2.2 apresenta a técnica de CC como solução para aumentar ou recuperar a conectividade em uma RSSF. Por fim, na Seção 2.3, fazemos um resumo do que foi abordado no capítulo.

### 2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Os recentes avanços tecnológicos em microeletrônica criaram as condições técnicas para construir nós sensores de pequena escala, baixo custo e baixa potência [16]. Os nós sensores consistem em um processador, armazenamento, bateria, transceptor e um ou mais sensores. Uma rede de sensores sem fio pode compreender centenas de nós sensores que, em conjunto, cooperam para atingir um objetivo ou realizar uma tarefa em comum [6]. Cada sensor tem a capacidade de coletar e rotear dados para outros sensores ou para um ou mais nós sorvedouros. O nó sorvedouro pode ser um nó fixo ou móvel capaz de se conectar com a RSSF e com a Internet ou outras redes de modo que se possa ter acesso aos dados obtidos pelos sensores. A Figura 2.1 apresenta um exemplo de RSSF com diversos nós sensores espalhados em uma área de monitoração. Neste exemplo, cada nó sensor tem diversos nós vizinhos, mas uma única rota para o nó sorvedouro. O nó sorvedouro coleta as informações sensoriadas pelos nós sensores e as envia para outras redes como, por exemplo, a Internet.

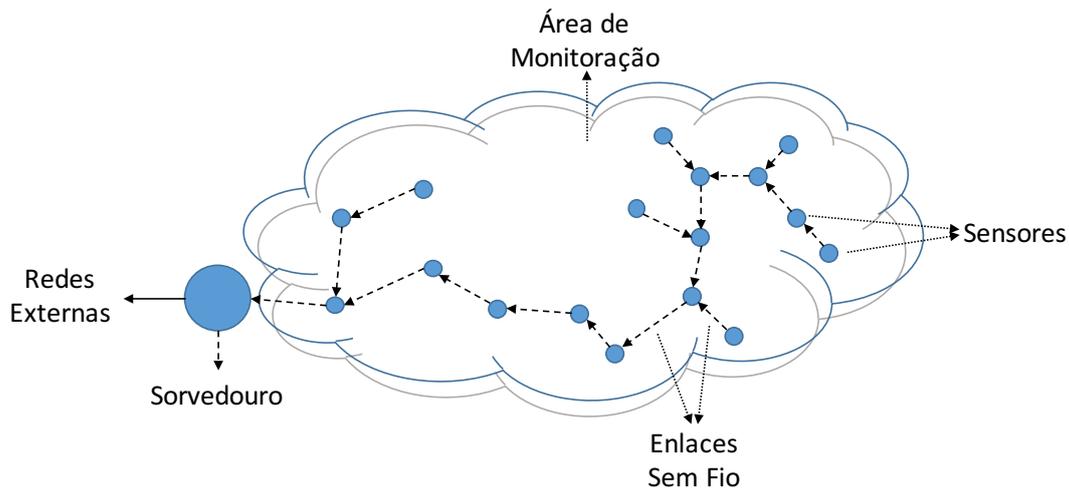


Figura 2.1: Exemplo de uma rede de sensores.

Comparando as redes sem fios tradicionais como redes *ad hoc* móveis, as RSSF possuem características e restrições que tem um impacto decisivo em termos de design e capacidades da rede. Algumas características das RSSF são apresentadas abaixo:

- **Disposição dos nós sensores:** A disposição dos nós sensores pode ser feita de forma determinística ou aleatória. Na disposição determinística, os nós são posicionados de forma manual em uma localização pré-determinada dentro de uma área. Entretanto, na disposição aleatória, os nós são posicionados de forma aleatória na área a ser sensoriada [17]. Se a distribuição resultante não é a ideal, isto é, a rede de sensores não é conexa então um algoritmo se torna necessário para permitir conectividade e uma operação eficiente em energia.
- **Consumo energético:** Em geral, o consumo energético dos nós sensores pode ser dividido em três categorias: (i) energia gasta no sensoriamento, (ii) energia gasta na comunicação com os outros nós sensores e (iii) energia gasta no processamento dos dados. O estudo em [18] mostra que cada bit transmitido em uma RSSF consome tanta energia quanto a execução de 800 a 1000 instruções. Assim, o custo de comunicação é maior que o custo de computação em uma RSSF. Em algumas aplicações, a reposição de recursos energéticos, como baterias, pode ser impossível. Deste modo, o tempo de vida de um sensor tem uma forte dependência com o tempo de vida da bateria [19]. Em uma rede de sensores de múltiplos saltos, a perda de alguns nós pode significar mudanças na topologia e podem requerer o estabelecimento de novas rotas para o nó servidor e reorganização da rede. Deste modo, a conservação e gestão de energia são de extrema importância.
- **Modelo de envio dos dados sensorizados:** O sensoriamento e o envio dos dados numa RSSF são dependentes da aplicação e da criticidade dos dados. O modelo de envio dos dados sensorizados pode ser caracterizado como orientado no tempo, por

eventos, por requisição ou híbrido [20]. O modelo orientado no tempo é conveniente para aplicações que necessitam de monitoração periódica. Assim, os nós sensores monitoram o ambiente e transmitem o dado num intervalo periódico de tempo constante. Nos modelos orientados a eventos ou requisições, os nós sensores reagem imediatamente a mudanças drásticas do atributo sensoriado devido a ocorrência de um determinado evento ou uma requisição do nó sorvedouro. Assim, estes modelos são adequados para aplicações críticas no tempo. Além disso, uma combinação dos modelos também é possível.

- **Heterogeneidade dos nós ou enlaces:** Os nós sensores podem ser homogêneos [21], ou seja, tem a mesma capacidade em termo de computação, comunicação e potência de transmissão ou os nós podem ser heterogêneos de modo a ter capacidade ou um papel diferente [22].
- **Nó sorvedouro:** Uma rede de sensores pode ter um ou múltiplos sorvedouros dependendo da necessidade da aplicação [6]. Segundo [23], a utilização de múltiplos sorvedouros reduz a distância que os dados devem percorrer e correspondentemente reduz o consumo energético consideravelmente.
- **Tolerância a falhas:** Os nós sensores podem falhar devido a esgotamento da bateria, deterioração do *hardware* ou interferência do meio. A falha dos nós sensores não deve afetar a tarefa global da rede de sensores. Se muitos enlaces ou nós falham, algoritmos devem ser implementados para possibilitar acomodar a formação de novos enlaces e o roteamento dos dados sensoriados para o nó sorvedouro.
- **Mobilidade dos nós sensores:** A maioria das arquiteturas de rede assumem que os nós sensores são estacionários, entretanto a mobilidade dos nós sorvedouros ou dos nós sensores é necessária em diversas aplicações [24]. A introdução da mobilidade em alguns ou todos os nós sensores, promove o aumento da capacidade e da flexibilidade de suportar diversas aplicações e mudanças na topologia da rede [10].
- **Área de cobertura:** Um importante parâmetro de um RSSF é a área de cobertura de comunicação. A visão que um sensor tem do ambiente é limitada pelo alcance e pela acurácia. Assim, o nó sensor cobre uma área limitada do ambiente e só pode se comunicar com os nós sensores que estão dentro da área de cobertura.
- **Conectividade:** Uma opção para manter a conectividade dos nós sensores com o nó sorvedouro é aumentar a densidade de nós na rede ou o alcance dos nós sensores [9]. Adicionalmente, a conectividade depende da localização, possivelmente aleatória, dos nós da rede. Entretanto, a topologia da rede pode ficar desconexa devido a falha dos nós, falha dos enlaces ou eventos externos. Sem conectividade com o nó

sorvedouro, os nós sensores podem perder os dados sensoriados devido as limitações de memória e processamento.

Devido a importância da conectividade nas RSSF, a Seção 2.1.1 apresenta mais detalhes sobre esta característica.

### 2.1.1 Conectividade em uma RSSF

Nas RSSF, os enlaces de comunicação podem sofrer alterações devido a falha dos nós, seja por falta de energia ou eventos externos. Estas alterações podem particionar a rede, inviabilizando assim a tarefa de repasse das informações obtidas pelos nós sensores. Para minimizar estes efeitos, algoritmos para aumentar ou recuperar a conectividade da rede foram propostos na literatura. Sedgewick *et al.* [25] e Cormen *et al.* [26] definem articulação como um vértice de um grafo conectado cuja remoção torna este grafo desconectado. De forma análoga, uma ponte é um enlace tal que sua exclusão torna o grafo desconectado [26]. As propostas apresentadas em [27, 28, 29] sugerem a identificação de nós e enlaces críticos chamados de articulações e pontes, respectivamente, e cuja retirada torna a rede desconexa. Li *et al.* [9] propõem a adição de mínima quantidade possível de nós que resultem em uma topologia de rede resultante conexa. Goyal *et al.* [10] propuseram o uso de mobilidade limitada e coordenada de modo promover a recuperação de enlaces e nós. Khelifa *et al.* [30] propuseram o uso de nós redundantes que podem ser movidos ou ativados em caso de falha de enlace ou dos nós.

Para reduzir o consumo de energia, e ao mesmo tempo garantir um nível de conectividade aceitável, técnicas de controle de topologia tem sido largamente utilizadas. O controle de topologia, como o nome sugere, visa controlar os enlaces de comunicação, através do raio de comunicação, com o objetivo de manter alguma propriedade global enquanto reduz o consumo de energia [31]. Yu *et al.* [11] propuseram um esquema de controle de topologia para redes *ad hoc* sem fio, denominado *CoopBridges*, que utiliza CC para reduzir a potência de transmissão dos nós bem como aumentar a conectividade da rede. Os algoritmos propostos visam selecionar os nós auxiliares de maior eficiência energética para auxiliar o nó fonte a se comunicar com o nó de destino: um método ótimo cuja complexidade é exponencial, tornando o impraticável para uma rede com grande quantidade de nós e uma heurística gulosa. Apesar do contexto do *CoopBridges* ser redes *ad hoc* sem fio, este pode ser facilmente adaptado para RSSF.

Afonseca [1], dentro do contexto de redes *ad hoc* sem fio e RSSF, propõe duas soluções distribuídas que aplicam conhecimento localizado da topologia e permitem recuperar a conectividade da rede com objetivo de reforçar a conectividade por meio de enlaces cooperativos. A recuperação da conectividade é realizada em duas fases: a primeira consiste

na localização de elementos críticos e biconectados; e a segunda pelo estabelecimento de enlaces cooperativos sobressalentes entre os componentes biconectados. Na primeira fase, o autor utilizou o algoritmo distribuído de Chaudhuri [28] otimizado para localização de articulações. Para a segunda fase, o autor propõe duas soluções distribuídas e localizadas capazes de oferecer resiliência à conectividade da rede de forma auto-organizável. A primeira solução utiliza informações a 2-saltos, a partir das articulações, para computar enlaces cooperativos entre os componentes biconectados. As articulações são monitoradas e, quando falham, o enlace cooperativo é imediatamente recriado. A segunda solução não requer a coleta de informações adicionais sobre a topologia e, a partir de uma estimativa arbitrária de distância entre os componentes biconectados, é capaz de criar múltiplos enlaces cooperativos.

Algoritmos de recuperação de conectividade em uma RSSF podem ser divididos em duas categorias principais: centralizados ou distribuídos. Os algoritmos centralizados, como o utilizado em [10], assumem informações globais como informação de topologia estão disponíveis enquanto os algoritmos distribuídos [28] consideram a informação de vizinhos até  $k$  saltos, onde  $k$  é tipicamente um ou dois. Adicionalmente, existem a decisão de quando o algoritmo para recuperação da conectividade é executado, ou seja, se antes ou depois da falha do nó. Assim, a recuperação da conectividade numa RSSF pode ser dividida em três tipos: recuperação ativa, passiva ou híbrida.

1. **Recuperação ativa com decisão pré-definida:** este método consiste em ter uma decisão pré-definida de modo a restaurar a conectividade da rede imediatamente após a falha de um nó. Em [32] este método é utilizado para realizar a autoconfiguração de RSSF;
2. **Recuperação passiva:** neste método o processamento para tomada de decisão de como recuperar a conectividade da rede é feita apenas quando o nó falha. Alguns algoritmos, como em [33], [34] e [35] utilizam informação pré-armazenada sobre os nós vizinhos.
3. **Recuperação híbrida:** neste método existe um pré-processamento, como salvar informações dos vizinhos, mas o processamento para recuperação do enlace só ocorre quando um nó falha [36].

Neste trabalho, consideramos o cenário de uma rede de sensores onde os nós sensores estão distribuídos numa área bidimensional e cuja tarefa seja coletar e transferir dados para uma unidade central denominada nó sorvedouro. O nó sorvedouro é responsável por requisitar e receber informações dos nós sensores. Os nós sensores tem informação completa da topologia da rede e a rede possui apenas um nó sorvedouro. Adicionalmente,

os nós podem obter informações críticas que necessitam ser transmitidas ao nó sorvedouro de forma rápida e com o menor custo de comunicação possível.

A Seção 2.2 apresenta uma técnica de aumento de conectividade em RSSF que vem ganhando espaço na literatura já que não necessita de nós sensores adicionais ou movimentação dos nós [11, 37].

## 2.2 Comunicação Cooperativa

Os nós sensores em RSSF são utilizadas para coletar dados do ambiente e enviá-los para um nó sorvedouro que está conectado com outras redes. Neste cenário, é de extrema importância manter a conectividade entre os nós. Entretanto, os nós podem se mover ou ficar indisponíveis devido ao fim da bateria, eventos externos ou falha nos nós e, desta forma, maneiras de aumentar ou recuperar a conectividade de rede são cruciais em certos casos. Neste contexto, a CC tem sido considerada uma estratégia atrativa para aumentar a conectividade da rede [12, 11, 37, 38].

A CC é uma técnica da camada física que permite que, dispositivos com uma única antena, tenham os benefícios dos sistemas MIMO ao compartilhar antenas [39]. Em um sistema MIMO, os dispositivos utilizam, simultaneamente, tanto na origem quanto no destino, um conjunto de antenas para transmitir e receber dados. Segundo Sadek *et al.* [39], a utilização de sistemas MIMO combate o desvanecimento do sinal, aumenta o desempenho e a confiabilidade do sistema. Devido a essas propriedades, a tecnologia MIMO foi incorporada em diversos padrões de comunicação sem fio, como IEEE 802.11n, 4G, WiMAX e HSPA+ [40]. Uma das propriedades de um sistema MIMO é o ganho de diversidade que pode ser obtido quando existem diferentes canais entre o receptor e o transmissor. Isto significa que quando um canal está bloqueado ou tendo um alto desvanecimento, outros canais podem ser utilizados. No caso da CC, a diversidade espacial pode explorar melhor as características do sistema MIMO do que a diversidade no tempo ou frequência [41].

A CC permite que os nós criem um arranjo virtual de antenas sem implantar múltiplas antenas num mesmo dispositivo [38, 42]. Além disso, a CC permite que os nós enviem dados para um receptor remoto de forma eficiente [38]. Song *et al.* [43] estudaram as propriedades da conectividade em redes densas e esparsas quando CC é utilizada para aumentar o alcance de transmissão. Os autores argumentam que, selecionando apropriadamente os nós auxiliares, redes cooperativas podem utilizar menos potência que redes não cooperativas para manter a conectividade da rede. Entretanto, a tarefa de encontrar nós auxiliares adequados que cooperativamente recuperaram a conectividade de componentes da rede utilizando a menor quantidade possível de potência é um problema NP-completo

[44]. Nas próximas subseções apresentaremos as principais características da CC como o modelo de rede cooperativa, as técnicas de transmissão cooperativa e os modelos de CC.

### 2.2.1 Modelo de Rede Cooperativa

O modelo de rede cooperativa apresentado a seguir é semelhante aos apresentados em [12, 11, 14, 45]. Em uma rede sensores sem fio com  $n$  nós cuja topologia de rede é representada como um grafo:  $G = (V, E)$ , onde  $V = v_1, v_2, \dots, v_n$  é um conjunto que representa os nós de uma rede ad hoc e  $E$  é um conjunto de enlaces que ligam dois nós distintos de  $V$ . Um enlace  $v_i v_j \in E$  simboliza que o nó  $v_i$  pode transmitir um dado para o nó  $v_j$  tanto diretamente quanto usando CC. O conjunto  $N(v_i)$  é o conjunto de vizinhos diretos de  $v_i$  dentro do seu alcance máximo de transmissão  $R_{MAX}$ , isto é, para todos  $v_k \in N(v_i)$ , existe  $P_i \leq P_{MAX}$  conforme a Inequação 2.1.

$$P_i(d_{i,j})^{-\alpha} \geq \tau \quad (0 \leq P_i \leq P_{MAX}), \quad (2.1)$$

onde  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso (PLE, *Path Loss Exponent*), que normalmente fica entre 2 e 4 e simboliza a taxa de desvanecimento do sinal com a distância  $d_{ij}$ ;  $d_{ij}$  é a distância Euclidiana entre os nós  $v_i$  e  $v_j$ ; e  $\tau$  é a sensibilidade do receptor para iniciar a detecção de um pacote, isto é, o limiar de detecção do receptor para que este possa corretamente decodificar o sinal e obter a mensagem original. Seguem seis definições que serão utilizadas ao longo deste trabalho:

**Definição 1** (*Enlace direto*): Um enlace direto  $\overline{v_i v_j}$  é um enlace pertencente a  $\overline{E}$ , representando que um nó  $v_i$  pode transmitir informação para o nó  $v_j$  diretamente, isto é, a potência  $P_i$  de  $v_i$  é capaz de alcançar  $v_j$  com  $P_i \leq P_{MAX}$ . Utiliza-se um traço horizontal para identificar um enlace direto.

**Definição 2** (*Custo de um enlace direto*): O custo de um enlace  $\overline{v_i v_j}$  é definido como:

$$w(\overline{v_i v_j}) = \tau d_{i,j}^\alpha. \quad (2.2)$$

Assumimos um regime limitado de interferência, onde o ruído é pequeno se comparado com o sinal. Adicionalmente, só é considerado o expoente de perda de percurso, o efeito do *slow fading* e do *fast fading* não são considerados neste modelo.

**Definição 3** (*Conjunto de nós auxiliares*):  $H_{i,j}$  representa o conjunto de nós auxiliares de  $v_i$  na comunicação cooperativa para  $v_j$ . Assume-se que todos os nós auxiliares precisam ser vizinhos diretos de  $v_i$ , isto é,  $H_{i,j} \subseteq N(v_i)$ , onde  $N(v_i)$  é o conjunto com todos os vizinhos de  $v_i$ . Em outras palavras, todos os elementos em  $N(v_i)$  são candidatos a nós auxiliares de  $v_i$ .

**Definição 4** (*Enlace CC*): Um enlace CC  $\widetilde{v_i v_j}$  é um enlace pertencente a  $\widetilde{E}$  se um nó  $v_i$  pode transmitir dados para o nó  $v_j$  cooperativamente, utilizando um conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$ . Utiliza-se um traço horizontal ondulado para identificar um enlace CC.

**Definição 5** (*Enlace auxiliar*): Um enlace auxiliar é um enlace entre  $v_i$  e um dos seus nós ajudantes em  $H_{i,j}$ .

Por exemplo, na Figura 3.2b, o nó  $v_1$  utiliza os nós  $v_2$  e  $v_3$  como nós auxiliares para criar um enlace CC entre  $v_1$  e  $v_4$ , isto é  $H_{1,4} = \{v_2, v_3\}$ , dessa forma, os enlaces  $\overline{v_1 v_2}$  e  $\overline{v_1 v_3}$  são considerados enlaces auxiliares.

**Definição 6** (*Topologia de rede*): A união de todos os enlaces diretos e enlaces CC são representados por  $\overline{E}$  e  $\widetilde{E}$ , respectivamente. Similarmente, os grafos de comunicação direta e CC são definidos por  $\overline{G} = (V, \overline{E})$  e  $\widetilde{G} = (V, \widetilde{E})$ , respectivamente. Note que  $E = \overline{E} \cup \widetilde{E}$ .

Seguindo a notação, observe que se  $v_i v_j \in E$ , então  $v_i v_j = \overline{v_i v_j}$  se  $v_i v_j$  for um enlace direta e que  $v_i v_j = \widetilde{v_i v_j}$  se  $v_i v_j$  for um enlace CC.

Em seguida, apresentaremos as principais técnicas de transmissão cooperativa, como estas funcionam e qual é a principal vantagem e desvantagem da utilização de cada técnica.

## 2.2.2 Técnicas de Transmissão Cooperativa

Em redes de múltiplos saltos tradicionais, nós intermediários cooperam com um nó fonte retransmitindo o dado para o nó de destino, processo que é realizado pela camada de rede. Dessa maneira, o nó de destino recebe apenas uma cópia do dado enviado. Entretanto, como mencionado na Seção 2.2, CC é uma técnica da camada física. Em CC, um conjunto de dispositivos com uma única antena enviam a mesma informação em um processo de duas fases: transmissão do dado original para um conjunto de nós auxiliares e transmissão dos dados pela origem e pelos auxiliares ou apenas pelos nós auxiliares de forma sincronizada para o destino. O nó de destino pode combinar as várias cópias do sinal recebido tanto do nó fonte quanto dos nós auxiliares, decodificar e obter o sinal original. Os dois métodos principais de retransmissão por parte dos nós auxiliares em CC segundo [46], [47], [48] são descritos na sequência:

- **Amplificar e Encaminhar (AF)**: No método Amplificar e Encaminhar (*Amplify and Forward*), o nó fonte envia o dado para os nós auxiliares que, ao receber o sinal ruidoso, amplificam e retransmitem o sinal sem nenhum processamento adicional. Ao chegar ao destino final, este combina as informações recebidas. Este método possui a desvantagem de propagar erros e a vantagem de ser uma solução com baixa

complexidade. Um exemplo de aplicação da técnica de retransmissão do tipo “amplifica e encaminha” é apresentado em [49]. Neste trabalho são propostos diferentes protocolos CC e avalia sua performance em termos de comportamento mediante a falha. Chatnagar *et al.* [50] propõem uma dupla modulação diferencial em um sistema de CC com um protocolo “amplifica e encaminha” para evitar o problema de compensação de portadora em canais com desvanecimento *m-Nakagami*.

- **Decodificar e Encaminhar (DF):** No método Decodificar e Encaminhar (*Decode and Forward*), o nó fonte envia o sinal para os nós auxiliares que recebem um sinal ruidoso. Estes decodificam o sinal e o retransmitem, diminuindo o ruído no receptor em relação ao método “amplificar e encaminhar”, entretanto, aumenta-se a complexidade e o custo operacional. Como exemplo de utilização da técnica de “decodificar e encaminhar” temos Bletsas *et al.* [51] que apresenta uma estratégia oportunista de retransmissão que utiliza tanto as técnicas de “decodificar e encaminhar” quanto “amplificar e encaminhar”.
- **Comprimir e Encaminhar (CF):** No método Comprimir e Encaminhar (*Compress and Forward*), o nó fonte envia o dado para os nós auxiliares que recebem um sinal ruidoso. Estes comprimem o sinal e o retransmitem para o nó de destino. Um exemplo da utilização do método “comprimir e encaminhar” é apresentado em Chia-Hung Yeh *et al.* [52] que propõem uma nova estratégia para este método que utiliza amostragem compressiva para diminuir o tamanho da mensagem quando o nó estima que a decodificação ocorrerá com sucesso.

A Figura 2.2 apresenta duas técnicas de transmissão cooperativa, AF e DF. Nesta figura, o nó de origem envia dados para o nó de destino utilizando um único nó auxiliar. A Figura 2.2(a) mostra a técnica amplificar e encaminhar onde o nó auxiliar recebe o sinal, amplifica e o retransmite. Note que o sinal é propagado sem nenhum tipo de processamento, os dados são enviados com os erros provenientes do desvanecimento do sinal, interferência e ruído. A Figura 2.2(b) mostra a técnica decodificar e encaminhar onde o nó auxiliar recebe o sinal do nó fonte, o decodifica e retransmite. Note que, como o sinal é decodificado, é adicionado um atraso ao tempo de transmissão, mas os erros percebidos pelo nó auxiliar não são propagados até o destino.

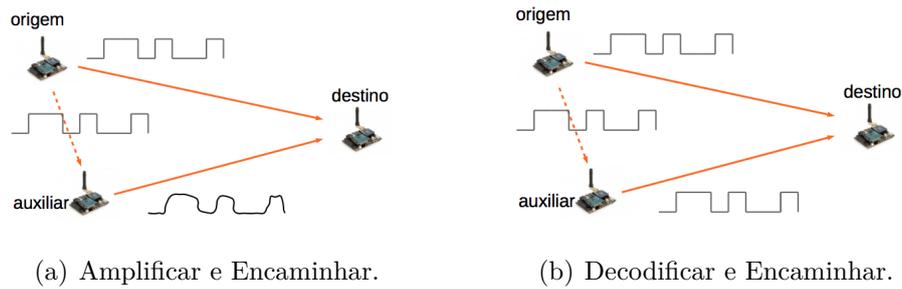


Figura 2.2: Técnicas de transmissão cooperativa [1].

As técnicas AF e DF necessitam, no mínimo, do dobro de tempo para transmitir um pacote de dados da fonte para o destino se comparadas com a técnica de transmissão direta. Como resultado, a vazão destes esquemas pode ser degradada se comparada a vazão da transmissão direta. Além disso, quando o nó de destino consegue decodificar corretamente o pacote de dados transmitido pelo nó fonte no primeiro intervalo de tempo, os recursos do canal que seriam utilizados pelo nó auxiliar no segundo *slot* de tempo são desperdiçados. De modo a combater estes problemas, esquemas de transmissão adaptativas que utilizam os recursos do canal eficientemente são propostos em [47]. Os autores descrevem dois esquemas de protocolos de transmissão adaptativos: transmissão seletiva e transmissão incremental. Transmissão seletiva permite ao nó fonte selecionar um nó auxiliar adequado baseado se a razão sinal ruído (SNR) medida previamente consegue satisfazer o limiar de detecção. Com a técnica de transmissão incremental, o nó fonte envia um sinal para o nó de destino usando um enlace direto. Se o nó de destino é incapaz de detectar o sinal usando o enlace direto, o nó auxiliar envia o sinal para o nó de destino (assumindo que o nó auxiliar foi capaz de detectar o sinal). As técnicas de transmissão seletiva e incremental podem ser usadas em conjunto com AF ou DF. Quanto ao método “comprimir e encaminhar”, este tende a ter um desempenho melhor que o DF quando os nós auxiliares estão próximos do destino [53].

Neste trabalho utilizamos a técnica *Decodificar e Encaminhar* já que, apesar de mais complexo em termos de implementação, o sinal que chega no receptor tem menos ruído do que se utilizamos a técnica AF. A técnica DF pode ser implementada de várias formas dependendo do modelo de CC utilizado. Além disso, antes de utilizarmos as técnicas AF ou DF precisamos primeiro selecionar os nós auxiliares que participarão da transmissão cooperativa. As estratégias de seleção de nós auxiliares serão apresentadas na seção a seguir.

### 2.2.3 Seleção de Nós Auxiliares

A seleção de nós auxiliares é crucial para o desempenho da rede devido ao fato que um nó auxiliar de qualidade significa aumento no ganho de diversidade. Assim, a seleção do nó auxiliar ótimo potencializa a performance do sistema a alcançar alguns objetivos de roteamento como eficiência energética, vazão, atraso. As estratégias de seleção em termos da quantidade ótima e da localização dos nós auxiliares são descritas na sequência.

- **Número ótimo de nós auxiliares:** A utilização de mais nós auxiliares promove um ganho maior em diversidade e um aumento do desempenho. Entretanto, quanto maior a quantidade de nós auxiliares, maior a necessidade de recursos (como tempo e energia) e causa uma maior área de interferência [54] o que pode reduzir o ganho de cooperação. Sem um controle central, uma maior coordenação e, conseqüentemente, uma carga extra na rede é necessária quando utilizamos muitos nós auxiliares. Devido ao sobrecarga, a eficiência energética da transmissão cooperativa diminui com o aumento da quantidade de nós auxiliares. Em [55] encontramos uma relação direta entre a área de interferência e a quantidade de nós auxiliares.
- **Localização ótima dos nós auxiliares:** O ganho potencial da CC depende da localização dos nós auxiliares. O melhor nó auxiliar é aquele que consegue maximizar um objetivo em um dado cenário. Quando apenas um nó auxiliar é necessário, Wang *et al.* [56] mostrou que a teoria dos jogos pode ser utilizada para selecionar o melhor nó auxiliar. Para enlaces com múltiplos nós auxiliares, os autores em [57] mostraram que o desempenho ótimo pode ser alcançado quando todos os nós auxiliares estão à mesma distância do nó de destino.

Existem outras técnicas, não ótimas, para a seleção dos nós auxiliares como, por exemplo, o *Distance Based Helper Set Selection (DBHSS)* [1] cuja idéia geral é adicionar a menor quantidade possível de nós ao conjunto de nós auxiliares, utilizando uma métrica simples, até que o enlace cooperativo seja estabelecido. O *DBHSS* tem como objetivo obter o valor mínimo da soma da distância entre os nós auxiliares e os nós de origem e destino.

Neste trabalho focamos na heurística de seleção de nós *Greedy Helper Set Selection* que foi utilizado em [11, 12, 45] de modo a facilitar a comparação das técnicas que serão propostas com o *CoopSink* [12]. Os detalhes do *Greedy Helper Set Selection* serão apresentados na sequência.

**Heurística *Greedy Helper Set Selection (GHSS)*** Descreve uma heurística gulosa, proposta em [11], para selecionar os nós auxiliares mais eficientes em energia em uma CC e serve para grafos tanto direcionais quanto bidirecionais.

O Algoritmo 5 recebe como entrada: o nó transmissor  $v_i$ ; o conjunto  $N(v_i)$  de nós vizinhos de  $v_i$ ; e nó destino  $v_j$ , a distância  $d_{ij}$  entre os nós  $v_i$  e  $v_j$  e o coeficiente de desvanecimento  $\alpha$ . Retorna um conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$  de tal forma que o peso do enlace CC  $\widetilde{v_i v_j}$  seja reduzido (embora não garanta soluções ótimas). O *GHSS* possui 3 passos principais:

---

**Algoritmo 1** *GreedyHelperSetSelection*

---

- 1: Ordenar os nós vizinhos de  $v_i$  ( $N(v_i)$ ) de acordo com uma heurística de ganho e colocar os vizinhos ordenados no vetor  $C$ ;
  - 2: Adicionar elementos do vetor  $C$  ao conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$  até que  $v_i$  e seus vizinhos possuam a potência mínima necessária para criar o enlace  $\widetilde{v_i v_j}$ . Se, após adicionar todos os elementos de  $C$ , a potência somada desses nós ainda não seja suficiente para criar o enlace  $\widetilde{v_i v_j}$ , uma mensagem de erro é retornada;
  - 3: Adicionar o máximo de nós ajudantes ao conjunto  $H_{i,j}$  de modo que a inclusão de um novo nó não aumente o peso do enlace CC. Caso a inclusão desse enlace aumente o peso do enlace CC ou todos os elementos em  $C$  já tiverem sido inseridos em  $H_{i,j}$ , a função retorna o conjunto  $H_{i,j}$ . Além disso, é retornado o peso do enlace CC  $v_i v_j$  utilizando os nós presentes no conjunto  $H_{i,j}$  como auxiliares.
- 

A função de ganho, é utilizada para ordenar os nós de  $N(v_i)$  que trarão mais ganho em termos de custos para criar o enlace CC  $\widetilde{v_i v_j}$ . Considere, para cada nó  $v_k \in N(v_i)$ , os seguintes valores:

- $b_k \leftarrow \frac{\tau}{(d_{i,j})^{-\alpha}} - \frac{\tau}{\sum_{v_l \in \{v_i, v_k\}} (d_{i,j})^{-\alpha}}$ : quantidade de potência que o nó  $v_i$  pode economizar se adicionar o nó  $v_k$  como auxiliar. Observe que o primeiro elemento da subtração é o custo para  $v_i$  se comunicar com  $v_j$  diretamente e o segundo elemento é a potência para  $v_i$  se comunicar com  $v_j$  cooperativamente utilizando  $v_k$  como auxiliar;
- $c_k = \frac{\tau}{(d_{i,k})^{-\alpha}}$ : Custo para o nó  $v_i$  se comunicar com o nó auxiliar  $v_k$  diretamente.

Como o objetivo é diminuir o peso do enlace CC, é claro que os valores de  $b_k$ , que simbolizam o ganho, devem ser maximizados enquanto os valores de  $c_k$ , que representam o custo de se comunicar com o nó auxiliar, devem ser minimizados. Dessa maneira, a função de ganho considera a razão  $\frac{b_k}{c_k}$  como métrica que indica qual nó trará mais ganho, ou seja, se  $\frac{b_k}{c_k}$  é máximo, então a inclusão do nó  $v_k$  trará mais ganho que os outros.

## 2.3 Discussão

Nesta seção apresentamos os principais conceitos e características de RSSF com ênfase na conectividade. Além disso, apresentamos a técnica de CC entrando em detalhes no modelo de rede, técnica de transmissão cooperativa e seleção de nós auxiliares. E, embora existam

estudos do consumo energético numa RSSF, não identificamos nenhum trabalho que tenha por objetivo criar enlaces cooperativos mais balanceados. No Capítulo 3 apresentamos técnicas de CC para aumentar a conectividade e que visam diminuir o número de saltos para o nó sorvedouro.

## Capítulo 3

# Utilização de CC na Obtenção de Rotas Alternativas em RSSF

As RSSF podem ser aplicadas em um número diferente de situações as quais podem requerer que os nós retransmitam a informação o mais rápido possível para o nó sorvedouro. Dentre as aplicações possíveis estão informações sísmicas, informações de maremotos, monitoração de deslizamento de terra, monitoração de habitat [58], nível da água de rios, monitoração de saúde de pessoas com necessidades especiais [59], entre outros [3, 4, 5]. Em tais aplicações, a necessidade de manter ou restabelecer conectividade com a menor quantidade de saltos possível para o *gateway* é crucial. Além disso, como os sensores operam por baterias é importante definir mecanismos eficientes em energia para executar o sensoriamento e o monitoramento do ambiente assim como meios de comunicação que gastem menos energia. Embora estes mecanismos possam retardar a descarga da bateria, não evitam que a rede se torne desconexa em algum ponto por falha dos nós sensores, de seus enlaces ou mesmo o esgotamento natural da bateria. Um nó sensor que não tem conectividade com o nó sorvedouro poderá perder os dados sensoriados devido as limitações de processamento e memória dos nós sensores. Visando prover conectividade ao nó da rede que não o possui com a comunicação tradicional, propomos utilização da técnica de CC. Este capítulo utiliza CC para aumentar o alcance de transmissão, e consequentemente, a conectividade de uma RSSF e minimizar a quantidade de saltos para o nó sorvedouro.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 3.1 apresenta o modelo de CC utilizado neste trabalho. A Seção 3.2 descreve a nossa proposta para aumentar a conectividade em uma rede de sensores sem fio e reduzir a quantidade de saltos até o nó sorvedouro. A Seção 3.3 apresenta os resultados de simulação que comparam a técnica proposta com outras da literatura. A Seção 3.4 apresenta uma discussão acerca dos resultados obtidos.

### 3.1 Modelo de Comunicação Cooperativa de Yu

Diversos modelos de CC foram propostos nos últimos anos. Estes modelos diferem quanto a sua forma de implementação, utilização e aplicação. Zaman *et al.* [60] propuseram o modelo de CC para aumentar a razão-sinal-ruído no nó de destino. Zhou *et al.* [61] mostraram que CC pode ser utilizada para aumentar a vazão da rede. O modelo de CC utilizado por [60, 61] é apresentado na Figura 3.1. Neste modelo, o nó fonte, auxiliar e destino conseguem se comunicar via arestas diretas, ou seja, estão dentro do alcance de transmissão um do outro. A CC ocorre em duas etapas: na primeira, o nó fonte encaminha os pacotes de dados aos seus nós auxiliares; após o nó fonte e o nó auxiliar transmitem em conjunto para o nó de destino.

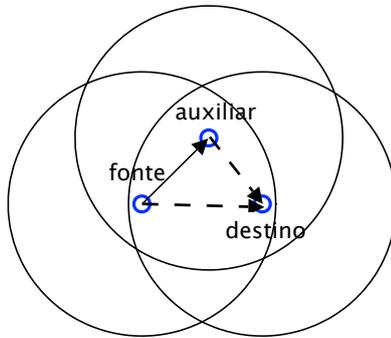


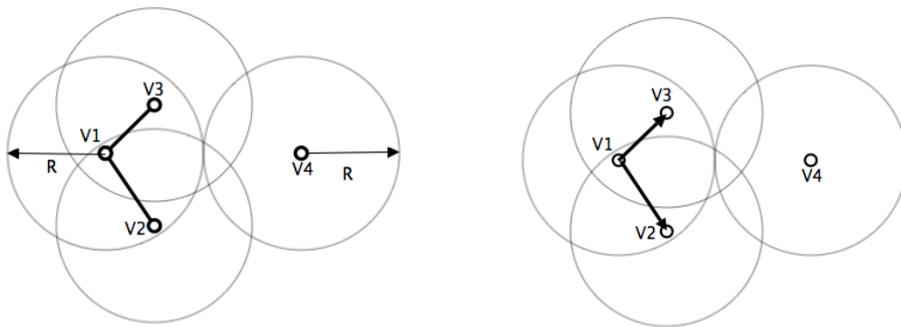
Figura 3.1: Exemplo de modelo de CC.

Yu *et al.* [11] descrevem como a CC pode ser utilizada para aumentar a conectividade em redes *ad hoc* sem fio. Este trabalho utiliza o modelo proposto por Yu como modelo de CC para aumentar a conectividade da rede. No que segue, apresentamos em mais detalhes o modelo de Yu, o qual será utilizado como base da proposta de aumento de conectividade apresentada neste capítulo. Doravante, o modelo cooperativo de Yu *et. al* [11] será referido como Modelo CC(Yu).

A CC obtém vantagem do projeto da camada física para combinar sinais e obter a informação completa [39]. Desta forma, ocorrerá uma comunicação completa entre o nó  $v_i$  e o nó  $v_j$  utilizando CC se  $v_i$  transmite o sinal simultaneamente com um conjunto de nós auxiliares  $H_{ij} \in N(v_i)$ , onde  $N(v_i)$  denota o conjunto de vizinhos diretos de  $v_i$ , e a soma de suas potências de transmissão satisfazem a Inequação 3.1.

$$\sum_{v_k \in v_i \cup H_{i,j}} P_k(d_{k,j})^{-\alpha} \geq \tau \quad (0 \leq P_k \leq P_{MAX}). \quad (3.1)$$

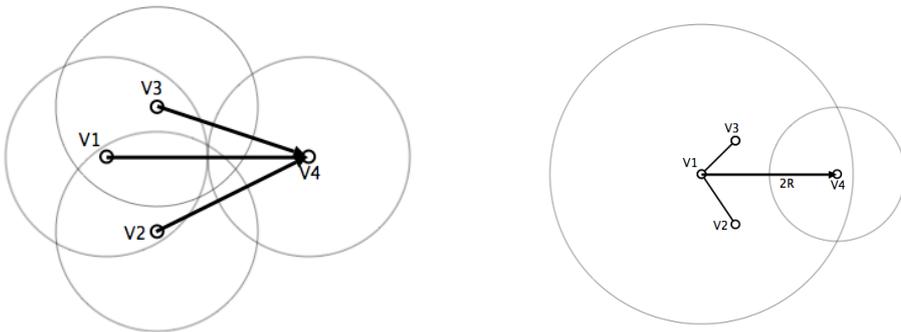
As Figuras 3.2 e 3.3 exemplificam um cenário de CC onde o modelo CC(Yu) é utilizado. A Figura 3.2(a) mostra o cenário onde o nó  $v_1$  tem dois nós dentro do raio de transmissão e um fora. O nó  $v_1$  pode enviar dados para o nó  $v_4$ , que está fora do seu raio de transmissão, utilizando CC. O nó  $v_1$  pode selecionar os nós  $v_2$  e  $v_3$  como auxiliares para transmitir para  $v_4$ , isto é,  $H_{ij}$ . Após selecionar esses nós como ajudantes, o nó  $v_1$  transmite seu dado para  $v_2$  e  $v_3$  como mostrado na Figura 3.2(b). Após, o nó fonte e seus nós auxiliares transmitem, simultaneamente, o dado para o nó destino  $v_4$ . Este segundo passo é ilustrado na Figura 3.3(a). Se a potência do sinal recebido obedecer aos requisitos da Inequação 3.1 em  $v_4$ , este nó seria capaz de decodificar o sinal recebido e recuperar o dado oriundo de  $v_1$ , assim como ilustrado pela Figura 3.3(b).



(a) Cenário onde existem 3 nós próximos  $v_1, v_2$  e  $v_3$  e um distante  $v_4$ .

(b) Primeiro momento da CC onde  $v_1$  transmite o dado para  $v_2$  e  $v_3$ .

Figura 3.2: Cenário e primeiro momento da CC.



(a) Segundo momento da CC cooperativa onde  $v_1, v_2$  e  $v_3$  transmitem o dado para  $v_4$ .

(b) Aumento do alcance de transmissão de  $v_1$  com a utilização dos nós ajudantes  $v_2$  e  $v_3$  para criar um enlace cooperativo entre  $v_1$  e  $v_4$ .

Figura 3.3: Segundo momento da CC e aumento do alcance de transmissão do nó  $v_1$ .

Como a CC ocorre em dois momentos, o custo da aresta apresentado na Definição 2 não pode ser aplicado neste caso. Portanto, o custo da aresta cooperativa é definida abaixo.

**Definição 7** (*Custo de uma aresta CC(Yu)*): O custo de cada aresta  $\widetilde{v_i v_j}$  é definido como:

$$w(\widetilde{v_i v_j}) = w_d(H_{i,j}) + (|H_{i,j}| + 1)w_{CC}(H_{i,j}), \quad (3.2)$$

onde:

- $|H_{i,j}|$ : é o número de elementos do conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$ ;
- $w_d(H_{i,j}) = \left( \frac{\tau}{\max_{v_k \in H_{i,j}} (d_{i,k})^{-\alpha}} \right)$ : é a potência mínima necessária para o nó  $v_i$  se comunicar diretamente com seu nó auxiliar mais distante em  $H_{i,j}$ ;
- $w_{CC}(H_{i,j}) = \left( \frac{\tau}{\sum_{v_k \in v_i \cup H_{i,j}} (d_{k,j})^{-\alpha}} \right)$ : é a potência mínima necessária para o nó  $v_k$  transmitir cooperativamente para o nó destino  $v_j$ .

Observe que, de acordo com as Inequações 2.1 e 3.1, a seguinte relação deve ser verdadeira para existir uma aresta CC:

$$\max(w_d(H_{i,j}), w_{CC}(H_{i,j})) \leq P_{MAX}. \quad (3.3)$$

Para a CC ocorrer de  $v_i$  para  $v_j$ , o nó fonte  $v_i$  deve, em um primeiro momento, enviar seu dado para seus nós auxiliares em  $H_{i,j}$  e, em um segundo momento, o nó  $v_i$  e seus ajudantes transmitem simultaneamente o mesmo dado para  $v_j$ . Dessa forma, o peso de uma aresta CC consiste na soma dos custos de comunicação nesses dois momentos.  $w_d(H_{i,j})$  é o custo do primeiro momento da CC enquanto  $w_{CC}(H_{i,j})$  é o custo para um único nó transmitir cooperativamente, devendo ser multiplicado por  $(|H_{i,j}| + 1)$ , que é o número de nós que participam da CC. Para este modelo assume-se que os nós que participam do segundo momento da CC utilizam a mesma potência, ou seja, o nós fonte e os nós auxiliares transmitem com a mesma potência.

A Seção 3.2 apresenta a proposta que utiliza o modelo CC(Yu) para aumentar a conectividade em uma RSSF.

## 3.2 Descrição da Proposta

Em uma rede de sensores, onde exista um nó sorvedouro, há a necessidade de manter a conectividade com este nó. A técnica de CC pode ser utilizada para garantir que nós,

antes sem conectividade com o sorvedouro, tornem-se capazes de se comunicar. Enquanto o *CoopSink* [12] visa aumentar a conectividade e, ao mesmo tempo, obter rotas mais eficientes energeticamente para o sorvedouro, este não analisa o impacto na quantidade de saltos para alcançar o sorvedouro. Nesta seção propomos a técnica *Cooperative Sink Communication(CSC)* cujos objetivos são os seguintes: (i) aumentar a conectividade da rede usando CC; (ii) garantir as rotas mais rápidas para o nó sorvedouro e (iii) reduzir o consumo energético ao menor possível nas rotas selecionadas. Os algoritmos e formulações desta seção são baseados no modelo de rede apresentado no Capítulo 2 e no modelo CC(Yu) apresentado na Seção 3.1. O *CSC* consiste na execução, em sequência, de quatro passos:

1. Os nós usam sua potência máxima de transmissão para se conectar aos nós vizinhos criando todos os enlaces diretos possíveis;
2. Os enlaces CC são criados de modo a aumentar a conectividade quando os enlaces diretos não são suficientes para garantir a conectividade da rede;
3. A topologia resultante dos passos 1 e 2 é usada para selecionar as rotas em direção ao nó sorvedouro que são capazes de
  - (a) reduzir o número de saltos; ou
  - (b) reduzir o número de transmissões.
4. A potência individual de transmissão é ajustada de modo a preservar a conectividade da rede.

Dado que o objetivo do *CSC* é reduzir o número de saltos para o nó sorvedouro, foi utilizado o algoritmo de Dijkstra [62] para encontrar o menor caminho entre cada nó para o nó sorvedouro e as rotas que não pertencem ao menor caminho foram removidas. Entretanto, existem outros algoritmos que realizam controle de topologia. Segundo Santi *et al.* [31], o controle de topologia consiste em controlar os enlaces de comunicação, através do raio de comunicação, entre os nós com o objetivo de manter alguma propriedade global da rede enquanto reduz o consumo de energia. O algoritmo de Dijkstra não é um algoritmo de controle de topologia, mas pode ser adaptado e usado para tal. Exemplos de controle de topologia: *DTCC/ITCC* proposto por Cardei *et al.* [46] que utiliza controle de topologia em conjunto com CC com o objetivo de obter topologias fortemente conexas com o mínimo consumo energético. Adicionalmente, o *CoopBridges* proposto por Yu *et al.* [11] que utiliza um controle de topologia centralizado que usa CC para reduzir a potência de transmissão dos nós bem como aumentar a conectividade da rede.

Os passos do *CSC* são apresentados em detalhes nas subseções na sequência.

### 3.2.1 CSC Passo 1 - Construção do grafo $\overline{G}$

O Algoritmo 2 descreve o primeiro passo do *CSC* que consiste em criar todos enlaces diretos possíveis usando a potência máxima de transmissão  $P_{MAX}$ . O Algoritmo tem como entrada: o conjunto de nós  $V = v_1, v_2, \dots, v_n$  com a informação local e a potência máxima de transmissão  $P_{MAX}$ . Nesta etapa, os nós conhecem seus vizinhos, ou seja, cada nó  $v_i$  conhece os nós em  $N(v_i)$ . No *for-loop* das linhas 2- 6, para cada nó  $v_i$  e  $v_j \in V$ , o nó  $v_i$  verifica se tem conexão com o nó  $v_j$  utilizando a potência máxima de transmissão  $P_{MAX}$ . Havendo, este enlace é adicionado ao conjunto de enlaces diretos  $\overline{E}$ . Como saída, o grafo direto  $\overline{G} = (V, \overline{E})$  onde  $\overline{E}$  consiste em todas das arestas diretas conforme Definição 1. O Algoritmo 2 tem custo computacional igual a  $O(\overline{E})$  tendo em vista que todas as arestas diretas são computadas neste passo.

As Figuras 3.4(a) e 3.4(b) apresentam, respectivamente, o grafo de entrada o e grafo  $\overline{G}$  computado. A Figura 3.4(a) consiste numa área de  $500 \times 500$  metros com  $n = 70$  nós e  $\overline{E} = \emptyset$ , ou seja, sem arestas. A Figura 3.4(b) ilustra o grafo resultado os nós criam arestas baseadas na potência máxima de transmissão. Neste exemplo, o alcance máximo de transmissão é igual a 70 metros ( $R_{MAX} = 70\text{m}$ ). Note que o grafo resultante não é necessariamente conexo e que os enlaces gerados nesse passo são bidirecionais.

---

**Algoritmo 2** *CSC\_Step(1)(V, P<sub>MAX</sub>)*

---

**Input:**  $V$  e  $P_{MAX}$ ;

**Output:**  $\overline{G}$ ;

- 1:  $\overline{G} = (V, \emptyset)$ ;
  - 2: **for**  $(v_i, v_j \in V)$  **do**
  - 3:   **if**  $(P_{MAX}(d_{ij})^{-\alpha} \geq \tau)$  **then**
  - 4:     Add  $\overline{v_i v_j}$  to  $\overline{G}$ ;
  - 5:   **end if**
  - 6: **end for**
- 

### 3.2.2 CSC Passo 2 - Construção do grafo $\widetilde{G}$

O Algoritmo 3 descreve o segundo passo do *CSC* onde todos os enlaces cooperativos possíveis, conforme Definição 4, são criados utilizando o modelo de CC de Yu. Como entrada, o algoritmo recebe o grafo  $\overline{G} = (V, \overline{E})$  do passo anterior. Para o cálculo do conjunto de nós auxiliares de cada nó  $H_{i,j}$  apresentado na Definição 3, o *CSC* utiliza uma heurística gulosa proposta em [11] e que contém o protótipo de função *GreedyHelperSetSelection* $(v_i, N(v_i), v_j)$  apresentado na Seção 2.2.3. No *for-loop* das linhas 2 - 11, primeiramente é calculado o conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$  utilizando o *GreedyHelperSetSelection* $(v_i, N(v_i), v_j)$ . Entretanto, o *GHSS* pode retornar um  $H_{i,j}$  cuja potência individual de transmissão de cada nó no segundo momento da CC ultrapasse  $P_{MAX}$ . Caso, isso não ocorra, o enlace  $\widetilde{v_i v_j}$  é

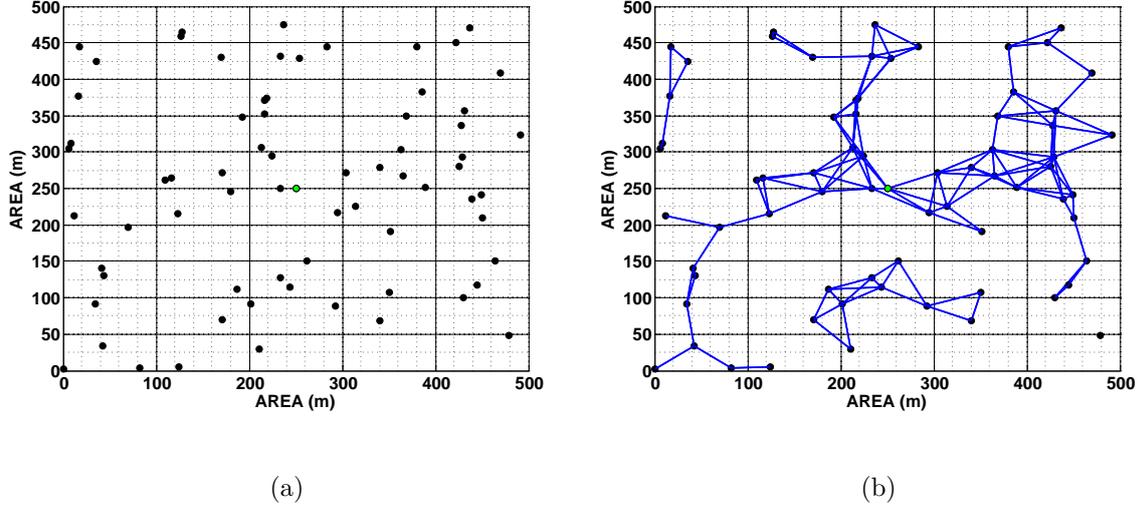


Figura 3.4: (a) Exemplo de topologia de rede com  $n = 70$  nós e  $|E| = 0$ . (b) Grafo direto  $\bar{G}$  criado a partir de (a) onde os nós operam com a potência máxima de transmissão  $P_{MAX}$ .

adicionado ao grafo  $\tilde{G} = (V, \tilde{E})$ . No `if` das linhas 6 - 8, verificamos se já existe algum enlace direto  $\bar{v}_i\bar{v}_j \in \bar{G}$  cujo peso seja maior que o enlace cooperativo criado anteriormente, este enlace direto  $\bar{v}_i\bar{v}_j$  é retirado do grafo  $\bar{G}$ . Na linha 11, adicionamos ao grafo  $G$  o grafo  $\bar{G}$  que contém todas os enlances diretos e o grafo  $\tilde{G}$  que contém todos os enlances cooperativos. Como saída, o algoritmo retorna o grafo  $G$  que contém tanto enlances diretos quanto cooperativos. Considerando o custo computacional do *GHSS* calculado na Seção 2.2.3, o Algoritmo 3 chama a função *GHSS*  $V^2$  vezes, ou seja, para cada nó no grafo é calculado a possibilidade de existência de um enlace CC com todos os nós do grafo. Assim, o custo computacional do Algoritmo 3 é  $O(V^2 \cdot \Delta(G)^2)$ .

Como exemplo do Passo 2, considere as Figuras 3.4(b) e 3.5. O grafo da Figura 3.4(b) é a saída do Passo 1 e o grafo de entrada do Passo 2. O grafo da Figura 3.5 é a saída do Passo 2. Neste grafo, apresentamos em azul os enlances diretos  $\bar{v}_i\bar{v}_j \in E$  e, em vermelho, os enlances cooperativos  $\widetilde{v}_i\widetilde{v}_j \in E$ . Embora a utilização de CC permita a criação de muitos enlances cooperativos, estes enlances são unidirecionais, ou seja, a existência de  $\widetilde{v}_i\widetilde{v}_j \in E$  não implica na existência de  $\widetilde{v}_j\widetilde{v}_i \in E$ .

### 3.2.3 CSC Passo 3 - Remoção de Enlances de $G$

O Algoritmo 4 descreve o terceiro passo do *CSC*. Este algoritmo recebe de entrada: o grafo  $G$  obtido no passo anterior, o nó sorvedouro  $v_o \in V$  e a variável booleana  $\mathcal{R}$ . A saída do algoritmo é o grafo  $G'$  que contém os enlances computados de acordo com a variável  $\mathcal{R}$ :

---

**Algoritmo 3**  $CSC\_Step(2)(\overline{G})$ 

---

**Input:**  $\overline{G}$ ;**Output:**  $G$ ;

```
1:  $\tilde{G} = (V, \emptyset)$ ;  
2: for  $(v_i, v_j \in V)$  do  
3:    $H_{ij} \leftarrow GreedyHelperSetSelection(v_i, N(v_i), v_j)$ ;  
4:   if  $(w_{CC}(H_{i,j}) \leq P_{MAX})$  then  
5:     Add  $\overline{v_i v_j}$  to  $\tilde{G}$ ;  
6:     if  $(\overline{v_i v_j} \in \overline{G}$  and  $w(\overline{v_i v_j}) > w(\widetilde{v_i v_j}))$  then  
7:       Remove  $\overline{v_i v_j}$  from  $\overline{G}$ ;  
8:     end if  
9:   end if  
10: end for  
11:  $G = \overline{G} + \tilde{G}$ ;
```

---

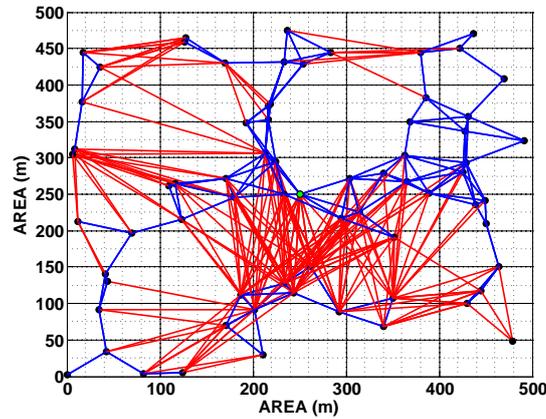


Figura 3.5: Grafo  $G$  criado a partir do grafo 3.4(b) e que contém todas as arestas diretas e cooperativas possíveis.

$\mathcal{R} = 0$ : Enlaces com o menor número de saltos para alcançar o sorvedouro são mantidos; ou

$\mathcal{R} = 1$ : Enlaces com o menor número de transmissões para alcançar o sorvedouro são mantidos.

No **for** das linhas 2 - 6, para cada nó  $v_i$ , a função  $NextHopToSink(G, E, v_o, \mathcal{R})$  é utilizada para o cálculo do menor caminho em direção ao nó sorvedouro. Quando o parâmetro  $\mathcal{R} = 0$ , a função retorna o próximo salto  $e(v_i v_j)$  no menor caminho em direção a  $v_o$ . Entretanto, quando  $\mathcal{R} = 1$ , a função retorna próximo salto  $e(v_i v_j)$  em direção ao nó sorvedouro que contém o menor número de nós auxiliares. Na linha 6, o enlace  $e(v_i v_j)$  é adicionado ao conjunto  $E'$ . Assim, apenas os enlaces que participam do menor caminho,

seja em saltos ou transmissões, pertenceram ao conjunto  $E'$ . Note que, quanto maior a quantidade de nós auxiliares, maior a quantidade de transmissões simultâneas em cada salto em direção ao destino já que os nós em  $H_{i,j}$  cooperativamente transmitem o pacote para o próximo salto. Quando  $\mathcal{R} = 1$ , denominamos esta técnica como  $CSC(HS)$ , caso contrário denominamos como  $CSC$ . Como utilizamos o algoritmo de Dijkstra [62] para o cálculo do menor caminho com base na métrica  $\mathcal{R}$ , o custo computacional do Algoritmo 4 é  $O(V^2)$ .

A Figura 3.5 apresenta o grafo de entrada deste passo, já as Figuras 3.6(a) e 3.6(b) mostram os grafos de saída deste passo,  $CSC$  e  $CSC(HS)$ , respectivamente. Os grafos resultantes deste passo mostram todos os enlaces em direção a  $v_o$ , ou seja, todos os nós que tem um caminho para o nó sorvedouro. Em ambas as Figuras 3.6(a) e 3.6(b), nós que previamente não tinham uma rota para  $v_o$  agora possuem devido a utilização de CC de modo que a conectividade da rede é aumentada.

---

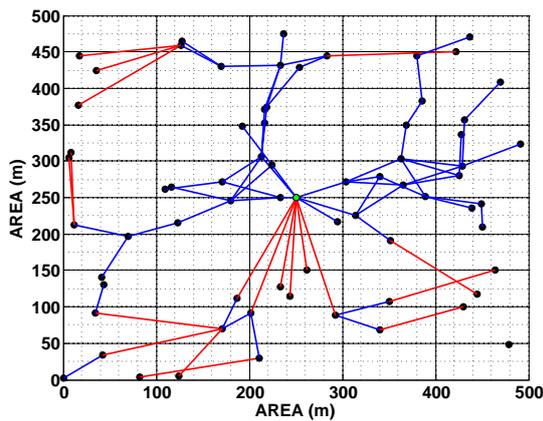
**Algoritmo 4**  $CSC\_Step3(G, v_o, \mathcal{R})$

---

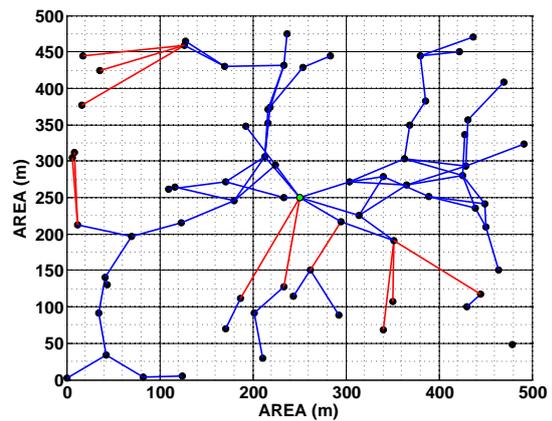
**Input:**  $G = (V, E)$ ;

**Output:**  $G' = (V, E')$ ;

- 1:  $E' \leftarrow \emptyset$ ;
  - 2: **for**  $\forall v_i \in V$  **do**
  - 3:  $e(v_i v_j) \leftarrow NextHopToSink(G, E, v_o, \mathcal{R})$ ;
  - 4:  $v_i$  uses the edge  $e(v_i v_j)$  to reach the next hop towards the sink node;
  - 5:  $E' \leftarrow E' \cup e(v_i v_j)$ ;
  - 6: **end for**
- 



(a)



(b)

Figura 3.6: (a) Exemplo da técnica  $CSC$ . (b) Exemplo da técnica  $CSC(HS)$

### 3.2.4 CSC Passo 4 - Ajuste na Potência de Transmissão

O Algoritmo 5 descreve o último passo do *CSC* e do *CSC(HS)*. Este passo consiste no ajuste da potência de transmissão de todos os nós do grafo de entrada  $G'$  de modo que a potência individual de transmissão seja reduzida. Na linha 2 do **for**, é computada a mínima potência de transmissão de modo que  $N(v_i)$  não seja alterado, ou seja, a menor potência de transmissão tal que o enlace  $v_i v_j$  seja mantido para todo  $v_j \in N(v_i)$ . Posteriormente, na linha 3 do **for** é computada a potência mínima de transmissão deve garantir que todo enlace  $\widetilde{v_i v_j}$  criado no Passo 3 seja viável. Na linha 4, a potência individual  $P_i$  é a potência máxima calculada nas linhas 2 e 3 de modo a manter tanto os enlaces diretos quanto cooperativos viáveis. O custo computacional do Algoritmo 5 é dado por  $O(\widetilde{V}E)$  já que para cada  $v_i$  verificamos a potência de transmissão utilizada em cada enlace que este nó possui. No nosso exemplo, o grafo resultante é o mesmo do passo anterior com a diferença que a potência individual de transmissão foi reduzida.

---

#### Algoritmo 5 *CSC\_Step(4)(G')*

---

**Input:**  $G' = (V, E')$ ;

- 1: **for**  $v_i \in V$  **do**
  - 2:    $a \leftarrow \max_{v_i v_j \in G'} w_d(H_{i,j})$ ;
  - 3:    $b \leftarrow \max_{\widetilde{v_i v_j} \in G'} w_{CC}(H_{i,j})$ ;
  - 4:    $P_i = \max\{a, b\}$ ;
  - 5: **end for**
- 

O custo computacional da técnica *CSC* é calculado pela soma do Algoritmo 2 com os Algoritmos 3, 4 e 5. Comumente  $V < E$ , assim o custo computacional do *CSC* pode ser expressado por  $O(E^2 \cdot \Delta(G)^2)$ . A seção a seguir apresenta os resultados de simulação que comparam o *CSC* e o *CSC(HS)* com o *CoopSink* [12].

## 3.3 Resultados de Simulação

De forma a avaliar o modelo CC(Yu) em conjunto com as técnicas *CSC* e *CSC(HS)*, desenvolvemos um simulador em Matlab [15] onde os algoritmos foram implementados. Além das técnicas *CSC* e *CSC(HS)*, utilizamos para comparação a técnica *CoopSink* [12] que também utiliza o modelo CC(Yu) para aumentar a conectividade e controle de topologia para criar rotas eficientes em energia para o nó sorvedouro.

Para fins de comparação, os parâmetros de simulação são similares àqueles definidos por Yu *et al.* [11] e Neves *et al.* [12] com:  $n = 50, 60, \dots, 100$  nós aleatoriamente posicionados em uma área de  $500 \times 500$ m; nó sorvedouro  $v_1$  fixado na posição (250, 250). O coeficiente de desvanecimento igual a 2;  $P_{MAX} = 4900$  e  $R_{MAX} = 70$ m. Os resultados

de simulação são provenientes de uma média de 500 simulações e o intervalo de confiança utilizado foi de 95%.

Os resultados a seguir mostram a combinação das técnicas *CSC* e *CSC(HS)* com o modelo CC(Yu) comparadas com *CoopSink* que também utiliza o modelo CC(Yu) e utiliza a heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS* proposto em [11]. Estas técnicas e modelos são avaliados com base nas métricas M1 a M7. Para todas as figuras, o eixo  $x$  apresenta a quantidades de nós no grafo.

### 3.3.1 Média de Saltos (M1)

A CC ocorre em dois estágios que podem ser vistos como dois saltos virtuais: no primeiro salto o nó sorvedouro envia o pacote para os nós auxiliares e no segundo salto no nó fonte com ajuda dos nós auxiliares. Assim, cada enlace CC é representado por dois saltos virtuais e cada enlace direto por 1 salto.

A Figura 3.7 apresenta os resultados para a métrica de média de saltos. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de saltos que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC* obtém uma redução do número de saltos, independentemente da quantidade de nós no grafo. Mais especificamente, se comparado com o *CoopSink*, o *CSC* consegue reduzir em até 54,16% o número de saltos. E no pior caso, o qual ocorre com  $n = 50$  nós, o *CSC* consegue reduzir em 40,70% o número de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro. Como o *CoopSink* visa a redução do consumo energético, este acaba por selecionar rotas menor alcance, ou seja, de menor consumo e isto resulta em rotas com muitos saltos até o nó sorvedouro. Entretanto, o *CSC* e *CSC(HS)* visam na redução do número de saltos, ou seja, são escolhidas rotas com maior alcance e que se aproximam mais do nó sorvedouro.

### 3.3.2 Média de Transmissões(M2)

Quando um nó  $v_i$  com seu conjunto de nós auxiliares  $H_{ij}$  tenta alcançar um nó destino  $v_j$ , um total de  $|H_{i,j} + 2|$  transmissões são necessárias no caso do modelo CC(Yu). Assim, a média de transmissões para atravessar um enlace cooperativo é uma métrica que nos mostra, em geral, a quantidade de energia gasta em cada estratégia.

A Figura 3.8 apresenta os resultados para a métrica de média de transmissões. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de transmissões que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC(HS)* obtém uma redução do número de transmissões, independentemente da quantidade de nós no grafo. No melhor caso,  $n = 100$  nós, o *CSC(HS)* reduz em até 46,48% a quantidade de transmissões necessárias para alcançar o nó sorvedouro se comparado com o *CoopSink*. Já

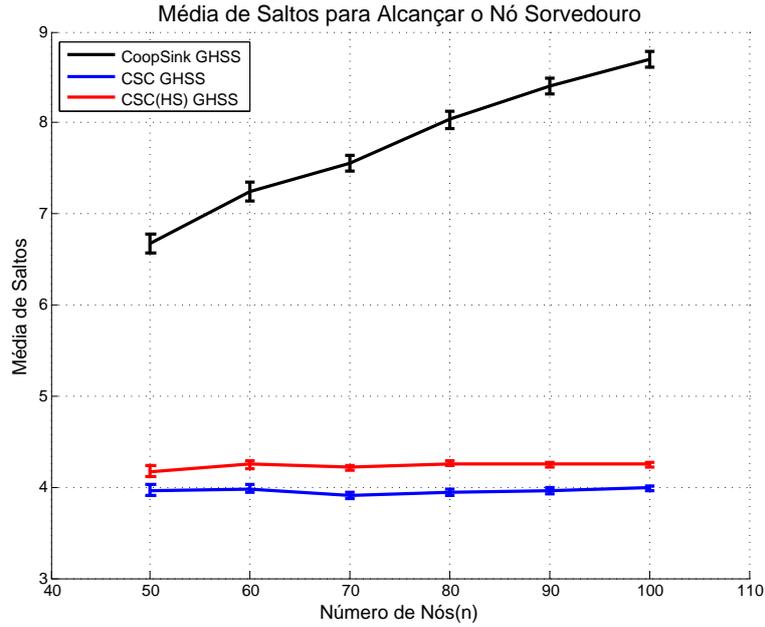


Figura 3.7: Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro.

no pior caso,  $n = 50$  nós, o  $CSC(HS)$  reduz em 27,10% o número de transmissões. Como  $CoopSink$  utiliza enlaces de menor alcance, este acaba por utilizar rotas com múltiplos saltos e isto é representado num alto número de transmissões para alcançar o nó sorvedouro. Quanto maior a densidade de nós da rede, mais o  $CSC$  e  $CSC(HS)$  são beneficiados já que tem mais enlaces e nós auxiliares de melhor qualidade o que se traduz em rotas com menor número de transmissões.

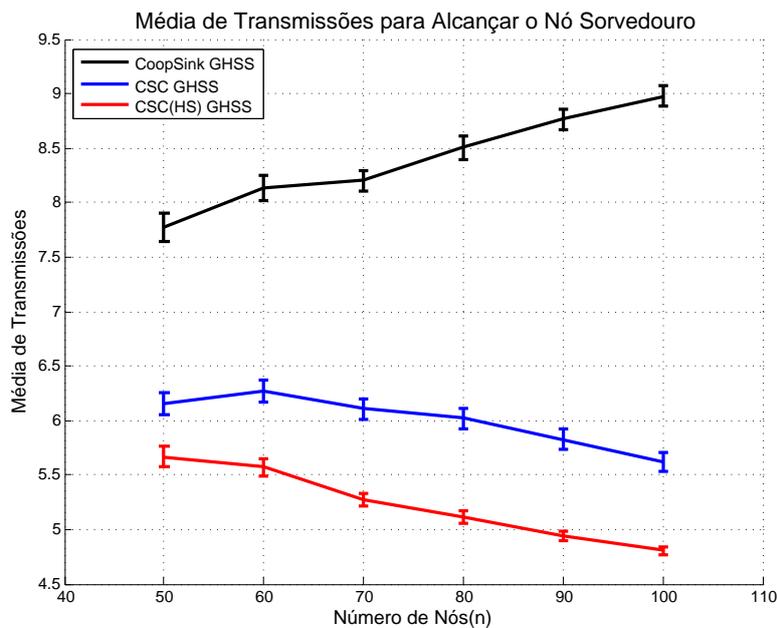


Figura 3.8: Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro.

### 3.3.3 Conectividade(M3)

A Figura 3.9 apresenta os resultados para a métrica M3. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra a quantidade de nós da rede que tem conectividade com o nó sorvedouro em porcentagem. Como podemos observar, a utilização do *CSC*, *CSC(HS)* ou *CoopSink* não influencia na conectividade. A utilização do modelo de CC 1 garante um ganho de conectividade e, no melhor caso, esse ganho pode chegar em até 134%. No pior caso,  $n = 100$  nós, o ganho de conectividade em relação a topologia original é de 14%. Assim, quanto mais esparsa a rede maior é a necessidade de utilização da CC para promover a conectividade entre os nós sensores e o nó sorvedouro.

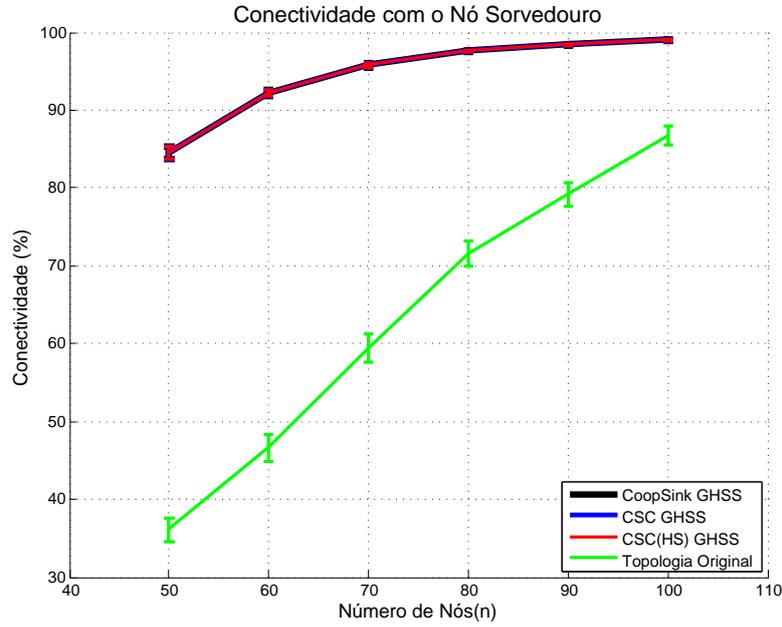


Figura 3.9: Conectividade com o nó sorvedouro.

### 3.3.4 Custo Médio dos Nós Fonte (M4)

Esta métrica tem por objetivo avaliar o impacto no custo médio dos nós fonte para cada técnica utilizada. Dada a Equação 3.4, podemos definir o custo médio dos nós fonte como o somatório do custo do primeiro e do segundo momento da CC para todos os nós fonte dividido pela quantidade total de enlaces CC. O custo médio dos nós fonte é dado pela Equação 3.4.

$$C_{fonte} = \frac{\sum_{\tilde{v}_i \tilde{v}_j \in \tilde{E}} w_d(H_{i,j}) + w_{cc}(H_{i,j})}{|\tilde{E}|}, \quad (3.4)$$

onde  $w_d$  e  $w_{CC}$  são definidos na Seção 3.1 e  $|\tilde{E}|$  é quantidade de enlaces cooperativos de uma topologia.

A Figura 3.10 apresenta os resultados para a métrica M4. O eixo  $y$  representa o custo médio de potência dos nós fonte. Para o calculo desta métrica, considera-se o impacto do modelo de CC no custo dos nós fonte, ou seja, com a utilização do modelo de CC(Yu) o custo do nó fonte é o custo do primeiro momento somado ao custo do segundo momento. Como o *CoopSink* é uma técnica voltada para reduzir o consumo energético, este tende a utilizar aresta de menor custo global e por isso tem um melhor resultado nesta métrica. O *CoopSink*, com  $n = 100$  nós, obtém uma redução de 34,85% no custo médio dos nós fonte se comparado com o *CSC*. O *CSC(HS)* visa reduzir o número de transmissões para o nó sorvedouro, como a quantidade de transmissões também afeta o consumo energético podemos observar que o *CSC(HS)* tem um custo médio dos nós fonte menor do que se comparado ao *CSC*. Além disso, para todas as técnicas analisadas, a medida que a rede se torna mais densa o custo médio dos nós fonte diminuiu. Com a rede mais densa, temos mais nós auxiliares e enlaces diretos disponíveis e, assim, é esperado que o custo dos nós fonte diminua.

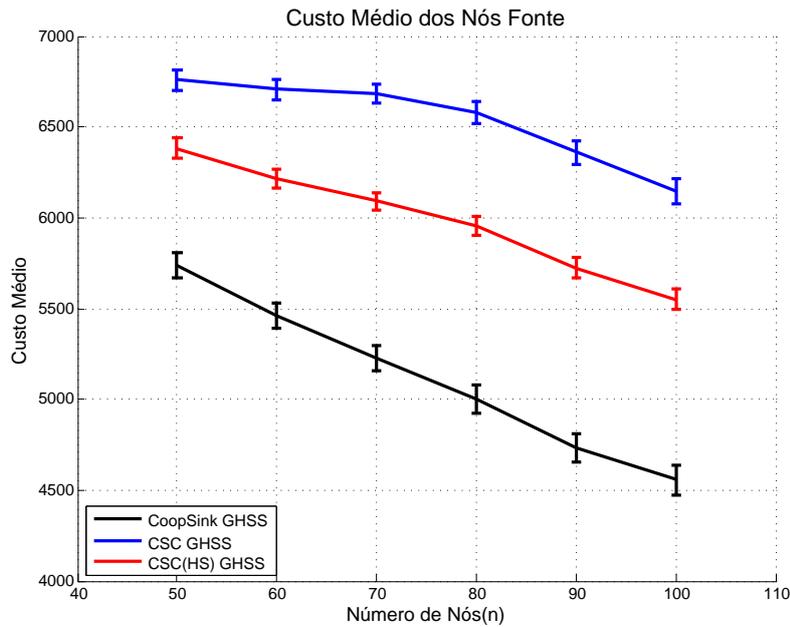


Figura 3.10: Custo médio dos nós fonte.

### 3.3.5 Custo Médio dos Nós Auxiliares(M5)

Esta métrica apresenta a média de energia gasta por cada nó auxiliar na rede. Dada a Equação 3.5, podemos observar que o custo de cada nó auxiliar dentro de um enlace cooperativo é dado por  $w_{CC}(H_{i,j})$ . Assim, podemos definir o custo médio dos nós auxiliares como o somatório do custo de cada nó auxiliar dentro de um enlace CC dividido pela

quantidade total de enlaces CC. O custo médio dos nós auxiliares é dado pela Equação 3.5.

$$C_{aux} = \frac{\sum_{H_{i,j} \in \tilde{E}} w_{CC}(H_{i,j})}{|\tilde{E}|}, \quad (3.5)$$

onde  $w_{CC}(H_{i,j})$  é o custo do segundo momento da CC para cada nó auxiliar, ou seja, é a potência mínima necessária para cada nó auxiliar enviar o dado para o nó destino  $v_j$  e  $|\tilde{E}|$  é quantidade de enlaces cooperativos de uma topologia.

A Figura 3.11 apresenta os resultados para a métrica M5. O eixo  $y$  representa o custo médio de potência dos nós auxiliares. Dentre as técnicas analisadas, o *CoopSink* apresenta, independentemente da densidade de nós na rede, o menor custo médio dos nós auxiliares. Isto ocorre, pois, o *CoopSink* tende a escolher arestas CC mais “curtas”, ou seja, com o nó destino mais próximo dos nós fonte e auxiliares reduzindo, assim, o custo energético. Este resultado era esperado porque o *CoopSink* é uma técnica voltada para a redução do consumo energético. Se comparamos o *CSC* com *CSC(HS)* podemos observar que até 90 nós as técnicas têm resultados tecnicamente iguais devido ao erro de 5%. O *CSC* tem a tendência de utilizar mais nós auxiliares já que isto garante um maior alcance e, portanto, reduz a quantidade de saltos até o nó sorvedouro. Devido a esta tendência, o custo energético dos nós auxiliares é melhor distribuído. O *CSC(HS)* tende a escolher enlaces com a menor quantidade de transmissões, isto é, nós auxiliares. Assim, o custo energético dos nós auxiliares é mais balanceado no *CSC* do que no *CSC(HS)*.

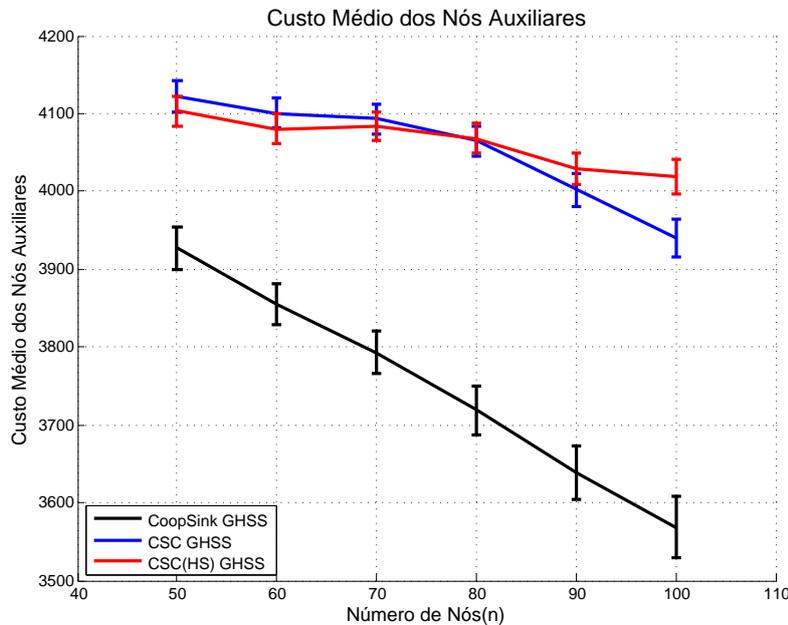


Figura 3.11: Custo médio dos nós auxiliares.

### 3.3.6 Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo(M6)

Esta métrica apresenta a razão do custo energético médio dos nós fonte ( $C_{fonte}$ ) com o custo energético médio dos nós auxiliares ( $C_{aux}$ ) de forma a demonstrar o balanceamento do enlace cooperativo. Quanto mais perto de 1, mais o enlace cooperativo está balanceado. Para o cálculo desta métrica, foi utilizado a Equação 3.6:

$$\mathbf{M6} = \frac{C_{fonte}}{C_{aux}} \times 100. \quad (3.6)$$

$$\mathbf{M6} \begin{cases} = 1 & \text{enlace cooperativo balanceado;} \\ > 1 & \text{nó fonte utiliza mais energia que os nós auxiliares;} \\ < 1 & \text{nós auxiliares utilizam mais energia que o nó fonte.} \end{cases} \quad (3.7)$$

A Figura 3.12 mostra os resultados de simulação da métrica M6. O eixo  $y$  apresenta a razão do custo de comunicação médio utilizado e a razão ótima é apresentada como uma linha horizontal tracejada que corta o eixo  $y$  no valor 1. Podemos observar que todas as técnicas analisadas possuem um desbalanceamento energético com o nó fonte gastando mais energia que os nós auxiliares. No pior caso, com  $n = 50$  nós e considerando a técnica *CSC*, o nó fonte gasta 63,92% mais energia que os nós auxiliares. O *CSC(HS)*, também com  $n = 50$  nós, o nó fonte gasta 55,56% mais energia que os nós auxiliares. Esta falta de equidade no consumo energético dentro do enlace CC causa o esgotamento de bateria prematuro do nó fonte e, por fim, perda de conectividade da rede.

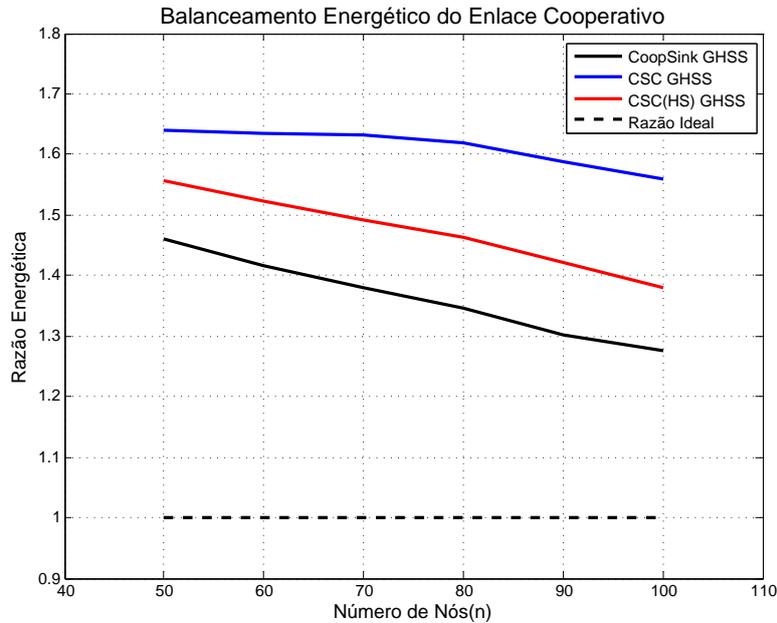


Figura 3.12: Custo balanceamento energético do enlace cooperativo.

### 3.3.7 Custo Médio por Rota(M7)

Esta métrica consiste na média da potência necessária para cada nó  $v_i \in G$  alcançar o nó sorvedouro.

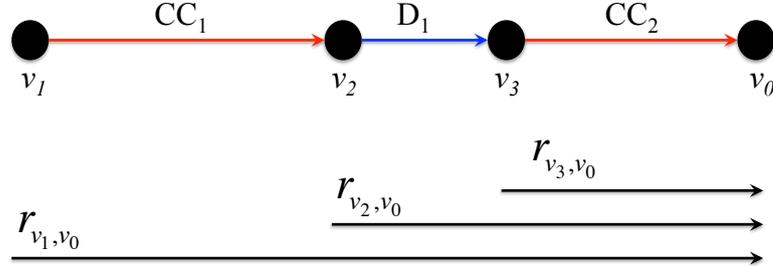


Figura 3.13: Exemplo de potência média da rota

A Figura 3.13 apresenta um exemplo do cálculo do custo médio por rota. Nesta figura temos 3 nós sensores:  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  e o nó sorvedouro  $v_0$ . A rota do nó  $v_1$  para o nó sorvedouro é composta pelo enlace cooperativo  $CC_1$ , pelo enlace direto  $D_1$  e pelo enlace cooperativo  $CC_2$ . A rota do nó  $v_2$  para o nó sorvedouro é composta pelo enlace direto  $D_1$  e pelo enlace cooperativo  $CC_2$ . Já a rota do  $v_3$  para o nó sorvedouro é composta apenas pelo enlace cooperativo  $CC_2$ . O custo do enlace direto  $D_1$  é dado pela Equação 2.2 e assim, o custo de  $D_1$  é  $w(\overline{v_2v_3})$ . Os custos dos enlaces cooperativos são dados pela Equação 3.4, e assim o custo de  $CC_1$  é  $w(\widetilde{v_1v_2})$  enquanto o custo de  $CC_2$  é dado por  $w(\widetilde{v_3v_0})$ . Na equação abaixo,  $r_{v_i, v_j}$  representa a rota do nó  $v_i$  até o nó  $v_j$ . Assim, o custo médio por rota pode ser calculado conforme a Equação 3.8:

$$M7 = (r_{v_1, v_0} + r_{v_2, v_0} + r_{v_3, v_0})/3, \quad (3.8)$$

$$M7 = w(\widetilde{v_1v_2}) + 2 \times w(\overline{v_2v_3}) + 3 \times w(\widetilde{v_3v_0})/3,$$

Desta forma, o custo médio por rota pode ser calculado pela soma dos custos dos enlaces de cada rota para o nó sorvedouro dividido pela quantidade de rotas para o nó sorvedouro.

A Figura 3.14 mostra os resultados de simulação da métrica M7. O eixo  $y$  apresenta o custo médio por rota que alcança o nó sorvedouro. Como o *CoopSink* é uma técnica voltada para criação de rotas eficientes em energia, o resultado esperado pode ser observado na Figura 3.14 onde o *CoopSink* obtém a menor custo médio por rota para todas as densidades de nós da rede apresentadas. O *CSC*, independentemente da densidade de nós na rede, obtém os maiores custos apesar desta técnica apresentar o menor caminho

possível para o nó sorvedouro. Isto ocorre, pois, o *CSC* utiliza mais arestas cooperativas aumentando o custo energético. O *CSC(HS)* é a técnica que mais se aproxima dos resultados do *CoopSink*. No pior caso, com  $n = 100$  nós, o *CSC(HS)* gasta 15,41% a mais de energia que o *CoopSink*.

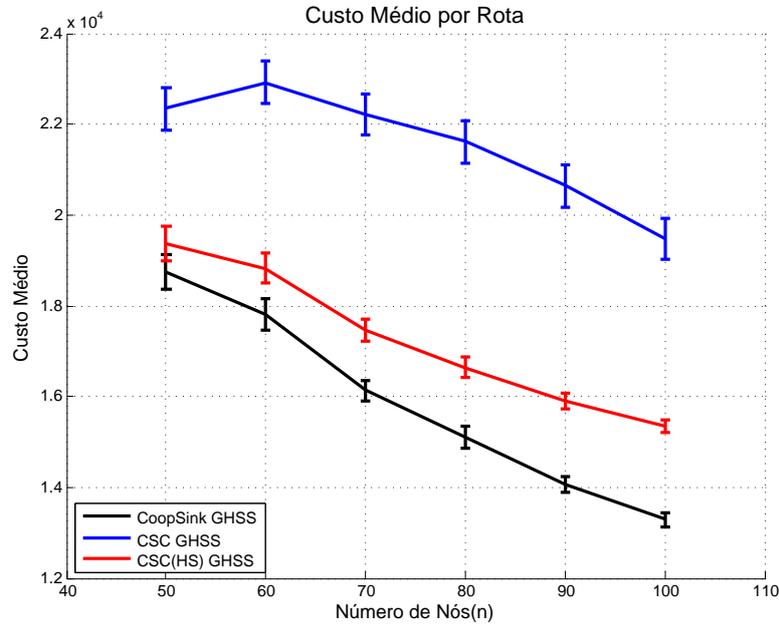


Figura 3.14: Custo médio por rota.

### 3.4 Discussão

Nesse capítulo apresentamos a técnica *CSC* cujos objetivos são aumentar a conectividade e reduzir a quantidade de saltos para o nó sorvedouro. Primeiramente, a técnica foi descrita e seu algoritmo apresentado e, em seguida, a técnica foi implementada e comparada com outras técnicas da literatura por meio de simulação. Como principais resultados temos que a utilização de CC garante um ganho de conectividade de até 134%. O *CSC* reduz em até 54,16% o número de saltos para alcançar o nó sorvedouro se comparado com outras técnicas da literatura e o *CSC(HS)* em conjunto com o modelo CC(Yu) reduz em até 46,48% o número de transmissões para alcançar o nó sorvedouro. Entretanto, todas as técnicas analisadas apresentam um desbalanceamento energético com o nó fonte gastando até 63,92% mais energia que os nós auxiliares o que pode causar o esgotamento de bateria prematuro do nó fonte inviabilizando o enlace CC. Esta falta de equidade energética é inerente ao modelo de CC utilizado já que no modelo de CC(Yu) o nó fonte participa do primeiro e do segundo momento da CC. Além disso, a utilização da heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS* visa reduzir o peso do enlace cooperativo em sua totalidade,

sacrificando o nó fonte já que apesar de serem escolhidos nós auxiliares próximos ao nó fonte estes podem estar numa posição desfavorável com relação ao nó destino o que aumenta o fardo do nó fonte e dos nós auxiliares no segundo momento da CC. No Capítulo 4 apresentamos um novo modelo de CC que em conjunto com uma nova heurística de seleção de nós auxiliares visa promover a equidade energética dos enlaces CC.

# Capítulo 4

## Mecanismos de Balanceamento de Energia

A utilização do modelo CC(Yu) e da heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS* resulta em uma falta de equidade energética. O desbalanceamento dos enlaces CC pode levar ao esgotamento prematuro da bateria e, conseqüentemente, a exaustão da bateria dos nós fonte, ou seus auxiliares, particionando a rede. A principal contribuição deste capítulo é propor mecanismos para promover o balanceamento de energia. Mais precisamente, a Seção 4.1 apresenta um modelo de CC que tem como objetivo reduzir o consumo de energia dos nós fontes, tendo em vista que a falha do nó fonte inviabiliza o estabelecimento do enlace cooperativo. A Seção 4.2 apresenta a heurística de seleção de nós auxiliares *Intermediate Helper Set Selection (IHSS)* que promove o balanceamento energético ao selecionar nós auxiliares próximos do ponto intermediário entre o nó fonte e destino. A Seção 4.3 apresenta os resultados de simulação que comparam o *IHSS* com outras técnicas da literatura. A Seção 4.4 apresenta uma discussão do que foi tratado neste capítulo.

### 4.1 Proposta de Modelo de Comunicação Cooperativa

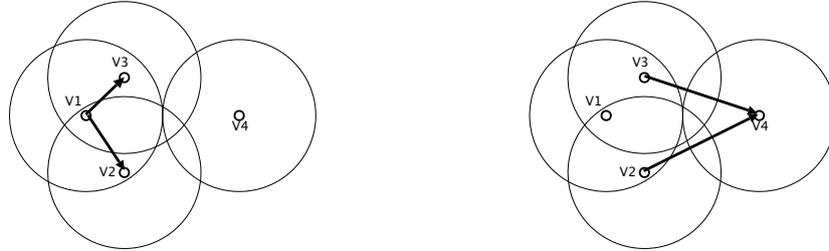
No modelo de CC(Yu), apresentado na Seção 3.1, o nó fonte participa tanto do primeiro momento quanto do segundo momento da CC, o que desfavorece a equidade energética do enlace cooperativo. Inerentemente ao modelo CC(Yu), o nó fonte irá gastar mais energia que os nós auxiliares, o que resulta no esgotamento de bateria prematuro do nó fonte e inviabilização do enlace CC. Nesta seção, propomos um novo modelo de CC cujo objetivo é reduzir o consumo energético do nó fonte num dado enlace cooperativo de forma a criar um enlace CC balanceado. No primeiro momento da CC, o modelo

proposto atua de forma semelhante ao modelo CC(Yu), neste passo o nó fonte envia o dado para os nós auxiliares utilizando a potência mínima necessária para alcançar o nó auxiliar mais distante. O modelo proposto é denominado modelo CC(BE), onde BE denota Balanceamento Energético. Este modelo difere do modelo CC(Yu) na execução do segundo momento da CC. O modelo proposto considera que os nós auxiliares enviam o dado para o nó de destino sem a participação do nó fonte. Assim, a principal diferença em relação ao modelo CC(Yu) consiste no fato de que o nó fonte só participa do primeiro momento da CC, economizando energia e mantendo o enlace cooperativo balanceado.

Semelhante ao modelo de energia de Yu, no modelo CC(BE) a transmissão ocorre somente se a soma das potências de transmissão dos nós auxiliares satisfazendo a Inequação 4.1.

$$\sum_{v_k \in H_{i,j}} P_k(d_{k,j})^{-\alpha} \geq \tau \quad (0 \leq P_k \leq P_{MAX}). \quad (4.1)$$

A Figura 4.1(a) exemplifica o primeiro momento da CC, que é igual para os modelos CC(Yu) e para o modelo CC(BE), onde o nó  $v_1$  transmite o dado para os nós  $v_2$  e  $v_3$ . A Figura 4.1(b) mostra o segundo momento da CC onde os nós  $v_2$  e  $v_3$  transmitem o dado cooperativamente para o nó  $v_4$  sem a participação do nó fonte  $v_1$ . Com as modificações do funcionamento da CC no modelo CC(BE), o custo de um enlace cooperativo é substituído pela Definição 8.



(a) Primeiro momento da CC onde  $v_1$  transmite o dado para  $v_2$  e  $v_3$ .

(b) Segundo momento da CC com a utilização do modelo 2, onde  $v_2$  e  $v_3$  transmitem o dado para  $v_4$ .

Figura 4.1: Cenário de CC utilizando o modelo proposto.

**Definição 8** (*Custo de uma aresta CC(BE)*): O custo de cada aresta  $\widetilde{v_i v_j}$  é definido como:

$$w(\widetilde{v_i v_j}) = w_d(H_{i,j}) + (|H_{i,j}|)w_{CC}(H_{i,j}), \quad (4.2)$$

- $|H_{i,j}|$ : é o número de elementos do conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$ ;
- $w_d(H_{i,j}) = \left( \frac{\tau}{\max_{v_k \in H_{i,j}} (d_{i,k})^{-\alpha}} \right)$ : é a potência mínima necessária para o nó  $v_i$  se comunicar diretamente com seu nó auxiliar mais distante em  $H_{i,j}$ ;

- $w_{CC}(H_{i,j}) = \left( \frac{\tau}{\sum_{v_k \in H_{i,j}} (d_{k,j})^{-\alpha}} \right)$ : é a potência mínima necessária para o nó  $v_k$  transmitir cooperativamente para o nó destino  $v_j$ . Note que o nó fonte  $v_i$  não participa do segundo momento da CC e, portanto, não gasta a potência  $w_{CC}$ .

#### 4.1.1 Comparativo Modelos de CC de Yu e Modelo de CC Proposto

Para mostrar a diferença na utilização e distribuição de potência entre os nós em um enlace CC, o cenário da Figura 4.2 será analisado mostrando como é a necessidade de potência de cada nó para o modelo CC(Yu) e para o modelo CC(BE). Considere que  $P_{MAX} = (R_{MAX})^2$  onde  $R_{MAX}$  é o raio máximo de alcance de um nó,  $\tau = 1$  e  $\alpha = 2$ . Para fins de notação, utilizaremos  $R = R_{MAX}$ . Neste cenário temos quatro nós  $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$  distribuídos e as distâncias entre eles são:  $d_{1,2} = R$ ,  $d_{1,3} = \frac{R}{2}$ ,  $d_{1,4} = 2R$ ,  $d_{2,4} = 1,2R$  e  $d_{3,4} = 1,6R$ .

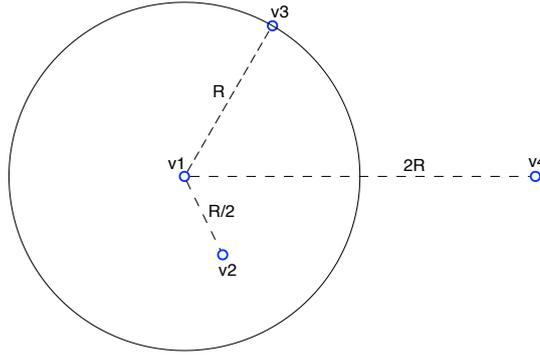


Figura 4.2: Cenário utilizado para comparação entre o Modelo CC(Yu) e o Modelo CC(BE).

#### Modelo CC(Yu)

Para a criação da aresta  $\widetilde{v_1 v_4}$  com  $H_{1,4} = \{v_2, v_3\}$  utilizando o Modelo CC(Yu), utilizamos a Inequação 3.1.

$$\begin{aligned}
P_1(d_{1,4})^{-2} + P_2(d_{2,4})^{-2} + P_3(d_{3,4})^{-2} &\geq 1 \\
P_1[(d_{1,4})^{-2} + (d_{2,4})^{-2} + (d_{3,4})^{-2}] &\geq 1 \\
P_1 &\geq \frac{1}{\left(\frac{1}{2R}\right)^2 + \left(\frac{1}{1,2R}\right)^2 + \left(\frac{1}{1,6R}\right)^2} \\
P_1 &\geq 0,7490R^2
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Da Equação 4.3, observa-se que, no enlace CC, todos os nós ( $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$ ) operam com a mesma potência, isto é,  $P_1 = P_2 = P_3$ . Neste caso,  $0,7490R^2 = 0,7490P_{MAX}$  é a potência mínima que cada nó irá utilizar para que a CC seja viável ( $P_1 < P_{MAX}$ ), ou seja, cada nó que participa desse enlace cooperativo transmitirá com no mínimo 74,9% da sua potência máxima  $P_{MAX}$ . Dado que o enlace cooperativo utilizando o modelo de Yu é viável podemos calcular seu custo conforme a Equação 3.4. O cálculo do custo do enlace CC é apresentado na Equação 4.4.

$$\begin{aligned}\widetilde{v_1v_4} &= P_{MAX} + (|H_{ij}| + 1) \times P_1 \\ \widetilde{v_1v_4} &= P_{MAX} + (2 + 1) \times 0,7490R^2 \\ \widetilde{v_1v_4} &= 3,2470R^2 = 3,2470P_{MAX}\end{aligned}\tag{4.4}$$

O custo do nó fonte é calculado somando a potência necessária para o primeiro momento com a utilizada em conjunto com os nós auxiliares no segundo momento da CC. O custo do nó fonte é apresentado na Equação 4.5.

$$\begin{aligned}w_{fonte} &= P_{MAX} + P_1 \\ w_{fonte} &= P_{MAX} + 0,7490P_{MAX}\end{aligned}\tag{4.5}$$

Neste cenário o nó fonte irá utilizar 100% de sua potência no primeiro momento e 74,9% no segundo momento da CC. Já o custo de cada nó auxiliar é igual a  $P_1 = 0,7490P_{MAX}$ .

### Modelo CC(BE)

No modelo CC(BE), o nó fonte não participa do segundo momento da CC, ou seja, não haverá contribuição de potência desse nó para a análise de viabilidade do enlace cooperativo. Para a criação da aresta  $\widetilde{v_1v_4}$  com  $H_{1,4} = \{v_2, v_3\}$  com o Modelo Proposto utilizamos a Inequação 4.1.

$$\begin{aligned}P_2(d_{2,4})^{-2} + P_3(d_{3,4})^{-2} &\geq 1 \\ P_2[(d_{2,4})^{-2} + (d_{3,4})^{-2}] &\geq 1 \\ P_2 &\geq \frac{1}{\left(\frac{1}{1,2R}\right) + \left(\frac{1}{1,6R}\right)} \\ P_2 &\geq 0,9216R^2\end{aligned}\tag{4.6}$$

Da Equação 4.6, observa-se que, no enlace CC, todos os nós ( $v_2$  e  $v_3$ ) que participam do segundo momento operam com a mesma potência, isto é,  $P_2 = P_3$ . Cada nó que participa do segundo momento da CC irá transmitir com no mínimo 92,16% da sua potência máxima  $P_{MAX}$ . Como o enlace cooperativo também é viável utilizando este modelo, podemos calcular seu custo com a Equação 4.2. O cálculo do custo do enlace cooperativo é apresentado na Equação 4.7.

$$\begin{aligned} \widetilde{v_1 v_4} &= P_{MAX} + (|H_{ij}|) \times P_2 \\ \widetilde{v_1 v_4} &= P_{MAX} + (2) \times 0,9216R^2 \\ \widetilde{v_1 v_4} &= 2,8432R^2 = 2,8432P_{MAX} \end{aligned} \tag{4.7}$$

Como o nó fonte não participa do segundo momento da CC, seu custo é calculado apenas com a potência gasta no primeiro momento. Assim, o custo do nó fonte é dado pela Equação 4.8.

$$w_{fonte} = P_{MAX} \tag{4.8}$$

Como podemos ver na Figura 4.3, há um melhor balanceamento entre o gasto dos nós participantes do enlace CC no modelo CC(BE) enquanto que no modelo CC(Yu) o nó fonte gasta consideravelmente mais energia para estabelecer enlace CC. O aumento do custo dos nós auxiliares no modelo CC(BE) é esperado tendo em vista que no segundo momento a potência necessária para o enlace CC é dividida entre dois nós e não três como ocorre no modelo CC(Yu). O custo total do enlace CC foi calculado utilizando a Equação 3.4 para o modelo CC(Yu) e a Equação 4.2 para o modelo CC(BE). Note que a diferença entre os modelos para o custo total do enlace CC nem sempre ocorrerá dado que este custo depende da quantidade de nós auxiliares e da posição em que eles estão em relação ao nó de destino. Concluído a definição do modelo CC(BE), a Seção 4.2 apresenta uma heurística de seleção de nós auxiliares que promove o balanceamento do enlace cooperativo.

## 4.2 Heurística de Equidade Energética para Seleção de Nós Auxiliares

Esta seção apresenta a heurística de seleção de nós auxiliares *Intermediate Helper Set Selection (IHSS)* cujo objetivo do *IHSS* é criar enlaces cooperativos balanceados. Apesar do modelo CC(BE) promover a criação de enlaces cooperativos balanceados, a heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS* não é adequada para este contexto. O *GHSS* tende a

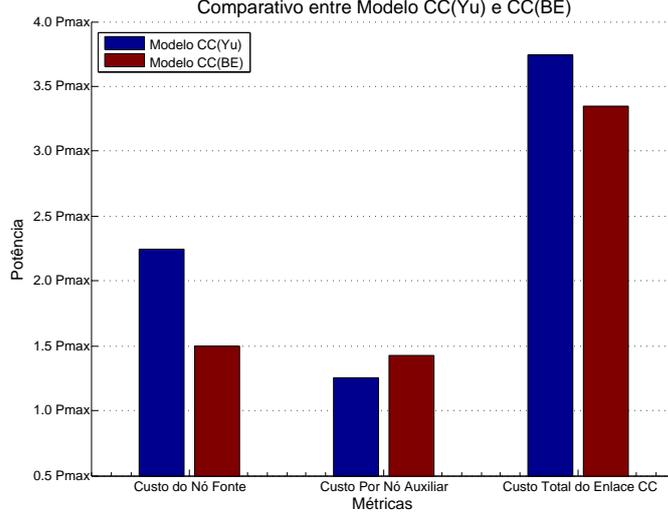


Figura 4.3: Comparativo entre Modelo CC(Yu) e Modelo CC(BE).

escolher nós auxiliares próximos do nó fonte e isto em conjunto com o modelo CC(Yu) cria enlaces CC desbalanceados.

A heurística *Intermediate Helper Set Selection (IHSS)* visa melhorar o balanceamento energético entre o nó fonte e os nós auxiliares quando um enlace cooperativo é estabelecido. O *IHSS* segue a recomendação de *Astaneh e Gazor* [63] e seleciona os nós sensores para compor o conjunto de nós auxiliares  $|H_{i,j}|$  que estão mais próximos do ponto intermediário entre o nó fonte e o nó destino. Os detalhes do *IHSS* são apresentados no Algoritmo 6. O algoritmo recebe como entrada o nó fonte  $v_i$ , o nó destino  $v_j$  e o conjunto de nós vizinho do nó fonte  $N(v_i)$ . O `for-loop` presente nas linhas 3-5, para cada nó  $v_k \in N(v_i)$  chama a função *ComputeDistance*. Esta função calcula a distância euclidiana de cada nó  $v_k$  para o nó fonte e para o nó destino. Depois é calculada distância  $d_k$  que é a diferença entre a distância entre o nó  $v_k$  e nó destino,  $d_{k,j}$ , e a distância de  $v_k$  para o nó fonte,  $d_{i,k}$ . A diferença  $d_k = d_{k,j} - d_{i,k}$  mostra com próximo o nó  $v_k$  está do ponto intermediário entre fonte e destino. Todas as distâncias indexadas  $d_k$  são colocadas no vetor  $B$ . Note que o nó com o menor  $d_k$  é o mais próximo do ponto intermediário. Na linha 7, todas as distâncias indexadas  $d_k \in B$  são ordenadas em ordem crescente e colocadas no vetor  $Q$ . Adicionalmente, a medida que os elementos em  $Q$  são ordenados de forma crescente, o nó mais próximo do ponto intermediário é o primeiro elemento em  $Q$ . Na linha 8, retiramos o primeiro elemento de  $Q$ , ou seja, o elemento mais próximo do ponto intermediário entre o nó fonte e o nó destino e colocamos no conjunto de nós auxiliares  $|H_{i,j}|$ . No `while-loop` das linhas 10-21, utilizando a função *ComputeTXPower* computamos a potência  $T_p$  utilizando a Equação 4.1. Caso esta equação seja satisfeita, ou seja,  $T_p < \tau$ , o algoritmo retorna o conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$ . Caso a Inequação 4.1

não seja satisfeita o algoritmo adiciona os nós mais próximos do ponto intermediário entre os nós fonte e destino ao conjunto  $|H_{i,j}|$  até que a lista de candidatos a nós auxiliares seja exaurida (i.e.,  $Q = \emptyset$ ). Caso a equação não seja satisfeita e  $Q = \emptyset$ , o algoritmo retorna um conjunto vazio. Assim, o algoritmo IHSS seleciona o número mínimo de nós localizados próximos ao ponto intermediário entre fonte e destino que satisfazem a Inequação 4.1, com custo computacional de  $O(\Delta(G)^2)$ .

---

**Algoritmo 6** *Intermediate Helper Set Selection*

---

**Input:**  $v_i, v_j, N(v_i)$

**Output:**  $H_{i,j}$

```

1:  $H_{i,j} \leftarrow B \leftarrow Q \leftarrow \emptyset$ ;
2:  $T_p \leftarrow 0$ ;
3: for  $\forall v_k \in N(v_i)$  do
4:    $d_k \leftarrow \text{ComputeDistance}(v_i, v_j, v_k)$ ;
5:    $B \leftarrow B \cup d_k$ ;
6: end for
7:  $Q \leftarrow \text{sort}(B)$ ;
8:  $H_{i,j} \leftarrow \text{pop\_head}(Q)$ ;
9: while true do
10:   $T_p \leftarrow \text{ComputeTXPower}(H_{i,j}, d_{i,j})$ ;
11:  if  $T_p < \tau$  then
12:    if  $|Q| = \emptyset$  then
13:      ( $H_{i,j} \leftarrow \emptyset$ );
14:      return
15:    else
16:       $H_{i,j} \leftarrow H_{i,j} \cup \text{pop\_head}(Q)$ ;
17:    end if
18:  else
19:    return ( $H_{i,j}$ );
20:  end if
21: end while

```

---

### 4.2.1 Comparativo *GHSS* e *IHSS*

Para analisar a diferença entre o uso do *GHSS* e do *IHSS* usamos a topologia da Figura 4.4 onde temos seis nós  $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$  distribuídos e as distâncias entre eles são:  $d_{1,2} = \frac{R}{2}$ ,  $d_{1,3} = \frac{R}{2}$ ,  $d_{1,4} = d_{1,5} = R$ ,  $d_{1,6} = 2R$ ,  $d_{2,6} = d_{3,6} = 1,58R$  e  $d_{4,6} = d_{5,6} = 1,23R$ .

O *GHSS* realiza o cálculo da heurística de ganho  $\frac{b_k}{c_k}$  de acordo com o apresentado na Seção 2.2.3 para cada nó dentro do alcance do nó fonte. Para a topologia da Figura 4.4 os valores desta heurística de ganho são 4,90 para  $\{v_2, v_3\}$  e 2,89 para  $\{v_4, v_5\}$ . Essa heurística escolhe um conjunto mínimo de nós com maior valor da heurística de ganho  $\frac{b_k}{c_k}$  para compor o conjunto de nós auxiliares, ou seja, irá escolher nós no conjunto  $\{v_2, v_3\}$

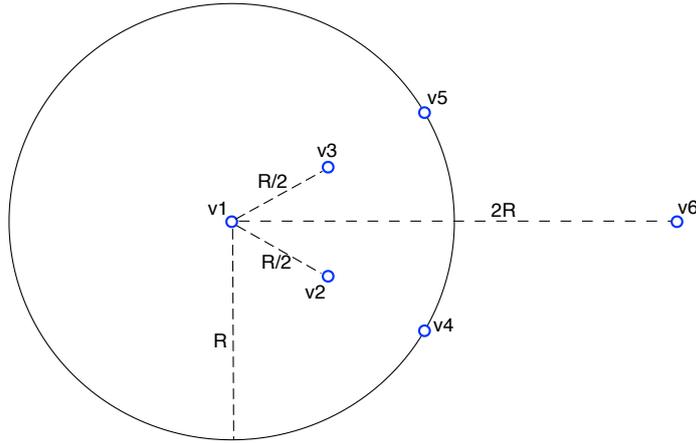


Figura 4.4: Cenário utilizado para comparação entre o GHSS e o IHSS.

e se necessário ao estabelecimento do enlace CC, irá escolher nós no conjunto  $\{v_5, v_4\}$ . No cenário proposto o conjunto de nós auxiliares escolhido pelo *GHSS* é  $\{v_2, v_3\}$  que é suficiente para o enlace CC  $\widetilde{v_1v_6}$ .

O *IHSS* irá realizar a escolha do conjunto de nós auxiliares mais próximos do ponto intermediário entre o nó fonte ( $v_1$ ) e o nó destino ( $v_6$ ). Para cada nó  $k$  dentro da área de cobertura do nó fonte essa heurística irá calcular a diferença entre a distância do nó  $k$  para o nó destino e a distância do nó  $k$  até o nó fonte, ou seja,  $d_{k,6} - d_{1,k}$ . Para a topologia proposta, essa diferença é 1,08 para os nós  $\{v_2, v_3\}$  e 0,23 para os nós  $\{v_4, v_5\}$ . O *IHSS* irá escolher nós com os menores valores dessa diferença, ou seja, para esta topologia os nós escolhidos são  $\{v_4, v_5\}$  para o conjunto de nós auxiliares. Na seção a seguir apresentaremos os resultados de simulação do *IHSS* em conjunto com o *CSC* e o *CSC(HS)* e o *GHSS* em conjunto com o *CoopSink*.

### 4.3 Resultados de Simulação

De forma a avaliar o modelo de CC e a heurística de seleção de nós auxiliares propostos, o modelo CC(BE) e o *IHSS* foram combinadas com as técnicas *CSC* e *CSC(HS)*. As heurísticas foram implementadas em um simulador em Matlab [15]. Para comparação utilizamos a versão original do *CSC* e do *CSC(HS)* apresentadas no Capítulo 3 e a técnica *CoopSink* que utiliza a heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS*. O mesmo cenário e métricas da Seção 3.3 foram utilizados para avaliar as técnicas propostas. Estas técnicas são avaliadas com base nas métricas M1 a M7 definidas na Seção 3.3. Para todas as figuras, o eixo  $x$  apresenta a quantidade de nós no grafo.

### 4.3.1 Média de Saltos (M1)

A Figura 4.5 apresenta os resultados para a métrica de média de saltos. Nesta Figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de saltos que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC* em conjunto com o *GHSS* obtém uma redução do número de saltos, independentemente da quantidade de nós no grafo. Se compararmos as heurísticas de seleção de nós auxiliares, a utilização do *GHSS* tende a reduzir a média de saltos para as técnicas *CSC* e *CSC(HS)*. Isto ocorre devido ao modelo de CC associado a cada heurística, ou seja, o *GHSS* é utilizado em conjunto com o modelo de CC( $Y_u$ ) e o *IHSS* é utilizado em conjunto com o modelo proposto neste trabalho. Conforme veremos na métrica de conectividade (M3), o modelo CC( $Y_u$ ) promove um aumento maior na conectividade que o modelo CC(BE) e assim, as heurísticas que utilizam o modelo CC( $Y_u$ ) tem mais opções de enlaces cooperativos para alcançar o nó sorvedouro o que resulta em uma menor quantidade de saltos.

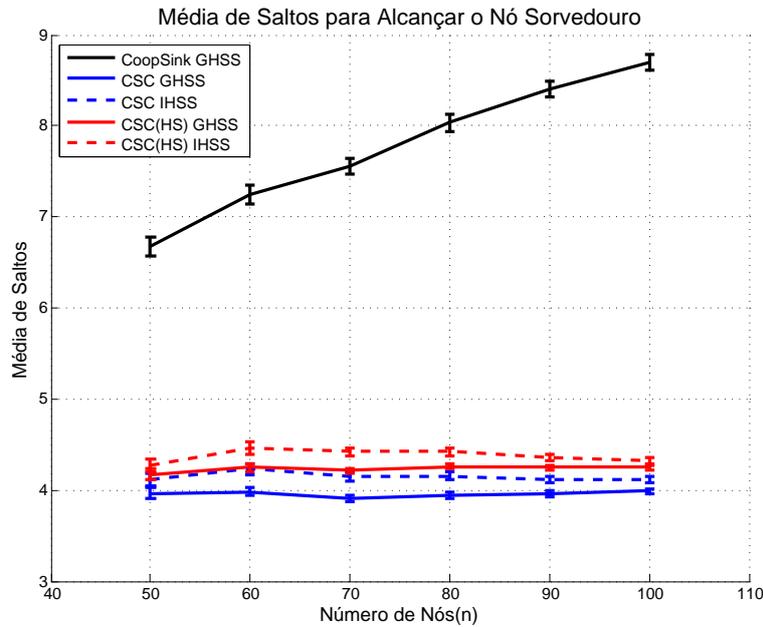


Figura 4.5: Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro.

### 4.3.2 Média de Transmissões (M2)

Para o modelo CC(BE), apenas o conjunto de nó auxiliares  $H_{i,j}$  tenta alcançar um nó destino  $v_j$  então temos um total de  $|H_{i,j} + 1|$  transmissões necessárias para alcançar  $v_j$ . A Figura 4.6 apresenta os resultados para a métrica de média de transmissões. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de transmissões que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC(HS)* obtém

uma redução do número de transmissões, independentemente da quantidade de nós e da heurística de seleção de nós utilizada. No melhor caso,  $n = 100$  nós, o  $CSC(HS)$  em conjunto com o  $IHSS$  consegue reduzir em 47,98% o número de transmissões necessárias para alcançar o nó sorvedouro se comparado com o  $CoopSink$ . No pior caso, com  $n = 50$ , o  $CSC(HS)$  em conjunto com o  $IHSS$  reduz em 29,95% o número médio de transmissões. Dentre as heurísticas analisadas observamos que o  $IHSS$  obtém uma maior redução no número médio de transmissões se comparado ao  $GHSS$  e assim como na média de saltos (M1) isto também é decorrente do modelo CC(BE) utilizado. No modelo de CC proposto, o nó fonte só participa do primeiro momento da CC o que resulta numa redução no número de transmissões e essa redução é pequena pois às vezes, neste modelo, é necessária a inclusão de mais nós auxiliares para tornar o enlace CC possível.

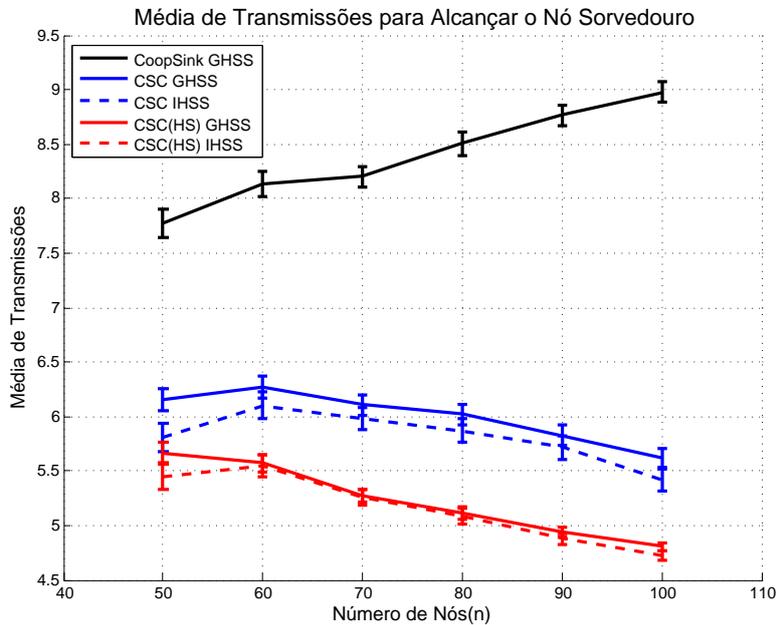


Figura 4.6: Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro.

### 4.3.3 Conectividade (M3)

A Figura 4.7 apresenta os resultados para a métrica de conectividade com o nó sorvedouro. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra a conectividade com o nó sorvedouro em porcentagem. Note que, o  $CoopSink$ , o  $CSC$  e o  $CSC(HS)$  em conjunto com o  $GHSS$  obtêm o mesmo resultado em termos de conectividade, o que também acontece para o  $CSC$  e o  $CSC(HS)$  em conjunto com o  $IHSS$ . Os resultados de conectividade são influenciados diretamente pelo modelo CC utilizado. Como o nó fonte não participa do segundo momento da CC no modelo CC(BE) temos uma perda de conectividade em duas situações: quando o nó fonte só tem apenas um nó auxiliar ou quando mesmo com todos vizinhos do nó fonte pertencendo

ao conjunto de nós auxiliares  $|H_{i,j}|$  estes não conseguem alcançar o nó destino. Assim, o modelo CC(BE) perde em conectividade se comparado ao modelo CC(Yu). A utilização do *IHSS* em conjunto com o modelo CC(BE) proposto promove um ganho de conectividade de até 104% enquanto a utilização do *GHSS* em conjunto com modelo CC(Yu) promove um ganho de conectividade de até 134%. Entretanto, a partir de 70 nós, a diferença do ganho de utilização do modelo CC(Yu) diminui significativamente e em  $n = 100$  os modelos tem uma diferença de aproximadamente 1%.

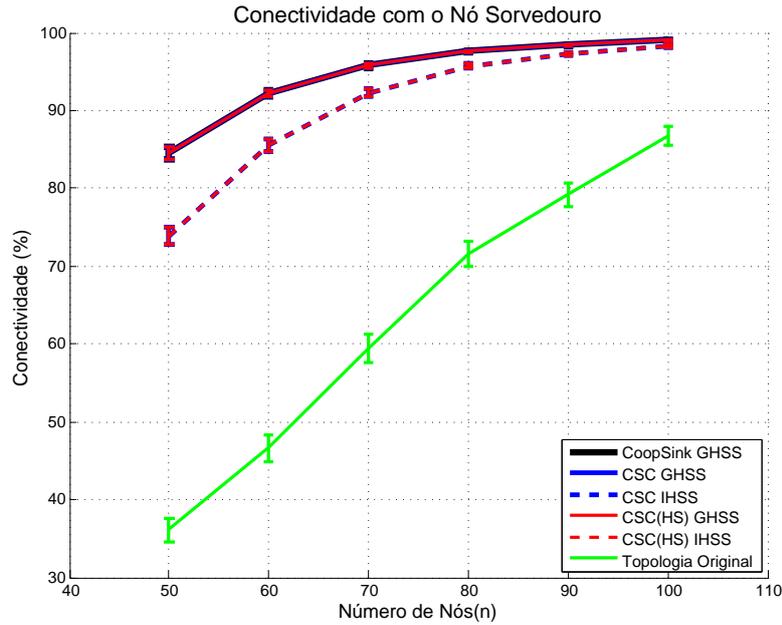


Figura 4.7: Conectividade com o nó sorvedouro.

#### 4.3.4 Custo Médio dos Nós Fonte (M4)

Como no modelo de CC(BE) o nó fonte só participa do segundo momento da CC, o cálculo do custo médio dos nós fonte para este modelo deve ser atualizado. Apresentamos abaixo o custo médio dos nós fonte para o modelo CC(BE).

$$C_{fonte} = \frac{\sum_{\widetilde{v_i v_j} \in \widetilde{E}} w_d(H_{i,j})}{|\widetilde{E}|} \quad (4.9)$$

onde  $w_d$  foi definido na Equação 8 e  $|\widetilde{E}|$  é quantidade de enlaces cooperativos de uma topologia.

A Figura 4.8 apresenta os resultados para a métrica M4. O eixo  $y$  representa o custo médio de potência dos nós fonte. Para o cálculo desta métrica, considera-se o impacto do modelo de CC no custo dos nós fonte, ou seja, com a utilização do modelo CC(Yu), o custo do nó fonte é o custo do primeiro momento somado ao custo do segundo momento.

Caso seja usado o modelo CC(BE), apenas é considerado o custo do nó fonte no primeiro momento já que o nó fonte não participa do segundo momento da CC tendo, portanto, custo zero nesta etapa. Assim, conforme mostra a Figura 4.8 a utilização do modelo CC(BE) resulta numa redução significativa do custo médio dos nós fonte. No melhor caso, com  $n = 70$  nós, a utilização do *CSC(HS)* com o modelo CC(BE) consegue reduzir em 51,24% o custo médio dos nós fonte se comparado com o *CSC* em conjunto com o modelo CC(Yu).

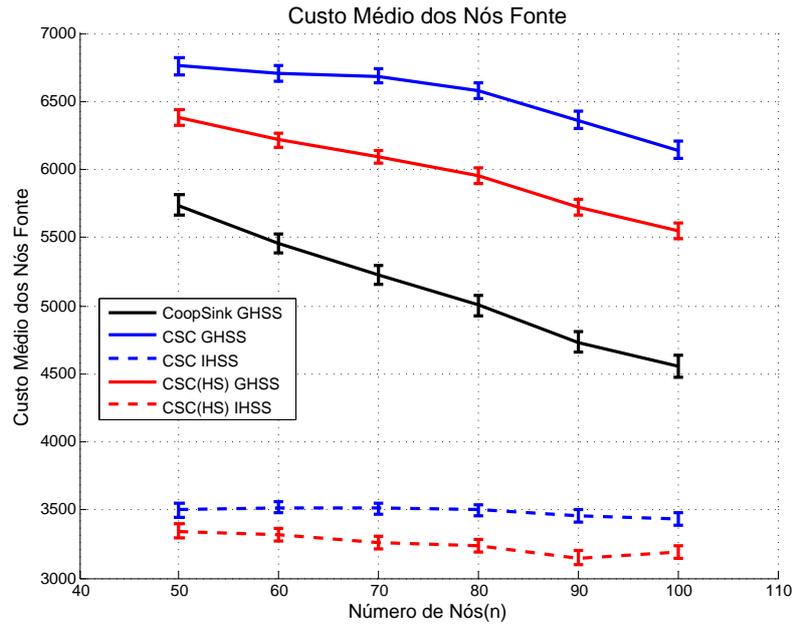


Figura 4.8: Custo médio dos nós fonte.

#### 4.3.5 Custo Médio dos Nós Auxiliares (M5)

A Figura 4.9 apresenta os resultados para a métrica de custo médio dos nós auxiliares. Nesta figura, o eixo  $y$  apresenta o custo médio. A utilização do modelo CC(BE) não altera o cálculo do custo médio dos nós auxiliares, mas como o nó fonte não participa do segundo momento da CC é natural que os nós auxiliares utilizem mais energia para criar o enlace CC. O *CoopSink* continua apresentando, independentemente da densidade de nós na rede, o menor custo médio dos nós auxiliares. O *CSC* em conjunto com o *IHSS* obtém o maior custo médio dos nós auxiliares já que esta técnica utiliza menos nós auxiliares de modo a diminuir a quantidade de transmissões para alcançar o nó sorvedouro e, por isso cada nó auxiliar gasta mais energia individualmente. As outras técnicas analisadas têm resultados similares nesta métrica.

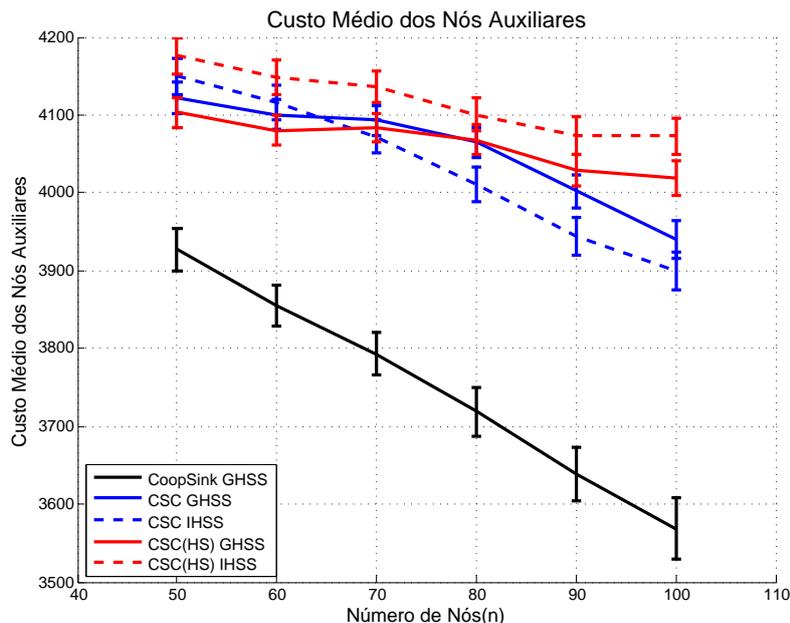


Figura 4.9: Custo médio dos nós auxiliares.

### 4.3.6 Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo (M6)

A Figura 4.10 mostra os resultados de simulação da métrica M6. O eixo  $y$  apresenta a razão do custo de comunicação médio utilizado e a razão ótima é apresentada como uma linha horizontal tracejada que corta o eixo  $y$  no valor 1. Nas técnicas que utilizam o modelo  $CC(Yu)$ , os resultados da razão do custo de comunicação médio estão acima da razão ideal e isso significa que o nó fonte gasta mais energia que os nós auxiliares. No pior caso, a combinação do  $CSC$  com o modelo de  $CC(Yu)$ , o nó fonte gasta até 63,92% mais energia que os nós auxiliares. Nas técnicas que utilizam o modelo de  $CC(BE)$ , os resultados da razão do custo de comunicação médio estão abaixo da razão ideal e, portanto, o nó fonte gasta menos energia que os nós auxiliares. Dentre as técnicas que utilizam o  $IHSS$ , o  $CSC$  se aproxima mais do balanceamento energético com o nó fonte gastando até 12% menos que os nós auxiliares.

### 4.3.7 Custo Médio por Rota (M7)

A Figura 4.11 mostra os resultados de simulação da métrica M7. O eixo  $y$  apresenta o custo médio por rota que alcança o nó sorvedouro. Novamente, obtivemos o resultado esperado com o *CoopSink* obtendo a menor potência média da rota para todas as densidades de nós da rede apresentadas. O  $CSC(HS)$  apresenta resultados muito semelhantes para as duas heurísticas analisadas e é a técnica que mais se aproxima dos resultados do *CoopSink*. No pior caso, com  $n = 100$  nós, o  $CSC(HS)$  em conjunto com o  $GHSS$  gasta 15,41% a mais de energia que o *CoopSink*. Dentre as técnicas analisadas, o  $CSC$  tem a maior

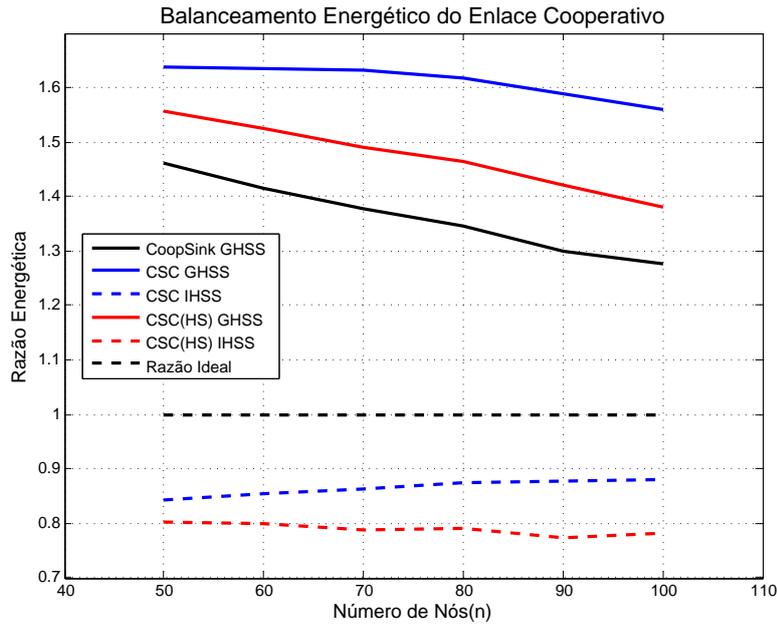


Figura 4.10: Custo balanceamento energético do enlace cooperativo.

potência média da rota independentemente da quantidade de nós da rede. Entretanto, a utilização do *CSC* em conjunto com o *IHSS* e, conseqüentemente, também em conjunto com o modelo *CC(BE)* reduz a potência média da rota se comparado com o *CSC* em conjunto com o modelo *CC(Yu)* que ocorre em duas situações: quando o nó fonte só tem apenas um nó auxiliar ou quando mesmo com todos vizinhos do nó fonte pertencendo ao conjunto de nós auxiliares  $|H_{i,j}|$  estes não conseguem alcançar o nó destino.

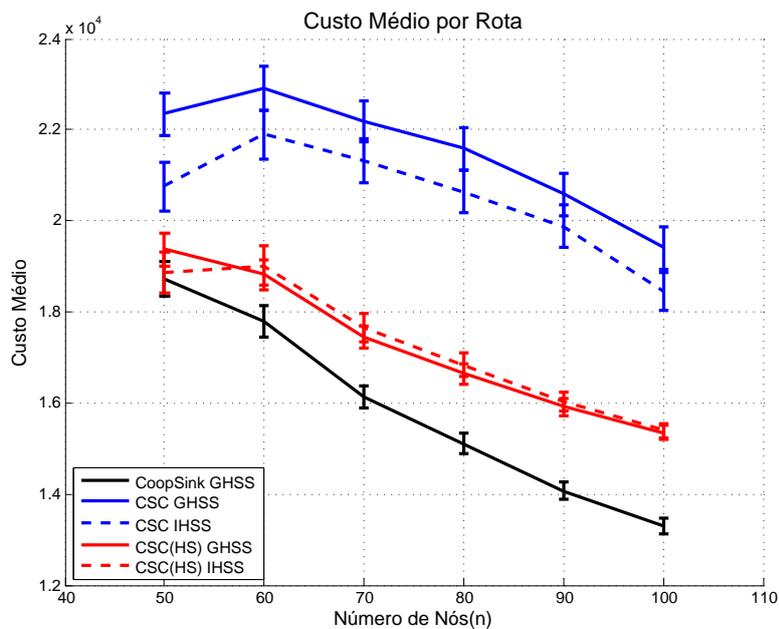


Figura 4.11: Custo médio por rota.

## 4.4 Discussão

Neste capítulo foram apresentados o modelo CC(BE) e a heurística de seleção de nós auxiliares *IHSS*. O modelo CC(BE) visa reduzir o consumo energético do nó fonte de forma a criar enlaces cooperativos mais balanceados energeticamente. O *IHSS* é uma heurística que visa escolher para o conjunto de nós auxiliares os nós mais próximos do ponto intermediário entre o nó fonte e o nó destino de modo a manter os enlaces cooperativos balanceados. Como principais resultados temos que o conjunto *CSC* com o modelo CC(BE) e o *IHSS* se aproximam mais do balanceamento energético ideal do que as outras técnicas analisadas. Além disso, com o nó fonte gasta 12% menos que os nós auxiliares quando o *CSC* em conjunto com o *IHSS* é utilizado. Além disso, o conjunto *CSC(HS)* e *IHSS* consegue reduzir significativamente o custo médio dos nós fonte e no melhor caso, com  $n = 70$  nós, este conjunto reduz em 51,24% o custo médio dos nós fonte se comparado com o *CSC* em conjunto com o modelo CC(Yu). Entretanto, uma métrica importante numa RSSF é a conectividade já que os nós sensores necessitam de rotas para enviar os dados sensorizados para o nó sorvedouro. A utilização do modelo de CC(BE) perde em conectividade se comparado ao modelo CC(Yu). No Capítulo 5 apresentamos uma nova heurística de seleção de nós auxiliares cujo objetivo é criar enlaces cooperativos balanceados mas, ao mesmo tempo, atingir os níveis de conectividade do modelo CC(Yu).

# Capítulo 5

## Proposta para Seleção de Nós em Redes Esparsas

A tarefa de sensoriamento está associada a capacidade do nó sensor reportar suas observações. Assim, a conectividade em RSSF é um fator crucial, particularmente quando as informações coletadas devem ser encaminhadas a um nó sorvedouro por meio da cooperação com outros nós da rede. Como visto no capítulo anterior, a heurística IHSS, em conjunto com o Modelo CC(BE) apresentam uma melhor distribuição de energia na composição dos enlaces CC. No entanto, o IHSS, quando comparado com o GHSS possui um desempenho inferior no que tange a conectividade da rede em topologias esparsas. A principal contribuição deste capítulo é apresentar uma alternativa para seleção de nós auxiliares híbrida que utiliza tanto o modelo CC(BE) quanto o modelo CC(Yu) de modo a obter um maior ganho de conectividade, mas mantendo o balanceamento energético dos enlaces cooperativos. A Seção 4.1 apresenta a proposta deste capítulo: a heurística de seleção de nós auxiliares *Hybrid Helper Set Selection (HHSS)*. A Seção 4.2 apresenta os resultados de simulação que comparam o *HHSS* com o *IHSS* e outra técnica da literatura. A Seção 4.3 apresenta uma discussão do que foi tratado neste capítulo.

### 5.1 Heurística de Seleção de Nós Auxiliares em Topologias Esparsas

A heurística *HHSS* visa melhorar o balanceamento energético entre o nó fonte e os nós auxiliares quando um enlace cooperativo é estabelecido, mas, ao mesmo tempo, obter um ganho de conectividade igual ao de outras técnicas da literatura como, por exemplo, o *GHSS*. Entretanto, o modelo CC(BE) proposto perde em conectividade para o modelo CC(Yu) em duas situações: *(i)* quando o nó fonte tem menos de dois vizinhos ou *(ii)*

quando mesmo utilizando todos os vizinhos disponíveis o nó fonte não consegue criar o enlace CC utilizando o modelo CC(BE). Para combater estas duas situações, o *HHSS* utiliza tanto o modelo CC(BE) proposto quanto o modelo CC(Yu). Os detalhes do *HHSS* são apresentados no Algoritmo 7. O algoritmo recebe como entrada o nó fonte  $v_i$ , o nó destino  $v_j$  e o conjunto de nós vizinho do nó fonte  $N(v_i)$ . Na linha 1, o *HHSS* chama a heurística de seleção de nós auxiliares *IHSS* apresentada na Seção 4.2 para criar o conjunto  $|H_{i,j}|$ . Caso não seja possível, ou seja, alguma das situações apresentadas anteriormente ocorreu, o *HHSS* chama novamente o *IHSS*, mas com modificações nas funções *ComputeDistance* e *ComputeTXPower*. A principal modificação na função *ComputeDistance* é que apenas calculamos a distância para do nó fonte  $v_i$  para o nó auxiliar  $v_k$ . Deste modo, escolhemos nós auxiliares mais próximos no nó fonte e temos uma economia de energia do nó fonte no primeiro momento da CC. Na função *ComputeTXPower*, calculamos a potência de transmissão  $T_p$  de modo a satisfazer a Inequação 3.1. Caso, a Inequação 3.1 não seja satisfeita, e segunda chamada do *IHSS* retornará o conjunto de nós auxiliares  $H_{i,j}$  como vazio.

Portanto, o *HHSS* primeiramente tentará escolher como nós auxiliares o menor conjunto de nós sensores mais próximos do ponto intermediário entre os nós fonte e destino sempre que possível de modo a criar enlaces cooperativos balanceados. Note que, neste caso, o nó fonte não irá participar do segundo momento da CC. Caso não seja possível satisfazer a Inequação 4.1, o *HHSS* escolherá os nós sensores mais próximos do nó fonte que tornem possível o enlace CC e o nó fonte participará do segundo momento da CC de modo a garantir uma maior conectividade. Assim, como *HHSS* chama a heurística *IHSS* duas vezes, o custo do computacional do *HHSS* é  $O(\Delta(G)^2)$ . Na seção a seguir são apresentados os resultados de simulação que comparam o *IHSS* e *HHSS*.

---

**Algoritmo 7** *Hybrid Helper Set Selection*

---

**Input:**  $v_i, v_j, N(v_i)$

**Output:**  $H_{i,j}$

- 1:  $H_{i,j} \leftarrow \text{IntermediateHelperSetSelection}(v_i, v_j, N(v_i))$
  - 2: **if**  $|H_{i,j}| = \emptyset$  **then**
  - 3:    $H_{i,j} \leftarrow$  call *IHSS* with modified functions  
           *ComputeDistance()* and *ComputeTXPower()*
  - 4: **end if**
- 

## 5.2 Resultados de Simulação

De forma a avaliar a heurística proposta, o *HHSS* foi combinado com as técnicas *CSC* e *CSC(HS)*. A heurística foi implementada em um simulador em Matlab [15]. Além

do *CSC* e do *CSC(HS)*, utilizamos para comparação a técnica *CoopSink* que utiliza a heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS* e comparamos o *HHSS* com a heurística *IHSS* apresentada no capítulo anterior. O mesmo cenário e métricas da Seção 3.3 foram utilizados para avaliar as técnicas propostas.

Os resultados a seguir mostram a combinação das técnicas *CSC* e *CSC(HS)* com as heurísticas *IHSS* e *HHSS* e o *CoopSink* que utiliza o modelo CC(Yu) em conjunto do a heurística de seleção de nós auxiliares *GHSS*. Estas técnicas são avaliadas com base nas métricas M1 a M7. Para todas as figuras, o eixo  $x$  apresenta a quantidade de nós no grafo.

### 5.2.1 Média de Saltos (M1)

A Figura 5.1 apresenta os resultados para a métrica de média de saltos. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de saltos que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC* obtém uma redução do número de saltos, independentemente da quantidade de nós no grafo. Se comparado com o *CoopSink*, o *CSC* em conjunto com o *HHSS* consegue reduzir em até 54,50% o número de saltos para alcançar o nó sorvedouro. E no pior caso, ou seja,  $n = 50$  nós, o *CSC* consegue reduzir em 40,82% o número de saltos. Novamente, independentemente heurística de seleção de nós auxiliares utilizada, as técnicas *CSC* e *CSC(HS)* obtêm melhores resultados que o *CoopSink*. Apesar de ambas as heurísticas terem resultados semelhantes no que tange a quantidade média de saltos para alcançar o nó sorvedouro, é possível analisar que o *HHSS* consegue uma redução maior na quantidade de saltos para alcançar o nó sorvedouro que o *IHSS*. Isto ocorre, pois, o *HHSS* obtém um aumento maior na conectividade que o *IHSS*, o que resulta em mais enlaces cooperativos, mais opções para alcançar o nó sorvedouro e em uma menor quantidade de saltos quando as técnicas *CSC* ou *CSC(HS)* são aplicadas.

### 5.2.2 Média de Transmissões (M2)

A Figura 5.2 apresenta os resultados para a métrica de média de transmissões. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra o número médio de transmissões que cada técnica necessita para alcançar o nó sorvedouro. Podemos observar que, dentre as técnicas analisadas, o *CSC(HS)* obtém uma redução do número de transmissões, independentemente da quantidade de nós e da heurística de seleção de nós utilizada. No melhor caso,  $n = 100$  nós, o *CSC(HS)* em conjunto com o *IHSS* consegue reduzir em 47,98% o número de transmissões necessárias para alcançar o nó sorvedouro se comparado com o *CoopSink*. Já com  $n = 50$  os resultados do *CSC(HS)* com o *IHSS* e com o *HHSS* são similares, mas ainda inferiores aos do *CSC*

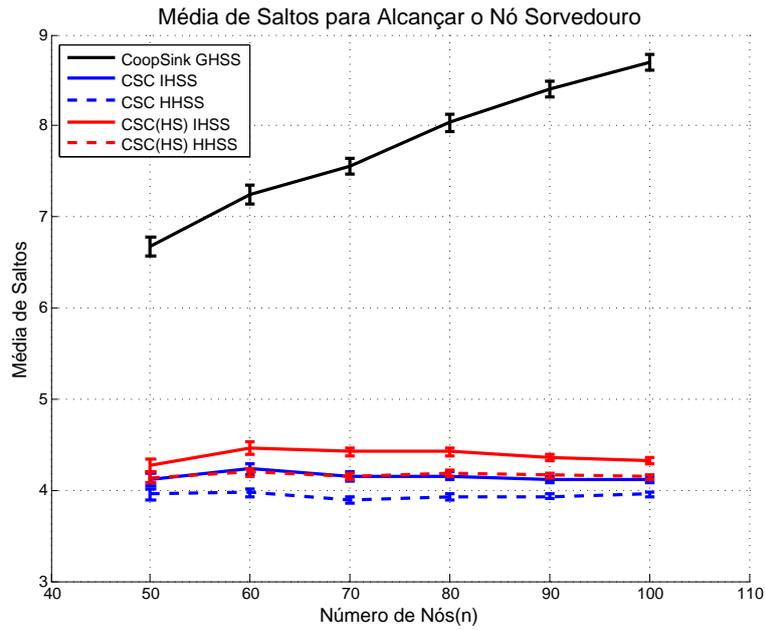


Figura 5.1: Média de saltos para um nó alcançar o nó sorvedouro.

e do *CoopSink*. Apesar da utilização do *HHSS* aumentar a conectividade da rede se comparado com o *IHSS*, os resultados da combinação destas técnicas com o *CSC* e o *CSC(HS)* são bastante similares.

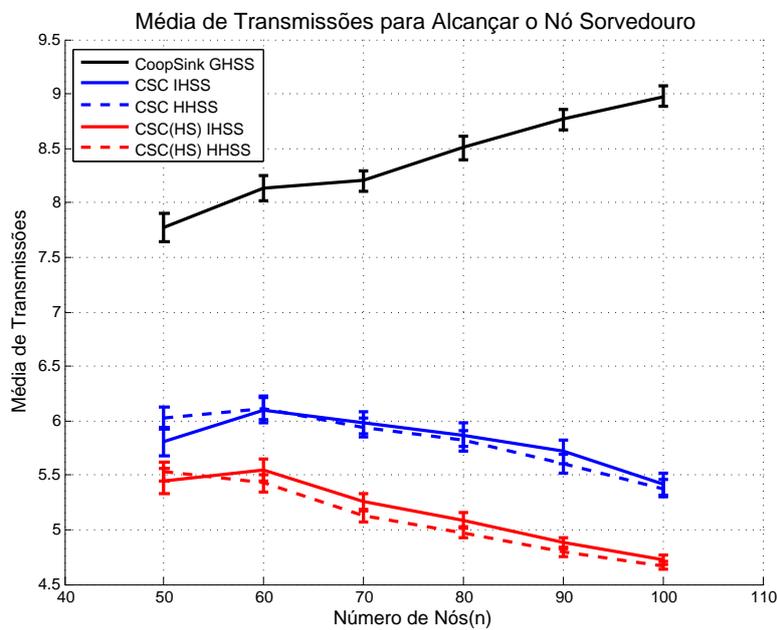


Figura 5.2: Média de transmissões para um nó alcançar o nó sorvedouro.

### 5.2.3 Conectividade (M3)

A Figura 5.3 apresenta os resultados para a métrica de conectividade com o nó sorvedouro. Nesta figura, o eixo  $y$  mostra a conectividade com o nó sorvedouro em porcentagem. A principal motivação da utilização do *HHSS* é alcançar a conectividade obtida pelo *GHSS*. Note que, na Figura 5.3, a utilização do *HHSS* em conjunto com o *CSC* e o *CSC(HS)* garante a mesma conectividade que o *CoopSink* em conjunto com o *GHSS* obtém. Apesar de não obter a conectividade do *HHSS* e *GHSS*, a utilização do *IHSS* aumenta significativamente a conectividade da rede se comparado com a topologia original que não utiliza CC. A utilização do *HHSS* em conjunto com o *CSC* ou *CSC(HS)* promove um ganho de conectividade de até 134%, já a utilização do *IHSS* em conjunto com o *CSC* ou *CSC(HS)* promove um ganho de conectividade de até 104%. A diferença da utilização das duas heurísticas de seleção de nós auxiliares diminui a medida que a densidade de nós da rede aumenta e torna-se aproximadamente 1% quando  $n = 100$  nós.

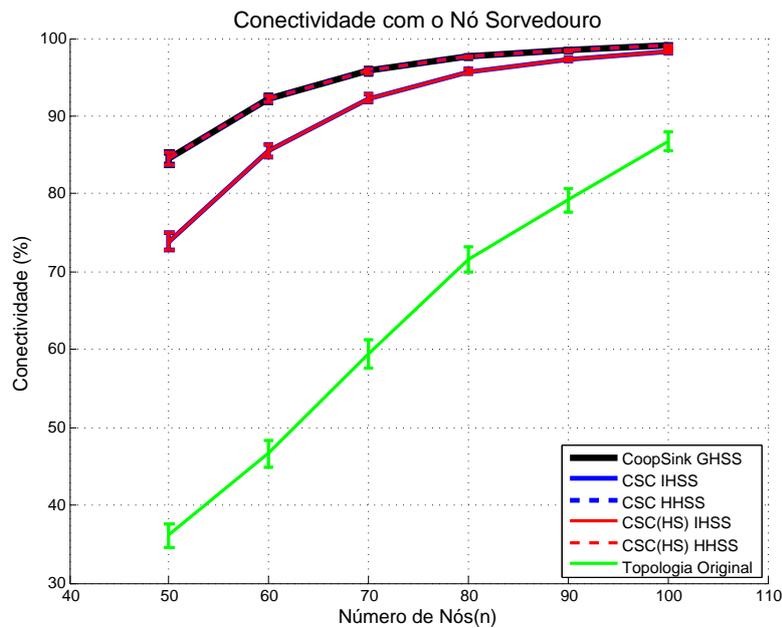


Figura 5.3: Conectividade com o nó sorvedouro.

### 5.2.4 Custo Médio dos Nós Fonte (M4)

A Figura 5.4 apresenta os resultados para a métrica de custo médio dos nós fonte. Nesta figura, o eixo  $y$  apresenta o custo médio. Como o *IHSS* utiliza o modelo *CC(BE)*, isto é, o nó fonte não participa do segundo momento da *CC*, a combinação do *IHSS* com o *CSC* e *CSC(HS)* garante o menor custo médio dos nós fonte independentemente da densidade de nós da rede. Entretanto, a utilização do *CSC(HS)* com o *HHSS* resulta em

uma redução do custo médio dos nós fonte de até 41,69% se comparado ao *CoopSink*. Isto ocorre, pois, o *CSC(HS)* visa reduzir o número de saltos para o nó fonte, mas, ao mesmo tempo, manter o consumo energético no menor nível possível. Como *CSC* visa apenas a redução do número de saltos e, assim, escolhe enlaces cooperativos mais “longos”, isto é, com maior custo energético o que pode ser verificado nesta métrica já que este obtém o maior custo médio dos nós fonte. Além disso, tanto para o *CSC* quanto para o *CSC(HS)* em conjunto com o *HHSS*, teremos alguns casos onde o nó fonte irá também participar do segundo momento da CC de modo a aumentar a conectividade da rede, mas isso causa um aumento também o custo médio dos nós fonte.

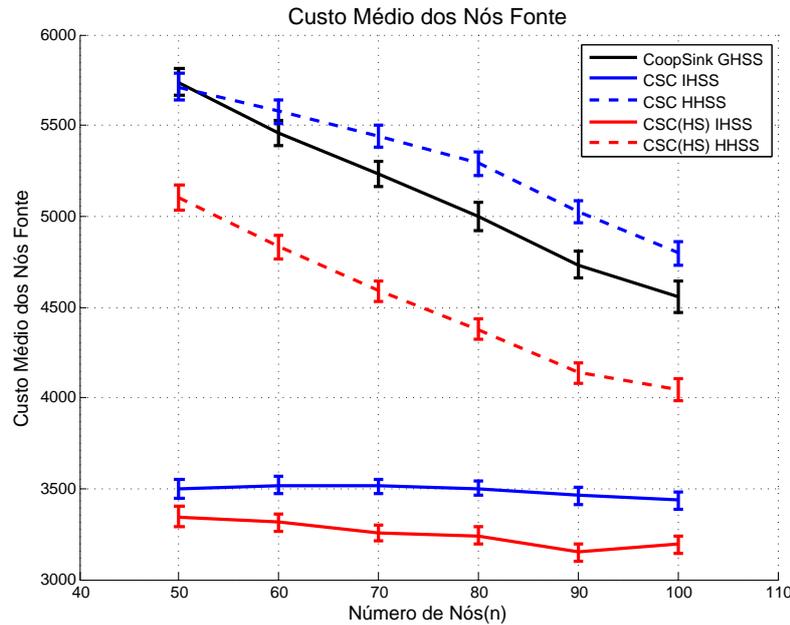


Figura 5.4: Custo médio dos nós fonte.

### 5.2.5 Custo Médio dos Nós Auxiliares (M5)

A Figura 5.5 apresenta os resultados para a métrica de custo médio dos nós auxiliares. Nesta figura, o eixo  $y$  apresenta o custo médio. O *CoopSink* continua apresentando, independentemente da densidade de nós na rede, o menor custo médio dos nós auxiliares. Isto ocorre, pois, o *CoopSink* tende a escolher arestas CC mais “curtas”, ou seja, com o nó destino mais próximo dos nós fonte e auxiliares reduzindo, assim, o custo energético. Dentre as heurísticas de seleção de nós auxiliares propostas, o *IHSS* consegue reduzir o custo médio dos nós auxiliares já que utiliza o modelo CC(BE). Este modelo usa mais nós auxiliares que o modelo CC(Yu) e, assim, distribui melhor o custo do enlace entre os nós. Como o *HHSS* utiliza o modelo CC(Yu) apenas em duas situações específicas, os resultados para o custo médio dos nós auxiliares ficam próximos ao do *IHSS*.

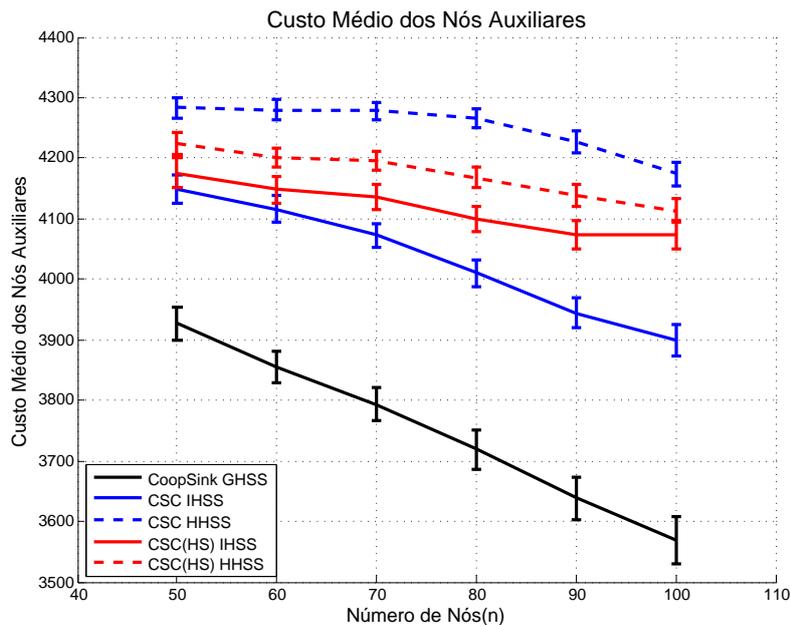


Figura 5.5: Custo médio dos nós auxiliares.

## 5.2.6 Balanceamento Energético do Enlace Cooperativo (M6)

A Figura 5.6 mostra os resultados de simulação da métrica M6. O eixo  $y$  apresenta a razão do custo de comunicação médio utilizado e a razão ótima é apresentada como uma linha horizontal tracejada que corta o eixo  $y$  no valor 1. Note que, o *CoopSink* tem o pior balanceamento energético com o nó fonte gastando até 46% mais energia que os nós auxiliares. Dentre as técnicas que utilizam o *IHSS*, o *CSC* se aproxima mais do balanceamento energético com o nó fonte gastando até 12% menos que os nós auxiliares. Nas técnicas que utilizam o *HHSS*, o nó fonte tende a gastar mais energia que os nós auxiliares quando a rede é esparsa já que neste momento o modelo *CC(Yu)* é muito utilizado para aumentar a conectividade. A medida que a rede se torna mais densa, estas técnicas se aproximam mais da razão energética ideal. Se observarmos em  $n = 90$  nós, o conjunto *CSC(HS)* com *HHSS* atinge o balanceamento energético ideal e já em  $n = 100$  nós, o nó fonte começa a gastar menos energia que os nós auxiliares. Na média, no conjunto *CSC(HS)* com *HHSS* o nó fonte gasta 8% mais que os nós auxiliares enquanto no conjunto *CSC* com *IHSS* o nó fonte gasta 13,5% menos energia que o nó fonte.

## 5.2.7 Custo Médio por Rota (M7)

A Figura 5.7 mostra os resultados de simulação da métrica M7. O eixo  $y$  apresenta custo médio por rota que alcança o nó sorvedouro. Novamente, obtivemos o resultado esperado com o *CoopSink* obtendo a menor potência média da rota para todas as densidades de nós da rede apresentadas. O *CSC(HS)* apresenta resultados muito semelhantes para as duas

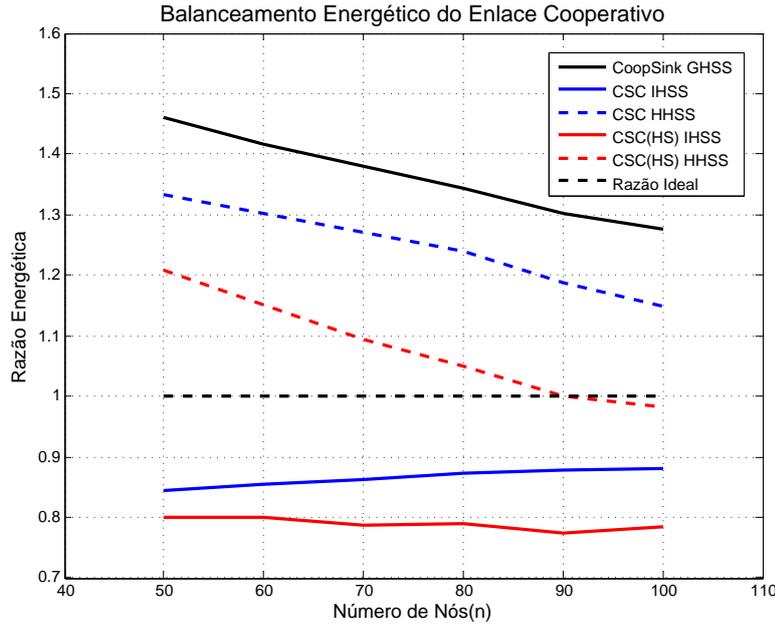


Figura 5.6: Custo balanceamento energético do enlace cooperativo.

heurísticas propostas e é a técnica que mais se aproxima dos resultados do *CoopSink*. No pior caso, com  $n = 100$  nós, o *CSC(HS)* gasta 16,03% a mais de energia que o *CoopSink*. Dentre as técnicas analisadas, o *CSC* tem a maior potência média da rota independentemente da quantidade de nós da rede. Entretanto, a utilização do *CSC* em conjunto com o *IHSS* e, conseqüentemente, também em conjunto com o modelo de CC proposto reduz a potência média da rota se comparado com o *CSC* em conjunto com o *HHSS*.

### 5.3 Discussão

Neste capítulo foi apresentada a heurística de seleção de nós auxiliares *Hybrid Helper Set Selection*. O *HHSS* é uma heurística que seleciona os nós mais próximos do ponto intermediário entre o nó fonte e o nó destino utilizando o modelo de CC proposto sempre que possível. Caso não seja, a heurística seleciona como conjunto de nós auxiliares os nós mais próximos do nó fonte e utiliza o modelo de CC de Yu de modo a aumentar a conectividade da rede. Primeiramente, a heurística foi descrita e seu algoritmo apresentado e, em seguida, a técnica foi implementada e comparada com outras técnicas da literatura por meio de simulação. Como principais resultados temos o aumento da conectividade em até 134% com a utilização do *HHSS*. Além disso, a utilização tanto do *IHSS* e do *HHSS* promove enlaces cooperativos mais balanceados. No conjunto *CSC(HS)* com *HHSS* o nó

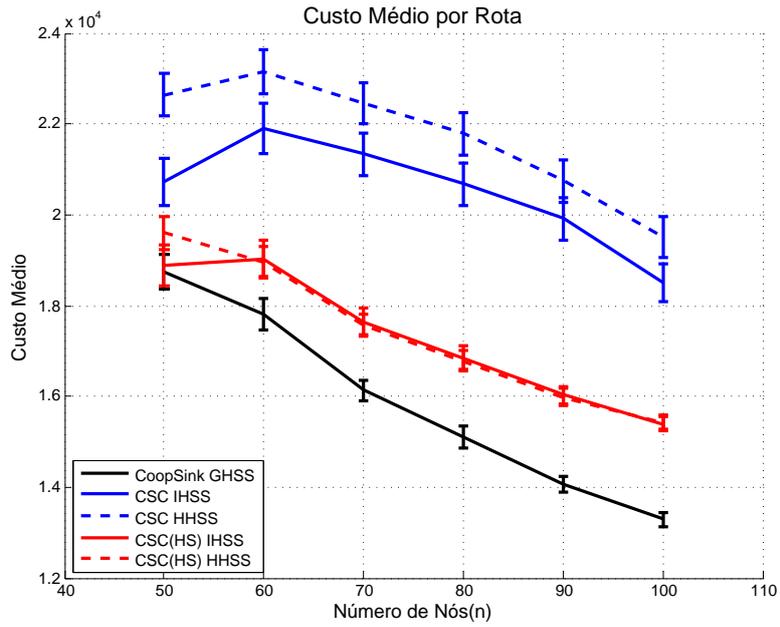


Figura 5.7: Potência média da rota por nó.

fonte gasta 8% mais que os nós auxiliares enquanto no conjunto *CSC* com *IHSS* o nó fonte gasta 13,5% menos energia que os nós auxiliares.

# Capítulo 6

## Conclusão

Nas RSSF, os nós sensores operam por baterias e tem um alcance de transmissão limitado. A rede pode se tornar desconexa devido a falha nos enlaces ou nós, eventos externos ou até pela descarga natural da bateria. Este trabalho considerou o emprego de CC objetivando aumentar a conectividade em uma RSSF. Além disso os enlaces cooperativos devem ser energeticamente balanceados de forma a prolongar o tempo de vida da rede. O principal objetivo deste trabalho foi apresentar alternativas para o aumento da conectividade em RSSF, empregando a comunicação cooperativa (CC). Neste sentido, foram apresentadas técnicas e heurísticas que utilizam CC para aumentar a conectividade em RSSF a partir do estabelecimento de enlaces cooperativos balanceados. A Seção 6.1 apresenta as considerações finais. Em seguida, a Seção 6.2 apresenta a possibilidade de trabalhos futuros.

### 6.1 Considerações Finais

Inicialmente, foram abordados os principais tópicos relacionados ao trabalho: RSSF, modelo de rede cooperativa, transmissão cooperativa e seleção de nós auxiliares. Posteriormente, apresentamos uma solução para obtenção de rotas alternativas em RSSF. Por fim, mecanismos para obtenção de enlaces cooperativos balanceados foram apresentados. Cada proposta foi detalhada e simulações foram feitas para comparar as propostas com outras técnicas da literatura e avaliar o desempenho de cada técnica em métricas específicas.

A primeira contribuição deste trabalho é apresentada no Capítulo 3, onde propomos a técnica *Cooperative Sink Communication (CSC)*, a qual utiliza o modelo CC(Yu) [11] para aumentar a conectividade em uma RSSF. O *CSC* possui dois modos de operação com objetivos distintos. O primeiro tem como foco reduzir a quantidade de saltos para o nó sorvedouro enquanto o segundo, denominado *CSC(HS)* visa reduzir a quantidade de transmissões para o nó sorvedouro. Os resultados denotam que o *CSC* permite reduzir

a quantidade de saltos até o nó sorvedouro em até 54,16% se comparado com outras técnicas da literatura enquanto o *CSC(HS)* permite reduzir em até 46,48% a quantidade de transmissões se comparado com o *CoopSink*. Ambas as técnicas, por utilizarem o modelo CC(Yu), promoveram um aumento de conectividade de até 134% em relação a topologia original. Entretanto, as duas técnicas apresentam um desbalanceamento energético com o nó fonte gastando até 63,92% mais energia que os nós auxiliares. Esta falta de equidade energética pode causar um esgotamento prematuro do nó fonte, inviabilizando o enlace CC.

No Capítulo 4, apresentamos um modelo de CC, denominado modelo CC(BE), e uma heurística de seleção de nós auxiliares, denominada *Intermediate Helper Set Selection (IHSS)*. No modelo CC(BE), o nó fonte apenas participa do primeiro momento da CC e, no segundo momento, os nós auxiliares enviam o dado, em sincronismo, para o nó destino. Deste modo, obtemos uma redução de energia do nó fonte promovendo o balanceamento energético. A heurística de seleção de nós auxiliares *IHSS* escolhe os nós sensores para compor o conjunto  $H_{i,j}$  que estão mais próximos do ponto intermediário entre o nó fonte e o nó destino de modo a manter enlaces CC balanceados. Estes mecanismos, em conjunto com as técnicas apresentadas no Capítulo 3, se aproximam muito do balanceamento energético ideal com o nó fonte gastando 12% menos que os nós auxiliares. Entretanto, a utilização do modelo CC(BE) em conjunto com o *IHSS* perde em conectividade para a utilização do modelo CC(Yu).

No Capítulo 5, apresentamos a heurística de seleção de nós auxiliares *HHSS* que utiliza os modelos CC(BE) e CC(Yu) de modo a aumentar a conectividade da RSSF sem perder a equidade energética dos enlaces CC. No primeiro momento, o *HHSS* utiliza o *IHSS* com o modelo de CC(BE) para criar enlaces cooperativos balanceados. Caso não seja possível criar o conjunto de nós auxiliares, o *HHSS* utilizará o modelo de CC(Yu) e selecionará, como nós auxiliares, os nós mais próximos do nó fonte. Assim, o *HHSS* obtém um ganho de conectividade em relação a topologia original igual ao de técnicas que utilizam o modelo CC(Yu), como o *GHSS*. Adicionalmente, com utilização do *HHSS* são criados enlaces cooperativos balanceados com o nó fonte gastando, em média, apenas 8% a mais que os nós auxiliares.

Com as técnicas proposta e o resultados obtidos, é possível utilizar a CC para aumentar a conectividade de RSSF. No caso do modelo CC(Yu), a conectividade da rede pode aumentar em até 134% com relação a topologia original. No caso do modelo CC(BE) a conectividade é aumentada em até 104%. Além disso, o modelo CC(BE) e as heurísticas de seleção de nós *IHSS* e *HHSS* criam enlaces cooperativos balanceados que prolongam o tempo de vida da rede. Inicialmente, temos a utilização do *GHSS* com o modelo CC(Yu) com o nó fonte gastando até 63,92% mais energia do que os nós auxiliares. Com a

utilização do modelo CC(BE) em conjunto com o *IHSS* temos enlaces cooperativos mais balanceados com o nó fonte gastando até 12% menos que os nós auxiliares. Por fim, a utilização do *HHSS* garante um aumento de conectividade igual ao do *GHSS* e ainda cria enlaces cooperativos balanceados com o nó fonte gastando, em média, apenas 8% mais que os nós auxiliares.

As publicações resultantes do desenvolvimento deste trabalho são apresentadas na Tabela 6.1. O artigo *Exploring Cooperative Communication to Establish Delay-Aware Routes in WSN's* foi publicado no *The Second International Symposium on Computing and Networking* no ano de 2014 e apresenta e avalia as técnicas *CSC* e *CSC(HS)*. O modelo CC(BE) foi apresentado e avaliado em conjunto com as técnicas *CSC* e *CSC(HS)* no artigo *Modelos de Comunicação Cooperativa e Equidade no Consumo de Energia em Enlaces Cooperativos Aplicados à RSSF* que foi aceito na *XLII Conferencia Latinoamerica de Informática - CLEI 2016*. A heurística de seleção de nós auxiliares *IHSS* foi apresentada e avaliada no artigo *Improving Energy Balance and Network Connectivity in Wireless Sensor Networks* que foi submetido para *12th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications - WiMob 2016*.

Tabela 6.1: Lista das contribuições feitas durante o período de mestrado.

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Conferência</b>	<b>Situação</b>	<b>Ano</b>
Camila F. Rêgo, Thiago R. Neves, Ulisses R. Afonseca e Jacir L. Bordim.	<i>Exploring Cooperative Communication to Establish Delay-Aware Routes in WSN's.</i>	<i>The Second International Symposium on Computing and Networking - CANDAR 2014</i>	<b>Publicado</b>	2014
Camila F Rêgo, Rodrigo R. Bezerra, Ulisses R. Afonseca e Jacir L. Bordim.	<i>Modelos de Comunicação Cooperativa e Equidade no Consumo de Energia em Enlaces Cooperativos Aplicados à RSSF</i>	<i>XLII Conferencia Latinoamerica de Informática - CLEI 2016</i>	<b>Aceito</b>	2016
Camila F Rêgo, Rodrigo R. Bezerra e Jacir L. Bordim.	<i>Improving Energy Balance and Network Connectivity in Wireless Sensor Networks</i>	<i>The Ninth IEEE International Workshop on Selected Topics in Wireless and Mobile computing - STWiMob 2016</i>	<b>Aceito</b>	2016

## 6.2 Trabalhos Futuros

Considerando a revisão do estado da arte e as soluções propostas por este trabalho, sugerimos como trabalhos futuros:

1. Utilização de técnicas de controle de topologia como o *CoopSink* [12] em conjunto o modelo CC(BE) e com as heurísticas de seleção de nós auxiliares *IHSS* e *HHSS* e avaliar o impacto no balanceamento energético;

2. Implementação da CC em simuladores de rede como NS3 ou GloMoSim de modo a poder avaliar outras características importantes para RSSF como atraso e interferência;
3. Analisar como a variação da perda de percurso ( $\alpha$ ) e das informações topológicas impactam na conectividade da rede e na eficiência das técnicas e heurísticas propostas;
4. Implementação das heurísticas de seleção de nós auxiliares *IHSS* e *HHSS* de forma distribuída.

Os trabalhos futuros sugeridos podem ser desenvolvidos como projetos de graduação (sugestões 3 e 4) ou como início de um doutorado como a implementação da CC em simuladores de rede. A sugestão da utilização de técnicas de controle de topologia com as técnicas propostas neste trabalho já está em desenvolvimento.

# Referências

- [1] U. R. Afonseca. *Comunicação Cooperativa: Uma Alternativa Para A Resiliência Em Redes Ad Hoc Sem Fio*. PhD thesis, Programa de Pós-Graduação em Informática, Departamento de Ciência da Computação, UnB, 2015. x, 10, 16, 17
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: A survey. *Comput. Netw.*, 38(4):393–422, March 2002. 3
- [3] M. P. Hamilton and M. Flaxman. Scientific data visualization and biological diversity: new tools for spatializing multimedia observations of species and ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 21(4):285 – 287, 1992. 3, 20
- [4] C. Herring and S. Kaplan. Component-based software systems for smart environments. *IEEE Personal Communications*, 7(5):60–61, Oct 2000. 3, 20
- [5] E. M. Petriu, N. D. Georganas, D. C. Petriu, D. Makrakis, and V. Z. Groza. Sensor-based information appliances. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 3(4):31–35, Dec 2000. 3, 20
- [6] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9):6869–6896, 2009. 3, 7, 9
- [7] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Comput. Netw.*, 52(12):2292–2330, August 2008. 3
- [8] P. Mohapatra and S. V. Krishnamurthy. *Ad Hoc Networks - Technologies and Protocols*. Springer Science + Business Media, Inc. chapters 1, 3, 6, 2005. 3
- [9] N. Li and J. C. Hou. Improving connectivity of wireless ad hoc networks. In *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2005. MobiQuitous 2005.*, pages 314–324, July 2005. 3, 9, 10
- [10] D. Goyal and J. Caffery Jr. Partitioning avoidance in mobile ad hoc networks using network survivability concepts. In *Seventh International Symposium on Computers and Communications, 2002. Proceedings. ISCC 2002.*, pages 553–558. IEEE, 2002. 3, 9, 10, 11
- [11] J. Yu, H. Roh, W. Lee, S. Pack, and D.-Z. Du. Cooperative bridges: topology control in cooperative wireless ad hoc networks. In *2010 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 1–9. IEEE, 2010. 4, 10, 12, 13, 17, 21, 24, 25, 29, 30, 63

- [12] T. F. Neves and J. L. Bordim. Topology control in cooperative ad hoc wireless networks. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 302(0):29 – 51, 2014. Proceedings of the {XXXIX} Latin American Computing Conference (CLEI 2013). 4, 12, 13, 17, 24, 29, 65
- [13] Y. Zhu, M. Huang, S. Chen, and Y. Wang. Energy-efficient topology control in cooperative ad hoc networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(8):1480–1491, Aug 2012. 4
- [14] Z. Zhou, S. Zhou, J.-H. Cui, and S. Cui. Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(8):3066–3078, August 2008. 4, 13
- [15] M. Grant and S. Boyd. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1. Disponível em: <http://cvxr.com/cvx>, March 2014. 5, 29, 46, 55
- [16] D. K. Sing S. K. Singh, M. P. Singh. Energy-efficient homogeneous clustering algorithm for wireless sensor networks. *International Journal of Wireless and Mobile Networks*, 2(3):49–61, 2010. 7
- [17] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5):16–27, Oct 2000. 8
- [18] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister. System architecture directions for networked sensors. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, ASPLOS IX, pages 93–104, New York, NY, USA, 2000. ACM. 8
- [19] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000*, pages 10 pp. vol.2–, Jan 2000. 8
- [20] Y. Yao and J. Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *SIGMOD Rec.*, 31(3):9–18, September 2002. 9
- [21] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '00, pages 56–67, New York, NY, USA, 2000. ACM. 9
- [22] M. Younis, M. Youssef, and K. Arisha. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks. In *Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, 2002. MASCOTS 2002. Proceedings. 10th IEEE International Symposium on*, pages 129–136, 2002. 9
- [23] T. K. Jain, D. S. Saini, and S. V. Bhooshan. Increasing lifetime of a wireless sensor network using multiple sinks. In *2014 11th International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG)*, pages 616–619, April 2014. 9

- [24] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In *Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '02, pages 148–159, New York, NY, USA, 2002. ACM. 9
- [25] R. Sedgewick and K. Wayne. *Algorithms, 4th Edition*. Addison-Wesley, 2011. 10
- [26] T. H. Cormen, C. Stein, R. L. Rivest, and C. E. Leiserson. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill Higher Education, 2nd edition, 2001. 10
- [27] P. Chaudhuri. An optimal distributed algorithm for computing bridge-connected components. *Computer Journal*, 40:200–207, 1997. 10
- [28] P. Chaudhuri. An optimal distributed algorithm for finding articulation points in a network. *Comput. Commun.*, 21(18):1707–1715, December 1998. 10, 11
- [29] Volker Turau. Computing bridges, articulations, and 2-connected components in wireless sensor networks. In *Proceedings of the Second International Conference on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, ALGOSENSORS'06, pages 164–175, Berlin, Heidelberg, 2006. Springer-Verlag. 10
- [30] B. Khelifa, H. Haffaf, M. Madjid, and D. Llewellyn-Jones. Monitoring connectivity in wireless sensor networks. In *IEEE Symposium on Computers and Communications, 2009. ISCC 2009*, pages 507–512. IEEE, 2009. 10
- [31] P. Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Comput. Surv.*, 37(2):164–194, June 2005. 10, 24
- [32] S. Misra and A. Jain. Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks. *J. Netw. Comput. Appl.*, 34(5):1530–1544, September 2011. 11
- [33] S. Wang, X. Mao, S.-J. Tang, X. Y. Li, J. Zhao, and G. Dai. On movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 22(4):687–694, April 2011. 11
- [34] A. A. Abbasi, M. Younis, and K. Akkaya. Movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 20(9):1366–1379, Sept 2009. 11
- [35] Z. Mi and Y. Yang. Connectivity restorability of mobile ad hoc sensor network based on k-hop neighbor information. In *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*., pages 1–5, June 2011. 11
- [36] M. Younis, S. Lee, and A. A. Abbasi. A localized algorithm for restoring internode connectivity in networks of moveable sensors. *IEEE Transactions on Computers*, 59(12):1669–1682, Dec 2010. 11
- [37] J. Yu, H. Roh, and W. Lee. Topology Control in Cooperative Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(9):1771–1779, 2012. 12

- [38] Y.-W. P. Hong and C.-C. J. Kuo W.-J. Huang. *Cooperative Communications and Networking: Technologies and System Design*. Springer Science+Business Media, 2010. 12
- [39] A. K. Sadek, W. Su, and K. J. R. Liu. Multinode cooperative communications in wireless networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(1):341–355, Jan 2007. 12, 21
- [40] Y. Xiao. IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless lans. *IEEE Wireless Communications*, 12(6):82–91, Dec 2005. 12
- [41] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei. An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless. *Proceedings of the IEEE*, 92(2):198–218, Feb 2004. 12
- [42] M. Uysal. *Cooperative Communications for Improved Wireless Network Transmission: Framework for Virtual Antenna Array Applications*. Information Science Reference, 2010. 12
- [43] S. Song, D. L. Goeckel, and D. Towsley. Collaboration improves the connectivity of wireless networks. In *25th IEEE International Conference on Computer Communications.*, pages 1–11, April 2006. 12
- [44] W. Chen and N. Huang. The strongly connecting problem on multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 37(3):293–295, 1989. 13
- [45] C. F. Rego, T. F. Neves, U. R. Afonseca, and J. L. Bordim. Exploring cooperative communication to establish energy-and-delay aware routes in wsns. In *Second International Symposium on Computing and Networking (CANDAR), 2014*, pages 205–211, Dec 2014. 13, 17
- [46] M. Cardei, J. Wu, and S. Yang. Topology control in ad hoc wireless networks using cooperative communication. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(6):711–724, June 2006. 14, 24
- [47] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and Gregory W. Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12):3062–3080, Dec 2004. 14, 16
- [48] K. Kotobi. *Energy Conservation of Cooperative Communications over Composite Channel*. Masters in electrical engineering, Delft University of Technology, June 2011. 14
- [49] J. N. Laneman, G. W. Wornell, and D. N. C. Tse. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. In *IEEE International Symposium on Information Theory, 2001.*, pages 294–, 2001. 15
- [50] M. R. Bhatnagar, A. Hjørungnes, and L. Song. Amplify-and-forward cooperative communications using double-differential modulation over nakagami-m channels. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008.*, pages 350–355, March 2008. 15

- [51] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(9):3450–3460, September 2007. 15
- [52] C. Yeh, Y. Lin, C. Liu, and W. Huang. Compressed-and-forward: Compressive sensing for cooperative communication. In *Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), 2012 International Symposium on*, pages 319–322, Nov 2012. 15
- [53] T. Cover and A. E. Gamal. Capacity theorems for the relay channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 25(5):572–584, Sep 1979. 16
- [54] P. H. Pathak and R. Dutta. A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 13(3):396–428, Third 2011. 17
- [55] H. Shan, W. Zhuang, and Z. Wang. Distributed cooperative mac for multihop wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(2):126–133, February 2009. 17
- [56] B. Wang, Z. Han, and K. J. R. Liu. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. In *26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE INFOCOM 2007.*, pages 544–552, May 2007. 17
- [57] A. M. Akhtar, M. R. Nakhai, and A. H. Aghvami. Power aware cooperative routing in wireless mesh networks. *IEEE Communications Letters*, 16(5):670–673, May 2012. 17
- [58] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 31(2 supplement):20–41, April 2001. 20
- [59] B. G. Celler, T. Hesketh, W. Earnshaw, and E. Ilsar. An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly at home. In *Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers.*, pages 908–909 vol.2, 1994. 20
- [60] N. I. Zaman, K. M. A. A. Mamun, A. M. M. S. Uddin, and T. Kanakis. Performance analysis of mimo relaying channels’ cooperative diversity for mobile networks. In *2010 Second International Symposium on Data, Privacy and E-Commerce (ISDPE)*, pages 95–99, Sept 2010. 21
- [61] Y. Zhou and W. Zhuang. Throughput analysis of cooperative communication in wireless ad hoc networks with frequency reuse. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(1):205–218, Jan 2015. 21
- [62] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959. 24, 28

- [63] S. A. Astaneh and S. Gazor. Resource allocation and relay selection for collaborative communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(12):6126–6133, December 2009. 44