

O Problema da Cooperação entre Redes de Sensores Sem Fio

Pedro O.S. Vaz de Melo¹, Felipe Domingos¹, Jussara M. Almeida¹,
Raquel A.F. Mini², Antonio A.F. Loureiro¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, 31270-901 – Brasil

²Instituto de Informática – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, 30535-901 – Brasil

{olmo, fdcunha, jussara, loureiro}@dcc.ufmg.br, raquelmini@pucminas.br

Abstract. *An important issue in the design of a wireless sensor network (WSN) is to devise techniques to make efficient use of its energy, and thus, extend its lifetime. When two WSNs are deployed in the same place and their sensors cooperate with the other networks forwarding their packages, the distance of the transmissions decreases and, therefore, the power consumption as well. The objective of this work is to examine the extent to which different WSNs can cooperate and save their energies. Simulation results reveal that different densities and collecting data rates among WSNs, as the routing algorithm and the path loss exponent, have major impact in the establishment of cooperation.*

Resumo. *Um importante desafio no projeto de redes de sensores sem fio (RSSFs) é desenvolver técnicas que façam o uso eficiente da sua energia e, assim, estendam o seu tempo de vida. Quando duas RSSFs estão depositadas em um mesmo local e os seus nós sensores cooperam com as demais redes encaminhando os seus pacotes, a distância das transmissões diminui e, conseqüentemente, o consumo de energia também. O objetivo deste trabalho é analisar até que ponto diferentes RSSFs podem cooperar e economizar as suas energias. Resultados de simulação revelam que diferentes densidades e taxas de coleta de dados entre as RSSFs, assim como o algoritmo de roteamento e o expoente de perda do meio, influenciam significativamente no estabelecimento da cooperação.*

1. Introdução

Mark Weiser, no clássico artigo *The computer for the 21st century* [Weiser 1999], vislumbrou a computação ubíqua como sendo o futuro da interação homem-máquina, prevendo o acesso a ambientes computacionais por qualquer pessoa, em qualquer lugar, a qualquer momento. Espera-se que dispositivos computacionais estejam acoplados aos mais triviais objetos, tais como etiquetas de roupas, xícaras de café, canetas, ou qualquer tipo de objeto pessoal [de Araujo 2003], de forma totalmente invisível para o usuário, tornando a sua vida mais segura e confortável. Nesse contexto, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [Akyildiz et al. 2002] surgem como uma maneira de viabilizar a visão de Mark Weiser com a computação ubíqua. As RSSFs são um tipo especial de redes *ad hoc* que têm a função de coletar dados do ambiente em que são inseridas e disponibilizar tais informações para o usuário. Os dados ambientais são coletados pelos nós sensores, que

possuem severas restrições de processamento, memória e energia, e depois são transmitidos ao nó monitor (*sink*), que por sua vez, transmite-os para o usuário final.

Uma vez que os nós sensores são equipados por baterias com capacidade finita e a sua reposição é raramente possível, o desenvolvimento de protocolos que otimizem o consumo de energia dos mesmos é o principal tópico de pesquisa em RSSFs. Dentro do consumo de energia do nó sensor, a atividade de comunicação de dados é a mais significativa. Segundo [Pottie and Kaiser 2000], o custo de energia relativo à comunicação é aproximadamente três ordens de grandeza maior que o de processamento. Assim, técnicas para reduzir o consumo de energia na comunicação de dados devem ser desenvolvidas a fim de estender o tempo de vida dos nós sensores. Uma maneira simples de poupar a energia do nó sensor na comunicação é fazendo com que os nós se comuniquem através de múltiplos saltos (*multi-hop*). Isso é feito porque o gasto de energia varia exponencialmente com a distância em que o dado é transmitido, ou seja, uma mensagem transmitida a d metros consome uma quantidade de energia proporcional a d^α , com o expoente de perda do meio α variando normalmente entre 2 e 4 [Wieselthier et al. 2001]. Assim, quanto menor é a distância na qual uma transmissão de dados é feita, menor é a energia consumida pelo nó sensor que realizou a transmissão.

Uma maneira de diminuir a distância em que os nós sensores comunicam é aumentar a densidade da rede. Quanto maior é a densidade da rede, menor é a distância média entre dois nós sensores na rede e menor é a energia necessária para que os mesmos se comuniquem. Entretanto, aumentar a densidade de uma rede nem sempre pode ser viável, uma vez que isso pode representar um custo significativo no projeto da RSSF e em sua manutenção. Uma vez que a computação ubíqua prevê a instalação de diferentes redes em um mesmo local, uma maneira de aumentar a densidade de uma RSSF a um custo que, a princípio, é nulo, é fazendo com que duas RSSFs diferentes usem nós sensores uma das outras no roteamento de pacotes. Quando duas RSSFs, instaladas no mesmo local, compartilham seus nós sensores a fim de que os mesmos enviem mensagens a menores distâncias, as duas redes estão economizando as suas energias e estendendo os seus tempos de vida. Apesar de óbvia e simples, essa idéia traz consigo inúmeras implicações que dificultam a cooperação entre as redes. Considerando que uma RSSF possui um caráter racional e egoísta, ela só irá cooperar com uma outra RSSF se essa lhe prover serviços que justifiquem a cooperação. Uma RSSF ociosa, que coleta dados mensalmente, por exemplo, se cooperar com uma rede que coleta dados diariamente, pode estar obtendo mais malefícios com a cooperação que benefícios, tendo a maior parte do seu consumo destinada a ações que não fazem parte do objetivo para o qual ela foi projetada.

O objetivo deste trabalho é estudar o problema da cooperação entre duas RSSFs depositadas no mesmo local. A primeira contribuição do trabalho é identificar os parâmetros que afetam no estabelecimento da cooperação e nos benefícios que as redes podem obter. A segunda contribuição é avaliar de forma quantitativa e metódica o impacto individual e interativo de quatro parâmetros considerados chave para o problema, sendo eles a densidade e a taxa de coleta de dados das redes, o algoritmo de roteamento e o expoente de perda do meio. Foi observado que diferentes densidades e taxas de coleta de dados entre as RSSFs, assim como o algoritmo de roteamento e o expoente de perda do meio, influenciam significativamente no estabelecimento e nos benefícios que as redes podem obter com a cooperação. Além disso, foi mostrado para quais valores

desses parâmetros as redes obtêm benefícios com a cooperação. Esses resultados podem alimentar o projeto futuro de protocolos de cooperação entre diferentes RSSFs.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A descrição dos parâmetros que podem levar ou não à cooperação e do modelo do projeto experimental que avalia o impacto dos mesmos se encontram na Seção 3. Na Seção 4 são descritos os resultados dos projetos experimentais. Finalmente, na Seção 5, são mostradas as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O problema da cooperação entre diferentes RSSFs foi primeiramente estudado em [Felegyhazi et al. 2005], em que foi elaborado um modelo seguindo os conceitos da teoria dos jogos para ditar o comportamento das redes. Na modelagem, os jogadores são as autoridades que controlam cada rede e suas estratégias são definir se seus nós encaminham pacotes de outras redes e se seus nós pedem para que outras redes encaminhem seus pacotes. Assume-se que os nós sensores enviam periodicamente e sincronizadamente mensagens para os seus respectivos nós monitores e esses, por sua vez, enviam para os seus nós sensores, via *single hop*, um único *bit* que informa se a taxa de coleta de dados foi satisfatória. A partir disso, os nós sensores controlam as suas estratégias em busca de minimizar o seu consumo de energia e maximizar a taxa de entrega de dados da rede.

Os resultados de [Felegyhazi et al. 2005] mostram que as redes convergem basicamente para dois equilíbrios, um não cooperativo, em que nenhum nó presta e pede serviços para nós de outra rede, e um cooperativo, que todos os nós prestam e pedem serviços para nós de outra rede. Além disso, foi verificado que quando o ambiente é muito denso, o custo da recepção domina o custo da transmissão, fazendo com que o algoritmo convirja para a não cooperação. Também foi verificado que quando o ambiente é hostil, ou seja, o valor de α é maior, há maiores incentivos para a cooperação.

O trabalho de [Felegyhazi et al. 2005] é pioneiro e, talvez por isso, deixa pontos abertos para estudo. Esse trabalho considera apenas os parâmetros densidade e expoente de perda do meio na avaliação do algoritmo proposto no trabalho. Além disso, o trabalho considera que as redes são homogêneas, não considerando densidades e taxas de tráfego de dados diferentes entre elas, fatores que podem ser determinantes para o estabelecimento da cooperação. Por fim, é considerado que há sincronismo na coleta de dados entre todos os nós sensores e que a comunicação feita do nó monitor para esses é do tipo *single hop*. Tais características podem ser consideradas inviáveis para ambientes do mundo real.

Outro trabalho que trata do problema de duas diferentes RSSFs depositadas no mesmo local é descrito em [Miller et al. 2005]. Nesse trabalho, os autores consideram a possibilidade de que nós sensores de diferentes redes troquem favores de natureza variada entre eles, tais como roteamento, sensoriamento, processamento e armazenamento de dados. Devido a isso, uma solução estável e benéfica para ambas as redes só é viável se os proprietários das redes assinam um contrato monetário antes da deposição das mesmas. Nesse contrato, as duas redes quantificam os valores dos serviços que podem ser oferecidos e, ao final de um tempo pré-definido, os favores são contabilizados e pagos por quem os pediu. O grande problema da modelagem de [Miller et al. 2005] é a necessidade do estabelecimento de um contrato financeiro. Essa necessidade está na contramão da proposta da computação ubíqua, em que redes são depositadas e retiradas a todo instante e

um controle sobre isso pode ser inviável.

3. Avaliação dos Fatores que Impactam na Cooperação de RSSFs

Nesta seção, será apresentada a motivação para a realização de um projeto experimental para avaliar o problema da cooperação entre diferentes RSSFs. Na Seção 3.1, serão descritos os parâmetros que podem impactar na cooperação e na Seção 3.2, será apresentado o modelo do projeto experimental.

3.1. Parâmetros

O estabelecimento da cooperação entre diferentes RSSFs pode depender de diversos parâmetros das mesmas. A seguir, serão descritos os parâmetros e os motivos nos quais os mesmos podem impactar na cooperação. É importante ressaltar que este é o primeiro trabalho que apresenta uma contribuição no sentido de identificar todos os parâmetros que podem impactar no problema da cooperação entre diferentes RSSFs. Dentre os parâmetros descritos nesta seção, apenas a densidade (igual entre as redes) e o expoente de perda do meio foram analisados por [Felegyhazi et al. 2005].

O primeiro parâmetro a ser discutido é, provavelmente, um dos mais relevantes. A **densidade da rede** é um fator primordial no estabelecimento da cooperação, ditando a distância média entre os nós sensores vizinhos. Quanto maior a densidade da rede, mais nós sensores estão depositados por área, e menor será a distância entre eles. Uma vez que a distância reduz, o custo da transmissão entre os mesmos também se reduz. Quando duas RSSFs estão depositadas em um mesmo local e ambas possuem a mesma densidade, a cooperação será capaz de aumentar a densidade das duas redes de forma equivalente, trazendo, teoricamente, um benefício igual para ambas. Caso, por exemplo, a densidade de uma é o dobro da densidade da outra, a cooperação irá trazer benefícios diferentes para as redes. Enquanto uma rede triplicará a sua quantidade de nós sensores, a outra terá a sua quantidade aumentada pela metade apenas. Assim, quando as densidades das redes variam, os benefícios com a cooperação também variam e podem, conseqüentemente, fazer com que uma rede ganhe com a cooperação e a outra perca.

Outro parâmetro que pode impactar no estabelecimento da cooperação é **taxa de coleta de dados da rede**. Se duas redes coletam a taxas similares, espera-se que ambas vão se beneficiar dos nós sensores alheios em frequências também similares. À medida que uma rede possui uma taxa de coleta de dados menor, essa rede terá os seus nós sensores usados numa frequência maior que a frequência que ela usa os nós sensores da outra rede. Essa variação pode chegar num ponto em que a cooperação implique em um consumo de energia maior que aquele que ela teria se não tivesse cooperando.

O **tipo do nó sensor** é outro parâmetro que pode influir na decisão da cooperação por partes das redes. Diferentes tipos de nós sensores possuem restrições diferentes e essas restrições influem no desgaste dos mesmos frente à cooperação. Se, por exemplo, uma das redes possuir nós sensores movidos a energia solar, essa rede não terá, provavelmente, incentivos significativos para cooperar com outra rede, pois a energia consumida em transmissões de dados pode ser reposta. Entretanto, se uma rede possuir nós sensores com severas restrições de energia, então essa rede deve cooperar sempre que possível, enquanto isso trouxer benefícios para ela.

O consumo de energia com a transmissão de uma mensagem é relacionado com a potência em que é feita a transmissão. Quanto maior a **potência de transmissão**, maior o alcance da transmissão e maior é o consumo de energia, que é proporcional à d^α [Wieselthier et al. 2001], sendo d a distância alcançada e α o expoente de perda do meio. Enquanto isso, a **potência de recepção** é constante e determina o quanto um nó sensor é capaz de escutar. Diferentes dispositivos sem fio possuem diferentes razões para o gasto de energia com transmissões e recepções [Cigdem Sengul and Kravets 2007]. De maneira geral, quando as distâncias de comunicação entre os nós diminuem significativamente, o gasto com a transmissão também se reduz significativamente mas, em compensação, o número de saltos que uma mensagem trafega aumenta consideravelmente. Quando isso acontece, o custo da transmissão pode ser dominado pelo custo da recepção, fazendo que o número de recepções e o respectivo gasto de energia com as recepções não compense a economia nas transmissões. Assim pode acontecer de que o aumento da densidade da rede não seja suficiente para que a cooperação seja benéfica.

O valor do **expoente de perda do meio** α também é um fator que impacta na cooperação, estando relacionado às características do meio de comunicação [Wieselthier et al. 2001]. Áreas abertas possuem menores valores para α enquanto áreas fechadas, com obstruções de qualquer tipo, possuem maiores valores para α . Quanto maior o valor de α , maior é a vantagem para dois nós se comunicarem a distâncias d menores, uma vez que a energia consumida na transmissão é proporcional a d^α . Assim, o valor de α influi diretamente na relação custo-benefício de se transmitir a distâncias pequenas, usando múltiplos saltos para trafegar a mensagem. Quanto maior o número de saltos, maior o número de recepções que um nó faz. À medida que o valor de α aumenta, menor é a distância necessária para que o custo da recepção domine o custo da transmissão e mais provável é, conseqüentemente, que a cooperação traga benefícios.

Ainda relacionado ao custo de transmissões e recepções, o **tamanho da mensagem** é um parâmetro preponderante no consumo de energia. Quanto maior o tamanho da mensagem, maior será o consumo de energia na transmissão e na recepção. Assim, o tamanho da mensagem que os nós sensores trafegam na rede pode ser um fator decisivo no estabelecimento da cooperação. As redes podem possuir as mesmas características, mas se uma delas trafegar mensagens de tamanho maior que as outras, ela vai se beneficiar mais com a cooperação que as outras pois, enquanto ela cooperará encaminhando pacotes pequenos, as outras cooperarão encaminhando os seus pacotes, de tamanho maior.

Por fim, o **algoritmo de roteamento** pode ser um parâmetro significativo para o estabelecimento da cooperação. Na literatura, existem diversos algoritmos de roteamento propostos para RSSFs. O objetivo de cada algoritmo varia, podendo ser economia de energia, redução da latência, confiabilidade, entre outras [Al-Karaki and Kamal 2004]. Para cada objetivo e algoritmo, o consumo de energia com a comunicação de dados pode variar e, com isso, o benefício com a cooperação. Se, por exemplo, o objetivo de um algoritmo é a redução da latência, o número de saltos que a mensagem trafega deve ser o menor possível. Se uma RSSF estiver usando esse algoritmo para rotear os seus dados, a cooperação com uma RSSF que usa um algoritmo de roteamento que priorize a economia de energia, usando o maior número de saltos possível, talvez não se torne possível, pois a necessidade de uma rede entra em conflito com a necessidade da outra.

3.2. Modelo do Projeto Experimental

Nesta seção é descrito o modelo do projeto experimental utilizado para avaliar o impacto dos parâmetros descritos na Seção 3.1 no estabelecimento da cooperação entre duas diferentes RSSFs depositadas no mesmo local. Dependendo do valor de cada parâmetro, a cooperação pode ser benéfica para ambas as redes, para apenas uma, ou até mesmo para nenhuma. Se os proprietários das RSSFs forem capazes de, a partir das características das mesmas, determinar se a cooperação será benéfica para as redes, os mesmos podem estabelecer um acordo entre eles e deixar que as redes cooperem entre si. Além disso, sabendo o impacto dos parâmetros na cooperação, novos protocolos podem ser desenvolvidos na direção de permitir que duas RSSFs cooperem quando isso for benéfico a elas.

Uma maneira de verificar o benefício que duas RSSFs podem atingir com a cooperação, dadas as suas respectivas configurações, é prevendo o consumo de energia que elas teriam caso cooperassem entre si e caso não cooperassem. Feito isso, para uma determinada rede, se a diferença entre os consumos de energia quando não há cooperação e quando há cooperação é positiva, então a cooperação para essa rede é benéfica. É importante ressaltar que quando há cooperação, qualquer nó sensor pode e deve encaminhar pacotes da outra rede. Assim, o consumo de energia da rede i pode ser dividido entre o consumo de energia com transmissões de mensagens e o consumo de energia com recepções de mensagens. Então, a diferença ΔE_i entre os consumos de energia da rede quando ela não coopera e quando ela coopera pode ser definida como $\Delta E_i = \Delta T x_i + \Delta R x_i$, em que $\Delta T x_i$ e $\Delta R x_i$ são, respectivamente, as diferenças entre os consumos de energia com transmissões $T x_i^{NC}$ e $T x_i^C$ e recepções $R x_i^{NC}$ e $R x_i^C$ quando, respectivamente, a rede não coopera e quando a rede coopera. Se $\Delta E_i > 0$, então a rede i obteve benefícios com a cooperação. O cálculo de $\Delta T x_i$ e $\Delta R x_i$ é dado, respectivamente, por $\Delta T x_i = T x_i^{NC} - T x_i^C$ e $\Delta R x_i = R x_i^{NC} - R x_i^C$.

Uma maneira de medir ΔE_i é através de simulação. As maiores vantagens de usar simulação em comparação com a experimentação de sistemas reais são o baixo custo e a alta facilidade de alterar as configurações da rede. Apesar das facilidades que a simulação traz consigo, a quantidade total de simulações que podem ser realizadas variando cada parâmetro e cada nível desse é praticamente infinita. Para contornar essa situação, a avaliação inicial do impacto dos parâmetros é feita nos moldes dos projetos experimentais fatoriais do tipo $2^k r$, descritos em [Jain 1991], em que k é o número de parâmetros que serão variados, chamados de fatores, r é o número de replicações do experimento e 2 é a quantidade de níveis de cada fator.

Um projeto fatorial do tipo $2^k r$ é um projeto experimental que visa identificar, dentre uma lista de parâmetros com potencial impacto, aqueles com maior efeito bem como quais interações tem efeito significativo na variação dos dados. Focando em dois níveis por fator ele permite, a um custo razoável, determinar o efeito de cada fator e interação sobre os valores médios da resposta, bem como a porcentagem da variação presente nos dados que surge devido a variação de cada um deles. Além disso, há ainda a variabilidade que surge devido à aleatoriedade e aos erros experimentais. Logo, é preciso replicar r vezes os experimentos para cada configuração de forma a obter resultados estatisticamente significativos. É um passo inicial para se entender o que, dentre um grande número de alternativas, impacta de forma significativa no benefício da cooperação.

A partir dos resultados obtidos em projetos fatoriais, pode-se realizar projetos

experimentais simples [Jain 1991], que são mais detalhados, em que apenas um fator é variado e os demais são mantidos fixos. Assim, pode-se variar um fator em diversos níveis a fim de quantificar e, possivelmente, prever o impacto desse fator em situações genéricas. Isso só pode ser feito se a interação dos fatores avaliados no projeto fatorial não for significativa, pois assim haveria a garantia que os resultados dos projetos simples conteriam apenas informações sobre o fator que foi variado.

O primeiro passo para realização desses projetos experimentais é determinar quais serão os fatores e quais serão os parâmetros que serão mantidos fixos. Dados os parâmetros descritos na Seção 3.1, foram fixados o tamanho da mensagem trafegada na rede, o tipo do nó sensor e as potências de transmissão e recepção do mesmos. Isso foi feito porque diferentes RSSFs com configurações distintas desses parâmetros podem ser normalizadas de forma a se tornarem equivalentes. Ainda, para não perder a generalidade, foi considerado que o consumo de energia para transmitir uma mensagem a uma unidade de distância d é C_{Tx} e o consumo de energia para receber uma mensagem é C_{Rx} . Assim, todos valores relacionados ao consumo de energia com transmissões e recepções serão dados, respectivamente, em função de C_{Tx} e C_{Rx} . Os demais parâmetros descritos na Seção 3.1 serão fatores dos projetos experimentais.

Por fim, é importante descrever os dois algoritmos de roteamento que foram implementados para trafegar as mensagens de evento dos nós sensores até o nó monitor. Os dois algoritmos são árvores de escoamento [Tanenbaum 2002] com objetivos diferentes, estratégias complementares e são ilustrados na figura 1. O primeiro algoritmo, ilustrado na figura 1-a, é chamado de *energyTree* e é o mesmo descrito em [Ye et al. 2001], em que as mensagens são trafegadas usando rotas que possuem o menor custo de energia com transmissões possível. O segundo algoritmo, ilustrado na figura 1-b, é chamado de *delayTree*, e faz com que as mensagens sejam entregues ao nó monitor com o menor atraso possível. Enquanto o algoritmo *energyTree* faz a mensagem trafegar o maior número de saltos possível, o algoritmo *delayTree* faz o contrário, fazendo com que os nós sensores utilizem ao máximo as suas potências de transmissão, reduzindo o número de saltos que a mensagem pode trafegar para o menor possível. Para um projeto experimental do tipo $2^k r$, é importante que os fatores possuam níveis significativamente distintos entre si.

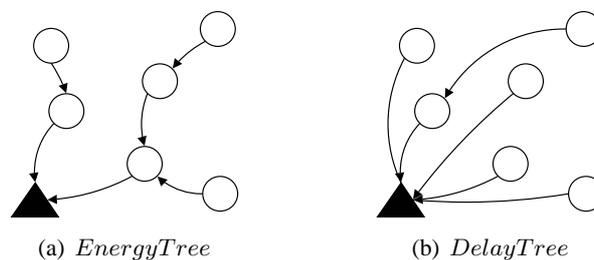


Figura 1. Árvores de escoamento usadas no roteamento.

4. Resultados de Simulação

Nesta seção dois projetos experimentais $2^k r$ são descritos. O primeiro projeto, descrito na Seção 4.1, é chamado de Projeto Densidade- α e mede o impacto da variação da densidade das redes e do expoente de perda do meio α . O segundo projeto, descrito na Seção 4.2, é chamado de Projeto Δ Densidade- λ e mede o impacto da diferença entre as densidades

e as taxas de coleta de dados das redes para cada um dos algoritmos implementados, o *EnergyTree* e o *DelayTree*. Além disso, na Seção 4.3 são realizados projetos simples em função dos resultados do Projeto Densidade- α e do Projeto Δ Densidade- λ .

Todas as simulações foram feitas no simulador *Network Simulator 2.31* [ns2 2002]. Além disso, foi considerado que os nós sensores são depositados aleatoriamente, formando uma topologia plana em um campo de sensoriamento de $40 \times 20 d^2$ para o Projeto Densidade- α e $35 \times 35 d^2$ para as demais simulações. O nó sensor tem raio de comunicação de $5 d$ e conhece a sua localização. O nó monitor é compartilhado pelas duas redes, é localizado no centro da topologia, não possui restrições de energia e conhece a localização de todos os nós sensores da rede. Durante os 1000 segundos de simulação, os eventos são gerados segundo uma distribuição de Poisson com $\lambda_{Poisson} = 0,3$ eventos por segundo, assim como descrito em [Ross 1996], sendo detectados uma única vez por um único nó. Todos os resultados de simulação correspondem à média aritmética de r simulações, em que r foi escolhido tal que o desvio padrão máximo observado seja inferior a 5% da média [Jain 1991].

4.1. Projeto Densidade- α

O projeto desta seção teve como motivação os resultados obtidos em [Felegyhazi et al. 2005]. O algoritmo proposto nesse trabalho, que é o único que trata do problema da cooperação apenas no roteamento em diferentes RSSFs, não obteve resultados satisfatórios à medida que a densidade das redes aumenta e que o α diminui. Foi constatado, por exemplo, que o algoritmo proposto não é capaz de fazer as redes cooperarem quando o α é 2 e quando o número de nós das redes é 50, numa topologia de $40 \times 20 d^2$.

Devido a isso, o Projeto Densidade- α avalia se, apesar dos resultados de [Felegyhazi et al. 2005], duas RSSFs obtêm benefícios com a cooperação quando as densidades das redes e o α são variados. Assim, os valores de $\Delta T x_i$ e $\Delta R x_i$ são calculados em função dessas variações, em r replicações, e são similares para ambas as redes, uma vez que a configuração das mesmas é idêntica, cada uma possuindo o mesmo número de nós n e ambas sobre o mesmo α . Além disso, o algoritmo de roteamento das redes é o *energyTree* e a área de sensoriamento é de $40 \times 20 d^2$, que são os mesmos parâmetros usados em [Felegyhazi et al. 2005]. O modelo para o cálculo de $\Delta T x_i$ e $\Delta R x_i$ é, então:

$$\begin{aligned} \Delta T x_i &= q_0^{Tx} + q_n^{Tx} X_n + q_\alpha^{Tx} X_\alpha + q_{\alpha n}^{Tx} X_n X_\alpha + e^{Tx} & (1) \\ \Delta R x_i &= q_0^{Rx} + q_n^{Rx} X_n + q_\alpha^{Rx} X_\alpha + q_{\alpha n}^{Rx} X_n X_\alpha + e^{Rx}, & (2) \end{aligned}$$

em que q_n^{Tx} e $q_n^{Rx} X_D$ são os coeficientes que representam, respectivamente, o efeito do número de nós n das redes sobre os valores médios q_0^{Tx} e q_0^{Rx} . Os coeficientes q_α^{Tx} e q_α^{Rx} , por sua vez, são os coeficientes que representam o efeito do α em q_0^{Tx} e q_0^{Rx} . Os coeficientes $q_{\alpha n}^{Tx}$ e $q_{\alpha n}^{Rx}$ são os coeficientes que representam o efeito da interação entre os dois fatores em q_0^{Tx} e q_0^{Rx} . As constantes e^{Tx} e e^{Rx} são os erros experimentais dos modelos. X_n e X_α são, respectivamente, variáveis categóricas que assumem valores -1 e 1 para indicar o nível dos fatores n e α , que são descritos na tabela 4.1.

A tabela 4.1, que foi feita nos moldes das tabelas de resultados de projetos fatoriais descritas em [Jain 1991], descreve os resultados do Projeto Densidade- α . Cada linha mostra os valores médios de $\Delta T x_i$, que está em função de C_{Tx} e $\Delta R x_i$, que está em

Tabela 1. Configuração das redes a partir de X_n e X_α .

X_n, X_α	n	α
-1	50	2
1	200	4

função de C_{Rx} , obtidos de r simulações para cada configuração definida pelos níveis de n e α , dados por X_n e X_α , respectivamente. A linha q^{Tx} (q^{Rx}) apresenta o efeito de cada fator sobre os valores médios de ΔTx_i (ΔRx_i), enquanto a linha $\%q^{Tx}$ ($\%q^{Rx}$) representa a porcentagem da variação dos dados explicada por cada fator, indicando, então, o impacto dos mesmos nos valores de ΔTx_i e ΔRx_i . A coluna $X_n X_\alpha$ apresenta os resultados para a interação entre os dois fatores.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos no Projeto Densidade- α .

I (média)	X_n	X_α	$X_n X_\alpha$	ΔTx_i	ΔRx_i
1	-1	-1	1	$6,94 \times 10^2$	$-5,59 \times 10^2$
1	-1	1	-1	$4,42 \times 10^7$	$-7,51 \times 10^2$
1	1	-1	-1	$3,67 \times 10^3$	$-1,18 \times 10^3$
1	1	1	1	$5,76 \times 10^6$	$-1,83 \times 10^3$
12,5	-9,61	1,25	-9,61	$q^{Tx} (\times 10^6)$	-
-	24%	40%	24%	$\%q^{Tx}$	-
-10,8	-4,25	-2,11	-1,15	-	$q^{Rx} (\times 10^2)$
-	40%	10%	3%	-	$\%q^{Rx}$

Pode-se observar que ao mesmo tempo que a cooperação resultou em valores positivos para ΔTx_i , ela resultou em valores negativos para ΔRx_i , como esperado. Nota-se também que o coeficiente q_n^{Tx} é negativo, indicando que o benefício em transmissões com a cooperação diminui quando a densidade das duas redes aumenta. Isso acontece porque quanto menor é a densidade das redes, maiores são as distâncias entre os nós e maiores são os benefícios de aumentar o número de saltos que uma mensagem trafega. Isso também pode ser comprovado pela alta porcentagem explicada pelo coeficiente $q_{\alpha n}^{Tx}$, de 23%, indicando que a diminuição da densidade e o aumento do valor de α em conjunto implica em um maior ganho com a cooperação. Em relação à métrica ΔRx_i , além do fato de que ela é negativa para todas as configurações, pode-se notar também que o coeficiente q_0^{Rx} é uma ordem de grandeza maior que os demais coeficientes. Isso indica que a cooperação por si só, independentemente do valor de n e α , já induz a um aumento significativo na quantidade de recepções, o que explica também o alto valor da porcentagem da variação explicada por e^{Rx} , que é $100\% - 53\% = 47\%$. O único fator que influi significativamente na média é n , pois o aumento da densidade da rede aumenta também o número de saltos possíveis que uma mensagem pode trafegar.

Uma conclusão interessante a partir dos resultados deste projeto é relativo à razão C_{Tx}/C_{Rx} . Na situação que a diferença entre ΔRx_i e ΔTx_i é a menor, a razão C_{Tx}/C_{Rx} deve ser maior que 0,8 para que ΔE_i seja maior que 0, ou seja, para que a cooperação seja benéfica. Isso mostra que, apesar dos resultados de [Felegyhazi et al. 2005], que o algoritmo proposto não atinge estados de cooperação quando $n = 50$ e $\alpha = 2$, há muito a se explorar no problema da cooperação entre diferentes RSSFs.

A partir do Projeto Densidade- α concluiu-se que a densidade das redes, o ex-

poente de perda do meio e a interação dos dois influi significativamente em ΔTx . Em relação à ΔRx , concluiu-se que apenas a densidade apresenta um impacto significativo, mas que ainda assim é menor que o impacto relativo aos erros experimentais. Isso leva à necessidade de novos experimentos, de forma que o impacto das densidades das redes seja avaliado separadamente para diferentes valores do expoente de perda do meio, uma vez que a interação dos mesmos é alta. Espera-se que esses experimentos expliquem precisamente o alto valor da porcentagem da variação explicada por e^{Rx} em ΔRx . Esses experimentos são descritos na Seção 4.3.

4.2. Projeto Δ Densidade- λ

O projeto da seção anterior considera que as configurações das duas redes são idênticas, o que faz com que a cooperação raramente não seja benéfica. Nesta seção é descrito o Projeto Δ Densidade- λ , que visa avaliar o impacto dos fatores em ΔTx e ΔRx quando as configurações das redes são diferentes. Os fatores deste projeto serão a razão entre as densidades das redes δ , a razão entre as taxas de coleta de dados das redes λ e o algoritmo de roteamento que ambas usam, *energyTree* e *delayTree*.

A fim de capturar o impacto relativo às diferenças entre duas redes, apenas uma das duas terá a sua configuração variada. A rede que não terá a sua configuração variada será, por definição, a rede 1 e a rede que terá sua configuração variada será a rede 2. Assim, os fatores serão responsáveis por alterar a configuração da rede 2 a fim de prejudicar o benefício que a rede 1 terá com a cooperação. Quando δ é 0,5, a rede 2 tem a metade dos nós sensores da rede 1 e quando λ é 2, a rede 2 coleta dados a uma taxa duas vezes maior que a rede 1. A partir disso, pode-se avaliar o impacto de cada fator no estabelecimento da cooperação, mostrando em quais configurações e em quanto uma rede pode ganhar ou perder encaminhando mensagens advindas de nós sensores de outra rede de diferente configuração. O modelo que descreve ΔTx_1 e ΔRx_1 para o projeto experimental desta seção é análogo ao da seção anterior. A tabela 4.2 descreve os valores que os fatores δ , λ e algoritmo de roteamento podem ter.

Tabela 3. Configuração das redes a partir de X_δ, X_λ, X_R .

X_δ, X_λ, X_R	δn	$\delta \lambda$	Algoritmo de Roteamento
-1	0,5	2	<i>DelayTree</i>
1	1	1	<i>EnergyTree</i>

A partir desse projeto, foi verificado que os três fatores considerados são igualmente significativos, e que quando a rede 2 tem a sua densidade reduzida e/ou a sua taxa de coleta de dados aumentada, o valor de ΔTx_1 diminui, como era esperado. Além disso, verificou-se que apesar do uso do algoritmo *delayTree* diminuir o valor de ΔTx_1 , quando as densidades e as taxas de coleta de dados são iguais entre as redes, esse algoritmo apresenta o maior valor para ΔE_1 nos resultados deste projeto, com a rede 1 economizando até mesmo no consumo com recepções, indicando que é vantagem cooperar independente da razão C_{Tx}/C_{Rx} . Em relação a variação de ΔRx_1 , verificou-se que a rede 1 sempre consumiu mais energia com recepções quando os seus nós sensores estão cooperando e encaminhando mensagens da rede 2, exceto quando o algoritmo usado por elas é o *delayTree* e as suas densidades e taxas de coleta de dados são as mesmas. O algoritmo, inclusive, é o fator de maior impacto no consumo de energia com recepções, indicando que esse deve ser cuidadosamente considerado no desenvolvimento de protocolos de cooperação entre

diferentes RSSFs. O valor do parâmetro δ também tem um impacto significativo no valor de ΔRx_1 , pois à medida que a densidade da rede 2 diminui, mais nós sensores da rede 1 têm que rotear mensagens da rede 2. Por fim, exceto no caso em que as densidades e as taxas de coleta de dados das duas redes são iguais, o valor de ΔE_1 é sempre negativo, indicando que a rede sempre perde com a cooperação, independente da razão C_{Tx}/C_{Rx} .

A partir do Projeto Δ Densidade- λ pode-se concluir que os fatores δ , λ e algoritmo de roteamento são significativos na variação do valor de ΔTx . Em relação à ΔRx , apenas o algoritmo de roteamento e o fator δ foram significativos. Um ponto comum nas duas métricas é que, da maneira que foram projetadas as simulações, a interação dos fatores não foi significativa, fazendo com que eles possam ser avaliados individualmente e, a partir disso, possa ser quantificado o ganho ou perda que cada um dos fatores implica em ΔTx e ΔRx . Os resultados dessa avaliação serão descritos na próxima seção.

4.3. Avaliação Individual dos Parâmetros

Uma vez visto que diferentes densidades δ e taxas de coleta de dados λ entre as RSSFs, assim como o algoritmo de roteamento e o expoente de perda do meio α , influenciam significativamente no estabelecimento da cooperação, é necessário avaliar o comportamento de cada um desses fatores individualmente. Como a interação dos fatores com o algoritmo de roteamento e com o valor de α foram as mais significativas nos projetos fatoriais, os mesmos serão tratados separadamente. Assim, nesta seção, os resultados de simulação exibem o comportamento da economia de energia em transmissões e em recepções para os dois algoritmos de roteamento implementados, *energyTree* e *delayTree*, cada qual com dois valores de α , 2 e 4. Serão avaliadas as economias percentuais de energia em transmissões e recepções a partir dos valores medidos de ΔTx_1 e ΔRx_1 que descrevem, respectivamente, o quanto a rede 1 ganhou ou perdeu com a cooperação no seu consumo com transmissões e recepções de mensagens. As linhas verticais nos pontos dos gráficos desta seção representam, para cada valor, um intervalo de confiança de 95%.

As figuras 2-a e 2-b ilustram, respectivamente, o impacto da variação da densidade das duas redes no valor de ΔTx_1 e ΔRx_1 , assim como foi feito no Projeto Densidade- α . Pode-se observar que o α só impacta, e de forma constante, em ΔTx_1 , e somente quando o algoritmo é o *energyTree*. Nas demais situações, como os intervalos de confiança se sobrepõem, o impacto do α pode ser considerado nulo. Pode-se notar também que o impacto do número de nós na economia da energia, tanto em ΔTx_1 quanto em ΔRx_1 , pode ser considerado não significativo se comparado ao impacto do algoritmo, com o *energyTree* economizando significativamente mais com transmissões e o *delayTree* com recepções. Além disso, enquanto os benefícios com a cooperação do *delayTree* são mais constantes, sendo pouco maiores que 0%, os benefícios com a cooperação do *energyTree* podem variar significativamente, podendo chegar a 60% de economia em transmissões e a 60% de perda em recepções. Isso é mais uma comprovação que o algoritmo de roteamento é crucial no desenvolvimento de protocolos de cooperação entre RSSFs. Isso explica também o alto valor da porcentagem da variação explicada por e^{Rx} no Projeto Densidade- α .

Assim como feito no Projeto Δ Densidade- λ , nos resultados seguintes a rede 1 mantém a sua configuração fixa e a rede 2 tem a sua configuração variada. O fator δ e o fator λ implicam, respectivamente, no percentual que a densidade e a taxa de coleta de dados da rede 2 é diferente da rede 1. As figuras 3-a e 3-b ilustram, respectivamente, o impacto do fator δ nos valores de ΔTx_1 e ΔRx_1 . Pode-se observar que o valor de

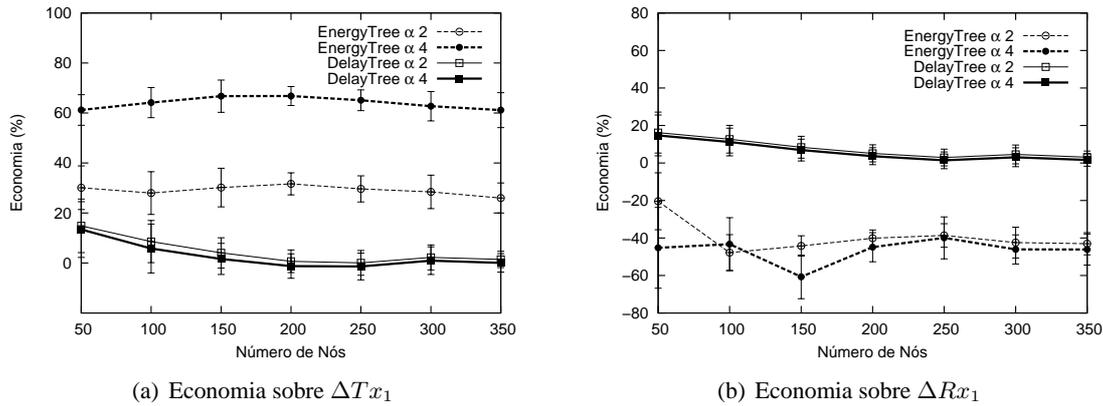


Figura 2. Percentual da economia de energia atingida a partir da variação de n .

α não impacta na economia de energia quando o algoritmo utilizado é o *delayTree* e impacta significativamente quando o algoritmo utilizado é o *energyTree*. Isso acontece porque, enquanto o algoritmo *delayTree* não leva em consideração o consumo de energia na geração da árvore de escoamento, o algoritmo *energyTree* considera, sendo esse influenciado pelo valor de α . Entretanto, como os intervalos de confiança se sobrepõem, o valor de $\Delta R x_1$ é similar nos algoritmo de roteamento para os dois valores de α , pois apesar do α influenciar nas rotas, o número de saltos que a mensagem trafega é similar.

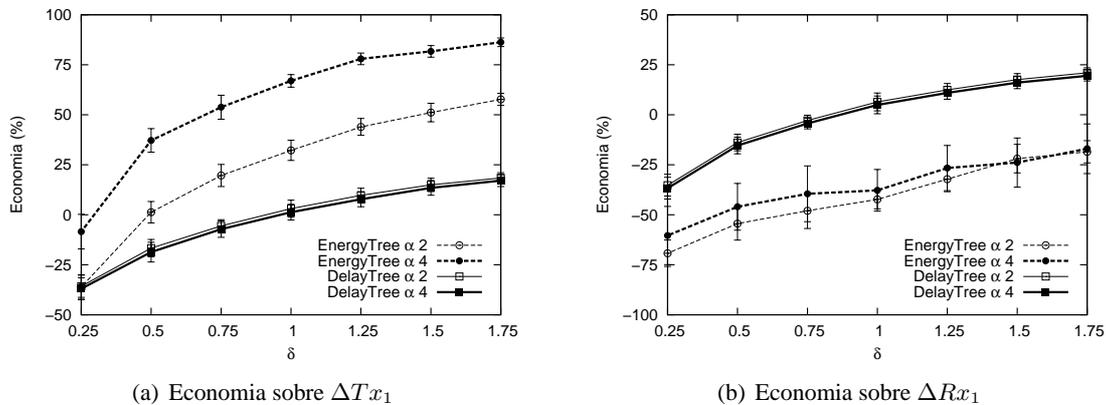


Figura 3. Percentual da economia de energia atingida a partir da variação de δ .

É importante ressaltar também que quando o algoritmo de roteamento utilizado é o *delayTree*, a rede 1 economiza energia em transmissões com a cooperação somente depois que o valor de δ é maior ou igual a 1, e ainda assim, de forma não significativa levando em consideração o alto valor de δ . Por outro lado, quando o algoritmo utilizado é o *energyTree*, a rede 1 economiza energia em transmissões com a cooperação mesmo quando o valor de δ é menor que 1. Quando o valor de α é 4, a rede 1 consegue economizar energia em transmissões até mesmo quando a densidade da rede 2 é um terço da sua, podendo ainda chegar a uma economia de 80% quando a densidade da rede 2 é 75% maior que a sua. Em contrapartida, o algoritmo *energyTree* sempre faz com que a rede 1 consuma mais com recepções de mensagens, pois o simples fato de estabelecer a cooperação aumenta a densidade da rede e, por conseguinte, aumenta o número de saltos que as mensagens trafegam, aumentando o número de recepções. No entanto, o algoritmo

delayTree é capaz de fazer com que a rede 1 até economize energia com recepções, no caso do valor de δ ser maior ou igual a 1. Por fim, é importante ressaltar que o crescimento das curvas ilustradas na figura 3 se assemelha a um crescimento logarítmico.

As figuras 4-a e 4-b ilustram, respectivamente, o impacto do fator λ nos valores de ΔT_{x_1} e ΔR_{x_1} . Pode-se notar que o valor de α não impacta no valor de ΔR_{x_1} , pois o valor de α não influencia no número de saltos que uma mensagem trafega na rede quando o número de eventos das redes é modificado. Além disso, nota-se também que o valor de α não impacta no valor de ΔT_{x_1} para o *delayTree*, pois esse algoritmo não considera o valor da energia consumida nas transmissões na geração da sua árvore de escoamento. Uma observação importante sobre o *delayTree* é que o valor de $\lambda = 1$ delimita valores de λ para os quais a rede 1 economiza e não economiza energia em transmissões com a cooperação. Quando o algoritmo de roteamento é o *energyTree*, a rede 2 pode ter uma taxa de coleta de dados duas vezes maior quando $\alpha = 2$ e três vezes maior quando $\alpha = 4$, que ainda assim a rede 1 economiza energia em transmissões com a cooperação. Em relação à economia de energia em recepções, novamente o valor de $\lambda = 1$ divide valores de λ para os quais a rede 1 economiza e não economiza energia quando usa o algoritmo *delayTree*. Por sua vez, o algoritmo *energyTree* só economiza energia em recepções quando λ é próximo de 0, ou seja, quando a taxa de coleta de dados da rede 2 não é significativa, mostrando que a cooperação tem um impacto relevante no aumento do consumo de energia em recepções para esse algoritmo. Por fim, é importante ressaltar que as curvas ilustradas na figura 4 apresentam variação linear em relação ao valor de λ .

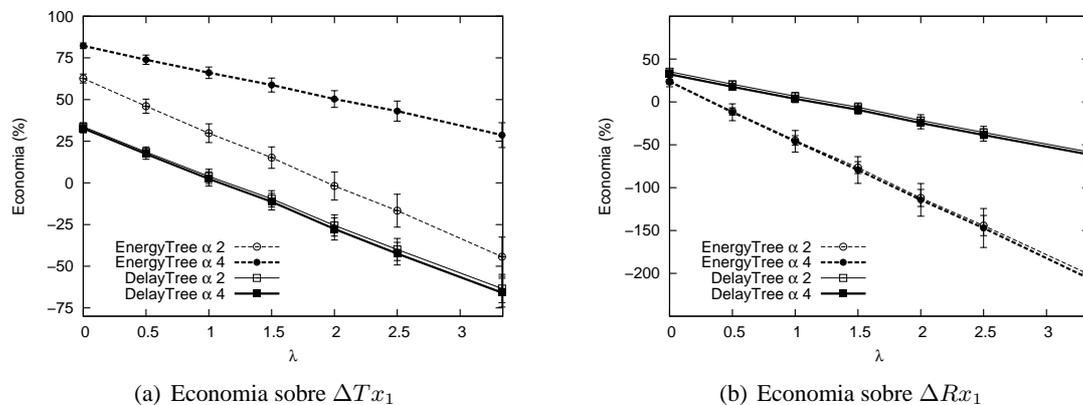


Figura 4. Percentual da economia de energia atingida a partir da variação de λ .

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho é um estudo quantitativo e metódico do problema da cooperação entre diferentes RSSFs depositadas em um mesmo local. Teoricamente, quando diferentes RSSFs estão depositadas em um mesmo local e essas cooperam fazendo os seus nós sensores encaminharem mensagens advindas de outras redes, todas as redes obtêm benefícios, pois a distância média das transmissões diminui e com ela o consumo de energia com as mesmas. Mas isso nem sempre é verdade, pois dependendo da configuração de cada rede, a cooperação pode não ser benéfica a todas, podendo fazer, então, que ela não aconteça.

Resultados de simulação presentes neste trabalho revelaram o impacto de diversos parâmetros no estabelecimento da cooperação entre diferentes RSSFs. Foi constatado que

a cooperação entre RSSFs com diferentes densidades e taxas de coleta de dados pode não ser benéfica a todas elas, dependendo do valor desses fatores. Além disso, foi mostrado que o algoritmo de roteamento pode influir significativamente no benefício da cooperação, devendo então ser considerado relevante no projeto de um protocolo para fazer com que diferentes RSSFs cooperem.

Como trabalhos futuros, planeja-se verificar o impacto dos parâmetros que foram fixados neste trabalho e, além disso, verificar se nós monitores localizados em posições diferentes podem influenciar na cooperação. Além disso, pretende-se desenvolver um modelo teórico que seja capaz de dizer precisamente quando duas RSSFs vão ganhar com a cooperação e quando não vão. Por fim, planeja-se desenvolver um protocolo distribuído que permita o estabelecimento da cooperação entre diferentes RSSFs a partir unicamente da interação entre os nós sensores das mesmas, sem o uso de um controle central ou contratos monetários de cooperação entre os proprietários das redes.

Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Al-Karaki, J. N. and Kamal, A. E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communication*, 11(6):6–28.
- Cigdem Sengul, A. F. H. I. and Kravets, R. (2007). Reconsidering power-management. In *IEEE Broadnets (Wireless Communications, Networks and Systems Symposium)*.
- de Araujo, R. B. (2003). Computação ubíqua: Princípios, tecnologias e desafios. In *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, Natal, RN, Brasil.
- Felegyhazi, M., Buttyan, L., and Hubaux, J. P. (2005). Cooperative packet forwarding in multi-domain sensor networks. In *Proceedings of IEEE PerSeNS 2005*, Hawaii, USA.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling*. John Wiley.
- Miller, D. A., Tilak, S., and Fountain, T. (2005). "token" equilibria in sensor networks with multiple sponsors. In *CollaborateCom*. IEEE.
- ns2 (2002). The network simulator. www.isi.edu/nsnam/ns.
- Pottie, G. and Kaiser, W. (2000). Embedding the internet wireless integrated network sensors. In *Communications of the ACM*, volume 43, pages 51–58.
- Ross, S. M. (1996). *Simulation (Statistical Modeling and Decision Science)*. Academic Press, second edition.
- Tanenbaum, A. (2002). *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Tech. Reference.
- Weiser, M. (1999). The computer for the 21st century. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 3(3):3–11.
- Wieselthier, J. E., Nguyen, G. D., and Ephremides, A. (2001). Algorithms for energy-efficient multicasting in static ad hoc wireless networks. *Mob. Netw. Appl.*, 6(3).
- Ye, F., Chen, A., Lu, S., and Zhang, L. (2001). A scalable solution to minimum cost forwarding in large scale sensor networks. In *The Tenth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, Scottsdale, AZ.