

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

RAFAEL LADISLAU ALVES

**PORT - PERSISTÊNCIA DE TABELAS DE
ROTEAMENTO EM REDES EM MALHA SEM FIO
COM CICLOS DE OPERAÇÃO**

NITERÓI

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

RAFAEL LADISLAU ALVES

**PORT - PERSISTÊNCIA DE TABELAS DE
ROTEAMENTO EM REDES EM MALHA SEM FIO
COM CICLOS DE OPERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Redes e Sistemas Distribuídos e Paralelos

Orientador:

CÉLIO VINICIUS NEVES ALBUQUERQUE

Co-orientador:

IGOR MONTEIRO MORAES

NITERÓI

2012

RAFAEL LADISLAU ALVES

PORT - PERSISTÊNCIA DE TABELAS DE ROTEAMENTO EM REDES EM
MALHA SEM FIO COM CICLOS DE OPERAÇÃO

Aprovada em Novembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Célio Vinicius Neves Albuquerque - Orientador, UFF

Prof. Igor Monteiro Moraes - Co-orientador, UFF

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, UERJ

Prof. Débora Christina Muchaluat Saade, UFF

Niterói

2012

À minha família e amigos.

Agradecimentos

A Deus, que me possibilita fazer todas as coisas.

Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram e me deram todo o apoio para que eu pudesse chegar a esta etapa da minha vida.

Aos professores e orientadores Célio Vinicius Neves Albuquerque e Igor Monteiro Moraes, por todo conhecimento, conselhos e tempo dedicados a mim.

A UFF - Universidade Federal Fluminense, em especial o Laboratório MídiaCom, pelo oportunidade que me foi concedida de poder estudar e extrair conhecimento para este trabalho.

Resumo

As Redes em Malha Sem Fio Verdes utilizam fontes limpas e renováveis de energia, como a energia solar e eólica. A intermitência dessas fontes faz com que essas redes precisem economizar energia. Uma abordagem nesse sentido é definir ciclos de operação da rede, nos quais os rádios sem fio dos nós estão ligados ou desligados. Um dos problemas do uso de ciclos de operação é a manutenção das tabelas de rotas enquanto os rádios estão desligados. Assim, este trabalho propõe um mecanismo para garantir a persistência das tabelas de rotas em redes em malha sem fio que usam ciclos de operação. Testes realizados comprovaram o aumento da disponibilidade das rotas, resultando em um aumento de até 100% na vazão da rede, sem prejudicar a métrica de atraso.

Palavras-chave: rede sem fio, ad hoc, ciclo de tarefas, OLSR, economia de energia, DSDV, NTP e PORT.

Abstract

Currently, clean energy sources, such as solar and wind power, are more and more used in Wireless Mesh Networks (WMNs). Such power sources, however, are intermittent and require these networks to save energy. Duty cycling is a common approach employed by WMNs to save energy by cyclically turning on and off the wireless radios. When the radios are turned off, the node's routing table eventually expires and, when the radios turn back on, it is necessary to wait for routes to be discovered before sending data. In order to eliminate this need, this work proposes a mechanism to ensure the persistence of the routing tables in wireless mesh networks. Experiments show that PORT increases the route availability and consequently it increases up to 100% the network throughput.

Keywords: wireless networks, ad hoc, duty cycling, OLSR, energy saving, DSDV, NTP e PORT.

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma configuração de agenda.	7
3.1	Topologia da rede em malha sem fio implantada no Instituto de Computação da UFF. (Os pontos representam os nós da rede)	11
3.2	Exemplo do funcionamento dos temporizadores de envio com o PORT. . .	12
3.3	Exemplo do funcionamento dos temporizadores de controle com o PORT. .	13
4.1	Exemplo da topologia do cenário em grade (7 x 7).	17
4.2	Exemplo de funcionamento do ciclo de tarefas dos rádios nos primeiros 220 s de uma simulação.	17
4.3	Cenário utilizado nos Conjuntos II e III.	18
4.4	Cenário utilizado no Conjunto IV: rede em malha sem fio operacional na UFF.	20
4.5	Cenário utilizado no Conjunto VI - estações sem fio espalhadas pelos prédios de um campus da Microsoft.	21
5.1	Conjunto I - Gráfico da Vazão	24
5.2	Conjunto I - Gráfico do Ganho da Vazão	24
5.3	Conjunto I - Gráfico do Tempo de Convergência.	25
5.4	Conjunto I - Gráfico do Tempo de Chegada do Primeiro Pacote.	26
5.5	Conjunto I - Gráfico do Atraso.	26
5.6	Conjunto II - Gráfico do Atraso.	27
5.7	Conjunto II - Gráfico do Tempo de Convergência.	28
5.8	Conjunto II - Gráfico do Tempo de Chegada do Primeiro Pacote.	29
5.9	Conjunto II - Gráfico da Porcentagem de Intervalos Ativos.	30
5.10	Conjunto II - Gráfico da Vazão.	30

5.11	Conjunto IV - Gráfico da Vazão.	33
5.12	Conjunto IV - Gráfico da Vazão com Dessincronização.	34
5.13	Conjunto IV - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote.	34
5.14	Conjunto IV - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote com Dessincronização.	35
5.15	Conjunto IV - Gráfico do Atraso.	35
5.16	Conjunto IV - Gráfico do Atraso com Dessincronização.	36
5.17	Conjunto V - Cenário com alternância de velocidade - Gráfico do Tempo de entrega do Primeiro Pacote.	38
5.18	Conjunto V - Cenário com alternância de ciclos de tarefas - Gráfico do Tempo de entrega do Primeiro Pacote.	38
5.19	Conjunto V - Cenário com alternância de velocidade - Gráfico da Vazão.	39
5.20	Conjunto V - Cenário com alternância de ciclos de tarefas - Gráfico da Vazão.	39
5.21	Conjunto VI - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote.	40
5.22	Conjunto VI - Gráfico da Vazão	41

Lista de Tabelas

4.1	Configurações do protocolo de roteamento OLSR	22
5.1	Número médio de pacotes TC recebidos pela estação de origem	31
5.2	Resultados das simulações com os protocolos de transporte	31
5.3	Conjunto IV - Número de pacotes de controle TC recebidos pela nó fonte do fluxo de dados.	36

Lista de Abreviaturas e Siglas

PORT	:	Persistence of Routing Tables;
TC	:	Topology Control;
Kbps	:	Quilobits por segundo;
TCP	:	Transmission Control Protocol;
UDP	:	User Datagram Protocol;
OLSR	:	Optimized Link State Routing;
DSDV	:	Destination-Sequenced Distance-Vector;
NTP	:	Network Time Protocol;
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers;
CBR	:	Constant Bit Rate;
FTP	:	File Transfer Protocol.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos do Trabalho	2
1.2	Organização do Texto	3
2	Trabalhos Relacionados	4
2.1	Mecanismo de conservação de energia do padrão IEEE 802.11	4
2.2	Trabalho relacionado a ciclos de tarefas utilizando <i>block design</i>	6
2.3	Outros trabalhos relacionados a ciclos de tarefas	6
3	Mecanismo PORT - Persistência de Tabelas de Roteamento	8
3.1	Requisitos da Solução	8
3.2	Protocolo de roteamento proativo - OLSR	9
3.3	Descrição do Problema Abordado	10
3.4	Descrição do Algoritmo	11
3.5	Detalhes da Implementação	14
4	Cenários de avaliação	16
4.1	Simulações de prova de conceito	16
4.2	Simulações de avaliação de desempenho	18
4.3	Características gerais das simulações	22
5	Resultados	23
5.1	Resultados das Simulações de Prova de Conceito	23

5.1.1	Conjunto I - Topologias em Grade	23
5.1.2	Conjunto II - Diferentes Ciclos de Operação dos Rádios	26
5.1.3	Conjunto III - Protocolos de Transporte	31
5.2	Resultados das Simulações de Avaliação de Desempenho	32
5.2.1	Conjunto IV - Cenário de uma Rede em Malha Sem Fio Operacional	32
5.2.2	Conjunto V - Cenário de Rede em Malha Sem Fio com Mobilidade (ZebraNet)	37
5.2.3	Conjunto VI - Cenário de Rede em Malha Sem Fio com nós móveis (VanLan)	39
6	Conclusões	42
6.1	Trabalhos Futuros	44
	Referências	46

Capítulo 1

Introdução

O problema do aquecimento global e a crescente preocupação dos pesquisadores com a sustentabilidade faz da Computação Verde uma área de grande interesse para a comunidade acadêmica atualmente. Nesse contexto, a eficiência energética das redes de comunicação se torna cada vez mais importante. Em 2008, a energia consumida por *data centers*, PCs e equipamentos de rede representava cerca de 3% da energia consumida em todo o mundo. Para 2020, a previsão é que a energia consumida por esses equipamentos passe a representar cerca de 10% de toda a energia consumida no mundo [18]. Dois fatores explicam esse crescimento: o aumento do volume de dados transmitidos e o aumento da capacidade de redes e dispositivos.

A eficiência energética também é um desafio para as redes sem fio. Os nós da rede são comumente alimentados por baterias, seja porque são móveis ou porque a rede opera em um ambiente hostil sem possibilidade de fornecimento de energia. Baterias são componentes caros, não raro pesadas e volumosas, potencialmente tóxicas e sua capacidade não tem aumentado par e passo com a evolução de outros componentes. O consumo de energia é, portanto, um dos fatores mais impactantes na utilidade dos dispositivos móveis e deve ser minimizado.

Os projetos ReMoTe [12] e Solar-Mesh [11] implementam redes em malha sem fio, respectivamente, para prover conectividade entre as torres de uma linha de transmissão de energia e entre residências. Ambos utilizam roteadores alimentados por painéis solares. Embora isso diminua o impacto ambiental, faz surgir problemas relacionados à confiabilidade, ao desempenho e à disponibilidade da rede, uma vez que a fonte de energia que alimenta os nós é intermitente. Por exemplo, não se pode contar com a energia solar em dias nublados e à noite. Alguns nós da rede do projeto Remote chegam a ficar 40% do tempo de observação desligados em determinadas épocas do ano. Dessa maneira, a ener-

gia precisa ser economizada para que a rede possa ser utilizada mesmo nessas condições adversas.

Os rádios dos dispositivos de uma rede sem fio são os principais consumidores de energia. Testes preliminares realizados neste trabalho revelam que nos roteadores Linksys WRT54G, o rádio é responsável por 40% do consumo de energia do roteador. Sendo assim, um método eficiente para economizar energia é escalonar a operação dos rádios por determinados intervalos de tempo.

O padrão IEEE 802.11 [1] define um mecanismo de conservação de energia no qual os nós de uma rede desligam seus rádios por pequenos intervalos de tempo. Esse método não é eficiente em redes em malha sem fio com múltiplos saltos porque surgem problemas como o aumento do tempo de entrega dos pacotes [21].

Zheng *et al.* definem um método para economizar energia no qual os nós possuem uma agenda que determina quando eles devem manter os seus rádios ligados ou desligados [23]. Esses métodos são baseados em ciclos de operação (*duty cycling*), onde as estações sem fio alternam entre o modo ativo e o modo de conservação de energia em intervalos de tempo.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade da utilização de protocolos de roteamento proativos, como o OLSR [9] e o DSDV [17], em redes em malha sem fio que operam com mecanismos de ciclos de operação para economizar energia. Nessas redes, basicamente, os nós alternam entre o modo ativo com o rádio ligado e o modo de conservação de energia, com o rádio desligado, em diferentes intervalos de tempo. Um dos principais desafios para os protocolos proativos nesse cenário é a persistência das tabelas de roteamento. As tabelas são atualizadas por meio de trocas de mensagens de controle entre os nós da rede. Quando as mensagens de controle de um determinado nó param de ser recebidas, eventualmente a rota para esse nó expira e é removida da tabela. Quando os rádios são desligados, essas mensagens de controle param de trafegar pela rede e, conseqüentemente, as tabelas de rotas são “esvaziadas”. Para ilustrar esse problema, testes foram realizados em uma rede em malha sem fio experimental com 13 nós e com número máximo de saltos igual a 7. Os nós da rede foram programados para desligar de forma síncrona o rádio por 5 minutos, tempo suficiente para que as tabelas de rotas fossem esvaziadas. Quando os rádios foram religados, os nós das extremidades da rede precisaram, em média, de 16 s para trocar pacotes com sucesso. Os rádios são mantidos desligados por 5 minutos porque

o tempo de validade das informações obtidas através dos pacotes de controle dessa rede pode ser de até 4 minutos. Como a rede experimental era uma rede em malha sem fio cujos nós são posicionados estaticamente, esse tempo de validade se justifica porque as condições dos enlaces mudam a uma taxa pequena em comparação às redes *ad hoc*, por exemplo.

Para evitar esse problema, este trabalho propõe o mecanismo PORT (*Persistence of Routing Tables*) [4, 3]. Esse mecanismo é responsável por manter as tabelas de rotas dos nós quando esses estão no modo de conservação de energia. Os temporizadores, que verificam o tempo de expiração das rotas, são programados para não contabilizarem o tempo enquanto as estações sem fio estiverem com os rádios desligados. Dessa maneira, quando os rádios são religados, o nó possui a mesma tabela de rotas do instante em que iniciou-se a conservação de energia. O objetivo é fazer com que tão logo os nós entrem no modo ativo, eles possam trocar pacotes com sucesso.

O mecanismo PORT - *Persistence of Routing Tables* é avaliado através de simulações em cenários com diferentes número de nós, diferentes ciclos de tarefa, diferentes protocolos de transporte (TCP[20] e UDP[19]), diferentes níveis de sincronismo e diferentes padrões de mobilidade. Nos cenários avaliados, o mecanismo aumenta a vazão e diminui o tempo de entrega do primeiro pacote depois do religamento dos rádios.

1.2 Organização do Texto

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta as principais técnicas relacionadas a conservação de energia em redes em malha sem fio. O Capítulo 3 detalha o funcionamento de protocolos de roteamento proativos e introduz o mecanismo PORT. O Capítulo 4 descreve os cenários usados nas simulações. O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados das simulações. Finalmente, no último capítulo, é apresentada a conclusão e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

A conservação de energia é o foco de muitos trabalhos na área de redes sem fio. Muitos desses trabalhos consideram o uso de ciclos de operação da rede (*duty cycling*)[1, 23, 7].

A proposta deste trabalho soluciona o problema da utilização de protocolos de roteamento proativos em redes em malha sem fio com múltiplos saltos e com ciclo de tarefas. Deste modo, nas próximas seções serão apresentados trabalhos que têm como objetivo a conservação de energia em redes em malha sem fio com múltiplos saltos utilizando técnicas de ciclo de tarefas.

2.1 Mecanismo de conservação de energia do padrão IEEE 802.11

O próprio padrão IEEE 802.11 propõe um mecanismo de conservação de energia baseado em ciclos de operação, chamado de *Power Save Mechanism* (PSM) [1]. Esse mecanismo atua na camada de enlace e permite que os nós de uma rede sem fio entrem no modo de conservação de energia quando não estão envolvidos em uma transmissão de dados. No modo de conservação de energia definido pelo PSM, os rádios dos nós são desligados.

O funcionamento do PSM é diferente dependendo do modo de operação da rede sem fio. Existem dois modos de operação: o modo infraestruturado e o modo *ad hoc*. Uma rede opera no modo infraestruturado quando os nós da rede se comunicam somente por meio de uma estação base central, normalmente denominada ponto de acesso. Mesmo que dois nós estejam a uma distância que permita uma comunicação direta entre eles, a comunicação será feita somente com os quadros de dados passando primeiramente pela estação base. Uma rede opera no modo *ad hoc* quando não existe a figura da estação

central. A comunicação entre dois nós da rede é feita sem o intermédio da estação base. Sendo assim, o funcionamento do PSM no modo infraestruturado, onde os nós sem fio estão associados a um ponto de acesso, mantém uma lista com todos os nós que estão no modo de conservação de energia em um dado instante e armazena em um *buffer* os pacotes endereçados a esses nós. A cada intervalo de envio de *beacons*, todos os nós saem do modo de conservação de energia. O ponto de acesso anuncia quais estações devem permanecer ativas para receber pacotes. Os pacotes que estavam no *buffer* são entregues aos seus destinatários.

No modo *ad hoc*, no qual não existe o ponto de acesso central, todas as estações enviam *beacons* em intervalos regulares de tempo. Cada intervalo de *beacons* é seguido por uma janela de tempo denominada ATIM (*Ad Hoc Traffic Indication Message*) e pela fase de transmissão de dados. A janela ATIM é um período de tempo no qual todos os nós da rede devem estar ativos. Nesse período, mensagens ATIM são trocadas para que os nós, que tenham pacotes a serem encaminhados, anunciem o tráfego para os destinatários dos pacotes. No final da janela ATIM, os nós que não estiverem associados a nenhum tráfego da rede podem entrar no modo de conservação de energia. A troca de pacotes acontece na fase de transmissão de dados.

O mecanismo de conservação de energia do padrão IEEE 802.11 foi proposto, principalmente, para redes com um único salto e que trabalham em modo infraestruturado. Dessa forma, o mecanismo é pouco eficiente em redes em malha sem fio com múltiplos saltos [21, 8]. O primeiro motivo para o mecanismo ser pouco eficiente em redes com múltiplos saltos é a necessidade de um quadro esperar pela janela ATIM, para que só depois de sua existência ser anunciada para o destino, ele ser transmitido. Essa necessidade faz com que o atraso fim-a-fim de um quadro cresça consideravelmente a cada salto a mais que exista em sua rota para o destino, podendo fazer com que o atraso atinja valores muito altos e impraticáveis.

Outro fato que torna o mecanismo pouco eficiente em rede em malha sem fio com múltiplos saltos é o problema de sincronização dos intervalos de *beacon*. Eles devem iniciar e terminar aproximadamente ao mesmo tempo em todos os nós, de modo que essa sincronização pode ser de implementação complexa e apresentar resultados inesperados, além de necessitar de hardware que suporte o modo PSM para a eficaz redução de consumo de energia.

2.2 Trabalho relacionado a ciclos de tarefas utilizando *block design*

Zheng *et al.* utilizam o conceito de *block design* para definir as agendas de operação dos nós [23]. Nessa proposta, os nós da rede também devem se manter ligados em determinados intervalos de *beacons*. Os intervalos de *beacons* nos quais os nós devem se manter ligados dependem de uma agenda que segue um padrão cíclico. Cada ciclo ou agenda programa um padrão de ligamento e desligamento para os intervalos de *beacons* que constituem o ciclo. Depois de executados todos os intervalos de *beacons* do ciclo, o ciclo se repete.

Essa agenda é seguida por todas as estações sem fio de maneira que, mesmo as estações não estando sincronizadas, a cada ciclo, duas estações quaisquer estarão ativas durante um mesmo intervalo de *beacons*. Para que essa afirmação seja verdadeira, o protocolo requer que os rádios permaneçam ligados por $O(\sqrt{n})$ intervalos de *beacons* por ciclo, onde n é o número de intervalos de *beacons* do ciclo.

Essa proposta é bastante eficaz em cenários onde existe baixa carga de tráfego de dados. Quanto maior o número de intervalos de *beacons* dentro do ciclo, maior a economia de energia que a proposta proporciona.

A Figura 2.1 mostra um exemplo de agenda que um nó pode utilizar com o mecanismo descrito nessa seção. A agenda apresentada possui 7 intervalos de *beacons*, onde a cada ciclo, 3 intervalos estarão com os rádios ligados e, mesmo dessincronizados, os nós coincidirão pelo menos um intervalo de *beacons* ativo. Note que todos os nós seguem a mesma agenda, mesmo que dessincronizados. A figura mostra todos os possíveis estados da agenda no tempo. É possível notar, por exemplo, que o nó A terá pelo menos um intervalo ativo com todos os outros nós da rede a cada ciclo.

2.3 Outros trabalhos relacionados a ciclos de tarefas

Christmann *et al.* propõem um mecanismo baseado no protocolo para camada de enlace em redes sem fio chamado Z[7]. O esquema CSMA/CA desse protocolo é modificado e o mecanismo utiliza um método de sincronização da rede onde a mesma é sincronizada por meio de marcos no tempo. Esses marcos acontecem em intervalos regulares. O intervalo entre esses marcos é dividido em subintervalos nos quais os nós devem estar ativos e inativos.



Figura 2.1: Exemplo de uma configuração de agenda.

Muitos trabalhos baseados em ciclos de operação estão sujeitos ao problema de expiração da tabela de rotas quando os rádios ficam inativos, seja pelo fato de o período de inatividade ser grande ou pelo fato da camada de enlace não estar ciente do período de inatividade. O objetivo desta dissertação não é apresentar um novo mecanismo de conservação de energia baseado em ciclos de operação, mas apresentar a viabilidade da utilização de protocolos de roteamento proativos em redes sem fio que empregam esses mecanismos de conservação de energia.

Este capítulo apresentou trabalhos relacionados a conservação de energia em redes em malha sem fio utilizando ciclos de operação. No próximo capítulo será descrito o mecanismo proposto PORT.

Capítulo 3

Mecanismo PORT - Persistência de Tabelas de Roteamento

Este capítulo apresenta os detalhes do mecanismo PORT [4, 3]. A definição do algoritmo e os aspectos práticos de implementação serão apresentados nas seções seguintes.

3.1 Requisitos da Solução

Este trabalho tem como objetivo apresentar um mecanismo que viabilize a utilização de protocolos de roteamento proativos em redes em malha sem fio com múltiplos saltos que usam técnicas de conservação de energia baseadas em ciclos de tarefas nos dispositivos da rede. Para atingir tal objetivo, o mecanismo deve satisfazer os seguintes requisitos:

- diminuir o tempo de aquisição de rotas quando os rádios são religados;
- aumentar a disponibilidade de rotas durante os ciclos de atividade dos rádios;
- a solução não pode permitir que o atraso de entrega dos pacotes seja prejudicado pelo uso do mecanismo.

Quando um protocolo de roteamento proativo é utilizado em uma rede em malha sem fio com múltiplos saltos, as rotas são construídas por meio de informações recolhidas dos pacotes de controle do protocolo. Essas informações possuem um tempo de validade que são renovadas a cada novo recebimento dos pacotes de controle. Quando essas informações não são mais recebidas por algum motivo, como o desligamento dos rádios dos roteadores da rede, as rotas construídas por meio dessas informações eventualmente expiram e são removidas da tabela de roteamento. O tempo para readquirir essas rotas é considerável e

causa impacto negativo no desempenho da rede. Por esse motivo é necessária a redução do tempo de aquisição de rotas quando os rádios são religados. Uma solução proposta neste trabalho se baseia na preservação das tabelas de roteamento dos roteadores da rede enquanto os rádios estão desligados por causa do ciclo de tarefa estabelecido para economizar energia.

O mecanismo é projetado para melhorar o desempenho da rede com sua utilização, sendo assim é esperado que ele aumente a vazão da mesma porque as rotas estarão disponíveis por mais tempo e que a métrica de atraso não seja prejudicada.

3.2 Protocolo de roteamento proativo - OLSR

O protocolo de roteamento proativo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [9] é um dos mais usados [12, 11] em redes em malha sem fio e, por isso, é o objeto de estudo desse trabalho. O OLSR é um protocolo de roteamento proativo, baseado em estado de enlace, desenvolvido para redes em malha sem fio com múltiplos saltos. Os protocolos de roteamento proativo mantêm localmente as informações da configuração da rede e distribuem essa informação periodicamente entre os outros nós da rede. Essas informações são usadas, em cada nó, para calcular as rotas para todos os destinos possíveis. A qualquer momento, essas rotas estarão disponíveis, fazendo com que nenhum tempo seja despendido para o descobrimento das rotas, exceto na inicialização do protocolo.

O conhecimento prévio de rotas vem com a difusão regular de informações sobre o estado da rede pelos nós. Essas informações são difundidas por meio de mensagens de controle. O protocolo OLSR possui vários tipos de mensagens de controle. As duas principais são as mensagens HELLO e TC (*Topology Control*). As mensagens HELLO são enviadas periodicamente para todos os vizinhos de um salto. Os nós utilizam essas mensagens para detectar e monitorar o estado da comunicação entre esses vizinhos. As mensagens TC inundam a rede com informações de topologia. As informações, que são obtidas a partir do recebimento dessas mensagens de controle, são armazenadas nos repositórios de informações do protocolo. Os principais repositórios de informações são: o repositório de informações sobre a vizinhança, repositório de informações sobre a topologia e o repositório de informações dos enlaces locais. Os repositórios de informações sobre vizinhança e de enlaces são povoados com informações obtidas das mensagens HELLO. Os repositórios de informações de topologia são povoados com informações obtidas das mensagens TC. A cada mensagem de controle é associado um tempo de validade e, posteriormente, quando

essas mensagens são recebidas e processadas, as informações obtidas dessas mensagens são armazenadas nos repositórios com esse tempo de validade. O tempo de validade das informações nos repositórios são atualizados quando uma nova informação é recebida por meio das mensagens de controle. Nesse caso, o tempo de validade da nova mensagem de controle será registrado para essa informação. As informações devem ser removidas dos repositórios assim que o tempo de validade expira. Periodicamente ou devido a mudanças nos repositórios, o protocolo de roteamento reconstrói a tabela de roteamento utilizando as informações armazenadas nos repositórios.

Além de diferentes mensagens de controle, o protocolo possui duas classes de temporizadores que são disparados periodicamente: os temporizadores de controle e os temporizadores de envio. Um temporizador de controle é associado a uma informação obtida por meio de uma mensagem de controle e é disparado quando o tempo de validade expira. Sendo assim, quando um temporizador de controle é disparado, o repositório onde essa informação está armazenada é atualizado e essa informação é removida do mesmo. Esse evento de atualização do repositório faz com que as tabelas de rotas sejam recalculadas, desconsiderando a informação que acabou de expirar. Para cada mensagem de controle enviada, um nó também dispara um temporizador no instante de envio da mensagem. Esse temporizador serve para definir o intervalo entre o envio de mensagens de controle. Cada tipo de mensagem de controle possui o seu temporizador de envio. Dessa maneira, cada tipo de mensagem de controle pode ser configurado para ser enviado em intervalos de tempo diferentes.

3.3 Descrição do Problema Abordado

Em redes em malha sem fio que operam com mecanismos de ciclos de operação para economizar energia, o uso de protocolos de roteamento proativos introduz um novo desafio: a manutenção das tabelas de rota durante a alternância dos ciclos de operação. Nessas redes, os nós alternam entre o modo ativo e o modo de conservação de energia, no qual o rádio de um nó é desligado. No caso do OLSR, como visto anteriormente, as tabelas de roteamento são atualizadas por meio de trocas de mensagens de controle entre os nós da rede. Quando as mensagens de controle de um determinado nó não são mais recebidas, a rota para esse nó é removida da tabela. Sempre que o rádio de um nó é desligado, esse nó deixa de enviar tais mensagens para os demais nós da rede. Consequentemente, a rota para tal nó pode ser removida pelos demais nós. Da mesma forma, quando o rádio de um nó está desligado, esse nó deixa de receber mensagens de controle dos demais nós da

rede. Se o tempo de desligamento for maior do que o dos temporizadores de controle, sua tabela de rotas será esvaziada.

Para ilustrar esse problema, testes foram realizados em uma rede em malha sem fio experimental com 13 nós e com número máximo de saltos igual a 7, como pode ser visto na Figura 3.1. Essa rede está situada no andar do Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense e foi implantada por alunos do Laboratório MídiaCom. As estações sem fio tiveram seus relógios sincronizados por meio de uma implementação do protocolo NTP[14] e foram programadas para desligar, sincronizadamente, o rádio por 5 minutos, tempo suficiente para que as tabelas de roteamento fossem esvaziadas. Quando os rádios foram religados, os nós das extremidades da rede precisaram, em média, de 16 s para trocar pacotes com sucesso.

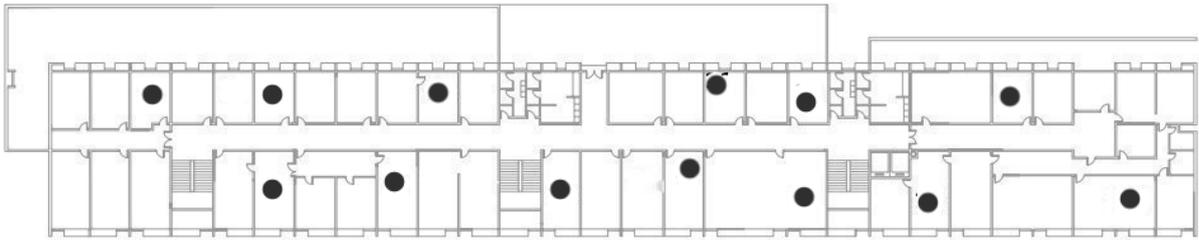


Figura 3.1: Topologia da rede em malha sem fio implantada no Instituto de Computação da UFF. (Os pontos representam os nós da rede)

3.4 Descrição do Algoritmo

Como solução para o problema da expiração de tabelas de roteamento em redes em malha sem fio operando com ciclos de operação, este trabalho propõe o mecanismo PORT que aplica a técnica de persistência de tabelas de roteamento em protocolos proativos. A grande maioria das redes em malha sem fio experimentais e de produção usam protocolos de roteamento proativos [12, 5, 10].

O objetivo do mecanismo proposto PORT (*Persistence of Routing Tables*) é garantir a persistência das tabelas de roteamento de protocolos proativos em redes em malha sem fio verdes, ou seja, que operam com mecanismos de ciclo de operação. A ideia-chave do mecanismo é modificar o funcionamento dos temporizadores do protocolo de roteamento para assegurar a existência de rotas nas tabelas dos nós tão logo tais nós tenham seus rádios religados. O PORT se aproveita do fato de que o desligamento dos rádios é um evento agendado. Sabe-se portanto quando o rádio é desligado e quando ele será religado.

Assim, durante esse intervalo de tempo, os temporizadores do protocolo de roteamento não são disparados. Os temporizadores são reagendados para um instante posterior ao religamento do rádio.

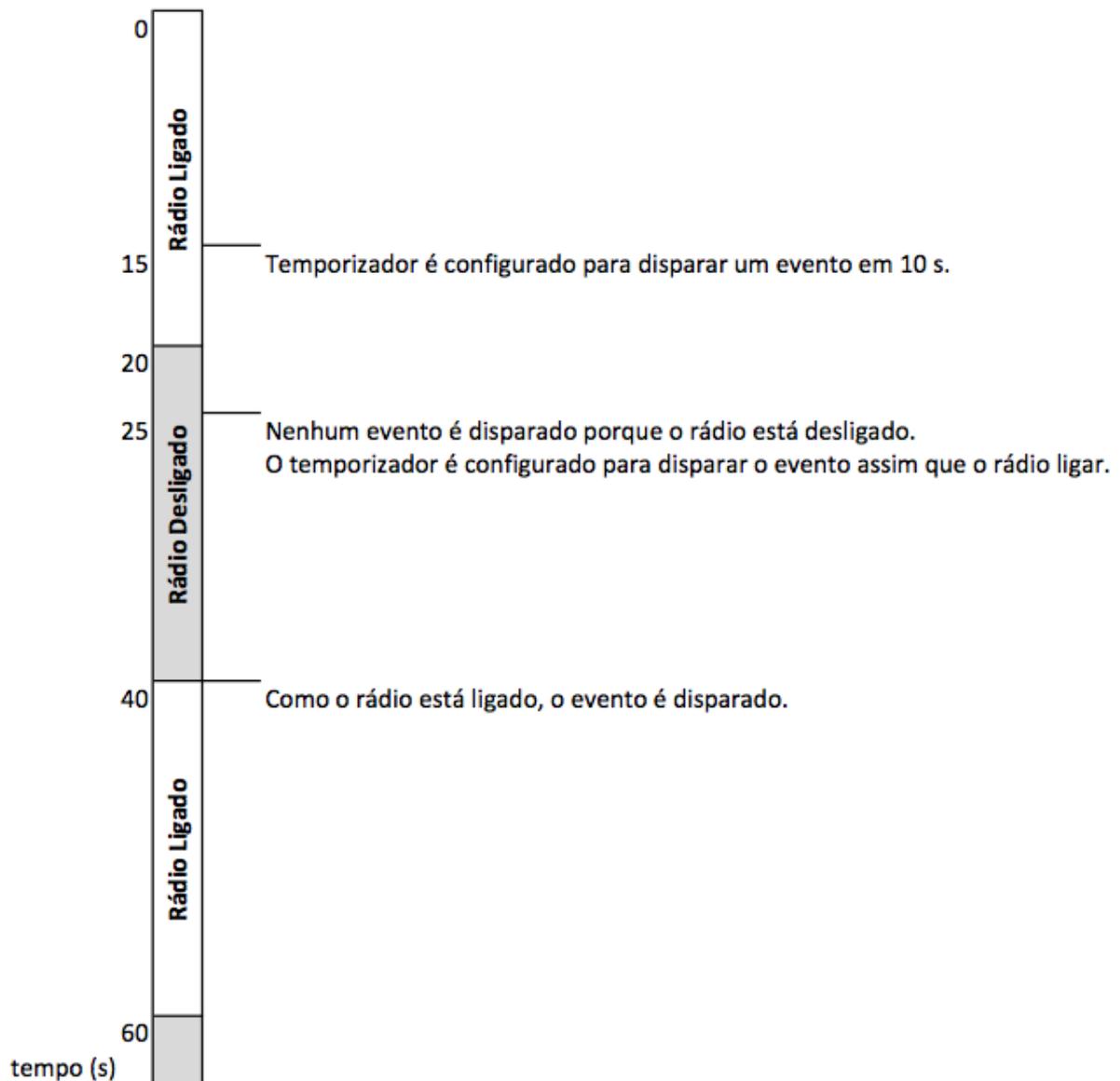


Figura 3.2: Exemplo do funcionamento dos temporizadores de envio com o PORT.

O mecanismo PORT introduz um método para fazer o reagendamento dos temporizadores do protocolo OLSR, chamado de para-e-reinicia. Nesse método, como pode ser visto na Figura 3.2, os temporizadores de envio que são disparados enquanto o rádio está desligado, não são executados efetivamente, mas reagendados para o instante de religamento do rádio.

O intervalo de tempo em que os temporizadores de controle são disparados é conhecido pelo mecanismo PORT. Sendo assim, um outro método chamado para-e-congela define

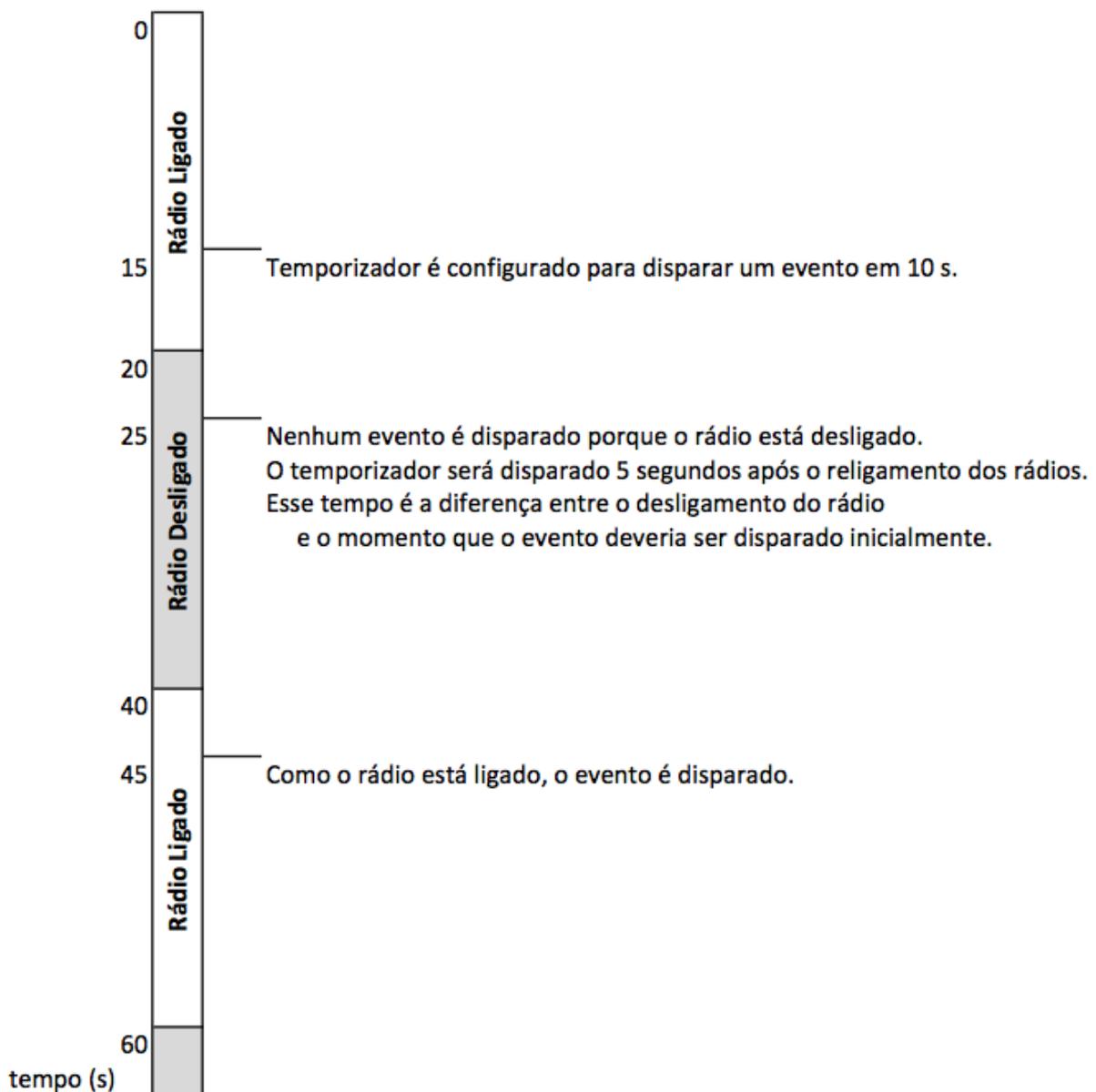


Figura 3.3: Exemplo do funcionamento dos temporizadores de controle com o PORT.

como os temporizadores de controle que seriam disparados durante o desligamento do rádio são tratados. Como pode ser visto na Figura 3.3, quando os temporizadores tentam disparar eventos enquanto o rádio está desligado, eles são reagendados para o tempo de religamento do rádio mais a diferença entre o tempo que o rádio desligou e o tempo que o temporizador tentou disparar o evento com o rádio desligado. O objetivo do método é garantir que, quando o rádio religar, as informações que o protocolo possui sobre a rede não estarão expiradas. Com isso, as mensagens de controle, que são enviadas imediatamente após o religamento dos rádios, terão tempo para chegar aos seus destinos e atualizar as informações dos nós.

A principal diferença entre o método para-e-renicia e para-e-congela, Figuras 3.2 e 3.3, é que o primeiro método faz com que as mensagens de controles que seriam disparadas enquanto o rádio estava desligado, sejam disparadas assim que o rádio religa e, dessa maneira, atualizem as informações dos estados de enlace da rede. O segundo método faz com que as informações não sejam expiradas assim que os rádios religem e permite que as informações atualizadas sejam coletadas antes da expiração.

É importante ressaltar que o uso mecanismo PORT não está limitado ao protocolo OLSR. Para usá-lo com outros protocolos, é necessário identificar quais são os temporizadores de envio e de controle do protocolo de roteamento e fazer a alteração para garantir a persistência de rotas quando os rádios estiverem desligados.

3.5 Detalhes da Implementação

O mecanismo PORT é implementado no simulador NS-2 [16] para que seja possível a realização de simulações para a validação da proposta. Sendo assim, o mecanismo é implementado com a linguagem de programação C.

Dois módulos são implementados: um módulo de agendamento do ciclo de tarefas e um módulo de gerenciamento dos temporizadores de controle. O módulo de agendamento do ciclo de tarefas é implementado como uma aplicação no simulador. Essa aplicação se vale do tempo ser sincronizado entre todos os nós das simulações. O módulo é executado em cada nó da rede. Cada nó possui a mesma agenda de quando os nós devem ligar e desligar os rádios. De posse dessa agenda, o módulo desliga e liga os rádios dos nós de acordo com a configuração encontrada na agenda. O módulo é configurado para iniciar em um determinado tempo e, depois de inicializado, mantém o rádio ligado e desligado de acordo com o tempo configurado. Note que os tempos de rádio ligado e desligado são configurações distintas e, portanto, podem ter tamanhos diferentes.

O módulo de agendamento do ciclo de tarefas se comunica com o módulo de gerenciamento dos temporizadores por meio de um fluxo TCP. Toda vez que o rádio é ligado ou desligado, uma mensagem é enviada para o módulo de gerenciamento dos temporizadores com a informação se o rádio está sendo ligado ou desligado e por quanto tempo o rádio se manterá nesse estado. Dessa maneira, o módulo de gerenciamento dos temporizadores sempre sabe qual o estado do rádio do nó e por quanto tempo o rádio se manterá nesse estado.

O módulo de gerenciamento dos temporizadores é responsável pelo reagendamento

dos temporizadores quando o nó está no estado de conservação de energia do ciclo de tarefas. O módulo configura uma variável que sinaliza o estado de conservação de energia para as funções que são disparadas pelos temporizadores. Essa variável é configurada com o recebimento das mensagens do módulo de agendamento de ciclo de tarefas. As funções, que são disparadas pelos temporizadores, verificam a variável sinalizadora e, quando o nó está no estado de conservação de energia, a função é reagendada para ser disparada em um momento posterior de acordo com a descrição apresentada na seção anterior.

Como no simulador NS-2, o tempo é sincronizado entre todos os nós das simulações, não é necessário nenhuma ação para manter o tempo sincronizado. Na verdade, em uma das simulações que será apresentada no próximo capítulo, é necessário inserir uma dessincronização artificialmente para que esse cenário de tempo dessincronizado seja avaliado. O mecanismo espera que exista um certo grau de sincronização do tempo. Em uma implementação real é sugerida a utilização do NTP [14] para que essa sincronização seja disponibilizada na rede testada.

Este capítulo apresentou os detalhes do mecanismo proposto PORT. Foram apresentados também o problema abordado, o algoritmo e os detalhes de implementação. Em seguida, serão apresentados os detalhes das simulações que são feitas para avaliar o PORT.

Capítulo 4

Cenários de avaliação

O mecanismo proposto PORT é avaliado através de simulações no NS-2 [16] para seis conjuntos de configurações diferentes. Este capítulo apresenta os detalhes desses seis conjuntos de simulações, apresentado os cenários, as topologias e as configurações de simulação de cada conjunto. Nos primeiros três conjuntos de testes são realizadas simulações de prova de conceito. Nesses testes é verificado se a proposta consegue atingir os resultados esperados em cenários com variáveis bem controladas. Nos últimos três conjuntos de testes são realizados testes de desempenho do mecanismo PORT. Nesses testes, o desempenho da proposta é testado em cenários que simulam topologias reais. A seguir, esses cenários são descritos.

4.1 Simulações de prova de conceito

No Conjunto I, um cenário em grade é utilizado para verificar o comportamento do mecanismo com diferentes números de nós sem fio e diferentes números de saltos entre origem e destino de um fluxo de dados. Os testes são realizados em grades com 4 estações (2 x 2) e 2 saltos de distância entre a origem e o destino do fluxo de dados até 49 estações (7 x 7) com 13 saltos de distância, como pode ser observado na Figura 4.1. Os testes duram 2000 s e os rádios de todos os nós sem fio são ligados e desligados, sincronizadamente, a cada 20 s. Esse intervalo é utilizado porque possibilita a perda de todas as rotas calculadas pelo OLSR quando o rádio está desligado e permite a avaliação do mecanismo de recuperação das rotas proposto e a troca de pacotes de dados quando o rádio está ligado. A perda de todas as rotas acontece por causa da expiração do tempo de validade das mensagens de controle do OLSR, que serão apresentadas na Seção 4.3. Os instantes iniciais do comportamento do rádio durante os testes são ilustrados na Figura 4.2.

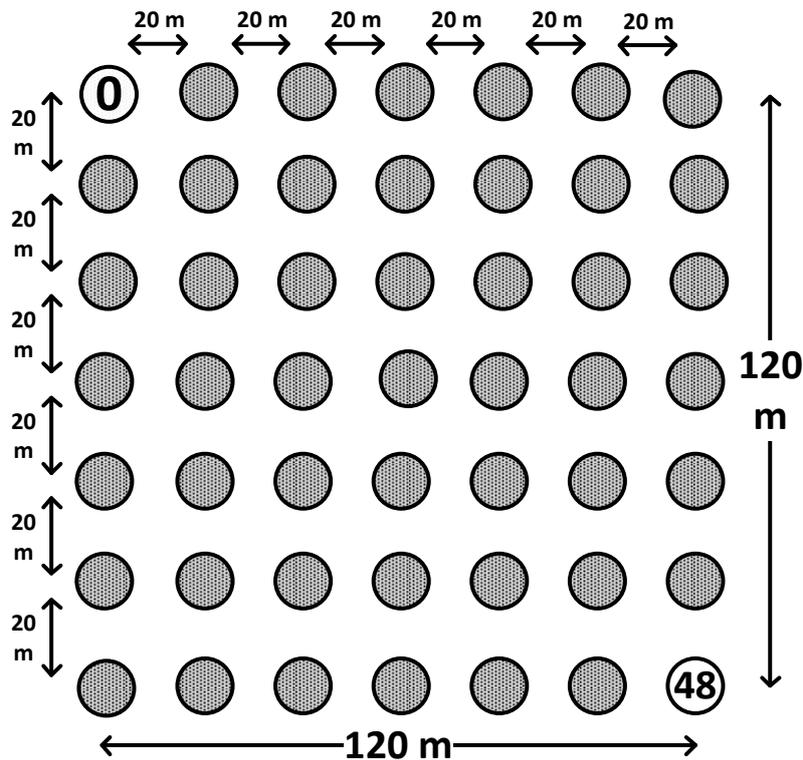


Figura 4.1: Exemplo da topologia do cenário em grade (7 x 7).



Figura 4.2: Exemplo de funcionamento do ciclo de tarefas dos rádios nos primeiros 220 s de uma simulação.

No Conjunto II, um cenário com 5 nós dispostos em linha foi utilizado para verificar o desempenho do mecanismo PORT com diferentes intervalos de rádio ligado e desligado. Esse cenário pode ser visto na Figura 4.3. A área definida para esse cenário possui 100 m de comprimento por 40 m de largura. Todos os nós estão posicionados a 15 m de distância uns dos outros. O modelo de propagação deste cenário foi configurado de forma que os nós só podem se comunicar com seus vizinhos de um salto, tanto o da esquerda, quanto o da direita, quando houver um. Os testes têm duração de 2000 s e os rádios de todos os nós são ligados e desligados de forma sincronizada em intervalos de 2, 3, 5, 10, 25, 50 e 100 s.

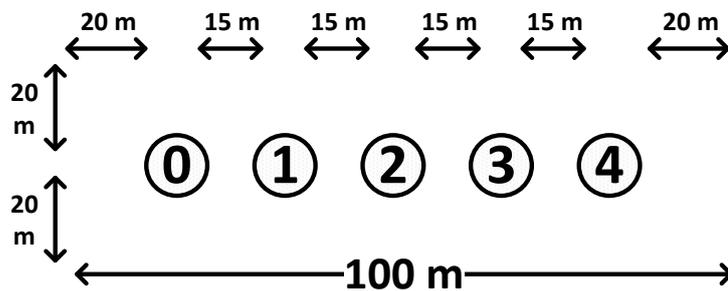


Figura 4.3: Cenário utilizado nos Conjuntos II e III.

No Conjunto III, as simulações são realizadas para avaliar o impacto da manutenção de rotas nos protocolos da camada de transporte. São testados os protocolos UDP e TCP. As simulações têm 2000 s de duração e o mesmo cenário com 5 estações do Conjunto II é utilizado.

Nos primeiros três conjuntos de testes, o NS-2 foi configurado para utilizar o modelo de propagação *Free Space*. Esse modelo de propagação faz com que todos os dados enviados entre os nós, que estejam dentro de uma área pré-configurada, sejam recebidos com sucesso. Nos testes realizados com esse modelo de propagação, a área pré-configurada é de 20 m. O objetivo de escolher esse tamanho de área é modelar um ambiente os nós das extremidades precisem se comunicar por meio de múltiplos saltos. O protocolo de roteamento utilizado é o OLSR e a métrica usada é o número de saltos (*hop count*) em todos os três primeiros conjuntos de simulações. O tráfego gerado nessas simulações é composto por um fluxo de dados entre os nós das extremidades da rede. Por exemplo, nos cenários em grade como na Figura 4.1, a origem é o Nó 0 e o destino é o Nó 48. O fluxo de dados é configurado para ter a taxa de transferência de 1 Mb/s e os pacotes para terem o tamanho de 1000 bytes.

4.2 Simulações de avaliação de desempenho

O objetivo das simulações descritas a seguir é avaliar o desempenho do mecanismo PORT em redes sem fio que sofrem com o problema de perda de rotas em virtude da utilização do ciclo de tarefas dos rádios. O desempenho do PORT também é avaliado por meio de simulações no NS-2 para 3 conjuntos de testes diferentes dos apresentados na Seção 4.1.

No Conjunto IV, a topologia da rede em malha sem fio apresentada nos testes preli-

minares do Capítulo 3 e ilustrada pela Figura 4.4 é utilizada nas simulações. O objetivo é observar o comportamento do mecanismo PORT em redes operacionais. Como pode ser visto na Figura 4.4, o cenário do Conjunto IV possui dois nós que ficam nas extremidades da rede em malha sem fio, os Nós **0** e **12**. Esses nós são a origem e o destino dos fluxos de dados simulados nesse conjunto. O fluxo de dados é configurado para ter a taxa de transferência de 1 Mb/s e os pacotes para terem o tamanho de 1000 bytes. Cada rodada de simulação tem 2000 s de duração e são divididas em dois subgrupos. No primeiro subgrupo, os rádios são ligados e desligados de forma síncrona em intervalos de 2, 3, 5, 10, 25, 50 e 100 s. Dessa maneira, o desempenho do mecanismo pode ser avaliado com o uso de diferentes intervalos de ciclo de tarefas. Esses intervalos são utilizados porque são menores, similares e maiores que o tempo de expiração das entradas na tabela de roteamento, que é cerca de 15 s considerando o uso da configuração padrão do OLSR. O tempo de expiração é recebido por meio das mensagens de controle do protocolo OLSR e quando esses tempos expiram, as rotas associadas a esses temporizadores são perdidas.

No segundo subgrupo de simulações do Conjunto IV, os rádios são ligados e desligados de forma não sincronizada. O objetivo desse experimento é avaliar o impacto da ausência de sincronização no desempenho do mecanismo PORT. Essa avaliação é importante pois em redes reais é impossível ligar e desligar todos os nós da rede de forma perfeitamente sincronizada. As simulações são feitas com o nível de dessincronização de 1%, 5% e 10% do intervalo de ciclo de tarefas. Nesse subgrupo, todas as simulações têm o intervalo de ciclo de tarefas com duração de 25 s. Dessa maneira, com o nível de dessincronização de 1%, 5% e 10%, os relógios dos nós poderão estar com uma diferença de até 0,25 s, 1,25 s e 2,5 s respectivamente.

Com o Conjunto V, o objetivo é avaliar o impacto da mobilidade no PORT. Para isso, define-se um cenário com 5 nós móveis que se movimentam segundo o padrão de mobilidade chamado ZebraNet [22]. Esse padrão de mobilidade foi coletado de um experimento real com zebras em uma reserva natural no Quênia e sua principal característica é que os nós se movem seguindo um comportamento de manada. Uma ferramenta fornecida por [22] é utilizada para, a partir do padrão de mobilidade captado de uma única zebra, fazer outros quatro padrões de mobilidade que possam ser seguidos pelos nós das simulações desse conjunto no simulador NS-2. A área do experimento é de 1000 m de largura e 1000 m de comprimento. O desempenho do mecanismo é avaliado com a variação da velocidade e do intervalo do ciclo de tarefas dos nós. Além da velocidade normal do padrão de mobilidade, os testes são realizados com o dobro e a metade dessa velocidade. Nesses testes, o intervalo do ciclo de tarefas é de 40 s. As simulações duram 2000 s com a velocidade

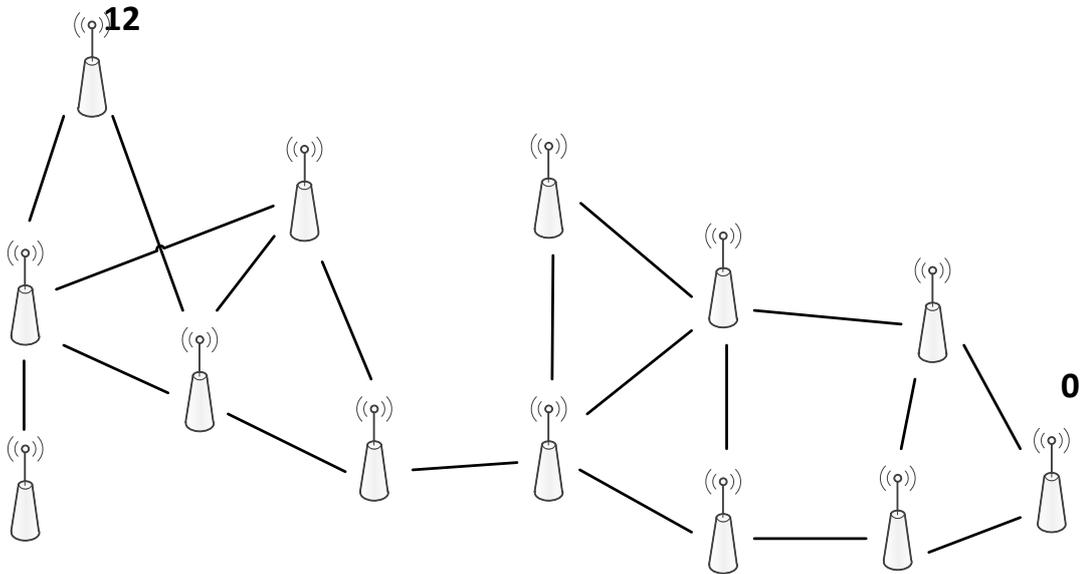


Figura 4.4: Cenário utilizado no Conjunto IV: rede em malha sem fio operacional na UFF.

normal, 1000 s com o dobro da velocidade e 4000 s com a metade da velocidade. Usando a velocidade normal, o mecanismo é avaliado com o intervalo de ciclos de tarefa igual a 20, 40 e 80 s. Nesse conjunto, o modelo de propagação é configurado de maneira que os nós a 100 m de distância da origem recebam os pacotes com sucesso em 50% das vezes e os nós a 300 m de distância da origem recebam os pacotes com sucesso 0,9% das vezes. Esses parâmetros são configurados por meio da ferramenta de calibração do modelo de propagação disponibilizado pelo próprio NS-2.

No Conjunto VI, um outro cenário de redes em malha sem fio com dois nós móveis é testado. Esses cenários possuem 11 nós fixos espalhados por 5 prédios de escritórios em um campus da Microsoft em Redmond e 2 vans que operam dentro do campus durante o dia como pode ser visto na Figura 4.5. Os nós móveis desse conjunto usam a configuração de mobilidade apresentada em VanLAN [13]. O desempenho é avaliado variando a velocidade dos nós. Enquanto a velocidade varia, o intervalo de ciclo de tarefa é de 40 s. As simulações duram 20500 s com velocidade normal, 10250 s com o dobro da velocidade e 41000 s com a metade da velocidade. Nesse conjunto, o modelo de propagação é configurado de maneira que os nós a 100 m de distância da origem de um fluxo recebam os pacotes com sucesso 50% das vezes e os nós a 300 m de distância da origem recebam os pacotes com sucesso 0,02% das vezes.

Nas simulações desta seção, diferentemente da seção anterior, o NS-2 é configurado

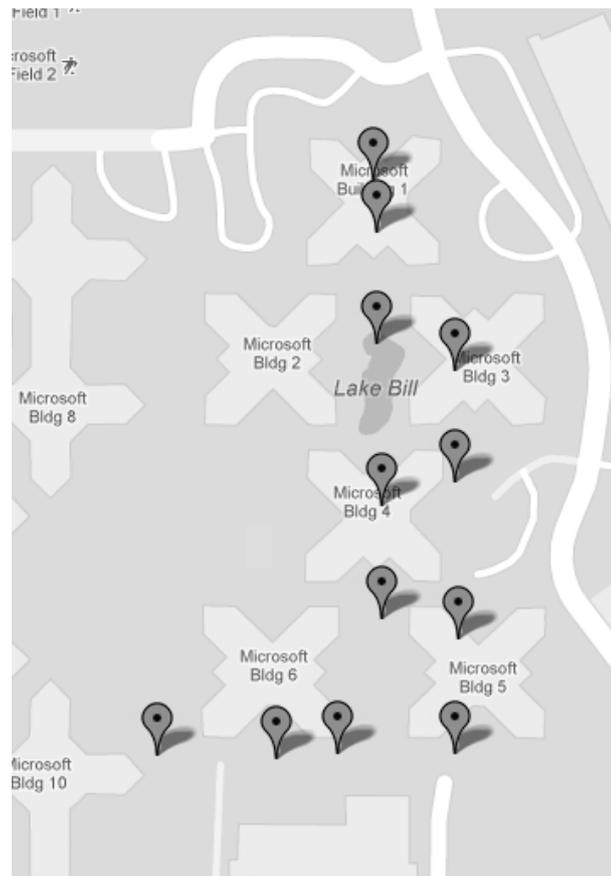


Figura 4.5: Cenário utilizado no Conjunto VI - estações sem fio espalhadas pelos prédios de um campus da Microsoft.

para usar o modelo de propagação *Shadowing* com o objetivo de obter resultados mais realísticos. Esse modelo de propagação estima a probabilidade de sucesso da entrega de pacotes considerando a degradação da potência do sinal. O protocolo de roteamento OLSR é usado com a métrica de qualidade de enlace *Expected Transmission Count* (ETX). Como o objetivo das simulações dessa seção é avaliar o desempenho do mecanismo PORT em cenários mais realísticos, a métrica ETX foi escolhida por representar melhor a qualidade dos enlaces da rede.

No Conjunto V, cada nó envia um fluxo de dados para cada um dos outros nós da rede. No Conjunto VI, existe um fluxo de dados entre uma das estações base (origem) e a van (destino). Nos Conjuntos IV e VI, os fluxos de dados têm a taxa de transferência de 1 Mb/s e os pacotes têm tamanho de 1000 bytes. No Conjunto V, cada fluxo de dados tem a taxa de transferência de 100 Kb/s e o mesmo tamanho de pacote.

4.3 Características gerais das simulações

A taxa máxima de transferência de dados na camada de enlace é de 1 Mb/s. Cada cenário foi executado cinco vezes, com sementes diferentes. Os resultados são mostrados com barras de erros que representam um intervalo de confiança de 90%.

Tabela 4.1: Configurações do protocolo de roteamento OLSR

Intervalo de envio de pacotes HELLO	2 s
Tempo de validade dos pacotes HELLO	6 s
Intervalo de envio de pacotes TC	5 s
Tempo de validade dos pacotes TC	15 s
Valor máximo da variação	0,5 s

O protocolo de roteamento utilizado é o OLSR. As mensagens HELLO são configuradas para serem enviadas em intervalos de 2 s com tempo de validade de 6 s. As mensagens TC são configuradas para serem enviadas em intervalos de 5 s com tempo de validade de 15 s. Esses valores são sugeridos na RFC 3626, que padroniza o protocolo OLSR [9]. É importante salientar que a proposta para o padrão também sugere que o envio de mensagens de controle deve ser feito de maneira que os nós não enviem mensagens de controle ao mesmo tempo. A possibilidade de ocorrer colisões e perdas de mensagens é o motivo pelo qual essa sincronização é evitada. Para evitar essa sincronização, é inserida uma variação nos temporizadores de envio. Essa variação, segundo a proposta do padrão, deve variar de 0 até um quarto do intervalo de envio das mensagens HELLO. Sendo assim, nas simulações realizadas o valor máximo dessa variação é 0,5 s.

Para todos os conjuntos de simulações a rede analisada emprega ou não o mecanismo PORT. Os intervalos de rádio ligado e desligado possuem o mesmo tamanho, mas o PORT admite a utilização de intervalos diferentes para esses intervalos. Exceto no Conjunto III, quando as simulações com o protocolo TCP têm o tráfego de dados simulado com o *File Transfer Protocol* (FTP), todas as outras simulações possuem o tráfego de dados simulado pelo *Constant Bit Rate* (CBR), utilizando o protocolo UDP.

Este capítulo apresentou os detalhes das simulações que são realizadas para avaliar o mecanismo PORT. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados e a análise dessas simulações.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados e as análises das simulações realizadas para avaliar o PORT. As métricas usadas nessas avaliações são vazão, atraso, tempo de convergência e tempo de chegada do primeiro pacote após o religamento do rádio. A vazão é calculada somente durante os momentos em que a rede não estiver no estado de conservação de energia, com rádio desligado.

O tempo de convergência é definido como o tempo despendido para que todos os nós da rede possuam uma rota para todos os destinos possíveis após o religamento dos rádios. O tempo de chegada do primeiro pacote inclui o tempo de descoberta de rota e o atraso fim-a-fim.

5.1 Resultados das Simulações de Prova de Conceito

As simulações de prova de conceito são realizadas usando um modelo de propagação simples para verificar a eficiência da proposta em cenários sintéticos simplificados, representados pelos Conjuntos I a III descritos anteriormente.

5.1.1 Conjunto I - Topologias em Grade

As Figuras de 5.1 a 5.5 apresentam os gráficos com a vazão, a razão entre as vazões com e sem o mecanismo PORT, o tempo para que todos os nós adquiram todas as rotas possíveis depois de cada religamento dos rádios, o tempo de chegada do primeiro pacote ao destino e o atraso.

A Figura 5.1 mostra o resultado da métrica da vazão em um fluxo de dados entre os nós das extremidades da rede. Nessa figura é possível observar que a vazão sempre é

maior com a utilização do mecanismo PORT do que sem o mecanismo à medida que o número de nós da rede aumenta. A Figura 5.2 complementa este resultado e mostra que o ganho percentual da vazão é bastante expressivo em grades maiores que 3x3.

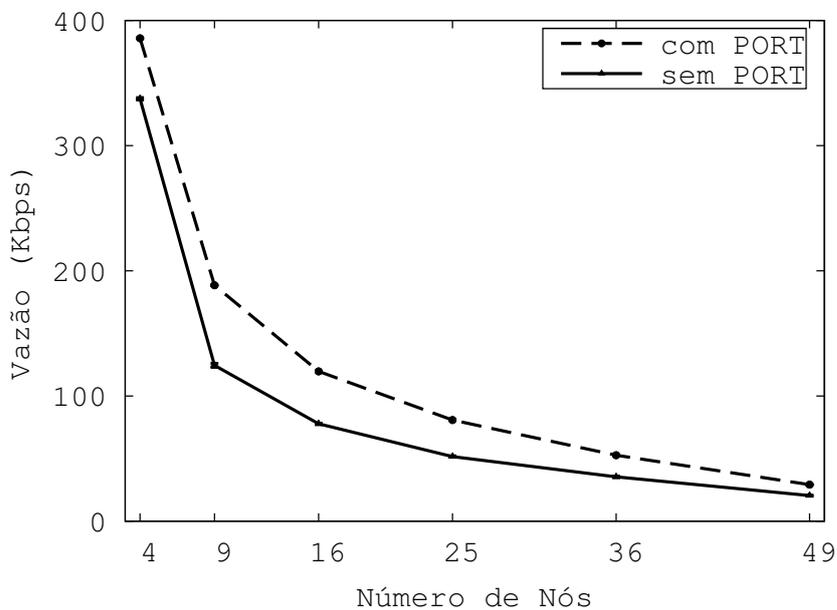


Figura 5.1: Conjunto I - Gráfico da Vazão

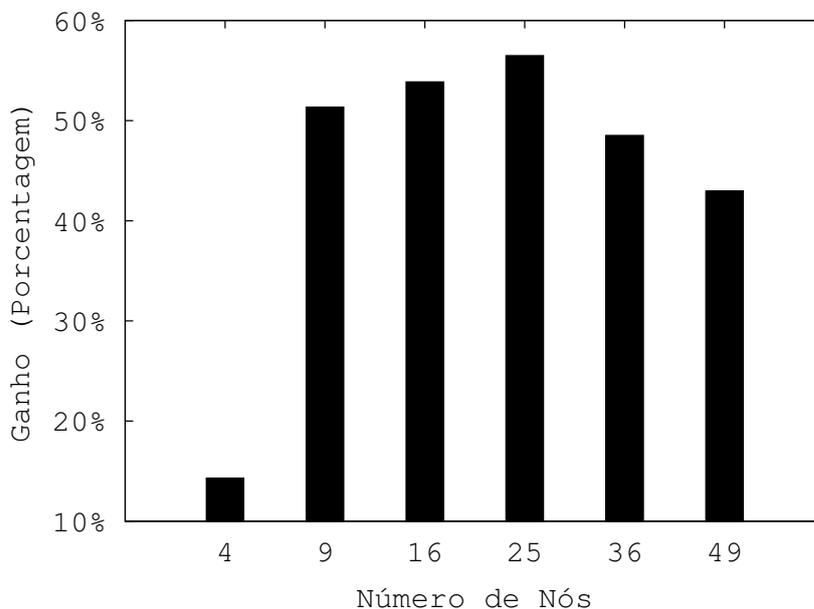


Figura 5.2: Conjunto I - Gráfico do Ganho da Vazão

O ganho de desempenho obtido pelo PORT é explicado pelo fato de que o mecanismo proposto aumenta o tempo de disponibilidade de rotas, como pode ser observado na Figura 5.3. Essa figura mostra o tempo de que todas as estações precisam para obter as

rotas para todos os destinos possíveis após o religamento dos rádios quando o PORT não é empregado pelos nós da rede. Nesse caso, quanto maior o número de estações, maior o tempo para se obter todas as rotas. Esse tempo é necessário para que as mensagens de controle do protocolo de roteamento trafeguem pela rede para que essas rotas sejam adquiridas, sendo despendido um tempo considerável para tal. Por outro lado, quando o mecanismo PORT é utilizado, as rotas são conservadas durante o período em que os rádios estão desligados e, portanto, estão imediatamente disponíveis quando os rádios são religados. Assim, o PORT garante que as rotas estão disponíveis por um período de tempo maior e, por isso, os nós da rede conseguem enviar mais pacotes.

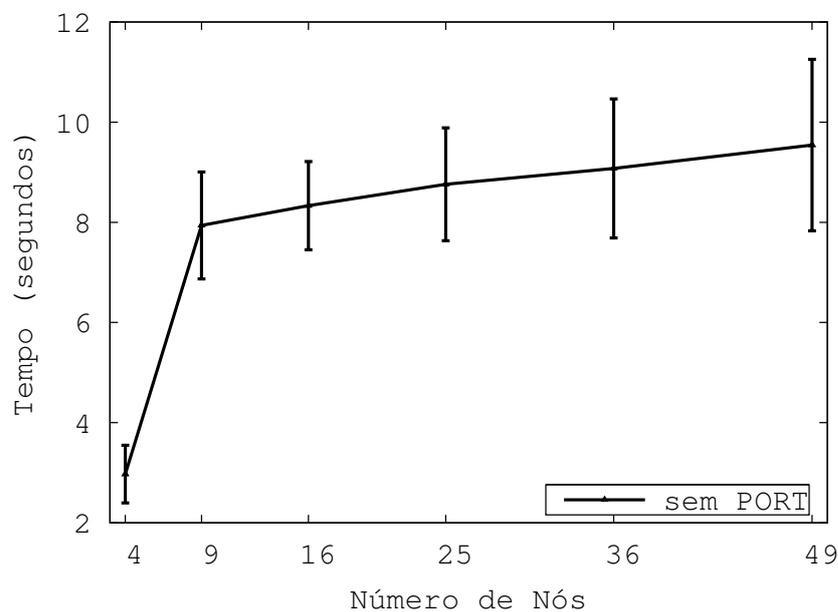


Figura 5.3: Conjunto I - Gráfico do Tempo de Convergência.

A Figura 5.4 também explica o fato da vazão ser maior com a utilização do mecanismo PORT. O tempo de chegada do primeiro pacote é sempre menor quando o mecanismo é utilizado, o que mais uma vez indica um aumento do tempo de disponibilidade de rotas.

Outra métrica avaliada é o atraso de entrega dos pacotes, cujo comportamento pode ser observado na Figura 5.5. O atraso aumenta de acordo com o crescimento do número de estações, uma vez que o número de saltos entre a origem e o destino do fluxo de dados considerado aumenta. Isso foi observado anteriormente por outros trabalhos como [2]. No entanto, o mais importante é que o PORT introduz um atraso menor do que o atraso que poderia ser introduzido caso o método de conservação de energia do padrão IEEE 802.11 fosse utilizado, mesmo usando rotas que podem não mais representar o melhor caminho entre origem e destino, de acordo com a métrica de estado dos enlaces do protocolo de roteamento, logo após os rádios serem religados.

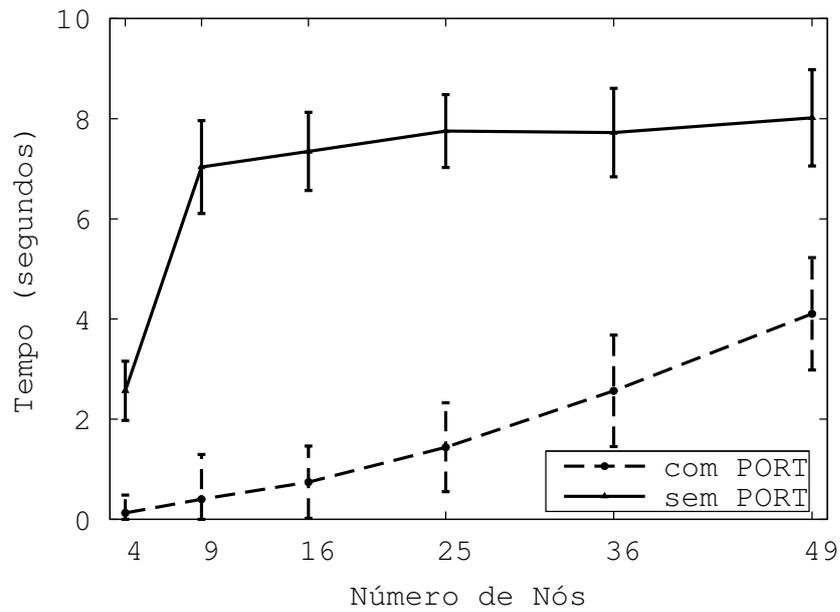


Figura 5.4: Conjunto I - Gráfico do Tempo de Chegada do Primeiro Pacote.

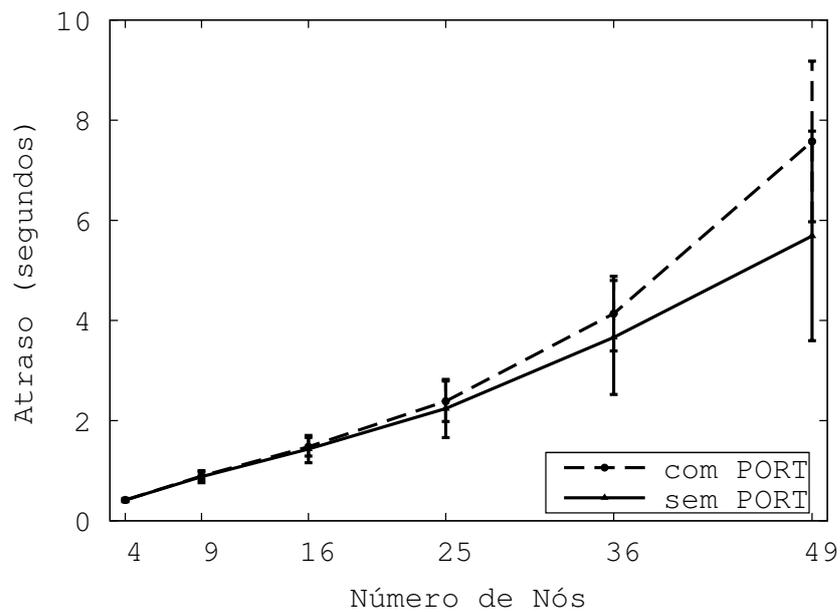


Figura 5.5: Conjunto I - Gráfico do Atraso.

5.1.2 Conjunto II - Diferentes Ciclos de Operação dos Rádios

O objetivo das simulações do Conjunto II é avaliar o impacto da duração dos intervalos de rádio ligado e desligado no PORT em termos de vazão, atraso, tempo de entrega do primeiro pacote e tempo para aquisição de rotas na rede. Os resultados obtidos nessas simulações são apresentados nas Figuras de 5.6 até 5.10.

Neste conjunto de simulações, o protocolo de roteamento é configurado para enviar os

pacotes de controle HELLO em intervalos de 2 s e com tempo de validade 6 s. Os pacotes de controle TC são configurados para serem enviados em intervalos de 5 s com tempo de validade igual a 15 s. Sendo assim, espera-se que o uso do mecanismo PORT não surta efeito quando o tamanho dos intervalos é menor do que 6 s porque o tempo que o rádio fica desligado é insuficiente para que as rotas sejam perdidas. Por meio dos resultados que serão apresentados a seguir, percebe-se que essa hipótese não é verdadeira. Os pacotes de controle do protocolo de roteamento são enviados em *broadcast* e não possuem controle de falha nem por parte do protocolo de roteamento e nem por parte da camada de enlace. O tempo para envio dos pacotes de controle é determinado pelo intervalo de envio dessas mensagens mais a variação, que evita a sincronização do envio de mensagens de controle entre os nós. Sendo assim, muitos pacotes são perdidos porque são enviados nos intervalos de rádio desligado. A perda desses pacotes prejudica a disponibilidade das rotas, mostrando que o mecanismo PORT é eficiente mesmo nessas condições.

A Figura 5.6 mostra o atraso de entrega dos pacotes, na qual é possível observar que este não se modifica significativamente com as diferentes configurações de duração de intervalo. Pode-se observar, também, que o atraso é praticamente igual com e sem a utilização do mecanismo PORT. Dessa maneira, é mostrado mais uma vez que o mecanismo PORT não introduz um atraso de entrega significativo.

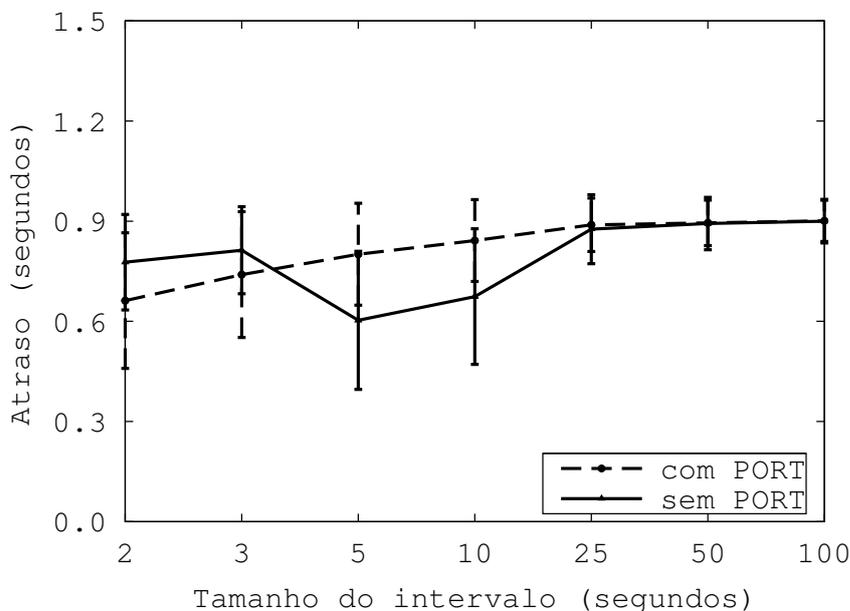


Figura 5.6: Conjunto II - Gráfico do Atraso.

Foram considerados tamanhos de intervalos para ligar/desligar os rádios menores e maiores do que o tempo de expiração de rotas do OLSR. Assim, para valores de intervalos do ciclo de operação menores que o tempo de expiração de rotas do OLSR, os nós religam

seus rádios e ainda possuem rotas para todos os destinos possíveis. Quando os valores dos intervalos do ciclo de operação são maiores que o tempo de expiração de rotas do OLSR, os nós não possuem mais rotas. Para verificar o tempo despendido para a aquisição de todas as rotas possíveis (Figura 5.7), somente os intervalos de rádio ligado, que iniciam sem todas as rotas possíveis e conseguem adquiri-las dentro do mesmo intervalo, são utilizados para o cálculo da métrica.

Nota-se que o tempo médio para que as rotas sejam adquiridas estabiliza em torno de 9 s quando a configuração dos intervalos ultrapassa 10 s. Quando a configuração dos intervalos é menor que 10 s, o tempo para adquirir todas as rotas é menor, mas essas rotas não conseguem ser adquiridas em muitos dos intervalos de rádio ligado porque não há tempo suficiente para a aquisição. Nesse caso, como as configurações dos intervalos são menores que 10 s, os nós conseguem adquirir as rotas em menos de 9 segundos.

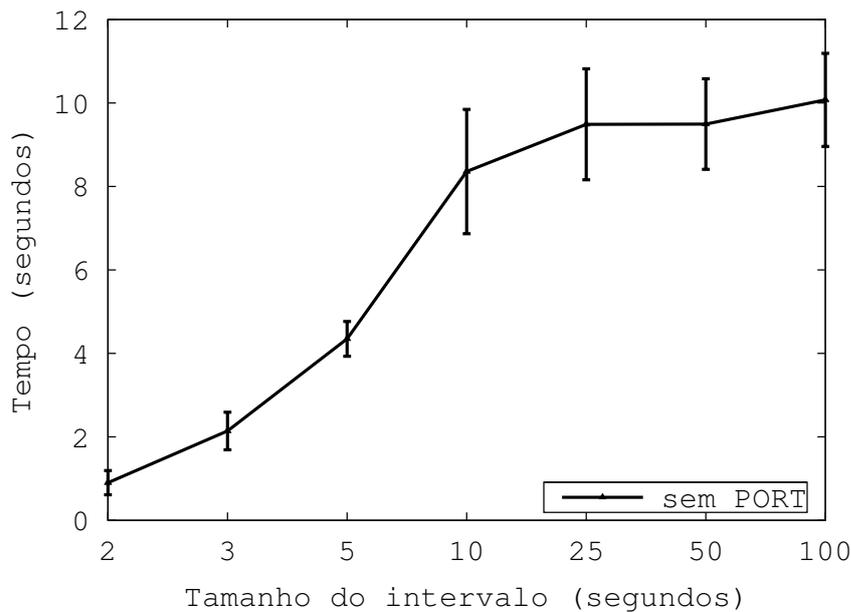


Figura 5.7: Conjunto II - Gráfico do Tempo de Convergência.

A Figura 5.8 apresenta a curva do tempo de entrega do primeiro pacote de dados em função da duração dos intervalos de ligar/desligar dos rádios nos intervalos em que pacotes de dados são enviados. Os intervalos de rádio ligado que pacotes de dados não são enviados por não existir rota para o destino não são contabilizados nesta métrica. Quando o mecanismo PORT não é utilizado, a curva do gráfico se assemelha a curva da Figura 5.7. Como as rotas não são persistentes, quando os intervalos de rádios ligados iniciam, não existe rota para o destino e essa rota precisa ser adquirida para que o envio do primeiro pacote seja feito. Quando o mecanismo PORT é utilizado, as rotas são conservadas e a curva do tempo de entrega do primeiro pacote se assemelha com a curva do atraso,

apresentada na Figura 5.6.

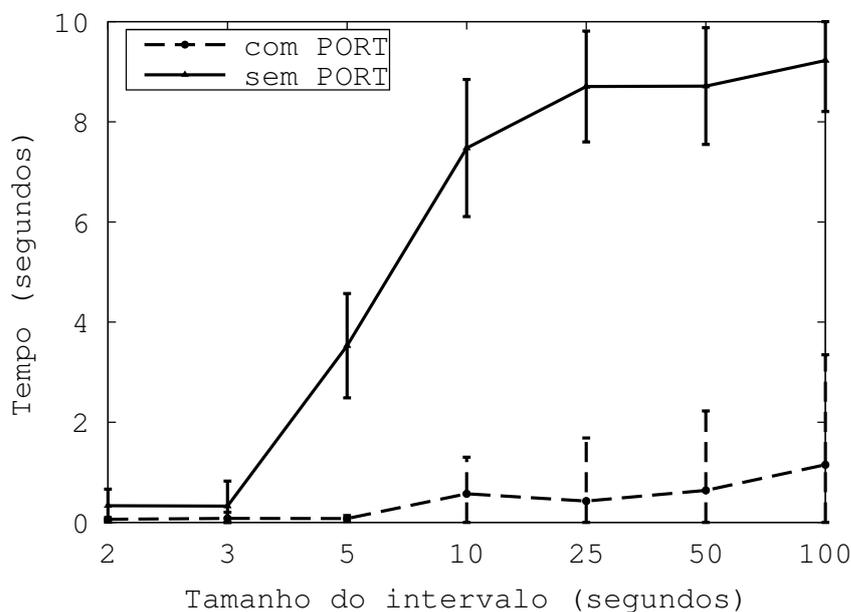


Figura 5.8: Conjunto II - Gráfico do Tempo de Chegada do Primeiro Pacote.

A Figura 5.9 mostra a porcentagem de intervalos de rádio ligado em que é possível enviar pacotes de dados, ou seja, o nó da origem do fluxo possui rota para o destino. Quando o mecanismo PORT é utilizado, a porcentagem de intervalos utilizados possui valores próximos a 100%. Os valores não são exatamente 100% para tamanhos de intervalos menores do que 10 s porque, nesses casos, são necessários mais de um intervalo para descobrir uma rota para o destino. Ou seja, dados não são enviados nos intervalos iniciais porque a rota para o destino ainda não existe. Muitos intervalos não conseguem enviar dados quando o mecanismo PORT não é utilizado e o tamanho dos intervalos é menor que 10 s. Para intervalos maiores do que 10 s, é possível enviar dados em todos os intervalos, mas grande parte do tempo do intervalo é perdida para a aquisição de rotas. A principal conclusão, portanto, é que a variação do tamanho da duração dos ciclos de tarefa impacta mais o desempenho da rede quando o PORT não é empregado.

A Figura 5.10 apresenta o comportamento da vazão. Quando o mecanismo PORT é utilizado, a vazão não varia de acordo com a mudança do tamanho dos intervalos. Como as rotas são conservadas com o mecanismo PORT, a vazão é sempre superior quando o mecanismo é utilizado.

Nas Figuras 5.10 e 5.9, quando o tamanho do intervalo é 5 s e o mecanismo PORT não é utilizado, a métrica apresenta um resultado desfavorável. No caso do intervalo de tamanho 5 s, como pode ser visto na Tabela 5.1 pela diferença de número de pacotes

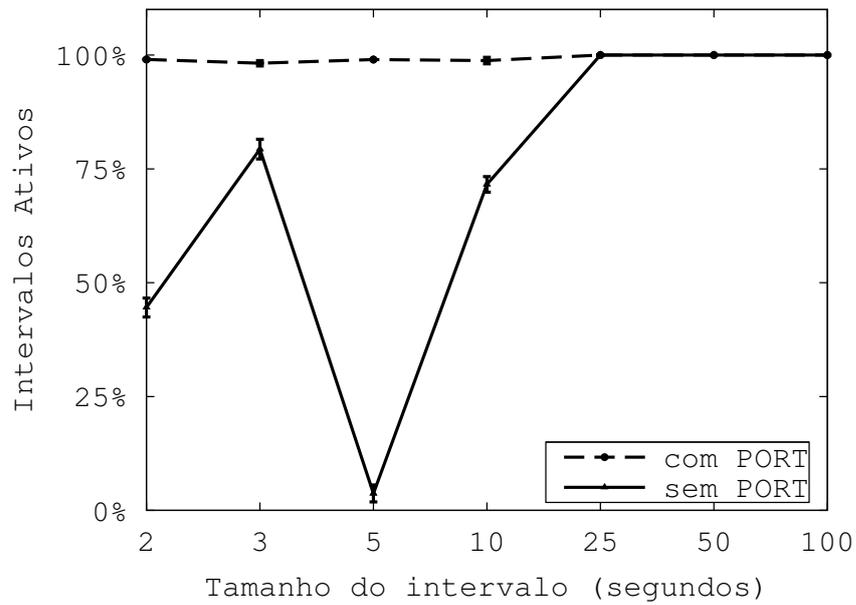


Figura 5.9: Conjunto II - Gráfico da Porcentagem de Intervalos Ativos.

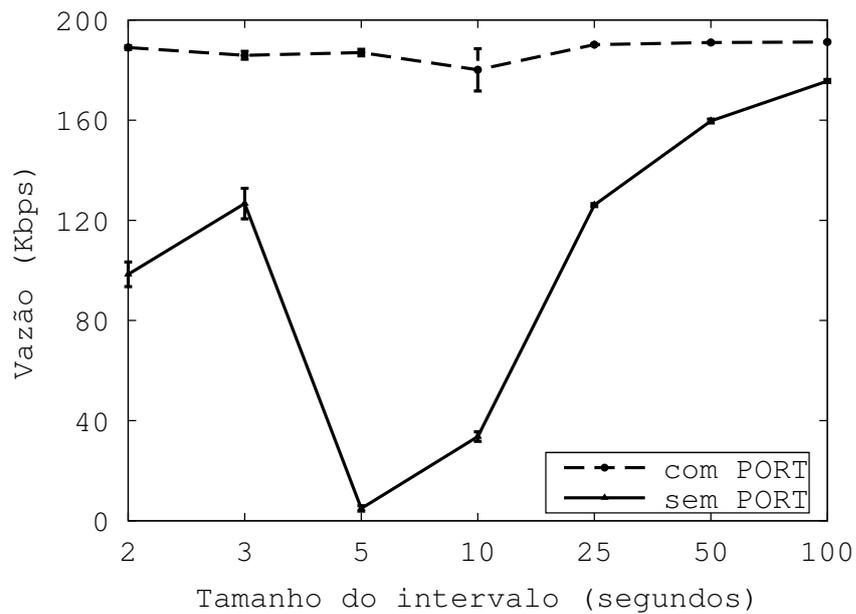


Figura 5.10: Conjunto II - Gráfico da Vazão.

recebidos, muitos pacotes de controle TC são perdidos. Como as mensagens TC também são enviadas em intervalos de 5 s mais a variação, mensagens TC podem ser enviadas no intervalo de rádio desligado. Como o destino dos pacotes de dados está a mais de um salto da origem, é necessário o recebimento das mensagens TC para que a rota para o destino seja estabelecida. Como muitas dessas mensagens são perdidas, a disponibilidade das rotas diminui e prejudica, substancialmente, a métrica da vazão e da porcentagem de intervalos ativos.

Tabela 5.1: Número médio de pacotes TC recebidos pela estação de origem

Tamanho do Intervalo (segundos)	TC com PORT (pacotes)	TC sem PORT (pacotes)
2	999 \pm 16	484 \pm 6
3	891 \pm 19	514 \pm 10
5	1044 \pm 20	226 \pm 21
10	844 \pm 60	331 \pm 6
25	641 \pm 20	473 \pm 4
50	591 \pm 7	523 \pm 2
100	588 \pm 5	545 \pm 5

5.1.3 Conjunto III - Protocolos de Transporte

O objetivo do Conjunto III é avaliar o desempenho dos protocolos de transporte UDP e TCP com e sem o PORT. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados das simulações com os protocolos de transporte

	UDP com PORT	UDP sem PORT	TCP com PORT	TCP sem PORT
Vazão (Kbps)	190,578 \pm 0,144	111,810 \pm 1,482	92,351 \pm 1,028	2,668 \pm 1,031
Atraso (s)	0,881 \pm 0,112	0,860 \pm 0,157	0,368 \pm 0,150	0,284 \pm 0,127
Primeiro Pacote (s)	0,347 \pm 1,409	8,501 \pm 1,592	7,806 \pm 2,079	11,701 \pm 2,358
Convergência (s)	0	9,395 \pm 1,670	0	8,967 \pm 1,342

Por meio da análise dos resultados das simulações, é possível observar que a utilização do mecanismo PORT aumenta a vazão e introduz um atraso menor do que o atraso que poderia ser introduzido caso o método de conservação de energia do padrão IEEE 802.11 fosse utilizado. Isso em virtude de conservar as rotas, tornando possível a transferência de dados assim que os rádios são religados. A métrica do tempo de convergência indica tal fato. Como tem valor zero, isso significa que todos os nós possuem rota para todos os destinos quando os rádios são ligados. Assim, aumenta-se a disponibilidade das rotas para os destinos e, conseqüentemente, aumenta-se a vazão da rede.

Também é possível observar que a vazão é maior na utilização do protocolo UDP como já foi mostrado em outro trabalho [6]. O ganho da vazão com o protocolo UDP é obtido em detrimento de várias funcionalidades que o protocolo TCP disponibiliza como a confiabilidade, a entrega ordenada, o controle de fluxo e o controle de congestionamento. Sendo que, as duas últimas funcionalidades do protocolo TCP são responsáveis pelo mesmo ter atraso menor que o protocolo UDP, que é programado para enviar pacotes a uma taxa fixa de 1 Mb/s, o que mantém a fila da camada de enlace quase sempre cheia.

Dois resultados devem ser ressaltados. O primeiro é que nas simulações do TCP com o PORT, mesmo com a métrica do tempo de convergência zero, a métrica do tempo médio de entrega do primeiro pacote é maior do que 7 s. O segundo é que nas simulações do TCP sem o mecanismo PORT, a vazão é muito baixa. Analisando os registros das simulações, é possível observar que em vários intervalos de rádio ligado, o protocolo TCP não envia dados mesmo possuindo rota para o destino.

No protocolo de roteamento OLSR, as rotas são adquiridas por meio de informações coletadas dos pacotes de controle. É necessário esperar que alguns pacotes de controle trafeguem pela rede para que as rotas fiquem disponíveis. Se uma comunicação TCP é iniciada enquanto as rotas estão sendo adquiridas, o mecanismo de controle de congestionamento do TCP, implementado no NS-2, espera, inicialmente, 3 s pela confirmação de um pacote enviado. Caso a confirmação não chegue em 3 s, um novo pacote será enviado. O TCP irá esperar o dobro do tempo para a chegada da próxima confirmação e assim por diante. Desse modo, num cenário de desligamento dos rádios sem a persistência de tabelas de rotas, as chances de uma comunicação TCP começar podem ser bem pequenas de acordo com a frequência do desligamento dos rádios.

No cenário simulado, os rádios são desligados em intervalos de 20 s e o tempo médio de descobrimento de rotas é cerca de 10 s. Assim, o rádio inicia a simulação ligado e a transferência de dados também começa nos primeiros instantes da simulação. Com o mecanismo de controle de erros do TCP funcionando da maneira esperada, o primeiro pacote enviado com sucesso só ocorre 45 s após o início da comunicação TCP nas simulações utilizando o mecanismo PORT.

5.2 Resultados das Simulações de Avaliação de Desempenho

O objetivo das simulações feitas nessa seção é avaliar o desempenho do PORT em cenários realísticos, onde é comum a implantação de redes em malha sem fio de múltiplos saltos.

5.2.1 Conjunto IV - Cenário de uma Rede em Malha Sem Fio Operacional

Neste conjunto, é considerada uma topologia semelhante à da rede em malha operacional do IC/UFF. As simulações estão divididas em dois grupos. No primeiro grupo de simulações são utilizados diferentes intervalos de ciclos de tarefas. No segundo grupo,

são simulados diferentes níveis de dessincronização entre os nós da rede com o valor do intervalo de ciclos de tarefas fixo em 25 s. Para os dois grupos, são avaliadas a vazão, o atraso e o tempo de chegada do primeiro pacote com e sem a utilização do mecanismo PORT.

Semelhante a configuração do protocolo de roteamento dos primeiros três conjuntos de simulações, nesse conjunto de simulações, o protocolo de roteamento é configurado para enviar mensagens de controle HELLO em intervalos de 2 s com tempo de validade de 6 s. As mensagens de controle TC são configuradas para serem enviadas em intervalos de 5 s com tempo de validade de 15 s.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam a vazão para diferentes intervalos de rádio ligado e diferentes níveis de dessincronização. Nos dois casos a vazão proporcionada pelo PORT é maior do que quando o mecanismo proposto não é utilizado. Com o PORT, as rotas são salvas e, posteriormente, são disponibilizadas assim que o rádio é religado. Consequentemente, os nós da rede permanecem em pleno funcionamento por um período maior de tempo e são capazes de transmitir um número maior de pacotes. Isso mostra que o PORT também aumenta o desempenho em uma rede com topologia semelhante a de uma rede experimental e que a dessincronização dos intervalos não impacta significativamente o desempenho do PORT em termos de vazão.

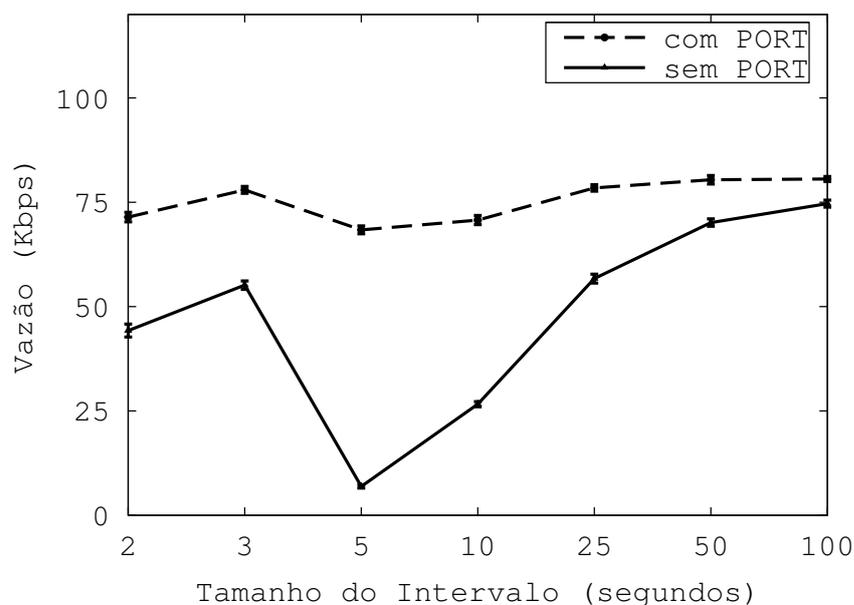


Figura 5.11: Conjunto IV - Gráfico da Vazão.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam o tempo de entrega do primeiro pacote, depois dos rádios reiniciarem para diferentes intervalos e níveis de dessincronização. Nota-se que esse

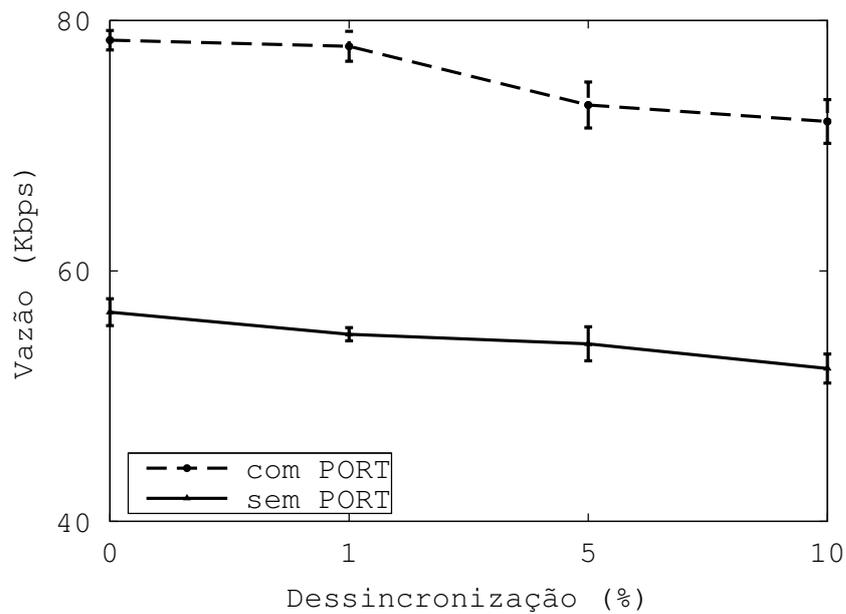


Figura 5.12: Conjunto IV - Gráfico da Vazão com Dessincronização.

tempo é menor quando o mecanismo PORT está sendo utilizado pelos nós da rede. Esse fato explica a vazão ser maior quando o mecanismo proposto está em uso. Isso acontece porque, nessas condições, os nós da rede começam a enviar pacotes tão logo os rádios sejam religados.

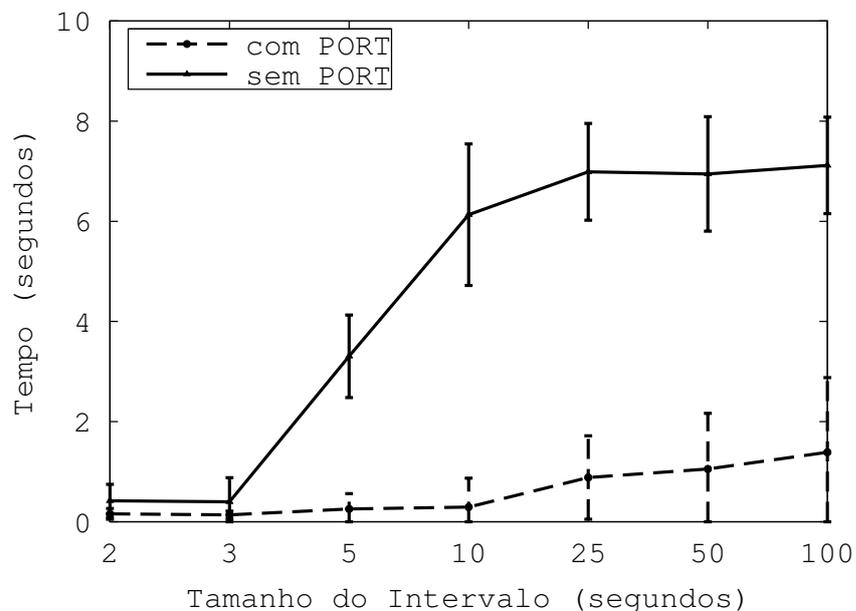


Figura 5.13: Conjunto IV - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote.

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam os resultados em termos de atraso. Nos dois casos, os resultados para o atraso possuem valores estatisticamente iguais com e sem a utilização

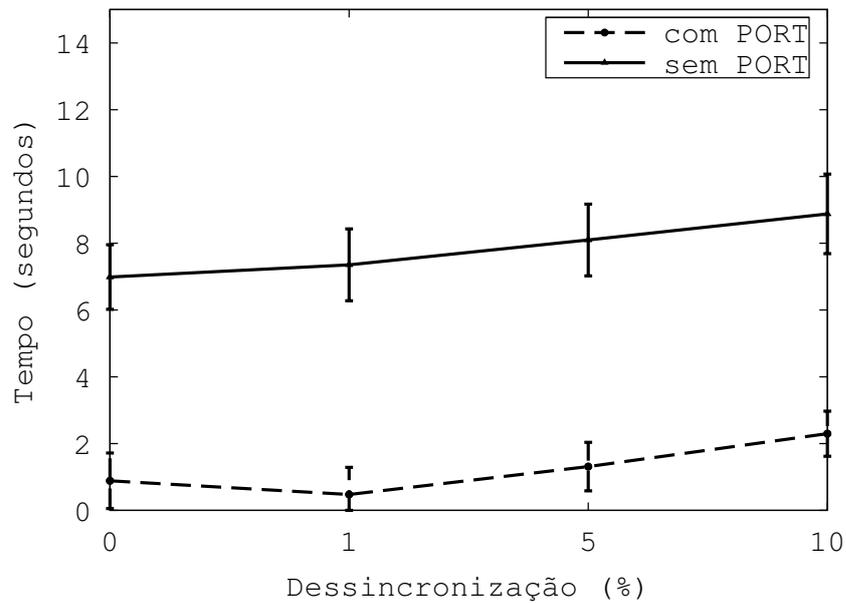


Figura 5.14: Conjunto IV - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote com Dessincronização.

do PORT. Sendo assim, conclui-se que o mecanismo PORT não introduz atraso na entrega dos pacotes.

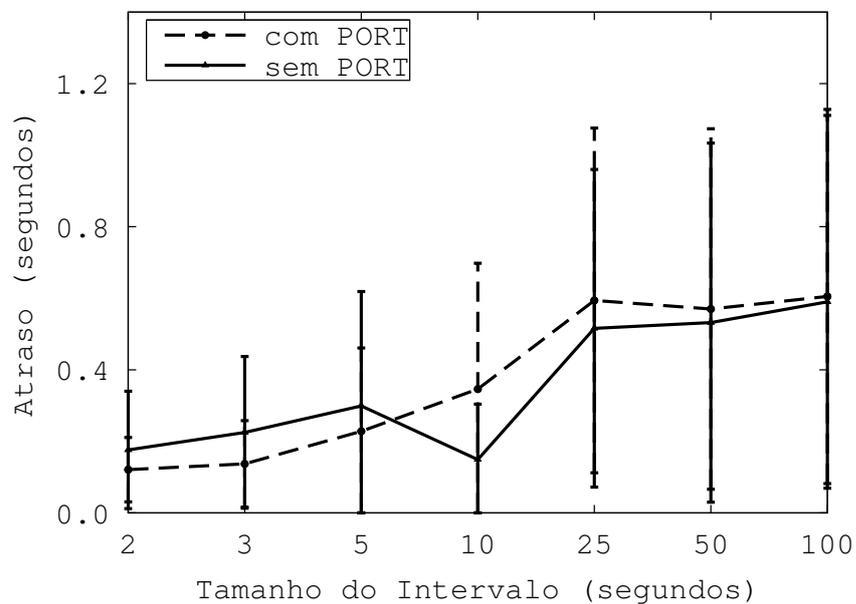


Figura 5.15: Conjunto IV - Gráfico do Atraso.

Como mostram as Figuras 5.11 e 5.12, sem o mecanismo PORT a vazão observada é baixa. Analisando a quantidade de mensagens TC recebidas na Tabela 5.3, é possível inferir a perda de pacotes de controle TC do nó que é a fonte do fluxo de dados. Dessa maneira, o mesmo problema de perdas de pacotes de controle TC apresentado no segundo

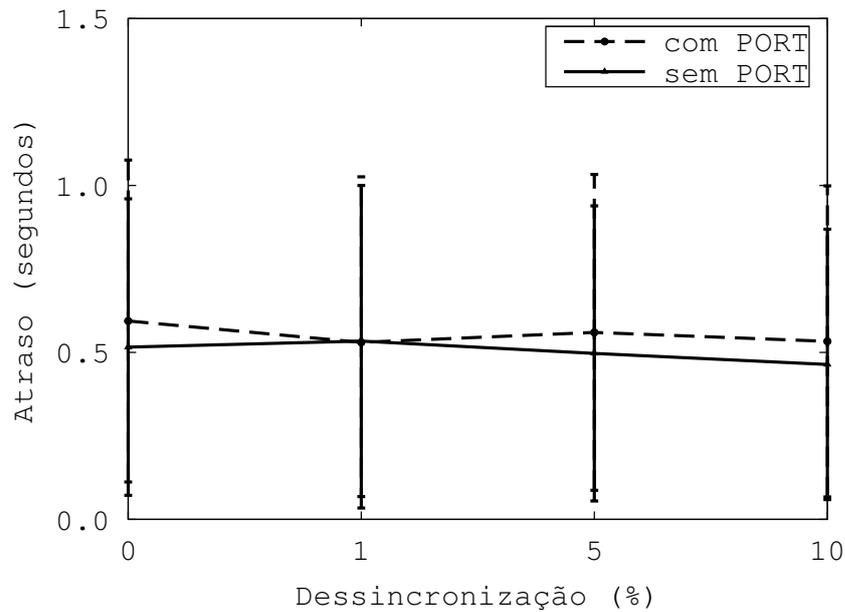


Figura 5.16: Conjunto IV - Gráfico do Atraso com Dessincronização.

conjunto de simulações, quando o intervalo de envio de mensagens TC é semelhante ao ciclo de tarefas, é observado nesse conjunto de simulações. Também é possível observar, assim como no segundo conjunto de simulações, que a curva da métrica do tempo de entrega do primeiro pacote é semelhante à curva do tempo de criação das rotas para o destino e que a curva do tempo de entrega do primeiro pacote é similar à curva da métrica de atraso. Na primeira situação, quando o mecanismo PORT não é utilizado, as rotas não são mantidas e, quando o rádio reinicia, os nós precisam que as rotas para os destinos sejam criadas antes de enviar os pacotes de dados. Na segunda situação, quando o mecanismo PORT é utilizado, as rotas são mantidas e não é necessário esperar pela criação de rotas. Sendo assim, os conjuntos de simulações de prova de conceito mostram-se úteis para verificar esse padrão de comportamento.

Tabela 5.3: Conjunto IV - Número de pacotes de controle TC recebidos pela nó fonte do fluxo de dados.

Tamanho do Intervalo (segundos)	TC com PORT (pacotes)	TC sem PORT (pacotes)
2	7384 ±24	3972 ±118
3	4638 ±60	4078 ±56
5	4651 ±45	2588 ±56
10	4164 ±40	3087 ±25
25	3674 ±44	3944 ±69
50	3651 ±39	4194 ±44
100	3805 ±43	4374 ±54

No segundo subgrupo de simulações, os intervalos de ciclos de tarefas são dessincroni-

zados, mas as métricas são calculadas como se os intervalos fossem sincronizados. Com a dessincronização, o intervalo de 25 s de ciclo de tarefas pode ser maior ou menor, mas as métricas são calculadas como se o intervalo de ciclos de tarefas fosse sempre 25 s. Pesquisas mostram que 99% dos servidores NTP estão sincronizados com seus pares com uma dessincronização menor que 1 segundo [15]. Sendo assim, assume-se que a dessincronização não seja maior que 2,5 s em uma rede em que os nós executem o NTP. Desse modo, as simulações são feitas com dessincronização máxima de 10% do intervalo de ciclos de tarefas, que é 25 s. A dessincronização não influencia na operação do mecanismo PORT e o mesmo continua com bom desempenho por manter as rotas durante o desligamento dos rádios nesse cenário. Nas Figuras 5.12 e 5.14, a vazão diminui enquanto a dessincronização do intervalo aumenta. Esse fato acontece porque com a dessincronização, o tempo em que todos os nós da rede estão com o rádio ligado diminui e, conseqüentemente, diminui o período de tempo em que os nós conseguem trocar pacotes de dados.

5.2.2 Conjunto V - Cenário de Rede em Malha Sem Fio com Mobilidade (ZebraNet)

Neste conjunto, são definidos vinte fluxos de dados para que assim cada nó da rede tenha um fluxo de dados com todos os outros nós. Varia-se também a velocidade dos nós e o tamanho dos intervalos dos ciclos de operação. Nas simulações que testam diferentes velocidades, o ciclo de operação tem o valor fixo de 40 s. Nas simulações que testam diferentes ciclos de operação, a velocidade original do padrão de mobilidade é utilizada. Dessa maneira, no Conjunto V, os resultados são apresentados como a porcentagem das vezes que as métricas vazão e tempo de entrega do primeiro pacote são menores com a utilização do mecanismo PORT. Os gráficos de atraso não são apresentados para os Conjuntos V e VI porque os valores dessa métrica são sempre semelhantes com e sem o PORT.

Os resultados para o tempo de entrega do primeiro pacote apresentado nas Figuras 5.17 e 5.18 mostram que o mecanismo PORT aumenta o desempenho da rede entre 40% e 60% das vezes.

A conclusão com as simulações do Conjunto V mostram que a variação dos intervalos de ciclos de tarefas, como pode ser visto nas Figuras 5.18 e 5.20, tem pouca influência no desempenho do PORT. Entretanto, a variação da velocidade dos nós, como pode ser visto nas Figuras 5.17 e 5.19, impacta o tempo de entrega do primeiro pacote com o PORT e também a vazão obtida. É interessante notar que o desempenho do PORT aumenta com o

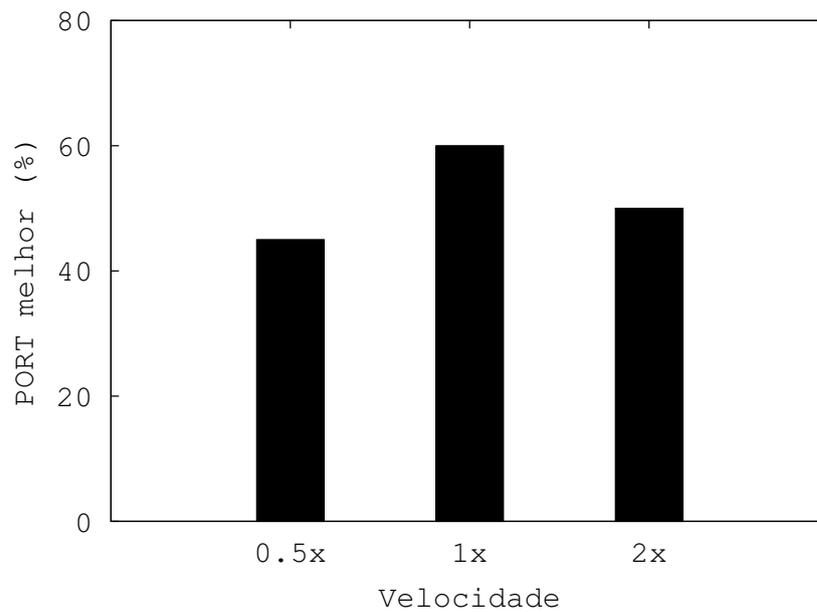


Figura 5.17: Conjunto V - Cenário com alternância de velocidade - Gráfico do Tempo de entrega do Primeiro Pacote.

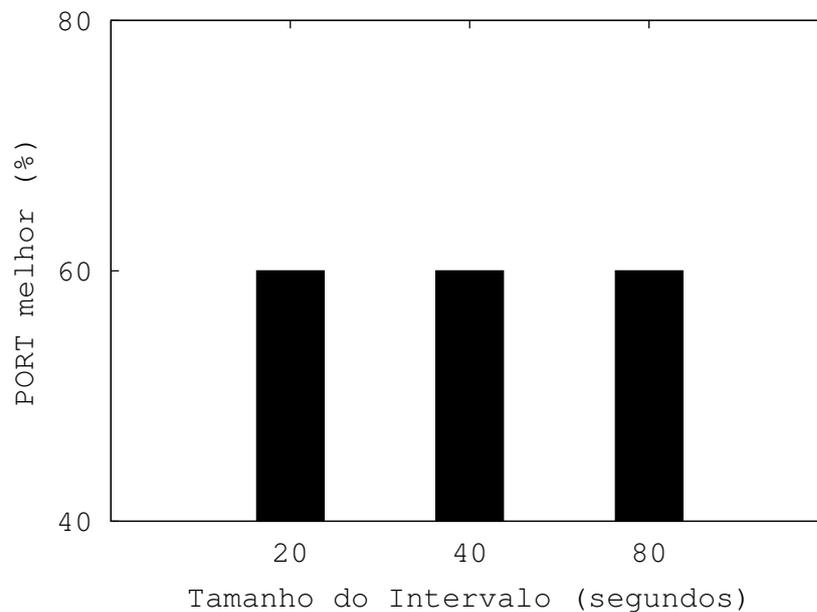


Figura 5.18: Conjunto V - Cenário com alternância de ciclos de tarefas - Gráfico do Tempo de entrega do Primeiro Pacote.

aumento da velocidade dos nós. Neste cenário específico, onde os nós apresentam um alto grau de agrupamento (manada), o aumento da velocidade não prejudica a comunicação entre os nós porque as rotas não se modificam.

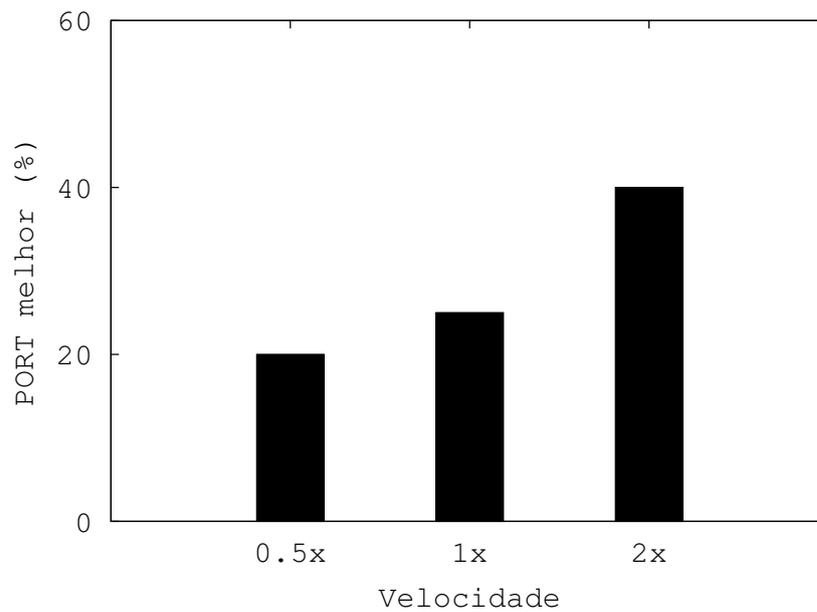


Figura 5.19: Conjunto V - Cenário com alternância de velocidade - Gráfico da Vazão.

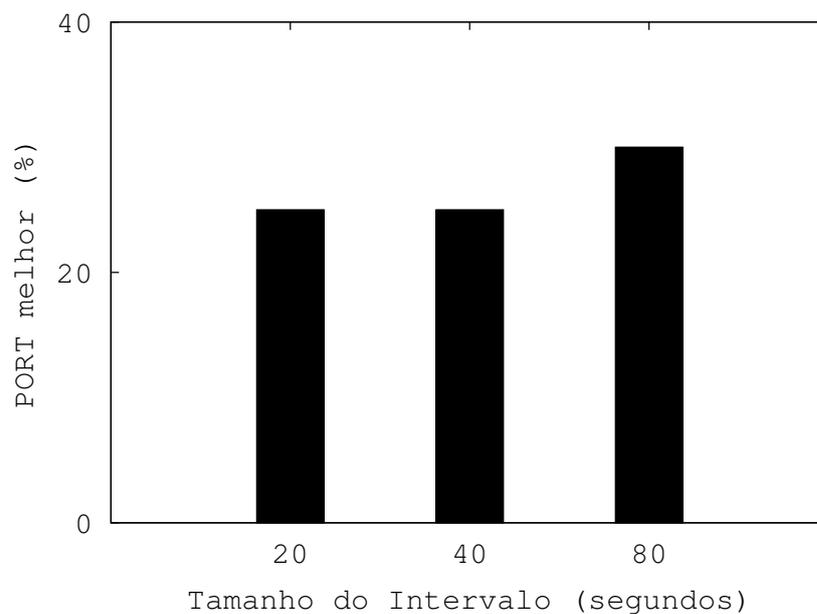


Figura 5.20: Conjunto V - Cenário com alternância de ciclos de tarefas - Gráfico da Vazão.

5.2.3 Conjunto VI - Cenário de Rede em Malha Sem Fio com nós móveis (VanLan)

Nesse conjunto de simulações, o desempenho do PORT também varia significativamente. No cenário com a velocidade original dos nós móveis, o tempo de entrega do primeiro pacote é maior quando o PORT é utilizado. Esse comportamento é observado na Figura 5.21 e acontece porque as rotas persistidas não são funcionais quando o rádio é reiniciado e o

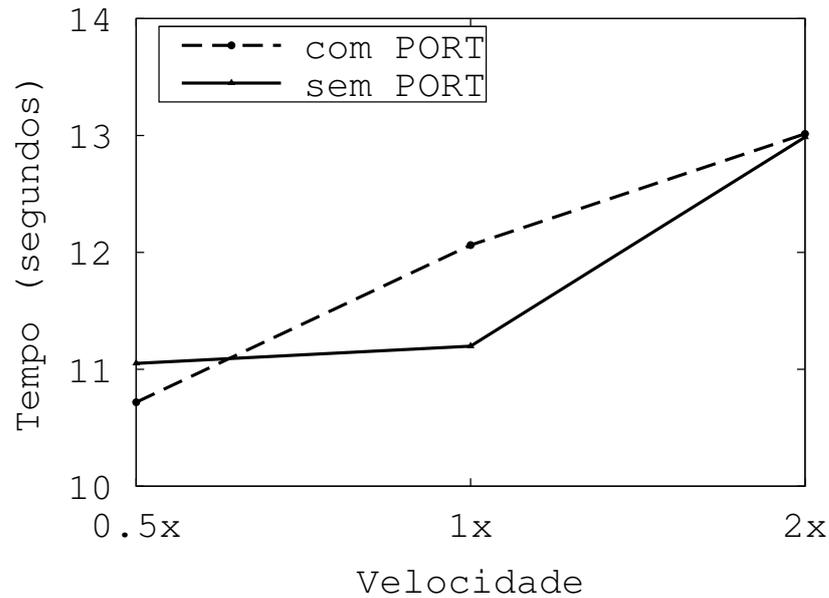


Figura 5.21: Conjunto VI - Gráfico do Tempo de Entrega do Primeiro Pacote.

tempo de tornar essas rotas não funcionais em funcionais é maior que o tempo de criar novas rotas. Mesmo quando o tempo de entrega do primeiro pacote é maior, o cenário com a velocidade original apresenta vazão maior quando o PORT é utilizado, como pode ser visto na Figura 5.22. Esse comportamento não é esperado porque se o tempo de entrega do primeiro pacote é menor, houve mais tempo para troca de pacotes e, dessa maneira, esperava-se que a vazão obtivesse o melhor resultado quando o tempo de entrega do primeiro pacote fosse menor. O fato de o tempo de entrega do primeiro ser menor sem o mecanismo PORT indica que a rota persistida pelo PORT não era mais válida quando os rádios foram reiniciados. Sendo assim, nesse cenário é mais rápido obter a rota para o destino quando a tabela está vazia do que quando a tabela possui informações inválidas, mas a rota válida obtida depois que a tabela possuía informações inválidas é melhor, o que pode ser ratificado pelo resultado da métrica da vazão ser melhor quando o PORT é utilizado. Nos cenários com a metade e o dobro da velocidade, a métrica da vazão não apresenta o mesmo ganho de desempenho observado na métrica do tempo de entrega do primeiro pacote.

Nos cenários do Conjunto VI, enquanto a velocidade aumenta, a vazão tende a diminuir e o tempo de entrega do primeiro pacote tende a aumentar. O tempo de entrega do primeiro pacote aumenta porque o tempo de aquisição de rotas aumenta. Diferentemente do conjunto de simulações anterior, quando os nós estão movendo em padrões descritos por manadas de animais, em cenários onde os nós móveis se movem através de estações base, as métricas tendem a ter o comportamento apresentado nessa seção.

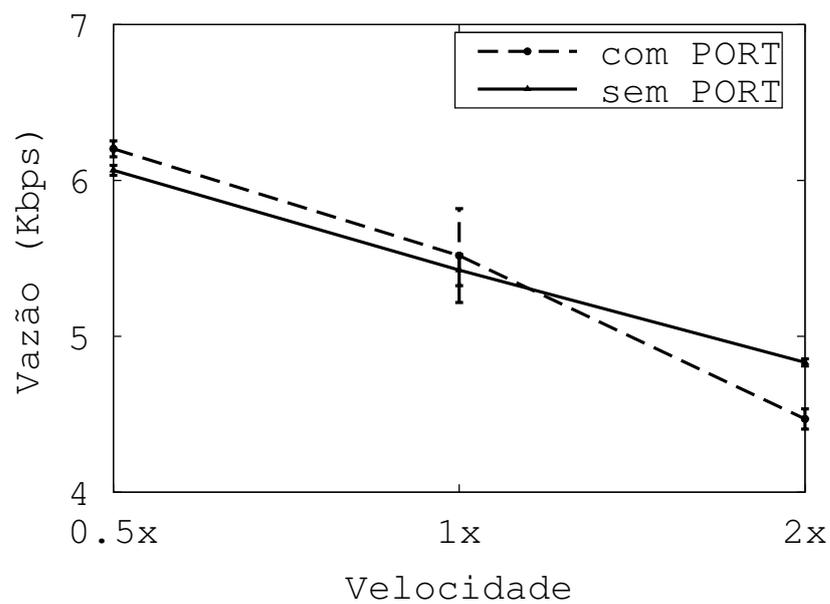


Figura 5.22: Conjunto VI - Gráfico da Vazão

Este capítulo apresentou os resultados e as análises das simulações realizadas para avaliar o mecanismo proposto. Em seguida, serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho foi estudado o problema da perda de rotas quando uma rede em malha sem fio verde, que utiliza um protocolo de roteamento proativo, entra no modo de conservação de energia com os rádios desligados. O mecanismo PORT é proposto para permitir a persistência das tabelas de roteamento nessas condições. Para garantir a persistência, o PORT modifica os temporizadores que controlam a expiração das rotas na tabela de roteamento.

Para demonstrar a eficácia do mecanismo, foram simulados vários cenários com diferentes topologias e diferentes ciclos de operação dos nós da rede. As simulações foram feitas no NS-2 e são avaliadas as métricas de vazão, atraso, disponibilidade das rotas depois do religamento dos rádios e tempo de entrega do primeiro pacote, depois do religamento dos rádios.

Seis conjuntos de simulações foram analisados. Os três primeiros conjuntos tiveram o objetivo de mostrar a viabilidade e a eficácia do mecanismo PORT em cenários com variáveis controladas. Os três últimos conjuntos tiveram o objetivo de testar o desempenho do mecanismo PORT em cenários realísticos.

Nos três primeiros conjuntos de simulações, as simulações foram feitas em cenários de redes em grades e de redes lineares. Nas simulações com o cenário de redes em grade, foi possível observar que o PORT é funcional em redes em malha sem fio com pequena ou grande quantidade de nós. Pela primeira vez, foi percebido que o PORT aumentou a disponibilidade das rotas e, conseqüentemente, aumentou a vazão da rede. O atraso não foi prejudicado pelo mecanismo e esses comportamentos foram observados na maioria das simulações realizadas.

Nas simulações com cenários de redes lineares, a eficácia do mecanismo PORT foi tes-

tada variando o tamanho do ciclo de tarefas dos nós e variando o protocolo de transporte. Quando o tamanho do ciclo de tarefas varia, foi verificada a eficácia do mecanismo mesmo quando o tamanho do intervalo é menor que o tempo necessário para que as rotas sejam perdidas. Esse fato se dá porque quando o mecanismo PORT não é utilizado, mensagens de controle são perdidas quando os rádios estão desligados. Isso não acontece quando o mecanismo é utilizado, pois com o PORT o protocolo não considera que as mensagens de controle deixam de ser recebidas. Nesse cenário também foi observado que quanto maior o tamanho do ciclo de tarefas, menor a eficácia do mecanismo PORT devido ao fato do tempo economizado pelo mecanismo ser menos expressivo em relação ao tempo útil do ciclo de tarefas. Nos cenários com diferentes protocolos de transporte, o protocolo de transporte UDP obteve resultados muito melhores que o protocolo TCP. Nesse caso, as funcionalidades extras, que o protocolo TCP possui, prejudicaram seu desempenho quando o PORT é utilizado.

Nos últimos três conjuntos de simulações foram realizados experimentos para avaliar o desempenho do mecanismo em cenários realistas. O primeiro desses conjuntos de simulações realizou testes numa rede em malha sem fio real. Essa rede possui 13 nós e para que um pacote atravesse a rede são necessários, em média, 7 saltos. Nessas simulações foram verificados alguns comportamentos que foram previstos nas simulações de prova de conceito, é possível verificar que o atraso não é influenciado pelo uso do mecanismo PORT, que a dessincronização dos ciclos de tarefas afeta de forma ruim a métrica da taxa de transferência na mesma proporção que essa dessincronização é inserida nas simulações e que a taxa de transferência tem um ganho de desempenho significativo com a utilização do PORT.

Os últimos dois conjuntos de simulações realizaram testes em redes em malha sem fio onde os nós são móveis. Dois cenários foram testados. No primeiro cenário um veículo se move nas ruas de um campus empresarial, levando pessoas de um prédio a outro. No outro cenário, os nós da rede estão implantados em zebras que se movimentam seguindo um comportamento de manada em um campo aberto. Mesmo em cenários tão distintos, a utilização do mecanismo PORT não faz com que a taxa de transferência apresente ganhos significativos embora, mais uma vez, a métrica de atraso não tenha sido influenciada pelo uso do PORT. Concluímos que o uso do PORT em cenários com mobilidade não traz benefícios expressivos.

Por meio da análise dos resultados verificou-se que o PORT aumenta a disponibilidade de rotas e, conseqüentemente, aumenta a vazão da rede. O atraso não é prejudicado pelo

mecanismo. Nos cenários simulados, o ganho da vazão com a utilização do PORT foi, em alguns casos, maior que 100% e, na maioria dos intervalos de rádio ligado, todas as rotas estavam disponíveis no instante em que o rádio era religado e o mecanismo PORT estava sendo utilizado.

O mecanismo PORT obteve bom desempenho em uma rede em malha, cuja topologia é tipicamente estacionária. No cenário com mobilidade, o ganho de desempenho foi incerto. Nesses casos, não foi possível identificar se é melhor para o desempenho da rede possuir nenhuma informação ou uma informação desatualizada quando os nós têm seu rádio religado. No cenário com dessincronização, a perda de desempenho se deu na mesma proporção do grau de dessincronização.

Este trabalho contribuiu para a publicação de dois artigos: “PORT: Persistência de Tabelas de Roteamento em Redes em Malha Sem Fio Verdes” [4] no Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS) do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC) de 2012 e “Persistence of Routing Tables in Wireless Mesh Networks with Duty Cycling” [3] na Conferência *Wireless Days* de 2012. Uma implementação do mecanismo PORT também foi disponibilizada para a realização de simulações no simulador NS-2.

6.1 Trabalhos Futuros

A principal linha de trabalho futuro para o PORT é a realização de testes experimentais em implementações reais que servirão para verificar o desempenho do PORT em condições reais de operação de redes em malha sem fio com múltiplos saltos.

Para a realização desses testes seria necessário pensar nos seguintes pontos: como sincronizar os relógios dos nós da rede, como desligar os rádios sem fio e como implementar o mecanismo PORT.

Uma maneira de realizar esses testes seria usando o protocolo NTP para sincronizar os relógios da rede. Esse protocolo consegue fazer com que os relógios mantenham um erro na casa dos milissegundos. Para desligar os rádios sem fio dos nós, duas técnicas podem ser utilizadas: desligar o rádio por meio do comando *privar* ou descarregar o módulo Linux do *drivers* do adaptador de rede sem fio. A escolha da técnica depende do driver do adaptador de rede sem fio. Nem todos os drivers possuem um método para desligar os rádios sem fio. Quando isso acontece, a única maneira de desligar os rádios é descarregando o driver. Por último, uma maneira de implementar o PORT seria como um

plugin do protocolo de roteamento. Dessa maneira, uma série de facilidades do protocolo de roteamento pode ser utilizada como o broadcast de mensagens de controle.

Referências

- [1] IEEE 802.11-2007, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, junho de 2007.
- [2] ABDULLAH, A. A., GEBALI, F., CAI, L. Modeling the Throughput and Delay in Wireless Multihop Ad Hoc Networks. In *GLOBECOM 2009* (novembro de 2009), p. 1–6.
- [3] ALVES, R. L., CARRANO, R., MORAES, I. M., DE ALBUQUERQUE, C. V. N. Persistence of routing tables in wireless mesh networks with duty cycling. In *IFIP - Wireless Days* (novembro de 2012).
- [4] ALVES, R. L., CARRANO, R., MORAES, I. M., DE ALBUQUERQUE, C. V. N. Port: Persistência de tabelas de roteamento em redes em malha sem fio verdes. In *SBRC 2012 - WGRS* (abril de 2012).
- [5] BICKET, J., AGUAYO, D., BISWAS, S., MORRIS, R. Architecture and evaluation of an unplanned 802.11 b mesh network. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking* (2005), p. 31–42.
- [6] BRUNO, R., CONTI, M., GREGORI, E. Throughput Analysis and Measurements in IEEE 802.11 WLANs with TCP and UDP Traffic Flows. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 7 (February 2008), 171–186.
- [7] CHRISTMANN, D., GOTZHEIN, R., KRAMER, M., WINKLER, M. Flexible and energy-efficient duty cycling in wireless networks with MacZ. In *New Technologies of Distributed Systems (NOTERE), 2010 10th Annual International Conference on* (2010), IEEE, p. 121–128.
- [8] CHU, W., TSEN, Y.-C. A Power Efficient Scheduling Mechanism for an IEEE 802.11 Multiple Rate Ad Hoc Network. *Journal of Computers* 19, 2 (julho de 2008).
- [9] CLAUSEN, T., JACQUET, P. RFC 3626: Optimized link state routing protocol (OLSR), outubro de 2003.
- [10] COUTO, D., AGUAYO, D., BICKET, J., MORRIS, R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks* 11, 4 (2005), 419–434.
- [11] FARBOD, A., TODD, T. D. Resource Allocation and Outage Control for Solar-Powered WLAN Mesh Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6, 8 (agosto de 2007), 960–970.
- [12] GERK, L., PASSOS, D., MUCHALUAT-SAADE, D. C., ALBUQUERQUE, C. Infraestrutura de comunicação em malha sem fio para supervisão e controle de sistemas de transmissão de energia. In *Espaço Energia* (2009), vol. 10, p. 1–10.

-
- [13] MAHAJAN, R. CRAWDAD data set microsoft/vanlan (v. 2007-09-14). Downloaded from <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/microsoft/vanlan>, setembro de 2007.
- [14] MILLS, D. L. RFC 1305: Network time protocol, 1992.
- [15] MINAR, N. A survey of the NTP network, dezembro de 1999.
- [16] NS-2. <http://isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 20/11/2011.
- [17] PERKINS, C. E., BHAGWAT, P. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 24 (outubro de 1994), 234–244.
- [18] PICKAVET, M., VEREECKEN, W., DEMEYER, S., AUDENAERT, P., VERMEULEN, B., DEVELDER, C., COLLE, D., DHOEDT, B., DEMEESTER, P. Worldwide Energy Needs for ICT: The rise of power-aware networking. In *Advanced Networks and Telecommunication Systems - (ANTS)* (dezembro de 2008), p. 1–3.
- [19] POSTEL, J. RFC 768: User datagram protocol, agosto de 1980.
- [20] POSTEL, J. RFC 793: Transmission control protocol, setembro de 1981.
- [21] TSENG, Y.-C., HSU, C.-S., HSIEH, T.-Y. Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop ad hoc networks. *Comput. Netw.* 43 (outubro de 2003), 317–337.
- [22] WANG, Y., ZHANG, P., LIU, T., SADLER, C., MARTONOSI, M. CRAWDAD data set princeton/zebranet (v. 2007-02-14). Downloaded from <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/princeton/zebranet>, fevereiro de 2007.
- [23] ZHENG, R., HOU, J. C., SHA, L. Optimal Block Design for Asynchronous Wake-Up Schedules and Its Applications in Multihop Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5 (setembro de 2006), 1228–1241.