

# Um Protocolo de Descoberta de Vizinhança Escalável para Redes em Malha Sem Fio Infra-Estruturadas

Daniel Charles F. Porto, Gustavo Cavalcanti, Gledson Elias, Mateus N. Santos

Departamento de Informática – Universidade Federal da Paraíba (UFPB)  
Cidade Universitária – 58.051.900 – João Pessoa – PB – Brasil

{daniel,gustavo,mateus}@ppgi.di.ufpb.br, gledson@di.ufpb.br

**Abstract.** *Wireless Mesh Networks (WMNs) have emerged as a new class of self-configurable networks that provide large coverage and connectivity. Due to similarities between ad hoc and wireless mesh networks, the required routing capabilities have been provided by ad hoc routing protocols, which do not scale very well in WMNs. One of the main reasons is the high signaling overhead generated by their neighborhood discovery process, which are responsible for detecting the presence and status of neighbor nodes. In such a context, this paper presents a scalable neighborhood discovery protocol (SNDP) designed for infrastructure WMNs. SNDP aims to reduce signaling overhead, power consumption and neighborhood discovery time.*

**Resumo.** *Redes em Malha Sem Fio (RMSF) são redes auto-configuráveis que provêm ampla cobertura e conectividade. Em função das similaridades com redes ad hoc, as facilidades de roteamento requeridas em RMSF têm sido providas por protocolos de roteamento ad hoc, que apresentam limitações de escalabilidade. Uma das principais razões é a alta carga de sinalização do processo de descoberta de vizinhança, que é responsável por detectar a presença e o estado de nós vizinhos. Neste contexto, este artigo apresenta um protocolo de descoberta de vizinhança escalável (SNDP) projetado para RMSF infra-estruturadas. O SNDP tem por objetivo reduzir a carga de sinalização, o consumo de energia e o tempo de descoberta da vizinhança.*

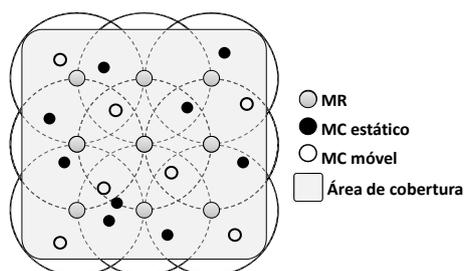
## 1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, as redes sem fio têm desempenhado um papel cada vez mais importante na comunicação dos computadores. A popularização de dispositivos sem fio, de baixo preço, baixo consumo de energia e portáteis, tem impulsionado o aumento da demanda e a implantação de infra-estruturas sem fio [Zhang *et al.* 2007]. Assim, a indústria e a academia têm concentrado esforços na evolução de diferentes tipos de redes móveis, como por exemplo, as Redes em Malha Sem Fio (*Wireless Mesh Networks*). As Redes em Malha Sem Fio (RMSF) são redes auto-configuráveis e auto-reparáveis, cuja comunicação entre dispositivos é realizada pela cooperação dos nós (dispositivos sem fio), que encaminham pacotes através de sua vizinhança, permitindo a comunicação entre nós distantes. Estas características permitem a criação espontânea de uma infra-estrutura sem fio com a capacidade de responder a quebras dos enlaces provocadas por falhas ou movimentação dos nós [Chen *et al.* 2006].

A arquitetura das RMSF define dois tipos de nós: *Mesh Client* (MC) e *Mesh Router* (MR). Os MCs são dispositivos com recursos limitados (por exemplo, com energia fornecida por baterias), móveis e que utilizam os serviços da rede. Já os MRs são dispositivos fixos, dedicados, sem restrições de energia [Hossain e Leung 2008], responsáveis por encaminhar pacotes na rede, formando um *backbone*. A existência do

*backbone* faz com que os enlaces das RMSF sejam mais confiáveis do que os enlaces de outros tipos de redes móveis, como por exemplo, as redes *ad hoc* [Chen *et al.* 2006; Zhang *et al.* 2007]. Além disso, os MRs também conectam a RMSF a outras redes.

Em adição, as RMSF podem ser classificadas em: *cliente*, *infra-estruturada* e *híbrida*. A infra-estruturada é o tipo de RMSF mais popular. Neste tipo de rede, apenas os MRs encaminham pacotes, não existindo comunicação direta entre MCs. As RMSF infra-estruturadas podem ser aplicadas em diversos cenários, como por exemplo, prover área de cobertura para permitir conectividade entre os *hosts* e o acesso à Internet a um campus universitário, bairro ou edifício, mesmo quando os MCs estão se movendo [Akyildiz *et al.* 2005]. A Figura 1 apresenta uma RMSF infra-estruturada.



**Figura 1. Rede em malha sem fio infra-estruturada**

Um dos grandes desafios das RMSF é o desenvolvimento de protocolos de roteamento que atendam aos requisitos destas redes. Devido às similaridades com as redes *ad hoc*, as facilidades de roteamento requeridas para as RMSF têm sido fornecidas por protocolos de roteamento projetados para redes *ad hoc* [Akyildiz *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2007], como por exemplo, o protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [Clausen e Jaquet 2003], que é definido pela RFC 3626 e utilizado nos projetos VMesh [Tsarmopoulos *et al.* 2005] e ReMesh [REMESH 2008]. Entretanto, os protocolos de roteamento de redes *ad hoc* têm problemas de escalabilidade, já que o desempenho da rede é degradado à medida que o número de nós aumenta [Akyildiz *et al.* 2005].

As facilidades de um protocolo de roteamento para RMSF podem ser divididas dentro de uma arquitetura em camadas, onde a camada inferior é responsável por detectar a presença e ausência de dispositivos vizinhos [Porto *et al.* 2009]. Alguns protocolos de roteamento já realizam a separação das funcionalidades de detecção de vizinhança em protocolos específicos para este propósito. Um exemplo pode ser visto na segunda versão do OLSR, denominado OLSRv2 [Clausen *et al.* 2008b], que realiza a separação formal do processo de descoberta de vizinhança da primeira versão, em um protocolo específico, denominado NHDP [Clausen *et al.* 2008a].

Como evidenciado em [Voorhaen e Blondia 2006], o processo de descoberta de vizinhança exerce grande influência sobre o desempenho de um protocolo de roteamento, pois grande parte dos problemas de escalabilidade é creditada à carga de mensagens de sinalização geradas pelo processo de descoberta de vizinhança.

Neste contexto, este artigo apresenta o protocolo SNDP (*Scalable Neighborhood Discovery Protocol*), para descoberta e controle das informações de vizinhança, que tem como objetivo reduzir a carga de sinalização, o consumo de energia e o tempo de descoberta da vizinhança. A redução da carga de sinalização é obtida através de uma estratégia híbrida e colaborativa entre MCs e MRs, onde os MRs divulgam mensagens de forma pró-ativa e orientada a tempo, e os MCs divulgam mensagens de maneira reativa e orientada a eventos. Além disso, com a redução da carga de sinalização, o SNDP também consegue reduzir o consumo de energia dos dispositivos. Por fim, a

estratégia híbrida também faz com que a descoberta da vizinhança ocorra em tempos reduzidos, de uma forma mais eficiente.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a descrição do protocolo SNDP, explicando a sua estratégia híbrida para descoberta da vizinhança, bem como alguns refinamentos do esquema de sinalização. Já a Seção 3 apresenta os detalhes da simulação da avaliação de desempenho do SNDP em relação ao processo de descoberta de vizinhança do OLSR. Por sua vez, a Seção 4 apresenta a avaliação quantitativa de desempenho para aferir a eficiência do protocolo com relação à carga de mensagens, consumo de energia e tempo de descoberta. Em conclusão, a Seção 5 apresentada algumas considerações finais.

## 2. O Protocolo SNDP

O SNDP (*Scalable Neighborhood Discovery Protocol*) é um protocolo responsável por detectar, notificar e processar modificações na vizinhança de um nó em uma RMSF infra-estruturada, buscando reduzir a carga de mensagens de sinalização, economizando energia e mantendo baixos tempos de detecção destas mudanças. A grande diferença do SNDP com relação ao NHDP ou ao processo de descoberta de vizinhança do OLSR está na utilização efetiva das características da RMSF infra-estruturada, adotando uma estratégia híbrida para descobrir a vizinhança dos dispositivos. Para isto, o SNDP adota algumas premissas para seu funcionamento: é necessária uma área de cobertura total fornecida pelo *backbone* e enlaces bidirecionais entre MCs e MRs.

Como já mencionado, o SNDP detecta a entrada e saída de nós na vizinhança através de sua estratégia híbrida e colaborativa. A estratégia é dita híbrida porque combina características pró-ativas e reativas. A parte pró-ativa do protocolo é executada pelos MRs e é orientada a tempo, pois todo MR envia periodicamente mensagens *HELLO* para anunciar sua presença. A parte reativa é executada pelos MCs e é orientada a eventos, pois os MCs só enviam mensagens *HELLO* quando entram ou saem da área de cobertura de um MR. A estratégia é colaborativa porque MCs e MRs cooperam para detectar a perda da vizinhança. Em ambos os casos, as mensagens *HELLO* são emitidas em *broadcast* e não são retransmitidas pelos nós receptores.

O intervalo de tempo entre mensagens *HELLO* emitidas pelos MRs é um parâmetro que pode ser ajustado no protocolo. Desta forma, o SNDP pode ser configurado para se adequar a diferentes cenários de mobilidade, podendo perceber mais rapidamente ou mais lentamente as mudanças na vizinhança. Quanto menor o intervalo de tempo entre as emissões de *HELLOs*, maior a carga de mensagens emitidas, no entanto, tende a reduzir os tempos de detecção de entrada e saída dos MCs. Assim como no OLSR, no SNDP, o intervalo de tempo padrão para envio de mensagens *HELLO* é um valor entre 1,5 e 2s. Este valor é escolhido aleatoriamente para evitar a sincronização no envio de *HELLOs* entre MRs vizinhos, e, por conseguinte, colisões.

### 2.1. Descoberta da vizinhança

Como já dito, no cenário assumido pelo SNDP, não é permitida a comunicação direta entre MCs. Portanto, os MCs precisam detectar apenas os seus MRs vizinhos. Para isto, os MRs adotam uma abordagem pró-ativa enviando periodicamente mensagens *HELLO*. Assim, quando um MC é ligado ou movimenta-se em direção a área de cobertura de um MR, o MC recebe um *HELLO* do MR e percebe que aquele MR é seu vizinho. Neste momento, o MC inclui o MR em uma tabela (chamada tabela de vizinhança) e associa um tempo de expiração à entrada na tabela. Sempre que são recebidos *HELLOs* de um MR vizinho, o respectivo tempo de expiração na tabela de vizinhança é atualizado.

Ao contrário dos MCs, que precisam descobrir apenas os MRs vizinhos, os MRs necessitam descobrir tanto MRs quanto MCs vizinhos. O comportamento pró-ativo adotado pelos MRs permite a descoberta de outros MRs quando uma mensagem *HELLO* é recebida. Neste caso, ocorre a inclusão de uma entrada na tabela de vizinhança, informando a presença do MR, com um tempo de expiração associado. Novamente, sempre que um *HELLO* é recebido de um MR vizinho, o respectivo tempo de expiração na tabela de vizinhança é atualizado.

Por outro lado, os MRs descobrem os MCs através do comportamento reativo dos mesmos, como ilustrado na Figura 2. Neste caso, em reação a uma mensagem *HELLO* recebida de um dado MR, o MC envia como resposta uma mensagem *HELLO* para também anunciar sua presença. A mensagem do MC só é emitida quando o MC adiciona o MR como vizinho, isto é, apenas na primeira vez que ele recebe um *HELLO* deste MR. Assim, quando um MC é ligado ou movimenta-se em direção a área de cobertura de um MR (Figura 2a), ao receber um *HELLO* do MR (Figura 2b), o MC emite um *HELLO* em resposta (Figura 2c). Desta forma, após receber a mensagem *HELLO* do MC, o MR pode incluir uma entrada correspondente ao MC na tabela de vizinhança. Nenhuma informação de expiração da vizinhança precisa ser adicionada na tabela do MR, pois é responsabilidade do MC gerenciar a perda da vizinhança, conforme será detalhado na Seção 2.2.

Para evitar que a perda da mensagem de resposta do MC, devido a alguma colisão ou outros problemas que possam ocorrer na transmissão, prejudique a consistência das informações mantidas pelo SNDP, uma estratégia de confirmação indireta é adotada pelos MRs. Na estratégia de confirmação adotada, todo MR que recebe um *HELLO* de um MC deve incluir, quando enviar o seu próximo *HELLO*, a informação que adicionou o MC como vizinho (Figura 2d). Esta informação de descoberta do MC é incluída em um campo da mensagem *HELLO* do MR que indica a lista de MCs recentemente descobertos. Assim, o MC ao receber o próximo *HELLO* do MR, verifica se está presente na lista, confirmando que foi detectado pelo MR. Se o MC não estiver presente na lista, ele emite outro *HELLO* até perceber que o MR o adicionou como vizinho.

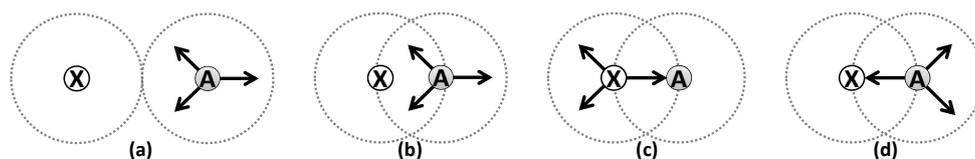


Figura 2. Processo de descoberta da vizinhança entre MR e MC

## 2.2. Perda da vizinhança

Para detectar a perda da vizinhança, MCs e MRs adotam estratégias diferentes. Um MC detecta que perdeu a vizinhança com um MR após não receber mensagens *HELLO* deste MR até o momento que a respectiva entrada na tabela de vizinhança expira. Por padrão, o tempo de expiração é de 2 segundos, sendo a entrada atualizada a cada *HELLO* recebido do respectivo MR. De forma análoga, um MR detecta que perdeu a vizinhança com outro MR após não receber mensagens *HELLO* deste MR até o momento que a respectiva entrada na tabela de vizinhança expira.

No entanto, um MR não pode adotar um tempo de expiração para detectar a perda da vizinhança com um MC, pois os MCs não publicam periodicamente. Assim, nos MRs, não existe tempo de expiração associado à informação de vizinhança com MCs. Neste caso, o MC é responsável por detectar a perda da vizinhança com o MR, e

em seguida, baseado em uma estratégia reativa, enviar uma notificação de perda para o MR, como ilustrado na Figura 3. Assim, quando percebe a perda da vizinhança com o MR, o MC emite uma mensagem *HELLO* com uma notificação de perda destinada ao MR perdido, alertando que não é mais seu vizinho, como ilustrado na Figura 3a.

Obviamente, a notificação de perda não pode ser recebida diretamente pelo MR perdido. No entanto, como o *backbone* tem cobertura total, embora o MC não tenha mais contato com o MR, outro MR próximo ainda tem. Assim, a notificação enviada pelo MC origem é repassada por outros MRs intermediários até alcançar o MR destino (Figura 3b). A notificação é enviada em um campo específico da mensagem *HELLO*.

A confirmação do encaminhamento da notificação do MC é realizada de forma indireta quando algum MR vizinho encaminha a notificação em seu próprio *HELLO*. O MC somente reenvia a notificação se não receber, de algum MR vizinho, um *HELLO* incluindo o encaminhamento da notificação. Deste modo, o MC não precisa permanecer enviando mensagens *HELLOs* com notificações na rede.

É importante ressaltar que o MC não remove as informações de vizinhança de um MR logo após enviar a notificação. Ele aguarda ainda um intervalo de 0,5 segundos após o envio da notificação para remover a informação. Desta forma, em função de erros de transmissão, caso um MC não receba um *HELLO* de um MR que ainda é seu vizinho, ele emite a notificação, mas possibilita que o MR adiante o envio de seu *HELLO* para que o MC não exclua a informação de vizinhança. Assim, nos MCs, o tempo para remoção da informação de vizinhança com MRs é de 2,5 segundos, considerando o valor padrão de intervalo de publicação de mensagens *HELLO*.

O encaminhamento da notificação de perda do MC é realizado usando um processo de inundação (*flooding*) com área de alcance limitada, no qual cada MR intermediário que recebe uma notificação deve incluí-la em seu próximo *HELLO*. Cada notificação tem um número de seqüência, que, em conjunto com os identificadores do MC origem e do MR perdido, identificam unicamente cada notificação. Assim, os MRs podem detectar e descartar réplicas das notificações.

Para delimitar a área de alcance de uma notificação, um campo da notificação define o número de saltos que a notificação pode alcançar. Esse número de saltos é definido pelo MC origem. Ao receber uma notificação, cada MR intermediário decrementa o número de saltos e propaga a notificação adiante (Figura 3b). O valor padrão para o limite de saltos é três. Este limite também é um parâmetro configurável.

Quando um MR intermediário recebe uma notificação de perda de vizinhança com número de saltos igual a um, ele somente inclui a notificação no próximo *HELLO* se for vizinho do MR destino. Neste caso, o MR intermediário permanece incluindo a notificação nos *HELLOs* até receber, do MR destino, a confirmação da remoção da vizinhança do MC. Essa confirmação é realizada pela inclusão do MC em um campo do *HELLO* que representa a lista de MCs perdidos. Assim, quando o MR destino recebe uma notificação, ele remove o MC da tabela de vizinhança e informa seus MRs vizinhos da remoção (Figura 3c).

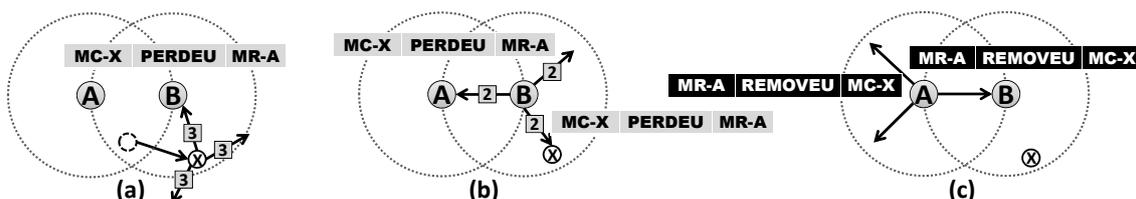


Figura 3. Descoberta da perda da vizinhança MR-MC

### 2.3. Refinamento do esquema de sinalização

No *backbone*, podem existir regiões nas quais os MRs não possuem MCs vizinhos, por exemplo, quando ocorre migração temporária de MCs móveis de uma área para outra, conforme ilustrado na Figura 4. Neste caso, os MRs sem MCs vizinhos ainda precisam enviar mensagens para alertar outros MRs e manter a conectividade no *backbone*. No entanto, não há necessidade de rapidamente detectar MCs. Assim, é possível reduzir a frequência de envio de mensagens *HELLO* nesta região. Esta redução é obtida com a adoção de um intervalo de tempo maior entre mensagens *HELLO* dos MRs. No entanto, para não aumentar o tempo de detecção de um MC que está na iminência de entrar na área de cobertura, apenas os MRs, que não possuem MCs vizinhos e cujos MRs vizinhos também não possuem MCs vizinhos, passam a adotar a frequência reduzida (os MRs {A, B, C, D, G, H, L, P} da Figura 4). Desta forma, a quantidade de mensagens *HELLO* enviadas naquela região é significativamente menor.

Uma vez que o MR não publica lista de vizinhos nas mensagens *HELLO*, uma *flag* no *HELLO* do MR permite identificar se este MR possui MCs vizinhos. Assim, quando um MR percebe que não existem MCs na sua vizinhança nem na de seus MRs vizinhos, ele passa a operar usando o intervalo de tempo maior entre *HELLOs*, que por padrão é um valor aleatório entre 24 e 32 segundos. Caso contrário, ele mantém ou passa a operar usando o intervalo de tempo menor, que por padrão é um valor aleatório entre 1,5 e 2 segundos.

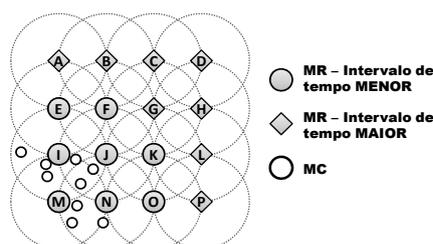


Figura 4. Comportamento da emissão dos *HELLOs* dos MRs

### 3. Cenário de simulação e parâmetros de avaliação

Visando avaliar a eficiência do SNDP com relação a outro trabalho, foi realizada uma comparação do protocolo com o processo de descoberta de vizinhança do OLSR. Como já dito, para a segunda versão do OLSR, foi realizada a separação formal do seu processo de descoberta de vizinhança, criando assim um protocolo de descoberta de vizinhança, denominado NHDP (*MANET Neighborhood Discovery Protocol*). No momento em que as simulações foram realizadas, não havia código-fonte do NHDP disponível para o simulador utilizado. Contudo, o NHDP não altera os mecanismos para descoberta de vizinhança da antiga versão do OLSR, modificando apenas o formato de mensagem enviada e utilizando uma técnica de compressão para representar as informações de marcação de tempo do protocolo [Clausen *et al.* 2008c; Clausen e Dearlove 2008]. Desse modo, uma comparação entre o SNDP e o NHDP apresentaria resultados bastante semelhantes aos da comparação do SNDP com o processo de descoberta de vizinhança do OLSR.

A comparação do desempenho do SNDP em relação ao processo de descoberta de vizinhança do OLSR foi realizada através de simulação utilizando a ferramenta *Network Simulator* (NS-2) versão 2.31. Para o OLSR, foi utilizada a implementação UM-OLSR [UM-OLSR 2008] devido sua conformidade com a RFC 3626. Para que a comparação com o SNDP fosse justa, a implementação UM-OLSR foi modificada,

isolando o processo de descoberta de vizinhança das outras funções do protocolo. As simulações foram repetidas várias vezes, de acordo com o cenário de simulação, até atingirem um intervalo de confiança de 95% com uma margem de erro de 5%, valores considerados adequados para este tipo de simulação [Law 2007].

### 3.1. Cenário de Simulação

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de simulação utilizados. O cenário definido é semelhante à RMSF infra-estruturada da Figura 1 (MRs dispostos como matriz). Além disso, as configurações de potência do sinal e frequência de operação seguiram a especificação da interface Cisco Aironet 350, encontrada em [Cisco 2008].

**Tabela 1. Parâmetros das simulações**

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
ÁREA DE COBERTURA TOTAL	1,04km X 1,04km	MOVIMENTO DOS MCS	RANDOM-WAYPOINT THINK-TIME DESATIVADO
NÚMERO DE MCS	{0, 5, 10, ..., 95, 100} {100, 110, 120, ..., 190, 200} {200, 300, 400, 500}	VELOCIDADE DOS MCS (m/s)	CONSTANTE {0; 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 10; 15; 20} VARIÁVEL (DE 0 ATÉ 20)
DISPOSIÇÃO DOS MRS	MATRIZ 10X10 FIXA DISTÂNCIA HORIZONTAL E VERTICAL DE 100M	DISPOSIÇÃO DOS MCS	ALEATÓRIA
MODELO PROPAGAÇÃO DO SINAL	TWO-RAY GROUND	POTÊNCIA DO SINAL	100 mW
TEMPO DE SIMULAÇÃO	3000 SEGUNDOS	PERÍODO TRANSIENTE	160 SEGUNDOS
TECNOLOGIA SEM FIO	802.11 b	FREQÜÊNCIA DE OPERAÇÃO	2,437 GHz (CANAL 6)
RAIO DE ALCANCE DOS NÓS	100 METROS	CONSUMO DE ENERGIA	2,25 W NA TRANSMISSÃO 1,35 W NA RECEPÇÃO
ANTENAS DOS DISPOSITIVOS	OMNIDIRECIONAIS	FILA DE TRANSMISSÃO	DROPTAIL / 50 PACOTES

### 3.2. Parâmetros de Avaliação

Para verificar se os objetivos do protocolo SNDP (reduzir a carga de mensagens de sinalização, o consumo de energia e o tempo de descoberta da vizinhança) são alcançados, são utilizados os parâmetros descritos abaixo. É importante notar que a descoberta da vizinhança pode significar tanto detecção quanto a perda de nós vizinhos. Devido à detecção e a perda serem situações processadas diferentemente em ambos os protocolos, o tempo de detecção e o tempo de perda são avaliados separadamente.

- **Carga de mensagens:** Corresponde à quantidade de mensagens de controle gerada pelo protocolo de descoberta de vizinhança. Quanto menor o número de mensagens, mais escalável é o protocolo já que o meio de transmissão não estará sendo constantemente utilizado para transmissão de mensagens de controle do mesmo.
- **Consumo de energia:** É a quantidade de energia utilizada pelos dispositivos que executam o protocolo simulado para a transmissão de mensagens de controle. Como as RMSF possuem dispositivos móveis com restrições de energia, o consumo de energia é um importante parâmetro para avaliar a eficiente utilização destes recursos.
- **Tempo de detecção:** É o tempo necessário para que o protocolo detecte que um dispositivo entrou na vizinhança de outro dispositivo. Este parâmetro representa o intervalo de tempo entre o momento que o protocolo detecta o vizinho e o instante real que este vizinho entra na área de cobertura do dispositivo. Um tempo de detecção pequeno permite a rápida descoberta e atualização de rotas nas tabelas de roteamento.
- **Tempo de perda:** É o tempo necessário para que o protocolo perceba que um dispositivo saiu da vizinhança de outro dispositivo. Este parâmetro representa o intervalo de tempo entre o momento que o protocolo percebe que um dispositivo saiu da vizinhança de outro dispositivo e o instante real que o vizinho sai da área de cobertura do dispositivo. Um tempo de perda pequeno diminui o tempo de permanência de rotas inválidas nas tabelas de roteamento.

## 4. Avaliação de desempenho

Esta seção apresenta e analisa os resultados das simulações do protocolo SNDP e do processo de descoberta de vizinhança do protocolo OLSR considerando os parâmetros descritos na Seção 3.2. A avaliação é apresentada juntamente com os gráficos dos resultados para os cenários de simulação utilizados. Todos os gráficos apresentam os resultados com a quantidade de MCs variando de 0 a 500 dispositivos. Por limitação de espaço, serão apresentados apenas os gráficos mais relevantes e o processo de descoberta de vizinhança do protocolo OLSR será referenciado apenas como OLSR.

### 4.1. Carga de mensagens

A estratégia híbrida adotada pelo SNDP tem como efeito um comportamento diferente na carga de mensagens por tipo de nó. No SNDP, a carga de mensagens varia em função da quantidade de MRs ou de MCs em movimento. Após inicialmente estabelecer suas vizinhanças, MCs parados não enviam mensagens *HELLO*, e, portanto, não influenciam na carga de mensagens. Assim, para evidenciar os benefícios da estratégia híbrida do SNDP, é importante analisar a carga de mensagens por tipo de dispositivo.

A Figura 5 apresenta uma comparação da quantidade de mensagens enviadas no SNDP e OLSR, com todos os nós parados e variando o número de MCs. A Figura 5A mostra a carga de mensagens dos MRs. Como o OLSR envia *HELLOs* periodicamente, a carga de mensagens é constante. Já no SNDP, percebe-se uma forte redução, de aproximadamente 150.000 mensagens geradas pelos MRs, quando o número de MCs é reduzido. Isto ocorre devido à adoção do intervalo maior de envio de *HELLOs* nos MRs (entre 24 e 32 segundos) que não possuem MCs vizinhos ou próximos. Assim, à medida que aumenta o número de MCs, aumenta a chance dos MRs possuírem MCs vizinhos ou próximos e, portanto, passam a usar o intervalo menor de envio de *HELLOs* (entre 1,5 e 2 segundos). Como o intervalo menor é o mesmo do OLSR, as curvas de carga de mensagens dos MRs se aproximam quando aumenta o número de MCs.

A Figura 5B apresenta a carga de mensagens dos MCs. Como os MCs não emitem mensagens periódicas, a redução na carga de mensagens é de quase 100% quando comparada ao OLSR, independente da quantidade de MCs. No entanto, o OLSR apresenta um crescimento linear da carga de mensagens *HELLO* à medida que se aumenta a quantidade de MCs. Vale ressaltar que o crescimento linear não é observado na Figura 5B porque a escala na horizontal não é uniforme.

A Figura 6 apresenta o efeito da combinação das duas estratégias, sem distinção de tipos de nós. A Figura 6A mostra que, para o OLSR, ocorre sobreposição das curvas nas várias velocidades avaliadas. Assim, fica evidenciado que o OLSR não altera a carga de mensagens em função da mobilidade dos MCs, apresentando um comportamento constante para todas as velocidades simuladas. Entretanto, a Figura 6B evidencia que o SNDP apresenta uma redução inicial da carga para todas as velocidades simuladas. Esta redução é resultante da mudança do intervalo de envio de *HELLOs* pelos MRs, conforme explicado anteriormente. Além disso, a curva que representa os MCs parados mostra que a carga de mensagens do SNDP não sofre influência com o aumento de MCs. Isto ocorre porque os MCs não enviam *HELLOs* periodicamente.

Também se verifica na Figura 6B, que, por volta de 30 MCs, em todas as velocidades, a carga de mensagens do SNDP se aproxima do OLSR. A razão disto é que os MRs são os maiores responsáveis pela carga de mensagens, pois estão em maior quantidade. Além disso, com cerca de 30 MCs, praticamente todos os MR enviam *HELLOs* no intervalo de tempo menor, passando a ter comportamento idêntico ao

OLSR. Mesmo assim, a carga do SNDP ainda é menor que o OLSR devido ao fato dos MCs não enviarem *HELLOs* periodicamente.

Quanto à mobilidade, a Figura 6B mostra que o SNDP incrementa a carga de mensagens à medida que aumenta a velocidade dos MCs. Assim, para que a carga do SNDP seja próxima da carga do OLSR, é necessário que todos os MCs estejam a uma velocidade de pelo menos 20m/s. Vale ressaltar que, mesmo com a velocidade variando entre 0 e 20m/s, a carga de mensagens obtida é significativamente inferior à carga do OLSR, mesmo para 500 MCs em movimento. Por fim, para velocidades superiores a 15m/s, devido à topologia do cenário e movimentação do MC, as informações na tabela de vizinhança podem ficar obsoletas muito rapidamente para ambos os protocolos. O aumento da velocidade torna estes problemas mais frequentes, demandando ajustes nos intervalos de envio de *HELLOs* de ambos os protocolos.

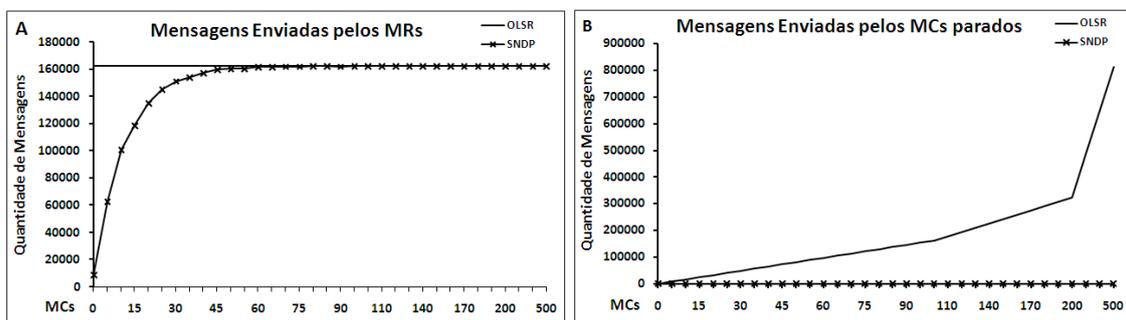


Figura 5. Mensagens enviadas pelos MRs e MCs parados

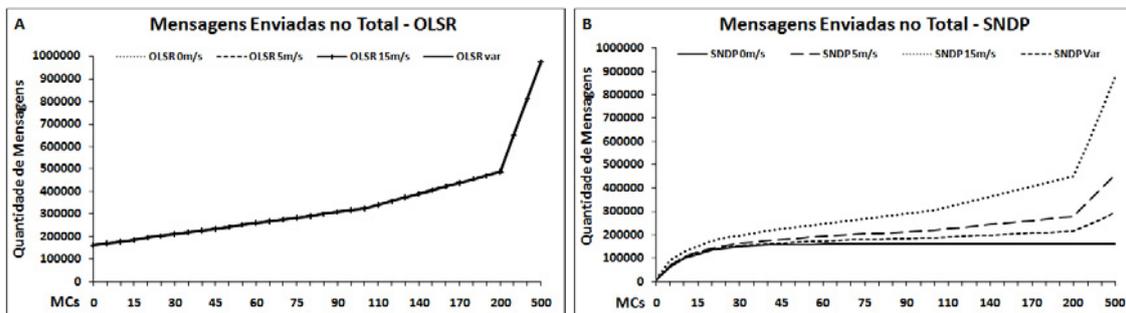


Figura 6. Carga total de mensagens

O resultado obtido com a estratégia híbrida do SNDP é uma redução da carga total de mensagens. A Tabela 2 mostra a porcentagem de redução da carga de mensagens de vizinhança. O ganho mínimo obtido com MCs parados (0m/s) é de 28%, que ocorre quando o número de MCs é próximo da quantidade de 30 MCs. Neste caso, quando o número de MCs existentes é 500, a redução da carga de mensagens obtida é de 83% em relação ao OLSR. Isto ocorre porque, no OLSR, os MCs publicam periodicamente, enquanto no SNDP os MCs somente publicam no caso de detecção ou perda de vizinhança. Assim, à medida que aumenta o número de clientes, aumenta também a influência dos MCs no cálculo da carga de mensagens do OLSR.

Tabela 2. Redução da carga de mensagens do SNDP comparado ao OLSR

		QUANTIDADE DE MCS										
		0	10	20	30	40	50	100	200	300	400	500
VELOCIDADE (M/S)	0	94%	43%	31%	28%	31%	34%	50%	67%	75%	80%	83%
	2	94%	42%	30%	28%	29%	31%	42%	56%	63%	67%	70%
	5	94%	39%	26%	22%	23%	24%	32%	42%	48%	51%	53%
	10	94%	33%	19%	15%	13%	13%	18%	23%	26%	28%	29%
	15	94%	29%	12%	7%	5%	5%	6%	8%	9%	9%	10%
	0-20	94%	42%	29%	27%	28%	30%	42%	56%	63%	67%	70%

Além disso, no SNDP, o aumento da velocidade provoca mais modificações da vizinhança dos MCs, fazendo-os enviar *HELLOs*. Quando a quantidade de MCs aumenta, aumenta sua influência no cálculo da carga, diminuindo o ganho em relação ao OLSR.

#### 4.2. Consumo de energia

As RMSF infra-estruturadas assumem que os MRs não possuem restrições de energia. Por isto, mesmo tendo avaliado o gasto de energia para MCs e MRs, será apresentada apenas a avaliação do consumo de energia dos MCs para transmitir e receber as mensagens de controle, pois como já citado, podem ter restrições severas de energia.

A Figura 7 apresenta o consumo médio de energia por MC em função da velocidade do nó e da quantidade de nós existentes. O consumo de energia de um protocolo é calculado levando-se em consideração a quantidade de mensagens enviadas e recebidas, e, também, o tamanho destas mensagens. A Figura 7 permite perceber que o SNDP possui resultados melhores do que o OLSR em relação ao consumo de energia. Quando os MCs estão parados, eles apresentam o menor consumo de energia. O SNDP consegue ser mais eficiente que o OLSR porque os MCs não emitem mensagens *HELLO* periódicas e, assim, também recebem uma menor quantidade de mensagens, sendo o consumo de energia também menor. Em comparação ao OLSR, como no SNDP os MCs recebem e enviam uma quantidade menor de mensagens *HELLO*, o consumo de energia é reduzido em todos os cenários avaliados (Figura 7B).

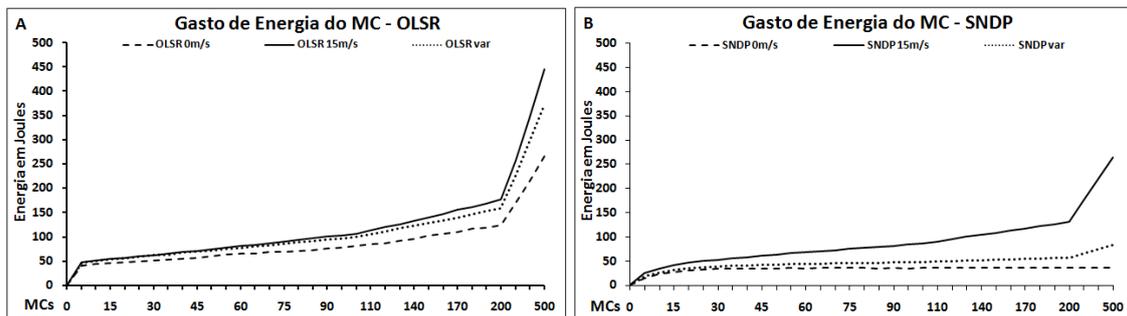


Figura 7. Consumo de energia do MC

A Tabela 3 mostra a redução porcentual do consumo de energia do SNDP em comparação com o OLSR. A forte redução do consumo com poucos MCs, deve-se ao intervalo de tempo maior entre mensagens *HELLOs* dos MRs. Considerando os MCs parados, uma redução de até 87% é alcançada. Quando a quantidade de mensagens enviadas pelos MCs passa a ser superior à quantidade enviada pelos MRs, a redução do gasto de energia em relação ao OLSR é de 77% em velocidade variável, quando se atinge 500 MCs, pois as mensagens são emitidas menos frequentemente que o OLSR.

Tabela 3. Redução do gasto de energia do SNDP em comparação com o OLSR

		QUANTIDADE DE MCS									
		10	20	30	40	50	100	200	300	400	500
VELOCIDADE (M/S)	0	47%	38%	36%	39%	42%	56%	72%	80%	84%	87%
	2	46%	37%	36%	38%	41%	52%	65%	72%	76%	79%
	5	43%	33%	31%	31%	33%	42%	53%	59%	63%	66%
	10	37%	25%	23%	23%	23%	30%	38%	44%	48%	51%
	15	33%	19%	16%	15%	16%	19%	26%	32%	37%	41%
	0-20	46%	35%	37%	38%	39%	51%	64%	70%	75%	77%

#### 4.3. Tempo de Detecção

Nesta seção, serão avaliados os tempos de detecção para a vizinhança entre MC e MR. Considerando que o *backbone* é planejado, não há mudanças na vizinhança entre MRs

após a inicialização da rede. Para um melhor entendimento dos resultados apresentados, o tempo de detecção MC-MR é o tempo que um MC leva para detectar a vizinhança com um MR. Já o tempo de detecção MR-MC corresponde ao tempo que um MR leva para detectar um MC em sua área de cobertura.

Nas simulações, o SNDP e o OLSR obtiveram tempos de detecção MC-MR similares, conforme ilustrado na Figura 8. Embora o SNDP tenha se mostrado um pouco mais eficiente (na média 2%) que o OLSR, pode-se considerá-los tecnicamente empatados nesse parâmetro, pois se encontram dentro da margem de erro de 5% adotada. A proximidade dos valores obtidos é justificada pelo fato de ambos protocolos adotarem intervalos idênticos de publicação nos MRs. Vale ressaltar que os tempos de detecção MC-MR não sofrem influência significativa com a alteração do número de MCs na rede e nem com a variação na velocidade destes MCs.

Por sua vez, a análise dos gráficos para o tempo de detecção MR-MC apresenta um comportamento interessante do SNDP. A Figura 9 mostra os resultados das simulações para as velocidades de 1 e 10m/s. Para a velocidade de 1m/s, apesar do SNDP apresentar uma pequena redução de 3% nos valores, podemos tecnicamente considerar os dois protocolos empatados em função da margem de erro de 5%. Entretanto, para velocidade de 10m/s e superiores, em média, o SNDP chega a obter um tempo de detecção MR-MC até 10% menor que o OLSR. Isto ocorre devido a um aproveitamento de mensagens *HELLO* enviadas pelos MCs. Para os cenários com maior velocidade, como o MC se desloca por uma maior distância em menos tempo, ele acaba cruzando as áreas de cobertura de novos MRs mais rapidamente. Desse modo, para os cenários com maior velocidade, quando um MC envia um *HELLO* em função da descoberta de um novo MR, outros novos MRs podem também receber esta mensagem e perceber a entrada deste MC em suas vizinhanças de modo mais rápido, reduzindo assim a média do tempo de detecção MR-MC.

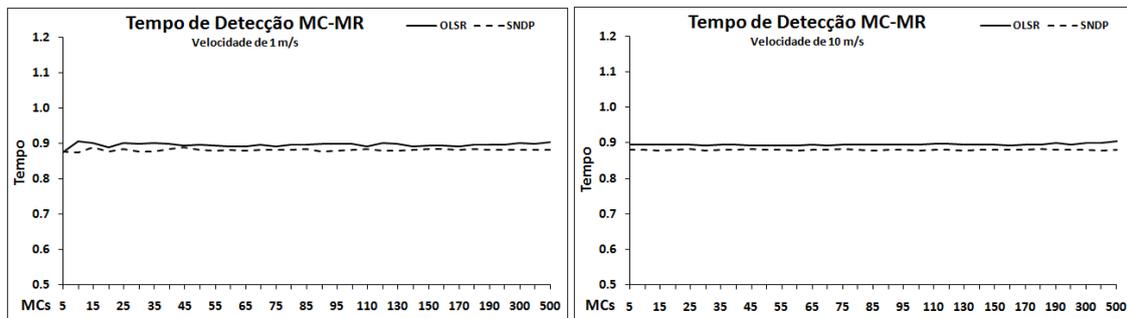


Figura 8. Tempos de detecção MC-MR (1m/s e 10m/s)

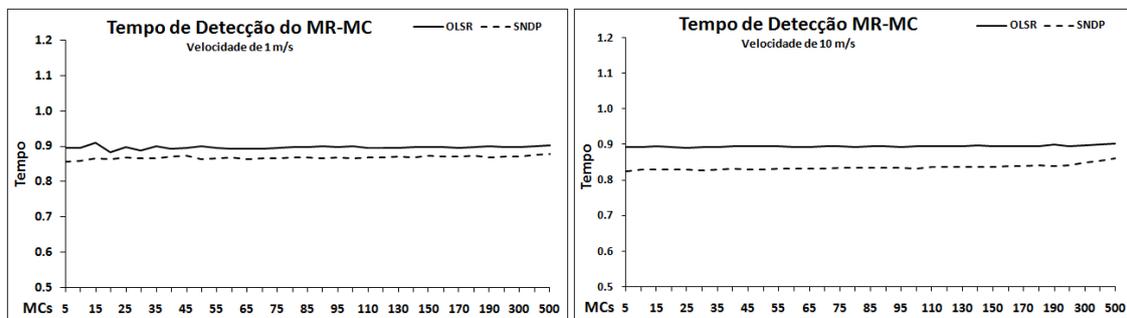


Figura 9. Tempos de detecção MR-MC (1m/s e 10m/s)

É importante ressaltar que este ganho no tempo de detecção MR-MC acontece no SNDP porque os MCs enviam mensagens *HELLO* em reação ao recebimento de

*HELLOs* dos MRs, representando assim uma forma de antecipação de *HELLOs*. No entanto, no caso do OLSR, as mensagens *HELLO* enviadas pelos MCs sempre obedecem ao intervalo de publicação. Assim, no OLSR, mesmo que um MC entre na vizinhança de vários MRs e receba algum *HELLO* desses MRs, ele somente enviará sua mensagem *HELLO* de acordo com o intervalo de publicação do protocolo.

#### 4.4. Tempo de Perda

Assim como na Seção 4.3, nesta seção serão avaliados apenas os tempos de perda da vizinhança entre MC e MR, pois, devido às características das RMSF infra-estruturadas, é incomum haver perda da vizinhança entre MRs. Em adição, para um melhor entendimento, definiremos como tempo de perda MC-MR o tempo no qual um MC leva para detectar a perda de vizinhança com um MR. Por sua vez, o tempo de perda MR-MC representa o tempo no qual um MR detecta a perda de vizinhança com um MC.

Se por um lado os resultados das simulações do SNDP e OLSR apresentaram tempos de detecção muito próximos (Seção 4.3), por outro lado, mostraram uma considerável redução no tempo de perda do SNDP em comparação ao OLSR. Este ganho é obtido pela diferença da estratégia para detecção da perda de vizinhança dos protocolos. Como já mencionado, o SNDP realiza a detecção da perda de vizinhança de duas maneiras distintas, dependendo do tipo do dispositivo vizinho (MC ou MR). Já o OLSR não faz distinção entre o tipo de dispositivo, e sempre realiza a detecção da perda de vizinhança através da ausência de mensagens *HELLO*.

Com relação ao tempo de perda MC-MR, como ilustrado na Figura 10, as simulações mostram que o tempo médio obtido pelo OLSR é de 5,2 segundos enquanto o tempo médio obtido pelo SNDP é de 1,7 segundos, representando um ganho médio de 68% do SNDP sobre o OLSR. Esta grande diferença é explicada pelo fato do OLSR e SNDP possuírem estratégias diferentes para detectarem a perda de vizinhança. No OLSR, esta perda de vizinhança ocorre com a ausência de três *HELLOs* seguidos [Clausen e Jacquet 2003]. Como o intervalo de publicação padrão de *HELLOs* é de dois segundos, após seis segundos sem receber algum *HELLO* de um vizinho, um nó remove as informações de vizinhança deste nó vizinho. Já no SNDP, a perda de vizinhança é identificada através da estratégia colaborativa descrita na Seção 2.2.

Os tempos são mantidos para todas as velocidades simuladas, incluindo velocidade variável. Vale ressaltar que os tempos médios obtidos são inferiores aos tempos de expiração da informação de vizinhança de cada protocolo (2,5 segundos para o SNDP e 6 segundos para o OLSR) porque a análise do movimento considera o tempo a partir do momento que o MC sai da área de cobertura do dispositivo. Como na maioria dos casos o MC recebe o último *HELLO* antes de estar na fronteira da área de vizinhança, ele ainda demora um pouco até sair da vizinhança do MR, fazendo com que os tempos médios de perda sejam inferiores aos tempos de expiração dos protocolos.

Para o tempo de perda MR-MC, os resultados do SNDP apresentam pequenos acréscimos em relação aos valores dos tempos de perda MC-MR, conforme ilustrado na Figura 11. O tempo médio de perda MR-MC do SNDP é de 1,9 segundos, sendo um pouco maior que o tempo médio de perda MC-MR, que é de 1,7 segundos. Este acréscimo é resultado da estratégia colaborativa de detecção da perda de vizinhança do SNDP, no qual primeiramente o MC detecta a perda do MR, e, posteriormente, via o mecanismo de notificação, o MR detecta a perda do MC. Assim, na média, o tempo de perda MC-MR é menor que o tempo de perda MR-MC. No caso do OLSR, o tempo médio de perda MR-MC é mantido em 5,2 segundos. Este resultado é esperado pelo fato do OLSR não fazer distinção entre os tipos de dispositivos, utilizando assim a mesma

estratégia para detecção da perda de vizinhança em MRs e MCs. Portanto, para o tempo de perda MR-MC, o ganho médio do SNDP em relação ao OLSR é de 62%.

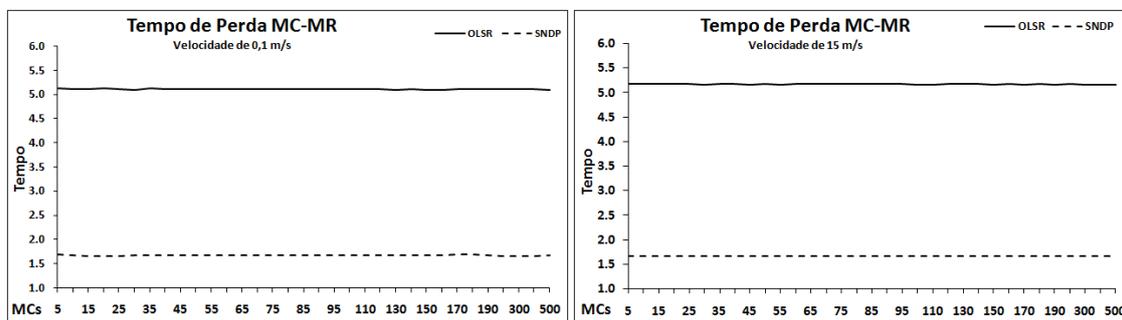


Figura 10. Tempos de perda MC-MR (0,1m/s e 15m/s)

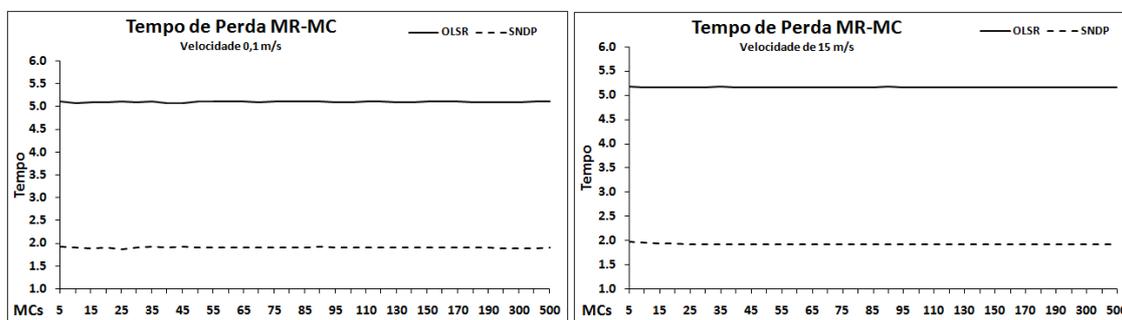


Figura 11. Tempos de perda MR-MC (0,1m/s e 15m/s)

## 5. Considerações finais

O SNDP se apresenta como uma alternativa eficiente para realizar a detecção e controle das informações de vizinhança em cenários de RMSF infra-estruturadas. Com base na avaliação de desempenho realizada, percebe-se que o SNDP é melhor que o OLSR em relação à carga de sinalização, ao tempo de detecção e perda da vizinhança e ao consumo de energia.

No caso particular dos tempos de detecção da vizinhança, o SNDP e o OLSR obtiveram praticamente o mesmo desempenho, apesar do SNDP sempre apresentar um pequeno ganho sobre o OLSR. Por exemplo, no tempo de detecção MR-MC na simulação com velocidade de 10m/s, o SNDP conseguiu uma redução de quase 7% em relação aos valores obtidos pelo OLSR. Já para os tempos de perda, o SNDP conseguiu uma expressiva redução de mais de 60% dos valores obtidos pelo OLSR. Estes ganhos são decorrentes da estratégia reativa de detecção de perda da vizinhança do SNDP, que explora de forma eficaz as características de uma RMSF infra-estruturada, garantindo um rápido e eficaz mecanismo de detecção de perda de vizinhança.

Com relação à carga de mensagens, o desempenho do SNDP se mostrou muito melhor que o do OLSR, reduzindo a carga de sinalização na rede em mais de 90% para alguns casos. Entretanto, há uma influência direta da velocidade dos MCs na carga de mensagens do SNDP. Desse modo, para os cenários onde os MCs estão com alta velocidade, o número de mensagens enviadas pelo SNDP aumenta. É importante lembrar que cenários onde todos os MCs estão com altas velocidades são praticamente inexistentes, assegurando assim que o SNDP possua um ótimo desempenho nos cenários de aplicação comuns das RMSF infra-estruturadas.

Além disso, a redução do número de mensagens faz com que o protocolo economize energia nos MCs, já que estes dispositivos são móveis e com restrições severas de energia. O SNDP procura equacionar o consumo de energia na medida em que diferencia a estratégia de publicação por dispositivo. Como os MRs são dispositivos sem limitações de energia, possuem uma estratégia pró-ativa para detecção de presença e ausência de dispositivos vizinhos. Por sua vez, a estratégia reativa é implementada pelos MCs, já que os mesmos possuem limitações de energia.

## Referências

- Akyildiz, I. F., Wang, X. e Wang, W. (2005). “Wireless mesh networks: A survey”. *Computer Networks*, 47(4):445–487.
- Chen, J., Lee, Y., Maniezzo, D. e Gerla, M. (2006) “Performance Comparison of AODV and OFLSR in Wireless Mesh Networks”. *IFIP Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net).Italy*.
- Cisco (2008) “Cisco Aironet 350 Series Client Adapters” [http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps6442/ps4555/ps448/product\\_data\\_sheet09186a0080088828.pdf](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps6442/ps4555/ps448/product_data_sheet09186a0080088828.pdf). Dezembro.
- Clausen, T. e Dearlove, C. (2008) “Representing multi-value time in MANETs”. IETF draft, work in progress, September 2008.
- Clausen, T., Dearlove, C. e Dean, J. (2008a) “MANET Neighborhood Discovery Protocol (NHDP)”. IETF draft, work in progress.
- Clausen, T., Dearlove, C. e Jacquet, P. (2008b) “The Optimized Link State Routing Protocol version 2”. IETF draft, work in progress.
- Clausen, T., Dearlove, C., Dean, J. e Adjih, C. (2008c) “Generalized MANET Packet/Message Format”. IETF draft, work in progress, November 2008.
- Clausen, T., e Jacquet, P. (2003) “The Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”. IETF RFC3626.
- Hossain, E. e Leung, K. K. (2008) “Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols”. Springer, 1<sup>st</sup> Edition.
- Law, A. M. (2007) “Statistical analysis of simulation output data: the practical state of the art”. In 39th Conference on Winter simulation. IEEE Press. Washington, USA.
- Porto, D. C. F., Cavalcanti, G. e Elias, G. (2009) “A Layered Routing Architecture for Infrastructured Wireless Mesh Networks”. A ser publicado no *The Fifth International Conference on Networking and Services (ICNS 2009)*, Espanha.
- REMESH (2008) <http://mesh.ic.uff.br/>, Dezembro.
- Tsarmopoulos, N., Kalavros, I. e Lalis, S. (2005) “A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless network based on open source Linux routers”. *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, 2005. Tridentcom 2005. 92-97 p.
- UM-OLSR (2008) <http://masimum.dif.um.es/?Software:UM-OLSR>, Dezembro.
- Voorhaen, M. e Blondia, C., (2006) “Analyzing the Impact of Neighbor Sensing on the Performance of the OLSR protocol”. 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, pp.1-6, Abril.
- Zhang, Y., Luo, J., e Hu, H. (2007). “Wireless Mesh Networks: Architectures, Protocols and Standards”. Auerbach Publications, 1<sup>st</sup> Edition.