

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA - PPGI
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DE UM MECANISMO DE
CONTROLE DE ADMISSÃO BIDIRECIONAL PARA
PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO OPORTUNÍSTICO EM
REDES AD HOC SEM FIO

MESTRANDO

ADRIANO DA SILVA ARAÚJO

ORIENTADOR

PROF. DR. LEANDRO DIAS DA SILVA

COORIENTADOR

PROF. DR. IVO AUGUSTO ANDRADE ROCHA CALADO

MACEIÓ, AL

2021

ADRIANO DA SILVA ARAÚJO

ORIENTADOR

PROF. DR. LEANDRO DIAS DA SILVA

COORIENTADOR

PROF. DR. IVO AUGUSTO ANDRADE ROCHA CALADO

MACEIÓ, AL

2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- A663e Araújo, Adriano da Silva.
 Especificação e análise de um mecanismo de controle de admissão bidirecional para protocolos de roteamento oportunístico em redes Ad Hoc sem fio / Adriano da Silva Araújo. – 2021.
 52 f. : il.
- Orientador: Leandro Dias da Silva.
 Coorientador: Ivo Augusto Andrade Rocha Calado.
 Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Programa de Pós-Graduação em Informática, Maceió, 2021.
- Bibliografia: f. 40-47.
 Apêndices: f. 48-52.
1. Informática. 2. Redes Ad Hoc. 3. Sistemas de comunicação sem fio - Qualidade de serviços. 4. Sistemas de comunicação sem fio - Controle de admissão. 5. Redes de computador - Roteamento oportunístico. I. Título.

CDU: 004.7

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

A minha amada esposa Priscilla e meu amado filho Cristiano Ronaldo por aguentar minhas angustias e abusos durante boa parte dos últimos 12 meses. Saibam que os amo muito e sou mais completo com vocês. Sem dúvidas, sou uma pessoa melhor a cada dia por causa de vocês.

Agradeço aos meus amados pais, Odilon e Marinalva, por toda educação de qualidade que sempre proporcionaram a mim e a meus irmãos, pois muito de nossas realizações vocês são responsáveis diretos.

Aos meus irmãos, Osair e Odilon Allisson, agradeço pelo apoio, e ter me dado os meus sobrinhos maravilhosos, Ana Clara, Sarah, Thor e Megan.

Aos meus orientadores, Leandro Dias e Ivo Augusto, pessoas da minha mais alta estima e admiração, agradeço por todos os conselhos, pela paciência e por toda a ajuda nesse período. Espero poder continuar desenvolvendo estudos em conjunto com os senhores.

A todos os professores do PPGI, por orientações de trabalhos e pelas aulas preciosas. Aos meus colegas de mestrado, agradeço pelo convívio, pela troca de experiências e companheirismo durante o Curso.

Ao secretariado do PPGI na pessoa do Anderson Cabral sempre muito preocupado e atencioso com todos os alunos.

Aos colegas de trabalho, Fernando Carneiro, Marco Albuquerque, Lucas Torquato, Simplício Neto, João Paulo, Handrik Palmeira, Anderson Maia, Iran Rodrigues e todos os demais, pela compreensão e apoio em momentos de desânimo.

Por fim e não menos importante, agradeço ao Instituto Federal de Alagoas – IFAL, por liberar parcialmente este funcionário público do trabalho sem prejuízo dos vencimentos, pois a realização deste trabalho de pesquisa seria muito mais difícil.

Resumo

Rede *Ad Hoc* sem fio é um modelo de comunicação que caracteriza-se pela ausência de um gerenciador central, em que as ligações entre os nós ocorrem de forma independente em relação às demais, ao ponto que, caso uma ligação falhe, as demais não são impactadas. Neste contexto, uma das abordagens de encaminhamento/roteamento de pacotes propostas na literatura é o Roteamento Oportunístico (RO). No RO, existe uma maior probabilidade de entrega dos pacotes, pois todos os caminhos da origem ao destino são avaliados no roteamento. Tal fato pode ser considerado uma vantagem para o atendimento dos requisitos de Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*) das aplicações. No entanto, prover QoS em ambientes de redes *Ad Hoc* sem fio oportunistas não é uma tarefa trivial. Para contribuir com a melhoria deste cenário, o Controle de Admissão (CA) de fluxos é um mecanismo viável para garantir que novos fluxos só serão admitidos na rede se houver recursos disponíveis. Este trabalho tem o objetivo de propor, especificar e analisar um mecanismo de controle de admissão de fluxos de dados bidirecional em redes *Ad Hoc* sem fio oportunísticas. Neste sentido, foram utilizados o OMNeT++, um simulador de eventos discretos de rede, para realizar a avaliação experimental do mecanismo proposto e uma modelagem formal em Redes de Petri Coloridas (*Colored Petri Nets - CPN*) na ferramenta de software CPN/Tools com o propósito de aumentar a cobertura de simulação e testes. Com os resultados obtidos foi possível identificar que para o modelo proposto, um fluxo será admitido somente se, após a descoberta de rede, existir nos nós encaminhadores recursos disponíveis para a transmissão e recepção de dados conforme requerido pela aplicação.

Palavras-chave: Redes *Ad Hoc*; Roteamento Oportunístico; Qualidade de Serviço; Controle de Admissão.

Abstract

Wireless Ad Hoc Network is a communication model characterized by the absence of a central manager where the connections between nodes happen independently to the others. In case a link fails, it will not impact the others. In this context, a packet routing approach proposed in the literature is Opportunistic Routing (OR). In OR, there is a greater probability of packet delivery because all paths from source to destination are evaluated in routing, this fact can be considered an advantage for meeting the Quality of Service (QoS) requirements of the applications. However, providing QoS in opportunistic wireless Ad Hoc network environments is not a trivial task. To contribute to the improvement of this scenario, the Admission Control (AC) of flows is a viable mechanism to guarantee that new flows will only be admitted into the network if resources are available. This work aims to propose, specify and analyze an admission control mechanism for bidirectional data flows in opportunistic wireless Ad Hoc networks. In this sense, OMNeT++, a discrete network event simulator, was used to perform the experimental evaluation of the proposed mechanism and a formal model in Colored Petri Nets (CPN) in the CPN/Tools software tool in order to increase the coverage simulation and testing. With the results obtained, it was possible to identify that for the proposed model, a flow will be admitted only if, after the network discovery, there are resources available in the forwarding nodes for the transmission and reception of data as required by the application.

Keywords: Wireless Ad Hoc Networks; Opportunistic Routing; Quality of Service; Admission Control.

Lista de Figuras

1.1	Modelos de rede sem fio. Fonte: [16]	2
2.1	Encaminhamento de pacotes em uma topologia de rede com baixa porcentagem de entrega	10
3.1	Módulos simples e compostos do OMNeT++. Fonte [56]	16
3.2	Tela de simulação do OMNeT++	17
3.3	Marcação inicial do modelo de CPN para o exemplo de transmissão por difusão	19
3.4	Marcação após o disparo da transição Rede	20
4.1	Processo de seleção dos trabalhos	23
4.2	Simuladores de rede utilizados nos trabalhos analisados	24
5.1	Exemplo de topologia da rede <i>Ad Hoc</i> sem fio em que n_S e n_D representam os nós de origem e destino, respectivamente	28
5.2	Envio inicial de pacote por difusão $n_S \rightarrow n_D$ para descoberta das rotas de ida	28
5.3	Rotas descobertas de $n_S \rightarrow n_D$, representadas pelas setas verdes, após o finalização do processo de ida	29
5.4	Rotas descobertas de $n_D \rightarrow n_S$, representadas pelas setas verdes, após o finalização do processo de volta	30
5.5	Exemplo de topologia de rede com 5 nós encaminhadores utilizada na realização do experimento 1	34
5.6	Modelo em CPN proposto para a avaliação do controle de admissão	36

A.1	Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 5 nós encaminhadores	48
A.2	Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 8 nós encaminhadores	49
A.3	Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 10 nós encaminhadores	50

Lista de Tabelas

2.1	Requisitos de desempenho para serviços baseados em texto, áudio e vídeo adaptado de [21]	12
3.1	Comparativo entre softwares simuladores de rede.	18
4.1	Bases eletrônicas pesquisadas	22
4.2	Critérios de inclusão e exclusão	22
5.1	Parâmetros de configuração para o ambiente de simulação do OMNeT++	34
5.2	Tempo de resposta em segundos para a descoberta de rede e reserva de recursos	35

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Descrição do Problema	4
1.2	Motivação	5
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivo Geral	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Contribuições	6
1.5	Estrutura do Documento	6
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Estado da Arte	7
2.1.1	Redes <i>Ad Hoc</i> Sem Fio	7
2.1.2	Roteamento Oportunístico em Redes Sem Fio	8
2.1.3	Qualidade de Serviço	11
2.1.4	Controle de Admissão em Redes Sem Fio	13
2.2	Trabalhos Relacionados	13
3	Ferramentas de simulação e análise de rede	15
3.1	Simuladores de Eventos Discretos de Rede	15
3.2	Redes de Petri Coloridas	17
4	Revisão da Literatura Sobre Controle de Admissão Bidirecional	21
4.1	Protocolo da Revisão	21
4.2	Resultados da Revisão	22

5	Mecanismo de Controle de Admissão Proposto	26
5.1	O Mecanismo de Controle de Admissão Bidirecional	26
5.2	Processo de Reserva	30
5.3	Avaliação Experimental do Mecanismo	32
5.3.1	Experimento 1: Simulação do Funcionamento do Mecanismo no OMNeT++	33
5.3.2	Experimento 2: Modelagem em Redes de Petri Coloridas	35
6	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	37
6.1	Considerações Finais	37
6.2	Trabalhos Futuros	38
A	Relatórios das Simulações Realizadas no CPN/Tools	48
B	Lista de Abreviaturas e Siglas	51

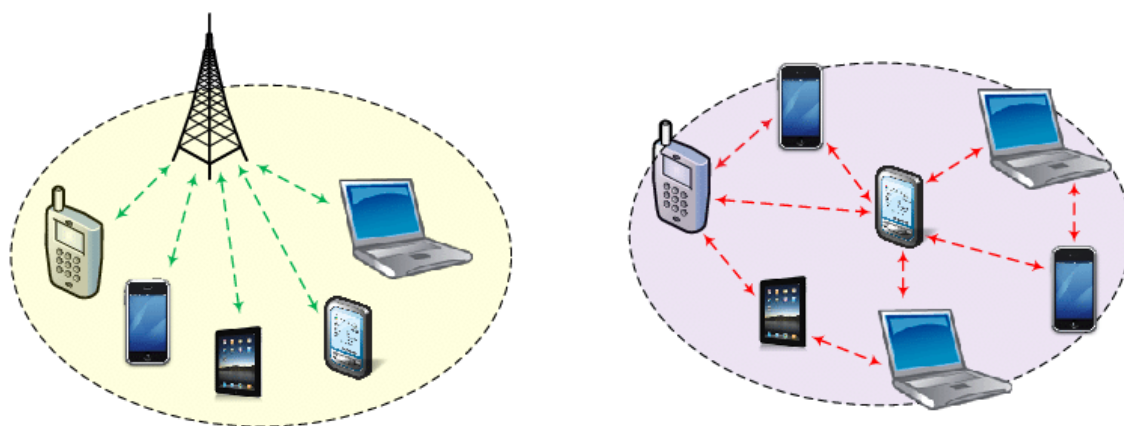
Capítulo 1

Introdução

As redes de computadores sem fio em seu modelo tradicional são caracterizadas por dispositivos que estão conectados a uma infraestrutura composta por uma ou mais estações centrais que desempenham o papel de gerenciar o processo de comunicação entre os diversos dispositivos a ela conectada. Neste modelo, os dispositivos são fortemente dependentes, ao ponto que caso falhe um dos componentes centrais da infraestrutura, a comunicação entre todos os dispositivos conectados a esta rede estará comprometida.

De modo geral, redes de comunicação sem fio apresentam benefícios como: facilidade de instalação e manutenção [2], flexibilidade [10], escalabilidade [12] e mobilidade [1] [61]. A *facilidade de instalação e manutenção* é ressaltada pela não necessidade de lançamentos de cabeamentos de qualquer natureza, tornando a implantação e expansão das redes sem fio mais rápida, limpa e econômica. A *flexibilidade* é caracterizada por proporcionar um grande número de conexões dentro da área de cobertura do sinal. A *escalabilidade* é possibilitada pela simples adição de novos pontos repetidores para a ampliação do número de dispositivos conectados a rede. E a *mobilidade* permite que os dispositivos se desloquem dentro da área de cobertura de sinal sem a perda de conexão.

As redes *Ad Hoc* sem fio é um modelo de rede que caracteriza-se pela ausência de um gerenciador central das comunicações. Neste modelo, todos os nós de rede funcionam como se fossem roteadores que encaminham comunitariamente os pacotes de dados recebidos com o objetivo de alcançar o destino. Na Figura 1.1 é exibido um modelo de rede sem fio tradicional, baseado em infraestrutura centralizada, e um modelo de rede *Ad Hoc* sem fio.



(a) Modelo de rede tradicional de infraestrutura centralizada

(b) Modelo de rede *Ad Hoc* sem fio

Figura 1.1: Modelos de rede sem fio. Fonte: [16]

Nas redes *Ad Hoc* sem fio, observam-se as capacidades de auto-organizar e auto-configurar dinamicamente, sem a perda de conectividade [35]. Contudo, nesse ambiente, alguns problemas requerem atenção especial, tais como: constante mudança na topologia da rede, difícil localização dos nós, tratamento de erros de transmissão e recepção de dados. Devido a essa natureza dinâmica e pelo motivo da comunicação ocorrer na atmosfera por meio da transmissão de ondas eletromagnéticas é esperado interferências de toda ordem. Logo, uma quantidade significativa de padrões e protocolos de rede vem sendo proposta com o objetivo de diminuir a taxa de erros de entrega e otimizar o roteamento de pacotes.

No que se refere ao roteamento de pacotes, protocolos são padronizações utilizadas para fornecer um conjunto de funções, como: *a)* detecção e resposta sobre alterações na topologia ou serviços de rede; *b)* construção e gerenciamento de rotas; *c)* maximização da capacidade de utilização da rede; e *d)* minimização nos atrasos na entrega de pacotes [27]. Além dessas funções, os protocolos de roteamento podem considerar uma ou várias rotas para a transmissão de dados da origem ao destino. A vantagem daqueles que utilizam múltiplas rotas está na possibilidade de fornecer balanceamento de carga e proteção contra falhas, distribuindo o tráfego entre um conjunto das rotas selecionadas [25].

O Roteamento Oportunístico (RO) é um tipo de roteamento de pacotes utilizado em

redes *Ad Hoc* sem fio. Nesta abordagem, a principal atividade é selecionar o conjunto de nós encaminhadores e priorizá-los em relação aos demais [20]. Para isso, o RO realiza a transmissão por difusão e os nós são dinamicamente escolhidos para encaminhar os pacotes de dados através de todos os caminhos possíveis desde a origem até o destino.

Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*) é descrito por CRAWLEY *et al.* [13] como um conjunto de requisitos a serem atendidos pela rede para tornar possível a transmissão de um fluxo de dados. CALADO em [9] complementa dizendo que o objetivo das soluções de QoS é proporcionar a estabilidade da rede por meio da adequação das necessidades de transmissão das aplicações em face aos recursos de rede disponíveis. Aplicações da atualidade como *Voice over Internet Protocol (VoIP)*, videoconferência, jogos interativos, controle de pelotão de veículos (*platooning of vehicles*), *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*, telepresença, entre outros, necessitam de suporte de QoS para funcionar de maneira adequada.

Controle de Admissão (CA) é um mecanismo que gerencia os recursos disponíveis de rede. Nele os nós, de forma distribuída ou centralizada, determinam se um novo fluxo pode ser aceito na rede. O seu objetivo é a preservação de QoS dos fluxos já existentes na rede quando ocorre a chegada de uma nova solicitação, haja visto que novos fluxos só serão admitidos se houver recursos disponíveis [36]. O CA deve ainda melhorar os níveis de utilização da rede e ter um custo computacional relativamente baixo capaz oferecer resposta em tempo real.

Mecanismos de CA propostos na literatura como em JAT *et al.* [21] afirmam que a adaptação dinâmica da janela de contenção é uma maneira suficientemente capaz de melhorar o desempenho de um CA afim de se garantir a máxima utilização da capacidade de um canal. SIRAM *et al.* em [51] levam em consideração o problema de roteamento e escalonamento de fluxos que apresentam diferentes requisitos de QoS em redes sem fio de múltiplos saltos. HOSSEINI *et al.* em [19] afirmam que o CA é um mecanismo essencial para gerenciar o tráfego gerado por usuários em redes de sensores sem fio cognitivas (*Cognitive Radio Sensor Networks - CRSNs*), e assim atender os requisitos de QoS solicitados. HOSSEINI *et al.* ainda em [19] modelaram um CA por meio de um processo de semi decisão de Markov [41] com o objetivo de obter a política ideal para controlar o tráfego de CRSNs e obter a recompensa máxima.

YUAN e MUNTEAN em [64] afirmam que o CA e a equidade de downlink/uplink são dois problemas críticos para serviços como VoIP em redes do padrão IEEE 802.11 e propõem uma solução que envolve várias camadas chamada de *cross-layer*. Nela ocorre a interação de toda a pilha TCP/IP [52] como forma de otimizar o desempenho geral da rede, permitindo por exemplo, ao CA localizado na camada de aplicação, explorar dados ou informações providas na camada de enlace para a tomada de decisão. CALADO em [8] propõe um mecanismo de CA que observa o fluxo na direção do servidor para o cliente em redes sem-fio oportunísticas, baseando-se em limiares estrito (*hard*) e suave (*soft*) para garantir respectivamente a QoS entre o mínimo requerido e o ideal. Desse modo, permite-se a alocação de recursos e transmissão de fluxos de dados multimídia.

1.1 Descrição do Problema

Apesar do RO aumentar a probabilidade de entrega dos pacotes de dados da origem ao destino, a característica de transmissão por difusão pode ocasionar a inundação de rede (*flooding*) e conseqüentemente consumir todo o recurso disponível. Além disso, o paradigma de RO apresenta também questões desafiadoras como: *a)* a coordenação e seleção dos nós encaminhadores da rede; *b)* as maneiras de evitar interferências e retransmissão (duplicação) entre nós vizinhos; e *c)* as técnicas para priorizar a escolha dos melhores encaminhadores da origem ao destino. Dessa maneira, faz-se necessário a adoção de um mecanismo de CA para a coordenação dos nós e o gerenciamento dos recursos de rede disponíveis.

Este trabalho concentra a pesquisa em redes sem fio de malha (*mesh*) em que precisa-se garantir condições de QoS mínimas para realizar uma comunicação bidirecional, ou seja transmissão e recepção entre origem e destino. Visto que, em redes sem fio o fluxo de ida pode interferir no fluxo de volta, o controle bidirecional justifica-se para melhorar a estabilidade da rede.

Após descrever o problema, surge a seguinte questão de pesquisa: *Como fornecer QoS para aplicações em redes Ad Hoc sem fio que necessitem requisitos de largura de banda para transmissão e recepção de dados?*

1.2 Motivação

Diante do apresentado, foram realizadas pesquisas bibliográficas em que não foi possível observar trabalhos relacionados recentes sobre mecanismos que realizem CA em ambientes de RO e que realizem o controle de fluxo em ambos os sentidos. Considerando uma situação hipotética da comunicação de um nó n_1 com um outro n_i , o processo de descoberta e definição de rotas no *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) [43], por exemplo, consiste no envio de pacotes conhecidos como *Route Request* (RREQ) por broadcast na rede, iniciando de n_1 até alcançar n_i . Logo após, n_i retorna um pacote do tipo *Route Reply* (RREP) pelo caminho inverso da requisição com o objetivo de confirmar a rota. Entretanto, a comunicação sem fio é inerentemente sujeita a interferências e o caminho de volta poderá não estar disponível. Dessa forma, o fluxo de volta tende a interferir na confirmação do fluxo de ida. Esta propriedade somente será observada em cenário de controle de fluxo bidirecional.

1.3 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os específicos diretamente relacionados a esta dissertação.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor, especificar e analisar um mecanismo de controle de admissão para atender requisitos de QoS em redes *Ad Hoc* sem fio oportunísticas, tendo em conta os fluxos de dados em ambas as direções.

1.3.2 Objetivos Específicos

Considerando que a meta é alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são importantes para a condução deste trabalho:

- definir o modelo conceitual do controle de admissão a ser desenvolvido para realizar o controle de fluxo como proposto;

- simular em diferentes cenários o funcionamento do controle de admissão proposto;
- verificar a existência de anomalias no modelo conceitual.

1.4 Contribuições

A principal contribuição obtida neste trabalho é um mecanismo que realiza o controle de admissão de fluxos de dados de forma bidirecional em redes *Ad Hoc* sem fio oportunísticas. O mecanismo foi especificado e validado através de simulações em ferramentas de eventos discretos e de modelagem formal. No primeiro experimento, foi implementado um modelo para representar o comportamento desejado do mecanismo. Foi utilizado o simulador de eventos discretos, OMNeT++, em conjunto com o INET, um *framework* para redes de computadores. No segundo experimento, um modelo em *Coloured Petri Nets* (CPN) foi desenvolvido na ferramenta de *software* CPN/Tools.

1.5 Estrutura do Documento

O restante do documento está organizado da seguinte maneira:

- o Capítulo 2 apresenta a preparação para a pesquisa por meio de uma fundamentação teórica. São apresentados: os conceitos relacionados ao trabalho; o panorama sobre o estado da arte;
- o Capítulo 3 apresenta uma breve discussão sobre as ferramentas de simulação e análise de rede necessárias para a validação do trabalho;
- o Capítulo 4 apresenta uma investigação sobre a questão de pesquisa por meio de uma revisão da literatura;
- o Capítulo 5 apresenta a especificação do mecanismo de controle de admissão proposto, bem como a avaliação experimental do seu funcionamento;
- o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e direcionamentos para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Os aportes teóricos que aqui são apresentados deram suporte à pesquisa realizada e mostram-se necessários para fundamentar o trabalho.

2.1 Estado da Arte

2.1.1 Redes *Ad Hoc* Sem Fio

Redes *Ad Hoc* sem fio são modelos caracterizados pela ausência de controladores ou centralizadores das comunicações. Além disso, possuem a capacidade de se auto-organizar e auto-configurar dinamicamente, sem interrupção ou perda de conectividade. *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs), *Wireless Mesh Networks* (WMNs), *Vehicular Ad Hoc Networks* (VANETs), *Wireless Body Area Network* (WBAN), *Wireless Sensor Networks* (WSN) são alguns destes tipos de rede. Dentre as áreas de aplicação é possível citar: monitoramento de sinais biomédicos, automação industrial, monitoramento de eventos sísmológicos, veículos inteligentes, entre outros.

Segundo DANDJINOU *et al.* [14], com a popularização da tecnologia, as redes *Ad Hoc* sem fio receberam a atenção da comunidade científica em busca de proporcionar melhores índices de Qualidade de Serviço e de entrega de pacotes. Entretanto, a dificuldade de localização dos nós, o tratamento de erros de transmissão e recepção de dados são alguns problemas que requerem atenção especial para construção de uma rede estável.

Em redes *Ad Hoc* sem fio, o protocolo de roteamento é componente fundamental

para possibilitar a comunicação entre dois dispositivos distantes. Eles devem realizar rotinas capazes de mapear a topologia da rede, tornando possível a transmissão de pacotes desde a origem até o destino. Pode-se classificar os protocolos usados nesse tipo de rede em reativos, proativos e geográficos.

Protocolos reativos são aqueles que estabelecem rotas da origem para o destino apenas quando há solicitação de envio de pacotes. Pode-se citar como exemplo o *Ad hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) que para construir a rota dinamicamente, inicia-se por meio do nó que origina a requisição com o envio de uma mensagem por difusão (*broadcast*) do tipo *Route Request* (RREQ). Esta mensagem é propagada na rede até o destino que retorna com uma mensagem *Route Reply* (RREP) ao tempo que atualiza as tabelas de roteamento. Caso não encontre caminho disponível entre origem e destino, será gerada uma mensagem *Route Error* (RERR).

Nos protocolos proativos, os nós trocam informações de rotas com certa periodicidade, com isso cada nó mantém e gerencia sua própria tabela de roteamento. O *Optimized Link State Routing* (OLSR) é um protocolo proativo bastante conhecido, em que cada nó seleciona um conjunto de vizinhos denominados *Multipoint Relays* (MPRs) que são responsáveis pelo encaminhamento e controle do tráfego de pacotes. No cálculo da rota, os MPRs são usados para compor a rota de um determinado nó de origem para qualquer destino na rede [11].

Os protocolos classificados como geográficos consideram métricas de posicionamento físico para construção de rotas. O algoritmo identifica e considera como candidato o nó melhor localizado geograficamente para o próximo salto em direção do destino. VASHIST e JAIN em [58] informam que redes de drones ou multi-UAV são exemplos de arranjos que utilizam conceitos de redes *Ad Hoc* sem fio para transferir pacotes de forma eficiente. São exemplos de protocolos de roteamento geográficos: o *UAV Routing Protocol* (URP) [55] que faz uso de classificador de Bayes; e o DTN-LoRa [5] que apresenta uma abordagem tolerante a atrasos e interrupções.

2.1.2 Roteamento Oportunístico em Redes Sem Fio

Protocolos que realizam Roteamento Oportunístico (RO), especialmente em redes *Ad Hoc* sem fio, têm por função a cada etapa do processo de envio de fluxos de dados

selecionar dinamicamente um conjunto de nós candidatos (em vez de um único nó) desde a origem até o destino [48]. Em outras palavras, a transmissão de um nó é feita por difusão (*broadcast*) e essa passa a ser percebida por vários outros nós adjacentes que por sua vez decidem dinamicamente encaminhar pacotes de dados através de múltiplos caminhos até o destino. Essa característica produz o aumento da vazão da transmissão e maior confiabilidade de entrega dos pacotes.

Segundo ZENG *et al.* [65], o RO busca melhorar a confiabilidade do encaminhamento de pacotes em redes sem fio com vários saltos, aproveitando a natureza de transmissão do meio sem fio. Diferentemente do roteamento tradicional, em que apenas o caminho com maior probabilidade de entrega é o escolhido para a transmissão, no RO todos os nós podem ser compartilhados durante o processo de roteamento [8].

Invés de considerar o meio compartilhado sem fio uma limitação, o RO aproveita o processo de transmissão por difusão para escolher dinamicamente os nós que irão encaminhar os pacotes de dados, aproveitando de todos os caminhos possíveis desde a origem até o destino. Essas características estimularam sua adoção em ambientes de redes de comunicação Mesh, MANETs, automação da construção civil e infraestruturas críticas como: abastecimento de água, distribuição de eletricidade, pontes, ferrovias e gasodutos/oleodutos [44] [42] [33] [63].

Na Figura 2.1 é exibido o encaminhamento de pacotes em uma topologia de rede com baixa porcentagem de entrega de pacotes. Considerando que o nó 1 transmita pacotes para o nó 5, por meio dos nós intermediários 2, 3 e 4, as probabilidades das transmissões serem bem-sucedidas são de 30%, 40% e 5%, respectivamente. No RO, uma vez que um dos nós intermediários receba o pacote, não precisará haver retransmissão. Logo, a probabilidade de recebimento por parte do nó 5 será $P = 1 - [(1 - 0,3) * (1 - 0,4) * (1 - 0,05)] = 0,601 \approx 60\%$. Enquanto que no roteamento tradicional, no melhor dos casos, a cada 10 transmissões um número médio de 04 pacotes serão recebidos pelo nó 5. Em outras palavras, no cenário de RO, a probabilidade de sucesso da transmissão de um pacote aumenta de 40% para 60% se comparado com o roteamento tradicional.

O paradigma de RO apresenta questões desafiadoras como: *a)* a coordenação e seleção dos nós encaminhadores da rede; *b)* as maneiras de evitar interferências e

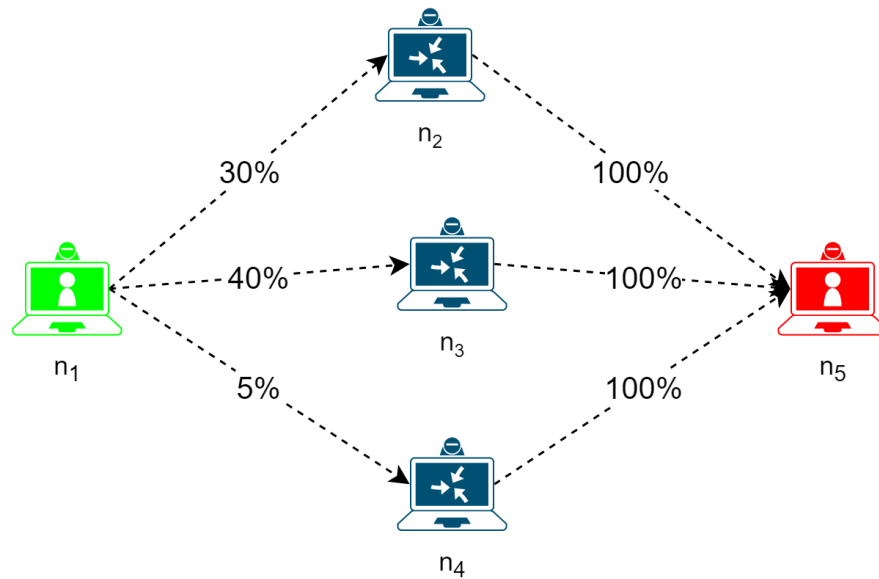


Figura 2.1: Encaminhamento de pacotes em uma topologia de rede com baixa porcentagem de entrega

retransmissão (duplicação) de pacotes entre nós vizinhos; e *c*) as técnicas para priorizar a escolha dos melhores encaminhadores da origem ao destino.

HEISSENBÜTTEL *et al.* propuseram o ExOR [18], um típico protocolo de roteamento proativo como solução para coordenar e selecionar nós. O conjunto de nós encaminhadores é selecionado por meio do envio periódico de pacotes de controle por cada um dos nós para seus vizinhos. No SOAR [28], o nó de origem inicia a transmissão e o caminho de roteamento é selecionado ao final da transmissão do pacote real, um típico comportamento de protocolos reativos.

Sobre questões relacionados a interferências, ROZNER *et al.* propuseram o MCEXOR [47], solução proposta especialmente para ambientes de transmissão multi-canal com o propósito de prevenir que os canais de transmissão venham se sobrepor uns aos outros, evitando interferências. O ExOR tenta evitar o aumento da retransmissão, limitando o número máximo de 10 saltos na expectativa de alcançar o destino. Caso esta condição seja atingida, a requisição é descartada e o destino é considerado inalcançável.

Ainda relacionado à retransmissão de dados em ambiente de roteamento oportunístico, um mecanismo foi proposto por CALADO em [8] para evitar o crescimento exponencial de retransmissão, funcionando da seguinte maneira: durante o processo de reserva, ao receber um *token* de requisição, o nó não efetua a retransmissão imediata,

invés disso aguarda por um período de tempo aleatório; e caso o nó venha receber novos *tokens* para o mesmo fluxo neste intervalo de tempo, os valores serão somados e uma única requisição será transmitida.

Para escolher os melhores encaminhadores, LEONTIADIS E MASCOLO em [31] propuseram o GeOpps, uma solução de roteamento geográfico para VANETs que permite utilizar rotas sugeridas pelo sistema de navegação veicular para a seleção dos nós encaminhadores. DING *et al.* em [15] propuseram o SIOR que na fase de seleção emprega uma técnica baseada no triângulo de Reuleaux (triângulo esférico) para identificar os encaminhadores que estiverem mais próximos. O triângulo de Reuleaux garante que todos os nós candidatos dentro dele possam se comunicar entre si.

2.1.3 Qualidade de Serviço

Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*) é descrito como um conjunto de requisitos a serem atendidos pela rede para tornar possível a transmissão de fluxos de dados [13]. Um dos principais objetivos da adoção de soluções de QoS é a necessidade de orquestrar as transmissões das aplicações em face dos recursos de rede disponíveis. Aplicações aprimoradas modernas como: VoIP, videoconferência, jogos interativos, controle de pelotão de veículos, UAV, telepresença, entre outros, necessitam de suporte de QoS para funcionar adequadamente.

A Figura 2.2 exibe o comparativo de uso da largura de banda em redes sem e com suporte à QoS. Na Figura 2.2(a) é representado o comportamento em redes sem QoS, em que aplicações com comportamento ganancioso consomem toda a largura de banda, inviabilizando o tráfego de serviços de maior criticidade. Na Figura 2.2(b), observa-se o comportamento de redes com QoS habilitado, em que a largura de banda é administrada de acordo com as exigências das aplicações e com parâmetros de configuração e administração da rede.

Para JAT *et al.* em [21], os requisitos de desempenho devem ser muito bem definidos no que se refere a largura de banda, *delay*, *jitter*, taxa de perda de pacotes, além de outros. A Tabela 2.1 exibe o desempenho requerido para diferentes classes de serviços que possuem diferentes requisitos de QoS. Como pode ser visto, as aplicações de tempo real requerem uma maior confiabilidade e são mais sensíveis a atrasos (*delay*) e ordenamento



Figura 2.2: Comparativo de uso da largura de banda em redes sem e com suporte QoS¹

na entrega (*jitter*) dos pacotes.

Tabela 2.1: Requisitos de desempenho para serviços baseados em texto, áudio e vídeo adaptado de [21]

Classe	Aplicação	Delay	Jitter	Taxa de perda
Tempo real	VoIP, videoconferência	<150ms	1 ms	1% (vídeo), 3% (áudio)
Streaming	Streaming vídeo/áudio	Até 10s	1 ms	1%
Melhor esforço	http, e-mailing, ftp	Minutos	NA	0%

Existem dois métodos principais para habilitar QoS em redes de computadores:

- serviços integrados (*Integrated Services - IntServ*) que tem como base a reserva de recursos. O nó de origem solicita ao nó de destino a alocação de recursos necessários para possibilitar a transmissão dos dados;
- serviços diferenciados (*Differentiated Services - DiffServ*) que implementam QoS com base na definição de tipos de serviços. Neste método, mecanismos de classificação priorizam as aplicações identificadas com requisitos mais exigentes.

Vale ressaltar que os métodos *IntServ* e *DiffServ* não são excludentes entre si. Eles podem ser projetados para uso em conjunto, de forma a acomodar diferentes requisitos para diferentes contextos de redes.

Priorização por fluxo e priorização por classes são tipos de abordagens de *DiffServ* utilizados para melhorar a aplicação de QoS com base em roteamento. Na priorização por fluxo é definido um conjunto de requisitos necessários para a transmissão. Tais requisitos são repassados para todos os roteadores que realizam a devida priorização dos fluxos. Nas soluções que realizam priorização por classes, os fluxos de dados que trafegam na rede devem ser organizados em classes com os níveis de prioridades identificados

¹<https://www.pcwdd.com/what-is-qos>

pela rede. Dessa maneira, não é necessário os nós de rede manter informações sobre o estado de todos os fluxos que os atravessam.

2.1.4 Controle de Admissão em Redes Sem Fio

Controle de Admissão (CA) é um mecanismo possível de ser empregado no gerenciamento dos recursos disponíveis na rede. MOLLAEI e DARMANI em [36] propõem que uma implementação de CA tem objetivo de controlar a inclusão de novos fluxos de dados na rede em cumprimento a condições preestabelecidas, além de promover o compartilhamento racional dos recursos de rede.

De modo mais abrangente, CA visa determinar quais fluxos poderão entrar na rede e quais não serão permitidos. Este processo será executado durante a entrada do fluxo na rede, de maneira que o nó de origem transmitirá quais serão os requisitos de QoS para o fluxo ou qual classe o fluxo pertence [9]. Dessa forma, pode-se afirmar que a principal finalidade em se implantar CA é disciplinar a utilização de recursos da rede.

Porém, propor CA em redes sem fio não é uma tarefa trivial. A coleta de informações sobre os recursos de rede disponíveis e a tomada de decisão, considerando parâmetros de QoS definidos são tarefas desafiadoras tanto na concepção quanto no desenvolvimento de uma solução eficiente. Ainda se tratando de CA, deve-se existir uma outra etapa muito importante, a reserva de recursos, momento em que os recursos disponíveis serão alocados para os fluxos aceitos (admitidos).

2.2 Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, pesquisadores vêm apresentando soluções relacionadas a CA. SHANG *et al.* em [49] propuseram um CA para WMNs que aplica modelos matemáticos da Teoria dos Jogos [60] sobre múltiplos critérios e características para a tomada de decisão. JIN *et al.* em [24] apresentaram a proposta de CA para computação em nuvem móvel com base no processo de decisão de semi-Markov com o objetivo de maximizar o desempenho e garantir QoS.

AMPRIRIT *et al.* em [3] apresentaram um mecanismo de CA com base em lógica Fuzzy para redes definidas por *software* (*Software-Defined Network* - SDN) móveis de

quinta geração (5G) que envolve o controlador SDN, estações rádio base e usuário (*User Equipment - UE*). O CA proposto pelos pesquisadores utiliza os seguintes parâmetros de entrada: requisitos de QoS; prioridade de rede (*slice priority*) para o UE; o tempo de espera de uma solicitação do usuário em um buffer; e o custo de sobrecarga de fatia de rede.

CABALLERO *et al.* em [7] propuseram um *framework* de fatiamento de rede (*networking slicing*) para jogos. Os pesquisadores modelaram políticas de CA, juntamente com um esquema de alocação de recursos e um algoritmo de descarte de usuários (*user dropping*), voltados para a manutenção do sistema em Equilíbrio de Nash².

GANESAN em [17] propôs um CA que realiza a abordagem baseada em algoritmos distribuídos, em que cada nó tem o conhecimento dos parâmetros de QoS globais da rede. Aplicável a redes *Ad Hoc* sem fio, os pesquisadores apresentaram um modelo de interferência primária para evitar que dois links quaisquer compartilhem o mesmo nó no mesmo intervalo de tempo.

Abordagens sobre modelos de CA bidirecional são mais escassas na literatura. XUE *et al.* em [62] aplicaram em redes *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) um modelo de fila de Markov e um método de pesquisa iterativa bidirecional (*Bidirectional Iterative Search - BIS*) para calcular as taxas de aceitação de transferência, e se um novo fluxo na rede será admitido com base no atraso dos pacotes e no número de fluxos em andamento na rede. MEHMOOD *et al.* em [34] apresentaram um esquema para reduzir o número de transmissões necessárias para comunicar pacotes bidirecionalmente em comunicações *unicast*.

Com base nas pesquisas bibliográficas realizadas, não foi possível localizar trabalhos relacionados recentes sobre mecanismos que realizem CA de fluxo em ambos os sentidos para ambientes de roteamento oportunístico.

²O Equilíbrio de Nash representa a inalterabilidade em uma situação na qual, em um jogo com dois ou mais jogadores, nenhum jogador tem a ganhar se mudar sua estratégia unilateralmente.

Capítulo 3

Ferramentas de simulação e análise de rede

Este Capítulo realiza uma breve discussão sobre as ferramentas de simulação e análise de redes necessárias para a validação do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

3.1 Simuladores de Eventos Discretos de Rede

Simuladores de eventos discretos vêm sendo amplamente utilizados tanto para o projeto quanto para a avaliação do comportamento de implementações de protocolos de comunicação em redes de computadores. Em modelos de eventos discretos, o estado do sistema muda somente no instante que ocorre um evento. Para todos os demais instantes de tempo, nada muda no sistema. Em redes de computadores, pode-se admitir como eventos discretos, por exemplo, o início de uma transmissão de pacotes e o fim de uma transmissão de pacotes. Isso implica que no intervalo de tempo entre esses dois eventos, nada de interessante acontece [56].

O OMNeT++ [57], solução adotada nesta dissertação para simulação e análise, é uma ferramenta composta por módulos que se comunicam trocando mensagens. Esses módulos são escritos na linguagem de programação C++ e seu funcionamento fazem uso de bibliotecas de classes de simulação. Outro componente fundamental no OMNeT++ é o *Network Description* (NED).

NED permite ao usuário declarar módulos simples, os conectar e montar módu-

los compostos (composição de mais de um módulo simples) conforme ilustrado na Figura 3.1. No OMNeT++, funcionalidades específicas de protocolos de comunicação podem ser herdadas de estruturas modelos (*templates*) e desenvolvidas como projetos independentes.

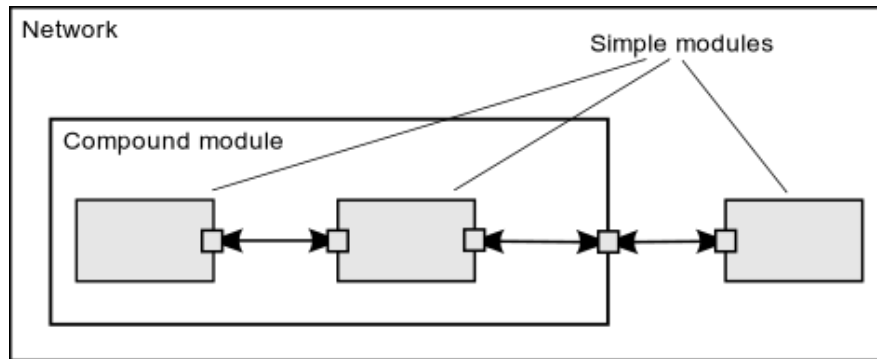


Figura 3.1: Módulos simples e compostos do OMNeT++. Fonte [56]

De modo geral, para se construir e executar a simulação de um modelo em OMNeT++, precisa-se ter:

- o código fonte contendo implementações dos módulos (arquivos `.cc` e `.h`);
- definições e tipos de mensagens (arquivos `.msg`) que serão traduzidas em classes C++;
- arquivos `.ned` com a descrição da topologia da rede, a estrutura do módulo com parâmetros, as portas de comunicações, entre outros; e
- arquivo de configuração (`omnetpp.ini`) que indica os parâmetros do modelo e outras configurações.

A interface gráfica de simulação do OMNeT++, exibida na Figura 3.2, tende a facilitar a depuração, a demonstração ou a execução em lote de simulações. Para modelar protocolos de comunicação de rede no OMNeT++, um framework bastante popular é o INET³. Esse oferece uma série de modelos para redes móveis, com e sem fio. Protocolos de camada de enlace sem fio (IEEE 802.11), protocolos de Internet (TCP, UDP, IPv4, IPv6), protocolos de roteamento (OSPF, RIP, BGP, etc.) são alguns dos modelos e componentes facilmente encontrados e disponíveis para uso e modificação.

³INET Framework. Disponível em: <https://inet.omnetpp.org/>. Acessado em novembro de 2020.

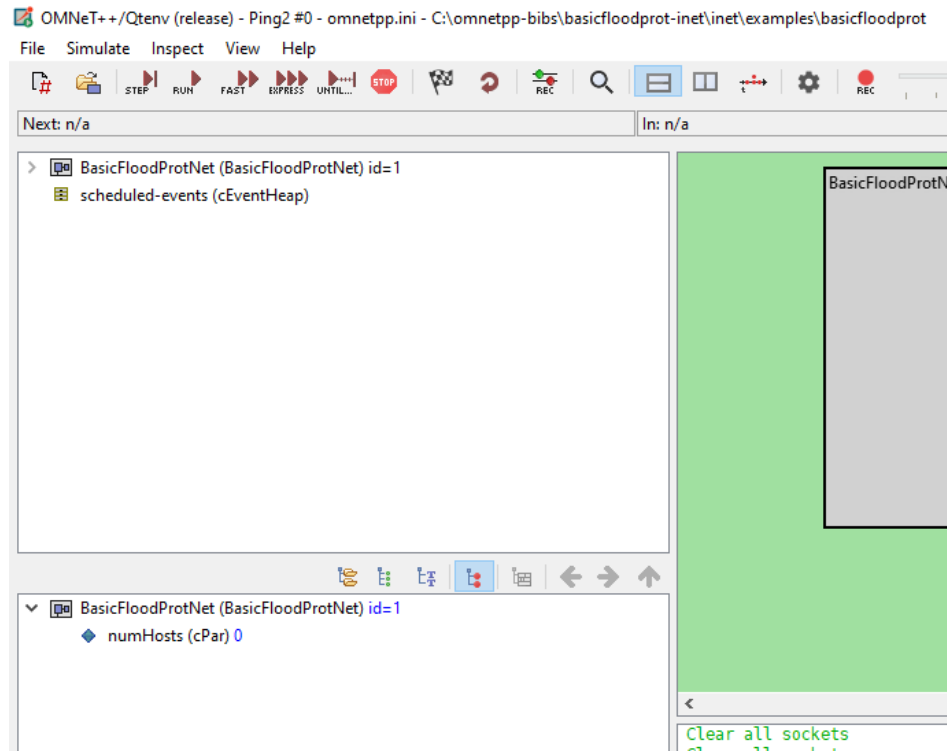


Figura 3.2: Tela de simulação do OMNeT++

Outros simuladores de redes podem ser vistos na Tabela 3.1 que exibe um comparativo com o OMNeT++. O SWANS [4] é um simulador para redes *Ad Hoc* sem fio que faz uso do *Java in Simulation Time - JiST*, porém apresenta uma interface gráfica limitada. O NetSim [54] é um software fim-a-fim, capaz de simular e emular redes em um ambiente completo de modelagem e desenvolvimento de protocolos de comunicação, porém é uma ferramenta comercial que representa custos adicionais. O NS-2 [59] é uma ferramenta muito popular usada para simular redes, porém não tem recebido atualização (a última ocorreu em 2013) o que limita seu uso em face do surgimento de novas tecnologias de transmissão. O NS-3 [40], outro simulador de rede de eventos discretos, suporta pesquisas em redes baseadas em endereçamento IP e não IP, mas não apresenta interface gráfica de simulação nativa.

3.2 Redes de Petri Coloridas

Redes de Petri Coloridas (*Coloured Petri Nets - CPN*), uma variação da tradicional rede de Petri descrita inicialmente por MURATA em [37], é uma linguagem formal que

Tabela 3.1: Comparativo entre softwares simuladores de rede.

Ferramenta	SWANS	NetSim	ns-2	ns-3	OMNeT++
Linguagem de programação	Java	C / Java / .NET	C++ / OTcl	C++ / Python	C++ / NED
Licença de uso	Livre	Comercial	Livre	Livre	Livre Acadêmico
Interface gráfica	Limitada	Sim	Limitada	Terceiros	Sim
Suporte a rede sem fio	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Atualizado nos últimos 05 anos	Não	Sim	Não	Sim	Sim

possui a capacidade de especificar e validar o comportamento de sistemas complexos [22]. JENSEN *et al.* em [23] relataram CPN como uma linguagem para a modelagem e validação de sistemas nos quais simultaneidade, comunicação e sincronização desempenham um papel importante.

Para esta dissertação foi utilizado o CPN/Tools [46], ferramenta que permite modelar eventos discretos combinando redes de Petri e a linguagem de programação funcional CPN/ML que é baseada nos padrões *Standard ML*⁴. Apesar de não limitados a esses, os típicos domínios de aplicação de CPN são os protocolos de comunicação, as redes de dados, os algoritmos distribuídos e os sistemas embarcados.

A definição formal de uma CPN é descrita em [22] como segue:

- CPN não hierárquica é uma 9-tupla $CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$ onde:
 1. P é um conjunto finito de **Lugares**.
 2. T é um conjunto finito de **Transições** tal que $P \cap T = \emptyset$.
 3. A é um conjunto finito de **Arcos** direcionados tal que $A \subseteq P \times T \cup T \times P$. Significa que um arco pode ligar apenas um lugar a uma transição ou vice-versa. Não é possível usar um arco para ligar um lugar a outro lugar ou uma transição a outra transição.
 4. Σ é um **conjunto de Cores** (tipo de dado) finito e não vazio.
 5. V é um conjunto finito de **Variáveis** tal que $Tipo[v] \in \Sigma$ para todas as variáveis $v \in V$.

⁴Standard ML of New Jersey. Disponível em: <http://www.smlnj.org>. Acessado em abril de 2021.

6. C é uma **função de Conjunto de cores** $C : P \rightarrow \Sigma$ que associa cada lugar a um conjunto de cores.
7. G é a **função de Guarda** $G : T \rightarrow EXPR_V$ que associa cada transição a uma guarda tal que $Tipo[G(t)] = Bool$ para todo $t \in T$.
8. E é a **função de Expressão de arco** $E : A \rightarrow EXPR_V$ que associa cada arco a a uma expressão tal que $Tipo[E(a)] = C(p)_{MS}$ para todo $a \in A$, onde p é o lugar conectado ao arco a .
9. I é a **função de Inicialização** $I : P \rightarrow EXPR_\emptyset$ que associa a cada lugar a uma marcação inicial tal que $Tipo[I(p)] = C(p)_{MS}$ para todo $p \in P$.

A simulação da CPN, chamado de jogo das fichas (*token game*) [32], é guiado pela ocorrência das transições que, por sua vez, é formalizado pela regra de disparo das transições. Para uma transição em uma CPN disparar, é preciso habilitá-la satisfazendo as seguintes regras: *a*) todos os lugares de entrada de uma transição devem ter fichas em quantidade maior ou igual que o peso do arco que liga o lugar a transição; e *b*) a função de guarda deve ser avaliada para verdadeira. São comportamentos esperados após o disparo: *i*) uma transição habilitada pode ou não ocorrer; e *ii*) o disparo de uma transição habilitada remove fichas dos lugares de entrada e acrescenta nos lugares de saída, de acordo com os pesos dos respectivos arcos [30].

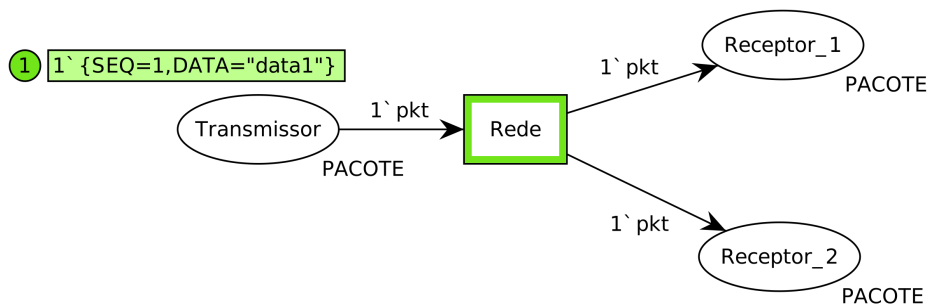


Figura 3.3: Marcação inicial do modelo de CPN para o exemplo de transmissão por difusão

Na Figura 3.3 é ilustrado um modelo de CPN para o envio por difusão de um pacote de dados em uma rede de computadores que possui um transmissor e dois receptores. Na figura, a marcação (fichas) nos lugares são $M(\text{Transmissor}) = 1$, $M(\text{Receptor}_1) = 0$ e $M(\text{Receptor}_2) = 0$. O peso do arco de Transmissor para Rede é 1. Dessa forma, a

transição está habilitada. Como não existe função de guarda em Rede, por definição assumi-se a guarda como verdadeira. O disparo da transição Rede irá remover uma ficha do lugar Transmissor e depositará uma ficha no lugar Receptor_1, e uma outra ficha no Receptor_2, como pode ser visto na Figura 3.4.

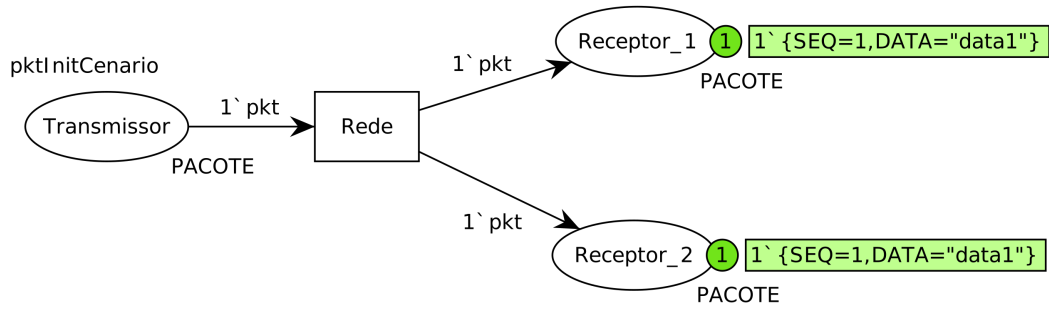


Figura 3.4: Marcação após o disparo da transição Rede

Capítulo 4

Revisão da Literatura Sobre Controle de Admissão Bidirecional

Para auxiliar a definição da solução de pesquisa desta dissertação, foram observados os trabalhos propostos na literatura sobre controle de admissão (CA) para o fornecimento de QoS em redes sem fio. Uma revisão secundária com base nas diretrizes de KITCHENHAM *et al.* em [29] foi conduzida, considerando os trabalhos publicados no período de janeiro de 2014 a primeira semana de abril de 2021.

4.1 Protocolo da Revisão

O planejamento, a condução e a análise dos trabalhos desta revisão foram realizados na ferramenta de software Parsifal⁵ e envolveu as seguintes etapas: (i) definição das questões de pesquisa; (ii) definição da *string* de busca e bases de pesquisa; (iii) definição dos critérios de inclusão e exclusão dos trabalhos; (iv) extração e classificação de trabalhos a partir das bases pesquisadas; e (v) análise e discussão sobre os trabalhos relacionados.

Uma questão principal de pesquisa (QP) e outras quatro secundárias (QS) orientaram a revisão. São elas: **QP**: como está proposto na literatura atual o CA bidirecional para melhorar a QoS em redes sem fio?; **QS01**: quais as problemáticas apresentadas para justificar os trabalhos analisados?; **QS02**: quais os desafios enfrentados no processo de

⁵Parsifal. Disponível em: <https://parsif.al/>. Acessado em: abril 2021.

desenvolvimento do CA para redes sem fio?; **QS03**: como foram realizadas a simulação e a avaliação de desempenho dos trabalhos propostos?; e **QS04**: quais os benefícios alcançados ao se implementar o CA nos trabalhos analisados?

As bases eletrônicas e a *string* de busca utilizada são indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Bases eletrônicas pesquisadas

Bases Eletrônicas	<i>String</i> de busca
Engineering Village	((“wireless” OR “mobile” OR “wi-fi”) AND (“quality of service” OR “qos”) AND (“admission control”) AND (“end-to-end” OR “bidirectional”))
IEEE Xplore	
Web of Science	
Science Direct	
Scopus	
Springer	

Os critérios de inclusão e exclusão foram úteis para indicar como serão feitas as seleções dos trabalhos. Busca-se identificar trabalhos primários, completos, publicados em língua inglesa que abordem os temas de CA bidirecional para habilitação de QoS em redes sem fio. Os critérios de inclusão e exclusão são exibidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Trabalhos sobre CA bidirecional para habilitação de QoS em redes sem fio	Trabalhos duplicados
Trabalhos primários	Trabalhos resumidos
Trabalhos publicados no período de janeiro de 2014 a primeira quinzena de abril 2021	Trabalhos escritos em língua estrangeira diferente do inglês
Trabalhos que respondam à questão de pesquisa	Trabalhos que realizam revisão sistemática ou <i>surveys</i>
-	Trabalhos que não apresentam discussão direta sobre o tema

4.2 Resultados da Revisão

O processo de seleção dos trabalhos, exibido na Figura 4.1, resultou em 23 trabalhos aceitos e a análise destes subsidiou as respostas para as questões de pesquisa propostas na seção 4.1.

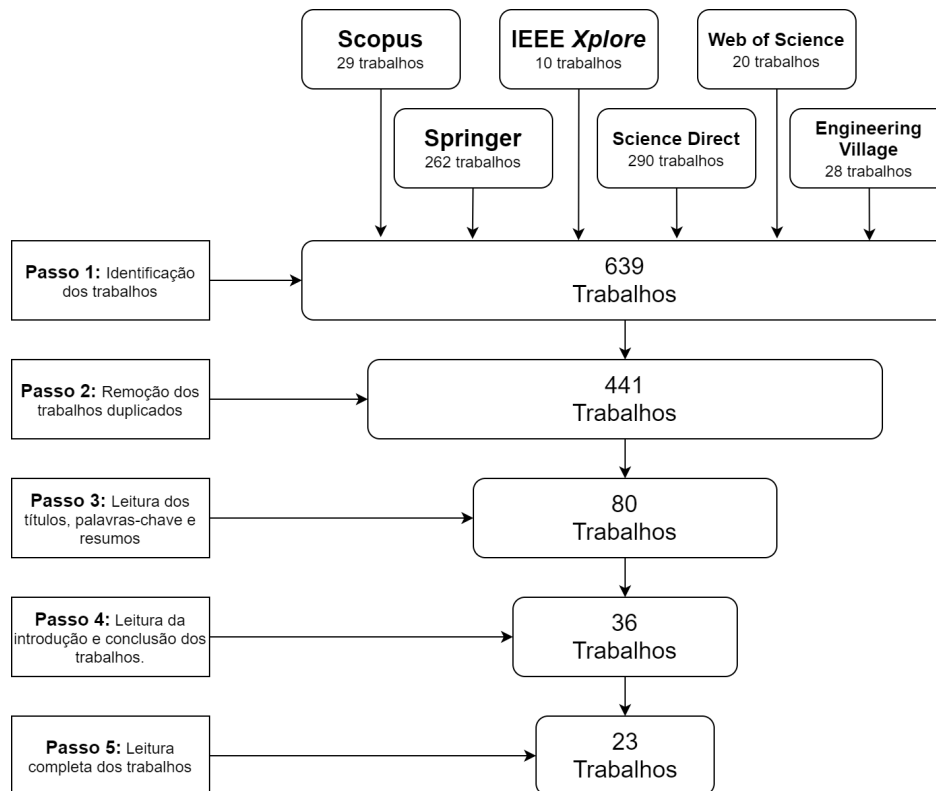


Figura 4.1: Processo de seleção dos trabalhos

A QS01 tem o objetivo de identificar as problemáticas que justificam os trabalhos realizados. A complexidade da computação e do roteamento em redes *Ad Hoc* sem fio é diretamente proporcional ao número de saltos da origem ao destino [51]. Em redes sem fio, a interferência causada pela transmissão de nós vizinhos é um problema crítico que afeta seriamente a performance da rede [26].

A QS02 tem o objetivo de identificar os desafios e as complexidades no desenvolvimento do CA em redes sem fio. Observou-se que a incerteza nos caminhos da origem para o destino [45], a capacidade de prever métricas durante a transmissão [50] e o ajuste da janela de contenção são os fatores que impactam na eficiência da solução. Janelas de contenção visam disciplinar transmissões simultâneas provenientes de diferentes nós na rede. Ao detectar interferências entre si, um mecanismo de *back off* (intervalo de tempo aleatório) é ativado, e então cada nó seleciona um tempo aleatório para atrasar sua própria transmissão [6] [38].

A QS03 tem o objetivo de relacionar as ferramentas de simulação e de avaliação de desempenho utilizadas nos trabalhos, observando de forma quantitativa a utilização

de simuladores de rede e métodos formais. Na Figura 4.2 é ilustrado o gráfico com a predominância de utilização do NS-2 nos trabalhos analisados. Como expressado anteriormente, o NS-2 é uma ferramenta muito popular e que possui documentação completa. Porém, devido a não receber atualizações há mais de 05 anos, pode-se gerar incertezas sobre a simulação de eventos em modelos de redes mais atuais. Sobre métodos formais, não foi identificado o uso de ferramentas para a especificação, análise e/ou validação nos trabalhos relacionados a CA em redes *Ad Hoc* sem fio. A especificação formal, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento, reduz os erros de requisitos, pois força-os a uma análise mais detalhada [53].

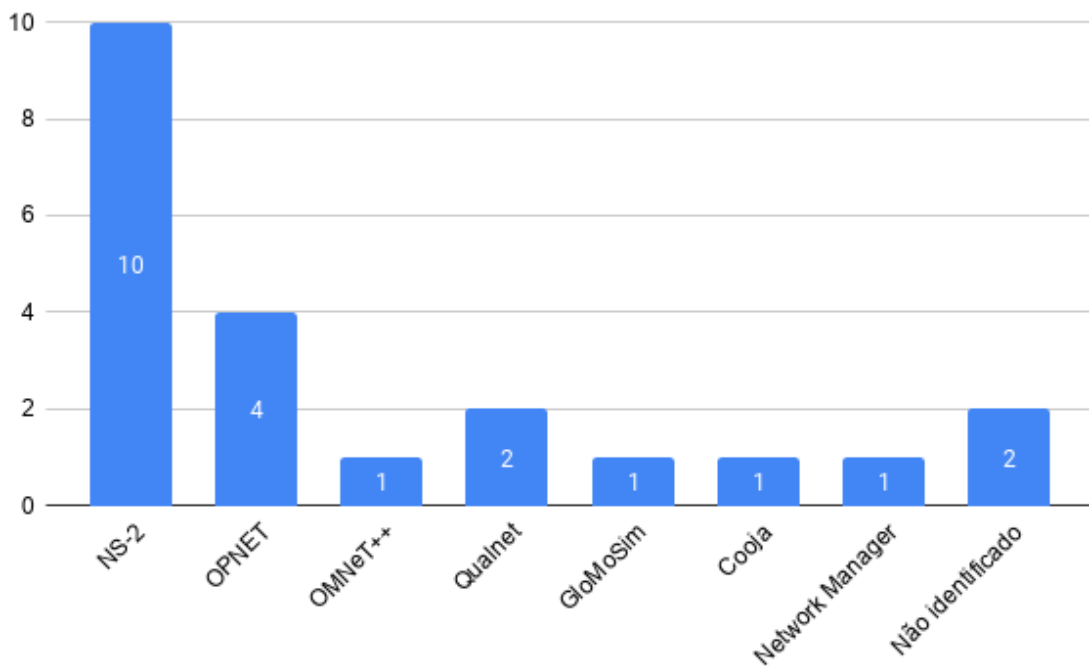


Figura 4.2: Simuladores de rede utilizados nos trabalhos analisados

A QS04 tem a finalidade de identificar a contribuição gerada pelos trabalhos analisados. A maioria dos autores dos trabalhos selecionados destacam: melhoria de performance em termos de *delay* médio [45]; melhoria no gerenciamento de recursos de serviços bidirecionais (*duplex*) em redes sem fio 802.16 [39]; melhoria na taxa de transferência de dados (*throughput*) [38]; e melhoria na abordagem de predição de métricas [50]. Em todos os trabalhos analisados, o objetivo principal é garantir melhores níveis de QoS.

Em resposta a QP (questão principal da pesquisa), observa-se que nos trabalhos

analisados duas abordagens se destacaram: *a)* redução ou limitação do número de saltos da origem ao destino; e *b)* ajuste dinâmico da janela de contenção para reduzir o comprimento da fila de transmissão na rede.

Por meio desta revisão da literatura, foi possível perceber um número limitado de trabalhos sobre CA em ambientes de roteamento oportunístico sem fio. CALADO em [8] já observava para a existência da lacuna de trabalhos sobre CA com foco bidirecional em redes *Ad Hoc* sem fio.

Outro ponto de destaque observado, refere-se ao fato de que nenhum dos trabalhos analisados fez uso de métodos formais para a validação de sua proposta. Portanto, uma lacuna de pesquisa relevante identificada durante a revisão é destacada: *a falta de análise das abordagens de CA em redes Ad Hoc sem fio utilizando modelos formais.*

No próximo capítulo será apresentada a especificação e a avaliação do mecanismo de CA bidirecional a ser empregado em ambientes de redes sem fio oportunísticas. Este difere dos demais por apresentar uma abordagem simplificada; por controlar fluxos bidirecionais com diferentes requisitos de banda para a transmissão e para a recepção; e por fim, possibilitar a sua utilização em diferentes tipos de aplicação que necessitem de QoS para o funcionamento.

Capítulo 5

Mecanismo de Controle de Admissão Proposto

Este capítulo foi dividido em três seções principais: na primeira foi definido o modelo conceitual do controle de admissão proposto; na segunda detalhou-se o processo de reserva de recursos; e na terceira foram apresentados os experimentos de simulação desenvolvidos, um no OMNeT++ com INET *framework* e outro no CPN/Tools.

5.1 O Mecanismo de Controle de Admissão Bidirecional

Para esta dissertação, assumiu-se uma topologia de rede em que o conjunto de nós encaminhadores é descrito como $\mathcal{N} = \{n_i | i = 1, 2, \dots, k - 1, k\}$. Considerou-se $\mathcal{L} = \{n_i \rightarrow n_j | n_i, n_j \in \mathcal{N}\}$ como a representação do conjunto de links entre dois nós do conjunto \mathcal{N} . Isto posto, a Eq. (5.1) definida por CALADO em [8, p. 4] indica que um fluxo pode ser roteado de n_S para n_D se existe pelo menos um caminho p válido. Logo, \mathcal{P} representa o conjunto dos rotas válidas.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{S \rightarrow D} &= \{n_S \rightarrow \dots \rightarrow n_D | n_S, n_D \in \mathcal{N} \wedge \exists \\ & p = (n_S \rightarrow n_x, n_x \rightarrow n_y, \dots, n_z \rightarrow n_D)\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

O controle de admissão proposto realiza a reserva nos nós utilizando-se de métricas

externas que são fornecidas ao algoritmo do mecanismo como dado de entrada, e a maneira como estas são avaliadas não foi o foco deste estudo. É possível nominar duas das métricas externas utilizadas: (a) a estimativa de banda disponível entre dois nós; e (b) o conhecimento da coordenada geográfica de qualquer nó da rede. Uma outra premissa muito importante é a condição de cada nó intermediário n_i receber e processar somente uma requisição por fluxo. Esta característica é extremamente útil para evitar o inundamento (*flooding*) da rede ocasionado pelo crescimento exponencial da retransmissão de pacotes.

No funcionamento do controle de admissão proposto, o nó n_S , marcado como origem, inicia um temporizador e envia pacotes por difusão (*broadcast*) para se comunicar com o nó n_D , marcado como destino. O pacote enviado possui em um dos campos a indicação dos requisitos de banda de transmissão e de recepção para o funcionamento da aplicação. Após o pacote percorrer a rede e alcançar o nó n_D , este armazena as mensagens recebidas por diferentes rotas até que se atinja o requisito de *transmissão* (*ReqTr*). Neste momento, o nó n_D inicia a descoberta de rede até o nó n_S a fim de verificar se o requisito de *recepção* (*ReqRe*) também será satisfeito. É importante destacar que em redes sem fio oportunísticas, o caminho $\mathcal{P}_{S \rightarrow D}$ (origem \rightarrow destino) pode ser diferente de $\mathcal{P}_{D \rightarrow S}$ (destino \rightarrow origem). Caso os requisitos de banda de *transmissão* e *recepção* não sejam atendidos o tempo configurado no temporizador é atingido, o controle de admissão não realiza a reserva e, conseqüentemente, o fluxo não será admitido na rede.

A Figura 5.1 ilustra o exemplo de topologia da rede *Ad Hoc* sem fio imediatamente antes da transmissão do pacote inicial. O n_S é aquele que dá origem a solicitação de reserva à rede e um nó intermediário n_i somente encaminhará o pacote se estiver posicionado entre o nó anterior n_{i-1} e o nó destino n_D . Uma vez conhecido o posicionamento (coordenadas geográficas) de cada nó, pode-se facilmente calcular a distância euclidiana entre dois pontos por meio da Eq. (5.2).

A distância euclidiana entre dois pontos, A e B, seja $A = (x_A, y_A, z_A)$ e $B = (x_B, y_B, z_B)$ é calculada pela equação:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (5.2)$$

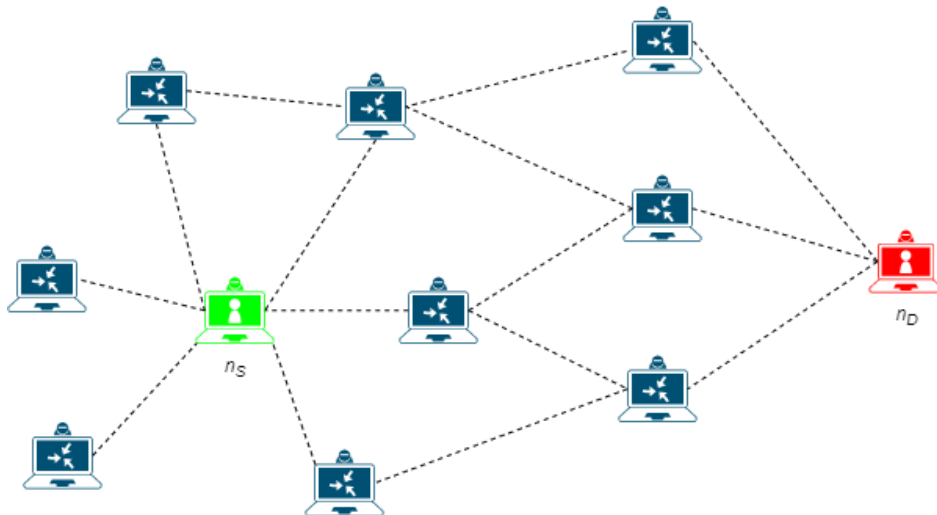


Figura 5.1: Exemplo de topologia da rede *Ad Hoc* sem fio em que n_S e n_D representam os nós de origem e destino, respectivamente

Para realizar a reserva de recursos para a admissão de fluxos de *transmissão* e de *recepção*, respectivamente $ReqTr = 50$ e $ReqRe = 50$, inicia-se o envio por difusão de um pacote a partir de n_S com destino a n_D , como representado na Figura 5.2. Em momentos de tempo diferentes, os nós encaminhadores vizinhos recebem o pacote e verificam se estão no caminho entre n_S e n_D . Em seguida, cada um consulta a banda estimada de n_S . Havendo banda disponível, os nós encaminham o pacote recebido ajustando o limite máximo de transmissão do caminho até alcançar o nó de destino n_D .

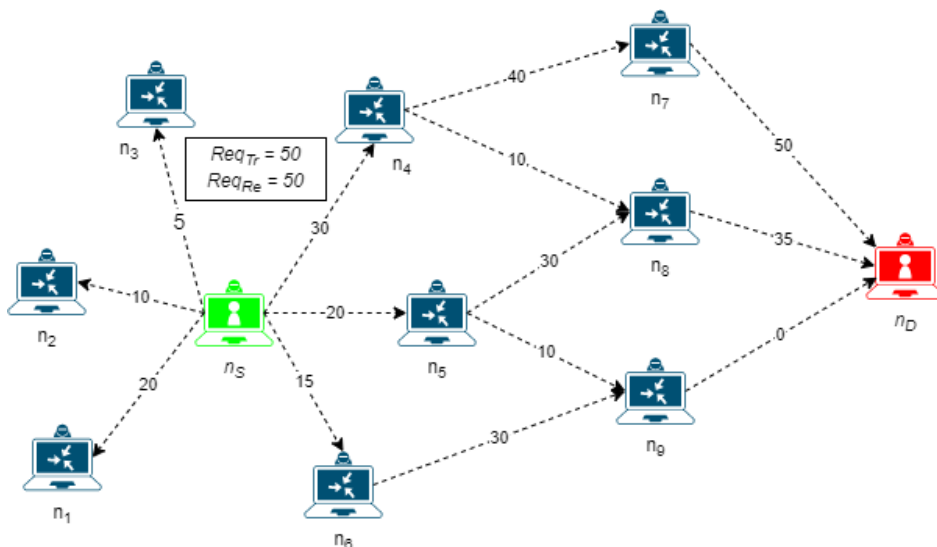


Figura 5.2: Envio inicial de pacote por difusão $n_S \rightarrow n_D$ para descoberta das rotas de ida

Na Figura 5.3 são ilustradas duas rotas válidas para o processo de descoberta de ida, $p_1 = (n_S \rightarrow n_4 \rightarrow n_7 \rightarrow n_D)$ e $p_2 = (n_S \rightarrow n_5 \rightarrow n_8 \rightarrow n_D)$. Os nós n_1 , n_2 e n_3 descartam o pacote com a requisição de reserva feita por n_S por não estarem na direção do destino (n_D). A requisição de n_9 para n_D é descartada pois não existe recurso disponível para estabelecer link por este caminho. As requisições em n_8 e n_9 , respectivamente, recebidas de n_4 e n_6 são descartadas. Isto ocorre devido a restrição implementada no mecanismo proposto que permite ao nó intermediário o processamento somente da primeira requisição de encaminhamento recebida, as demais serão descartadas. O processo de descoberta de ida é concluído quando há largura de banda disponível para atender o $ReqTr = 50$ em n_D .

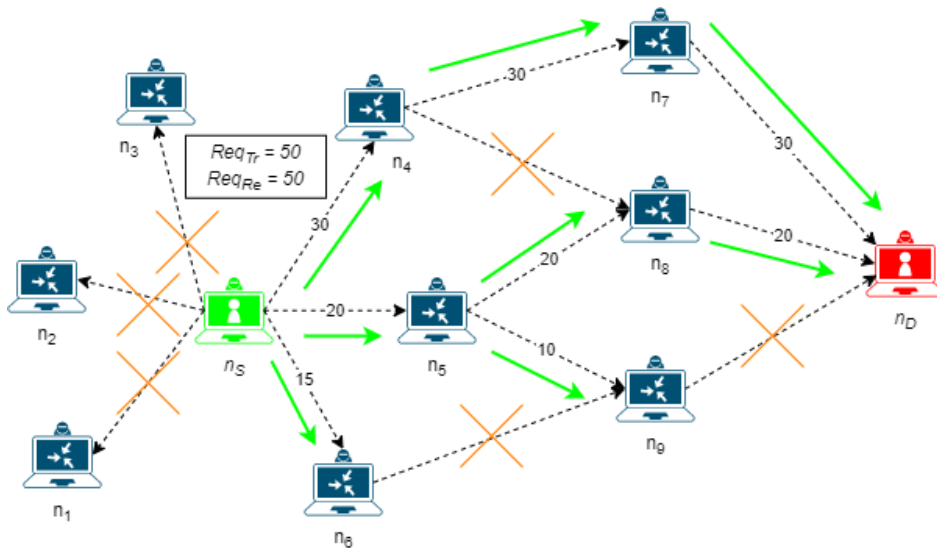


Figura 5.3: Rotas descobertas de $n_S \rightarrow n_D$, representadas pelas setas verdes, após o finalização do processo de ida

Após a conclusão do processo de descoberta de ida é realizada a descoberta de rede da volta ($n_D \rightarrow n_S$) para o atendimento de $ReqRe = 50$. Na Figura 5.4 é ilustrado os nós de rede e a largura de banda estimada entre eles. Após alcançar o nó n_S e com o $ReqRe$ atendido, é possível conhecer as rotas de volta $p_3 = (n_D \rightarrow n_7 \rightarrow n_4 \rightarrow n_S)$ $p_4 = (n_D \rightarrow n_8 \rightarrow n_5 \rightarrow n_S)$ $p_5 = (n_D \rightarrow n_9 \rightarrow n_6 \rightarrow n_S)$. Da mesma maneira que ocorre no processo de ida, as requisições são descartadas quando nós encaminhadores que não estão no caminho entre n_D e n_S ou quando recebem mais que uma requisição para o mesmo fluxo.

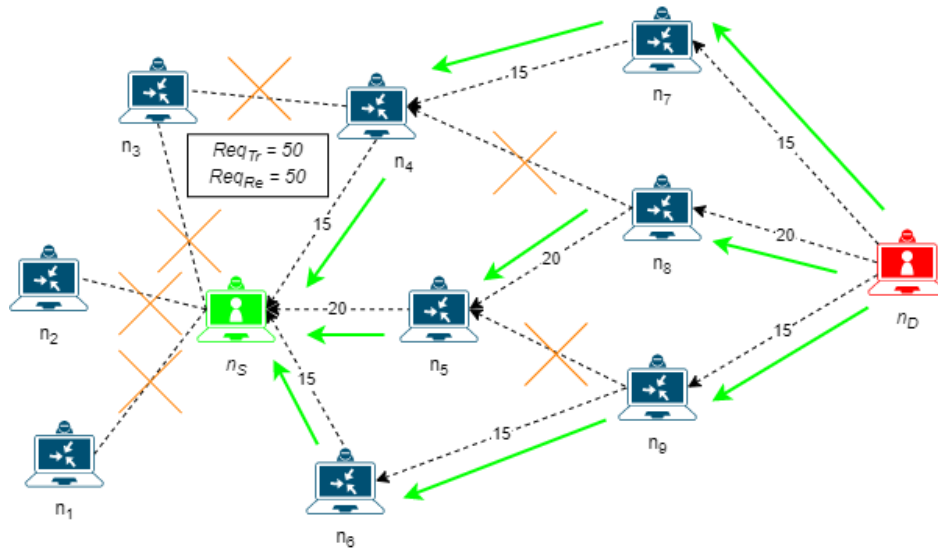


Figura 5.4: Rotas descobertas de $n_D \rightarrow n_S$, representadas pelas setas verdes, após o finalização do processo de volta

5.2 Processo de Reserva

Para realizar o processo de descoberta de rotas na rede e reserva de recursos, o Algoritmo 1 é proposto. É importante destacar que este algoritmo é executado por cada nó que receber algum pacote de requisição durante o processo.

O algoritmo supracitado deve receber os seguintes parâmetros de entrada: *source*, o nó que origina a requisição; *target*, o nó de destino; *ReqTr*, o requisito de banda de *transmissão* para a comunicação; *ReqRe*, o requisito de banda de *recepção* para a comunicação; *listPositionNodes[]*, a lista com a posição dos nós na rede; e *listEstimatedBw[]*, a lista com a largura de banda estimada em dois nós vizinhos.

A inicialização do processo de descoberta ocorre na seguinte sequência: *a*) o nó de origem executa o método *start()*; *b*) o temporizador, *timeOut*, de 3 segundos é iniciado; *c*) o início da primeira volta, *phase=1*, é definido com o objetivo de descobrir a largura de banda disponível até o destino, *target*; e *d*) o identificador para o fluxo, *flowID*, é escolhido. A partir deste momento, o nó de origem dispara por difusão um pacote que é recebido por seus vizinhos adjacentes.

Na linha 1 do Algoritmo 1 é validada a fase da descoberta de rede. Se a condição for verdadeira, significa que o requisito de transmissão (*ReqTr*) será testado para a descoberta das rotas de ida. Caso a condição seja falsa, o requisito de recepção (*ReqRe*)

Algoritmo 1 – Processo de Reserva

Input: *source*, *target*, *ReqTr*, *ReqRe*,
listPositionNodes[], *listEstimatedBw*[]
start();
timeOut \leftarrow 3s;
current_{bw} \leftarrow 0;
phase \leftarrow 1
flowID \leftarrow *random*(20);

Output: *listAvailableBw*[] \triangleright Lista com larguras de banda entre dois nós vizinhos

- 1: **if** (*phase* = 1) **then**
- 2: *reqApp* \leftarrow *ReqTr*;
- 3: **else**
- 4: *reqApp* \leftarrow *ReqRe*;
- 5: **if** (*node* = *target*) **then**
- 6: *current_{bw}* \leftarrow *current_{bw}* + *estimated_{bw}*;
- 7: **if** (*current_{bw}* \geq *reqApp*) **then**
- 8: **if** (*phase* == 1) **then**
- 9: *path.push_back*(*node*);
- 10: *pkt.push_back*(*path*);
- 11: *phase* ++;
- 12: *target* \leftarrow *source*;
- 13: *pkt.push_back*(*listAvailableBw*);
- 14: *transmit*(*pkt*);
- 15: **else**
- 16: **return** *pkt.listAvailableBw*;
- 17: **else**
- 18: **if** (*isNodeForwarder*(*pkt.path_back*, *node*, *target*)
and !*active*(*FlowID*)) **then**
- 19: *path.push_back*(*node*);
- 20: *pkt.push_back*(*path*);
- 21: *listAvailableBw.push_back*(*estimated_{bw}*);
- 22: *pkt.push_back*(*listAvailableBw*);
- 23: *transmit*(*pkt*);
- 24: *active.push_back*(*FlowID*);
- 25: **else**
- 26: **delete** *pkt*

será testado para a descoberta das rotas de volta.

Na linha 18, a função *isNodeForwarder* (definida no Algoritmo 2) testa se o nó atual é candidato a encaminhador, utilizando para isto a Eq. 5.2 que realiza o cálculo da distância entre os nós de rede. Se verdadeira, serão encapsuladas ao pacote informações úteis para o processo de descoberta, como: o caminho (*path*); e a largura de banda estimada entre este atual e o nó anterior (*estimated_{bw}*). Após isso, o nó transmite o pacote (linha 23) até encontrar o destino (linha 5), momento em que contabilizará os pacotes recebidos (linha 6) e, logo após atingir o requisito desejado (linha 7), iniciará o processo de volta (*phase = 2*).

O Algoritmo 1 finaliza nas seguintes situações: *i*) o valor do temporizador é atingido e não há possibilidade de reserva; *ii*) não existem mais pacotes a serem retransmitidos na rede; ou *iii*) o processo de descoberta da rede foi finalizado com o nó de origem tendo recebido as informações de rota e disponibilidade de recursos da rede. Nesta última situação, uma lista alimentada em cada iteração, contendo a largura de banda disponível entre cada dois vizinhos adjacentes é gerada como dado de saída.

Algoritmo 2 – Função auxiliar que identifica se o nó é candidato a encaminhador

```

1: function isNodeForwarder(P, C, T)
2:    $dist_{PT} \leftarrow \sqrt{(x_T - x_P)^2 + (y_T - y_P)^2 + (z_T - z_P)^2}$ 
3:    $dist_{CT} \leftarrow \sqrt{(x_T - x_C)^2 + (y_T - y_C)^2 + (z_T - z_C)^2}$ 
4:    $dist_{PC} \leftarrow \sqrt{(x_C - x_P)^2 + (y_C - y_P)^2 + (z_C - z_P)^2}$ 
5:   if ( $dist_{CT} \leq dist_{PT}$ ) and ( $dist_{PC} \leq dist_{PT}$ ) then
6:     return true
7:   else
8:     return false

```

5.3 Avaliação Experimental do Mecanismo

Neste ponto é descrito como foi realizado o experimento, aplicando os algoritmos apresentados na seção anterior. Para isto, foram utilizadas as ferramentas de software: OMNeT++ *Discrete Event Simulator* ver. 5.6.2 em conjunto com o INET *Framework* ver. 4.2.1 na subseção 5.3.1; e CPN/Tools ver. 4.0.1 na subseção 5.3.2. O código fonte dos experimentos foi disponibilizado no endereço eletrônico <https://bit.ly/3tPY2Fn>.

Para a condução dos experimentos foi utilizado um notebook com sistema operacional Windows 10, 8GB de memória RAM e processador Intel Core i5-8350U com 1.9Ghz de frequência.

5.3.1 Experimento 1: Simulação do Funcionamento do Mecanismo no OMNeT++

Objetivos

O presente experimento tem o objetivo de avaliar o processo de consulta a rede para a reserva de recursos, como também, verificar o tempo decorrido pela consulta em redes até 10 nós desde a origem até o destino.

Configuração

Para tornar possível a realização do experimento, considerou-se uma rede composta de nós distribuídos em uma área de 300 m x 200 m conforme a Figura 5.5. Os requisitos de banda de *transmissão* e *recepção* são $ReqTr = 50$ e $ReqRe = 50$.

Os nós foram configurados para não apresentarem mobilidade. Em relação aos parâmetros de transmissão, em cada nó foi ativado uma interface de rede sem fio no padrão 802.11g com potência de transmissão de 2 mW, sensibilidade de recepção de -85 dBm e taxa máxima de transmissão de 2 Mbps. Também é importante mencionar que a unidade de medição dos requisitos de transmissão e recepção é conhecida pelos nós da rede. Para sintetizar as informações, a Tabela 5.1 ilustra os parâmetros de configuração utilizados no experimento.

Análise dos Resultados

A partir da execução do experimento descrito nesta subseção, coletou-se as informações: *i)* foi possível encontrar nós encaminhadores e solicitar a reserva de recursos; e *ii)* o tempo médio que leva para enviar uma consulta de reserva de recursos da origem ao destino e receber uma resposta é de 2,744 segundos.

Na Tabela 5.2 é exibido os tempos decorridos para realizar a descoberta de rede e reserva de recursos. Como pode-se observar, os tempos ficaram muito próximos, atingindo o melhor resultado com a configuração de 8 nós. Conclui-se que para o ambiente descrito, a presença de novos nós encaminhadores, ou seja acima de 8 nós,

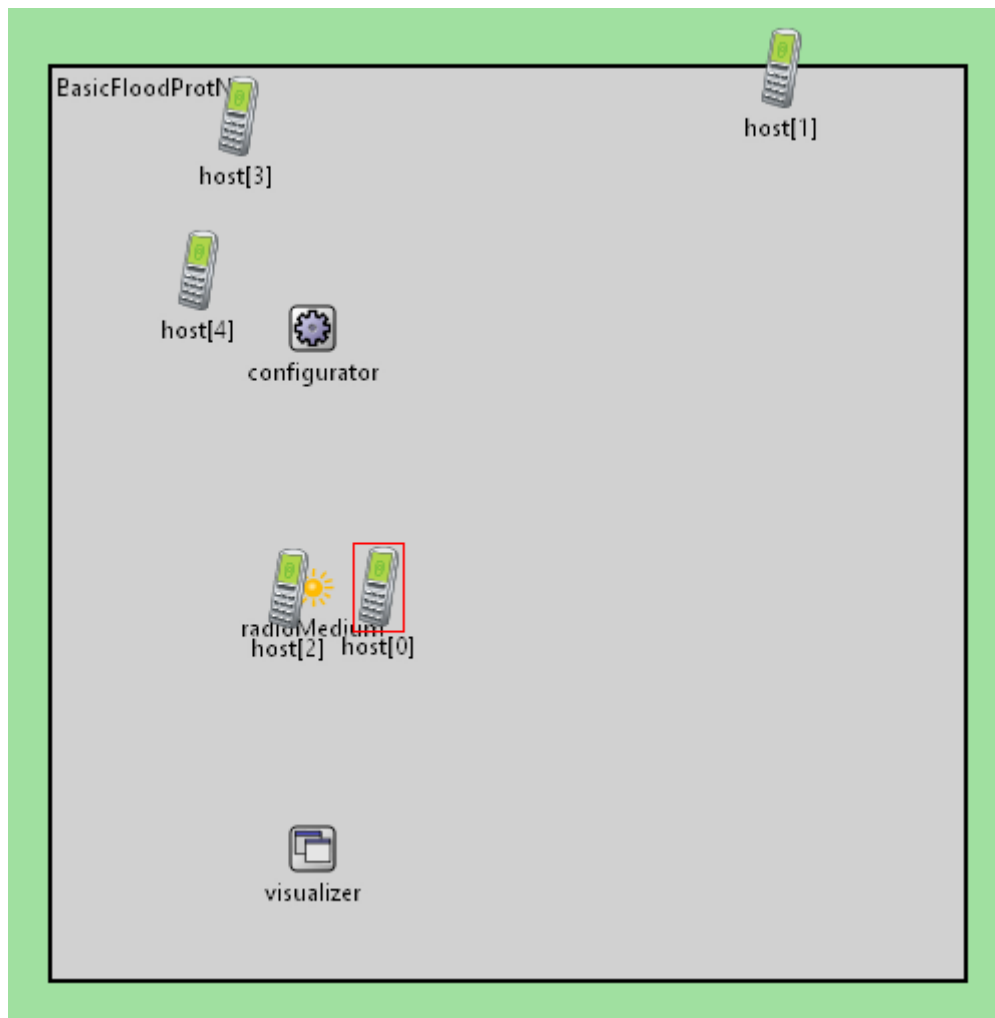


Figura 5.5: Exemplo de topologia de rede com 5 nós encaminhadores utilizada na realização do experimento 1

Tabela 5.1: Parâmetros de configuração para o ambiente de simulação do OMNeT++

Parâmetro de configuração	Valor
Número de simulações	10
Área de simulação	300 m x 200 m
Número de nós	5, 8, 10
Modo de operação dos nós da rede	802.11 g(mixed)
Taxa de transmissão máxima	2 Mbps
Tipo de mobilidade	Estacionário
Potência de transmissão	2 mW
Sensibilidade dos receptores	-85 dBm
Nó de origem	host[1]
Nó de destino	host[0]
<i>ReqRe</i>	50
<i>ReqTr</i>	50

não trará benefícios ao processo de reserva de recursos.

Tabela 5.2: Tempo de resposta em segundos para a descoberta de rede e reserva de recursos

Quantidade de nós	Tempo decorrido para reserva de recursos (s)
05	2,953
08	2,617
10	2,663

5.3.2 Experimento 2: Modelagem em Redes de Petri Coloridas

Objetivos

Este experimento tem o objetivo de validar os valores gerados pelo experimento 1 sobre disponibilidade de banda para cada ligação entre dois nós.

Configuração

O modelo foi desenvolvido em CPN, mais especificamente na ferramenta de software CPN/Tools ver. 4.0.1. Para condução deste experimento, foi utilizado o mesmo conjunto de *hardware* e *software* descrito no início da seção 5.3. Na Figura 5.6 é ilustrado o modelo em CPN utilizado neste experimento e o fluxo de execução é o que segue:

- O lugar **CTS Down**, alimentado manualmente, armazena a sequência de prioridade de transmissão observada em simulação no OMNeT++ na direção origem→destino.
- O lugar **Edges** armazena uma lista com todas as ligações entre dois nós envolvidos no processo de transmissão resultantes da simulação realizada no OMNeT++.
- A transição **Resolves Downlink nodes** processa a função *computeNodesD* que calcula o valor possível de transmissão entre dois nós vizinhos.
- O lugar **Group Down** armazena em lista o valor processado pela função denominada *computeNodesD*.
- O lugar **CTS Up** armazena a sequência de prioridade de transmissão observada em simulação do OMNeT++ na direção destino→origem.

- A transição `Resolves Uplink nodes` é habilitada somente quando são concluídas todas as transições na direção da origem→destino.
- O lugar `Group Up` armazena em uma lista valores processados pela função `computeNodesU`.
- A transição `Reserve?` quando habilitada processa a função `isReserve` que retorna um valor booleano.
- Por fim, o lugar `Admitted flow` recebe o valor booleano que confirma o resultado da simulação no OMNet++, caso o fluxo seja admitido (`true`) ou não (`false`).

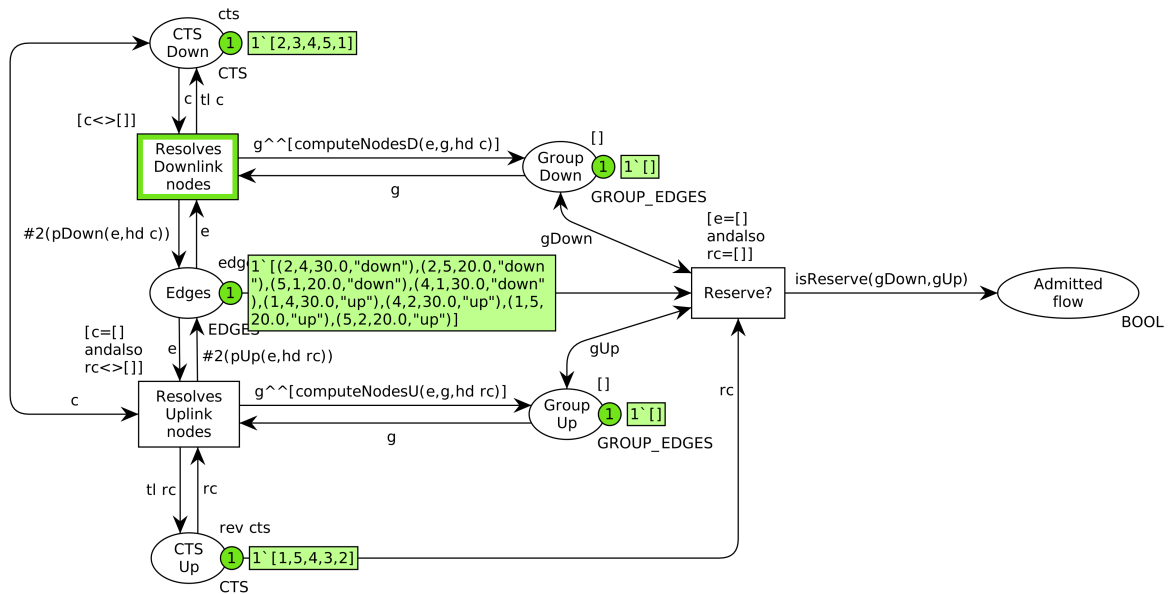


Figura 5.6: Modelo em CPN proposto para a avaliação do controle de admissão

Análise dos Resultados

No Apêndice A são ilustrados os resultados das simulações. Os valores registrados para os lugares `gUp` e `gDown` no passos 11, 17 e 21 das Figuras A.1, A.2 e A.3 no apêndice supracitado, representam os mesmos valores gerados a partir do experimento 1 descrito na subseção 5.3.1. Por fim, também foi possível observar que o modelo de CPN é aplicável a configurações de rede com diferentes quantidades de nós encaminhadores.

Capítulo 6

Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e os trabalhos futuros que envolveram a pesquisa.

6.1 Considerações Finais

Para que este estudo fosse possível, pesquisas bibliográficas e uma revisão da literatura sobre abordagens de controle de admissão de fluxos em redes sem fio foram realizadas. A partir dessas investigações, observou-se lacunas em trabalhos recentes tanto sobre controle de admissão bidirecional quanto na utilização de métodos formais para a especificação e análise dos modelos implementados

A análise e validação da proposta foi realizada através de experimentos de simulação em duas ferramentas diferentes. No primeiro experimento, foi utilizado o simulador de eventos discretos, OMNeT++, em conjunto com o INET, um *framework* de redes de computadores. No segundo experimento um modelo em CPN foi desenvolvido na ferramenta de *software* CPN/Tools.

Com os resultados obtidos é possível identificar que determinado fluxo será admitido somente se, após a descoberta de rede, existir nos nós encaminhadores recursos disponíveis para a transmissão e recepção de dados conforme requerido. Neste sentido, conclui-se que os objetivos geral e específicos desta dissertação foram atendidos.

6.2 Trabalhos Futuros

Considerando o trabalho desenvolvido nesta dissertação, pretende-se estender e aprofundar alguns pontos detalhados a seguir:

- *Realizar análises comparativas com outros mecanismos de controle de admissão disponíveis na literatura.* No estágio atual da pesquisa foram realizadas a especificação e a análise de funcionamento do mecanismo proposto. Considera-se muito importante a comparação deste com outros mecanismos já propostos na literatura.
- *Otimizar a alocação de banda.* Durante o processo de desenvolvimento foi observado que em determinadas condições, a resposta do mecanismo não realizava a alocação ótima da banda. Uma dessas situações ocorre quando um nó é fisicamente capaz de receber pacotes de dois ou mais nós adjacentes. Esta situação poderia contribuir com o aumento do *throughput* da rede, mas devido a uma condição de implementação que tem o objetivo de evitar a inundação de pacotes (*flooding*) na rede, cada nó somente processa e encaminha apenas os pacotes de quem ele primeiro recebeu.
- *Expandir a aplicabilidade para cenários diversos.* No mecanismo apresentado, foi considerado um cenário de redes sem fio, sem interferências, sem obstáculos e de baixa ou inexistente mobilidade. Acredita-se que diversos outros cenários e redes como VANETs, redes LTE e 5G e redes de sensores podem ser testados. Já em relação a aplicações, é possível citar chamadas de voz, videoconferência, controle de pelotão de veículos (*platooning of vehicles*), automação industrial por meio de dispositivos de IoT, automação de rede elétrica inteligente (*smart grid*), entre outros.
- *Automatizar e incorporar ao modelo o cálculo de novas métricas para a tomada de decisão.* Neste trabalho, algumas métricas foram simplificadas para a validação conceitual da proposta e outras foram entregues ao mecanismo como dado de entrada. Um possível trabalho futuro é melhorar a avaliação da tomada de decisão, incorporando ao mecanismo o cálculo de novas métricas, como por exemplo: mobilidade (entrada e saída do nó da rede), gasto de energia para encaminhar

pacotes, segurança, estimador de largura de banda (vazão) entre nós vizinhos, divulgação do posicionamento geográfico dos nós da rede e nós com mobilidade e capacidades de processamento diferentes.

Referências Bibliográficas

- [1] AKPANOBONG, A. C., OTHMAN, M., AND ANSA, G. O. Extending throughput performance for low snr scenarios in wlans using two-level frames aggregation with enhanced a-msdu. *Wireless Personal Communications* 115, 2 (Nov 2020), 1695–1710.
- [2] AL RAIMI, A. M., CHONG, C. M., TANG, L. Y., CHUA, Y. P., AND AL AJEEL, L. Y. *Using mHealth Apps in Health Education of Schoolchildren with Chronic Disease During COVID-19 Pandemic Era*. Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 305–317.
- [3] AMPRIRIT, P., OHARA, S., QAFZEZI, E., IKEDA, M., MATSUO, K., AND BARROLI, L. An integrated fuzzy-based admission control system (ifacs) for 5g wireless networks: Its implementation and performance evaluation. *Internet of Things* 13 (2021), 100351.
- [4] BARR, R., HAAS, Z. J., AND VAN RENESSE, R. JiST/SWANS. Disponível em: <http://jist.ece.cornell.edu/>, 2004. [Acessado em novembro de 2020].
- [5] BAUMGÄRTNER, L., LIESER, P., ZOBEL, J., BLOESSL, B., STEINMETZ, R., AND MEZINI, M. Loragent: A dtn-based location-aware communication system using lora. In *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* (2020), pp. 1–8.
- [6] BHANDARI, S., AND KAUR, P. A novel scheme for optimizing contention window adjustment in ieee 802.11e wireless networks. In *2016 International Conference on ICT in Business Industry Government (ICTBIG)* (2016), pp. 1–3.

- [7] CABALLERO, P., BANCHS, A., DE VECIANA, G., COSTA-PÉREZ, X., AND AZCORRA, A. Network slicing for guaranteed rate services: Admission control and resource allocation games. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17, 10 (2018), 6419–6432.
- [8] CALADO, I., LUIZ, S. O., SOARES, G., ALMEIDA, H., AND PERKUSICH, A. An admission control mechanism for dynamic QoS-enabled opportunistic routing protocols. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2015, 1 (dec 2015), 224.
- [9] CALADO, I. A. A. R. *Qualidade de Serviço em Redes Mesh Sem Fio Baseada em Roteamento Oportunístico e Códigos de Rede*. Tese (Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.
- [10] CHEN, X., NG, D. W. K., YU, W., LARSSON, E. G., AL-DHAHIR, N., AND SCHOBBER, R. Massive access for 5g and beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 39, 3 (2021), 615–637.
- [11] CLAUSEN, T., AND JACQUET, P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, RFC Editor, October 2003.
- [12] COOLEY, T. K. *Design, Development, and Implementation of a Wireless Local Area Network (WLAN): The Hartford Job Corps Academy Case Study*. Tese (Doutorado em Tecnologia da Computação na Educação), Nova Southeastern University College of Engineering and Computing, 2009.
- [13] CRAWLEY, E., NAIR, R., RAJAGOPALAN, B., AND SANDICK., H. A Framework for QoS-based Routing in the Internet. RFC 2386, RFC Editor, August 1998.
- [14] DANDJINOU, M. T., TALL, H., AND YÉLÉMOU, T. Fault-tolerant routing protocol for ad hoc networks. In *2020 IEEE International Conf on Natural and Engineering Sciences for Sahel's Sustainable Development - Impact of Big Data Application on Society and Environment (IBASE-BF)* (2020), pp. 1–6.

- [15] DING, Y.-Z., LI, Y.-C., XU, Y.-C., ZHOU, Y.-Z., AND ZHANG, Y.-L. An opportunistic routing protocol for mobile ad hoc networks based on stable ideology. *Wireless Personal Communications* 97, 1 (Nov 2017), 309–331.
- [16] DINH THAI, H., LU, X., NIYATO, D., WANG, P., AND HAN, Z. Applications of repeated games in wireless networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17 (01 2015).
- [17] GANESAN, A. Distributed algorithms for qos in wireless ad hoc networks under the primary interference model. In *2020 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (2020), pp. 63–66.
- [18] HEISSENBÜTTEL, M., BRAUN, T., BERNOULLI, T., AND WÄLCHLI, M. Blr: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks. *Computer Communications* 27, 11 (2004), 1076–1086. Applications and Services in Wireless Networks.
- [19] HOSSEINI, E. S., ESMAEELZADEH, V., BERANGI, R., AND AKAN, O. B. Delay sensitive and power-aware SMDP-based connection admission control mechanism in cognitive radio sensor networks. *Computer Communications* 106 (2017), 1–10.
- [20] JADHAV, P., AND SATAO, R. A survey on opportunistic routing protocols for wireless sensor networks. *Procedia Computer Science* 79 (2016), 603 – 609. Proceedings of International Conference on Communication, Computing and Virtualization (ICCCV) 2016.
- [21] JAT, D., SHEJWAL, A., LUSILAO, G., AND SINGH, C. *A Review of the Quality of Service for Time-Sensitive Applications Through Admission Control in 802.11 WLAN*. Springer, Singapore, 01 2018, pp. 665–672.
- [22] JENSEN, K., AND KRISTENSEN, L. *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 01 2009.
- [23] JENSEN, K., KRISTENSEN, L. M., AND WELLS, L. Coloured petri nets and cpn tools for modelling and validation of concurrent systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer* 9, 3 (Jun 2007), 213–254.

- [24] JIN, X., HUA, W., AND WANG, Z. Task admission control for application service operators in mobile cloud computing. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2020, 1 (Oct 2020), 217.
- [25] JUNHAI, L., DANXIA, Y., LIU, X., AND MINGYU, F. A survey of multicast routing protocols for mobile ad-hoc networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 11, 1 (First 2009), 78–91.
- [26] KANDASAMY, S., MARQUES, C., CALÇADA, T., RICARDO, M., MATOS, R., AND SARGENTO, S. Call admission control for wireless mesh network based on power interference modeling using directional antenna. *Wireless Networks* 22, 7 (2016), 2299–2316.
- [27] KARTHIKA K.C. Wireless mesh network: A survey. In *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (mar 2016), IEEE, pp. 1966–1970.
- [28] KATTI, S., KATABI, D., BALAKRISHNAN, H., AND MEDARD, M. Symbol-level network coding for wireless mesh networks. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 Conference on Data Communication* (New York, NY, USA, 2008), SIGCOMM '08, Association for Computing Machinery, p. 401–412.
- [29] KITCHENHAM, B., AND CHARTERS, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Tech. Rep. EBSE 2007-001, Keele University and Durham University Joint Report, 2007.
- [30] LEANDRO DIAS DA SILVA, HEITOR JUDISS SAVINO, TIAGO FIGUEIREDO VIEIRA, AND DAVI BIBIANO BRITO. Modelagem Formal Utilizando Redes de Petri Coloridas de um Sistema de Automação para abastecimento e Diluição de Ácido Sulfúrico. In *Proceedings XXII Congresso Brasileiro de Automática* (2018).
- [31] LEONTIADIS, I., AND MASCOLO, C. Geopps: Geographical opportunistic routing for vehicular networks. In *2007 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks* (2007), pp. 1–6.

- [32] MADOUGOU, S., VARBANESCU, A. L., AND DE LAAT, C. Using colored petri nets for gpgpu performance modeling. In *CF '16: Proceedings of the ACM International Conference on Computing Frontiers* (New York, NY, USA, 2016), CF '16, Association for Computing Machinery, p. 240–249.
- [33] MARTÍN-CAMPILLO, A., CROWCROFT, J., YONEKI, E., AND MARTÍ, R. Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios. *Journal of Network and Computer Applications* 36, 2 (2013), 870–880.
- [34] MEHMOOD, T., LIBMAN, L., DEHKORDI, H. R., AND JHA, S. K. Optimal opportunistic routing and network coding for bidirectional wireless flows. *Computer Networks* 57, 18 (2013), 4030–4046.
- [35] MISRA, S., MISRA, S. C., AND WOUNGANG, I., Eds. *Guide to Wireless Mesh Networks*. Springer London, 2009.
- [36] MOLLAEI, M., AND DARMANI, Y. A novel statistical and distributed CAC algorithm for IEEE 802.11 based single and multi-hop wireless ad hoc networks. *Wireless Networks* 24, 3 (2018), 955–967.
- [37] MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE* 77, 4 (April 1989), 541–580.
- [38] NAMAZI, M., MOGHIM, N., GHAZVINI, M., AND ASKARIAN, A. Dynamic txop assignment in ieee802.11e multi-hop wireless networks based on an admission control method. *Wireless Personal Communications* 97, 1 (Nov 2017), 749–772.
- [39] NEW, W.-K., CHOW, C.-O., AND MA, M. Resource management and qos provisioning for duplex services in ieee 802.16. *Wireless Personal Communications* 79, 3 (Dec 2014), 2005–2024.
- [40] OF WASHINGTON NS-3 CONSORTIUM, T. U. ns-3 Network Simulator. Disponível em: <https://www.nsnam.org/>, 2008. [Acessado em Outubro de 2020].
- [41] PELLEGRINI, J., AND WAINER, J. Processos de decisão de markov: um tutorial. *Revista de Informática Teórica e Aplicada* 14, 2 (2007), 133–179.

- [42] PENTLAND, A., FLETCHER, R., AND HASSON, A. Daknet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer* 37 (02 2004), 78 – 83.
- [43] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., AND DAS, S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, RFC Editor, July 2003.
- [44] QIN, X., AND BERRY, R. Exploiting multiuser diversity for medium access control in wireless networks. In *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)* (2003), vol. 2, pp. 1084–1094 vol.2.
- [45] QIN, Y., LI, L., ZHONG, X., YANG, Y., AND YE, Y. Opportunistic routing with admission control in wireless ad hoc networks. *Computer Communications* 55 (2015), 32–40.
- [46] RANTZER, A. V. CPN tools for editing, simulating and analysing coloured Petri nets. In *Applications and Theory of Petri Nets 2003: 24th International Conference, ICATPN 2003* (2003), W. M. P. van der Aalst and E. Best, Eds., vol. 2679, pp. 450–462.
- [47] ROZNER, E., SESHADRI, J., MEHTA, Y., AND QIU, L. Simple opportunistic routing protocol for wireless mesh networks. In *2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks* (2006), pp. 48–54.
- [48] SALEHI, M., AND BOUKERCHE, A. A novel packet salvaging model to improve the security of opportunistic routing protocols. *Computer Networks* 122 (2017), 163–178.
- [49] SHANG, F., ZHOU, D., AND HE, D. An admission control algorithm based on matching game and differentiated service in wireless mesh networks. *Neural Computing and Applications* 32, 7 (Apr 2020), 2945–2962.
- [50] SHARMA, V., AND KUMAR, R. Estimation-based queue scheduling model to improve qos for end users in manets. *Computing and Informatics* 35 (01 2016), 1079–1109.

- [51] SIRAM, V., VARMA, K., BARMAN, P., YELLISSETTY, S., DESIRAJU, P., MANDAL, S., VIJAYAN, S. M., CHAND, P., MUKHERJI, U., AND SHARMA, V. Routing and Scheduling Transient Flows for QoS in Multi-hop Wireless Networks. *2018 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)* (2018), 232–236.
- [52] SOCOLOFSKY, T., AND KALE, C. A TCP/IP Tutorial. RFC 1180, RFC Editor, January 1991.
- [53] SOMMERVILLE, I. *Software Engineering*, 10 ed. Pearson, University of Lancaster, United Kingdom, University of St Andrews, Scotland, 2016.
- [54] TETCOS. NetSim Professional. Disponível em: <https://www.tetcos.com/netsim-pro.html>, 2004. [Acessado em novembro de 2020].
- [55] UDDIN, A., MANSOUR, A., LE JEUNE, D., AYAZ, M., AND AGGOUNE, E.-H. UAV-assisted dynamic clustering of wireless sensor networks for crop health monitoring. *Sensors* 18 (02 2018), 555.
- [56] VARGA, A. OMNeT++ Simulator. Disponível em: <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/>, 2003. [Acessado em Outubro de 2020].
- [57] VARGA, A., AND HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops (ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2008)*, Simutools '08, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), pp. 60:1–60:10.
- [58] VASHIST, S., AND JAIN, S. Location-aware network of drones for consumer applications: Supporting efficient management between multiple drones. *IEEE Consumer Electronics Magazine* 8, 3 (2019), 68–73.
- [59] VINT, V. I. T. The Network Simulator - ns-2. Disponível em: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 1995. [Acessado em novembro de 2020].
- [60] VON NEUMANN, J., AND MORGENSTERN, O. *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press, 1947.

-
- [61] XU, M., YANG, Q., KWAK, K. S., AND PARK, D. Impact of mobility on energy consumption in wireless networks. *Wireless Networks* 25, 5 (Jul 2019), 2249–2258.
- [62] XUE, C., XU, W., HE, Z., AND NIU, K. A distributed call admission control scheme for qos provisioning in ofdma system. In *2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* (2011), pp. 648–652.
- [63] YOON, S., JANG, S., KIM, Y., AND BAHK, S. Opportunistic routing for smart grid with power line communication access networks. *IEEE Transactions on Smart Grid* 5, 1 (2014), 303–311.
- [64] YUAN, Z., AND MUNTEAN, G. M. IVoIP: An intelligent bandwidth management scheme for VoIP in WLANs. *Wireless Networks* 20, 3 (2014), 457–473.
- [65] ZENG, K., LOU, W., AND LI, M. *Multihop Wireless Networks: Opportunistic Routing*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

Apêndice A

Relatórios das Simulações Realizadas no CPN/Tools

```
CPN Tools simulation report for:
/cygdrive/C/Dropbox/Mestrado_UFAL/cpn/models/basicfloodprot/basicfloodprot.cpn
Report generated: Thu Apr 15 14:08:55 2021

1      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = []
- e = [(2,4,30.0,"down"),(2,5,20.0,"down"),(5,1,20.0,"down"),(4,1,30.0,"down"),
      (1,4,30.0,"up"),(4,2,30.0,"up"),(1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up")]
- c = [2,3,4,5,1]
2      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(2,4,30.0,"down"),(2,5,20.0,"down")]]
- e = [(5,1,20.0,"down"),(4,1,30.0,"down"),(1,4,30.0,"up"),(4,2,30.0,"up"),
      (1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up")]
- c = [3,4,5,1]
      .
      .
      .
10     0      Resolves_Uplink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(1,4,30.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[[5,2,20.0,"up"]],[[4,2,30.0,"up"]],
      [],[]]
- e = []
- c = []
- rc = [2]
11     0      Reserve @ (1:Phase2)
- gUp = [[(1,4,30.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[[5,2,20.0,"up"]],[[4,2,30.0,"up"]],
      [],[]]
- gDown = [[(2,4,30.0,"down"),(2,5,20.0,"down")],[[]],[[4,1,30.0,"down"]],
      [[5,1,20.0,"down"]],[]]
- e = []
- rc = []
```

Figura A.1: Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 5 nós encaminhadores

```

CPN Tools simulation report for:
/cygdrive/C/Dropbox/Mestrado_UFAL/cpn/models/basicfloodprot/basicfloodprot.cpn
Report generated: Thu Apr 15 14:09:55 2021

1      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = []
- e = [(2,4,30.0,"down"),(2,7,20.0,"down"),(2,8,20.0,"down"),(8,1,20.0,"down"),
      (7,1,20.0,"down"),(4,1,30.0,"down"),(1,8,20.0,"up"),(1,7,20.0,"up"),
      (1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up"),(7,2,20.0,"up"),(8,2,20.0,"up")]
- c = [2,3,4,5,6,7,8,1]
2      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(2,4,30.0,"down"),(2,7,20.0,"down"),(2,8,20.0,"down")]]
- e = [(8,1,20.0,"down"),(7,1,20.0,"down"),(4,1,30.0,"down"),(1,8,20.0,"up"),
      (1,7,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up"),(7,2,20.0,"up"),
      (8,2,20.0,"up")]
- c = [3,4,5,6,7,8,1]

      .
      .
      .

16     0      Resolves_Uplink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(1,8,20.0,"up"),(1,7,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[(8,2,20.0,"up")],
      [(7,2,20.0,"up")],[],[(5,2,20.0,"up")],[],[[]]]
- e = []
- c = []
- rc = [2]
17     0      Reserve @ (1:Phase2)
- gUp = [[(1,8,20.0,"up"),(1,7,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[(8,2,20.0,"up")],
        [(7,2,20.0,"up")],[],[(5,2,20.0,"up")],[],[[],[]]]
- gDown = [[(2,4,30.0,"down"),(2,7,20.0,"down"),(2,8,20.0,"down")],[],
           [(4,1,30.0,"down")],[],[],[(7,1,20.0,"down")],[(8,1,20.0,"down")],[[]]]
- e = []
- rc = []

```

Figura A.2: Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 8 nós encaminhadores

```

CPN Tools simulation report for:
/cygdrive/C/Dropbox/Mestrado_UFAL/cpn/models/basicfloodprot/basicfloodprot.cpn
Report generated: Thu Apr 15 14:16:07 2021

1      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = []
- e = [(2,7,20.0,"down"),(2,10,20.0,"down"),(2,9,20.0,"down"),(10,1,20.0,"down"),
      (9,1,20.0,"down"),(7,1,20.0,"down"),(1,7,20.0,"up"),(1,8,20.0,"up"),
      (1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up"),(8,2,20.0,"up"),(7,2,20.0,"up")]
- c = [2,3,4,5,6,7,8,9,10,1]
2      0      Resolves_Downlink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(2,7,20.0,"down"),(2,10,20.0,"down"),(2,9,20.0,"down")]]
- e = [(10,1,20.0,"down"),(9,1,20.0,"down"),(7,1,20.0,"down"),(1,7,20.0,"up"),
      (1,8,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up"),(5,2,20.0,"up"),(8,2,20.0,"up"),
      (7,2,20.0,"up")]
- c = [3,4,5,6,7,8,9,10,1]

      .
      :
      .

20     0      Resolves_Uplink_nodes @ (1:Phase2)
- g = [[(1,7,20.0,"up"),(1,8,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[],[],[(8,2,20.0,"up")],
      [(7,2,20.0,"up")],[],[(5,2,20.0,"up")],[],[[]]]
- e = []
- c = []
- rc = [2]
21     0      Reserve @ (1:Phase2)
- gUp = [[(1,7,20.0,"up"),(1,8,20.0,"up"),(1,5,20.0,"up")],[],[],[(8,2,20.0,"up")],
      [(7,2,20.0,"up")],[],[(5,2,20.0,"up")],[],[[]]]
- gDown = [[(2,7,20.0,"down"),(2,10,20.0,"down"),(2,9,20.0,"down")],[],[],[[]],[],
      [(7,1,20.0,"down")],[],[(9,1,20.0,"down")],[(10,1,20.0,"down")],[[]]]
- e = []
- rc = []

```

Figura A.3: Relatório resumido da simulação da página Phase2 do modelo de CPN para o ambiente de rede com 10 nós encaminhadores

Apêndice B

Lista de Abreviaturas e Siglas

5G	Rede Móvel de Quinta Geração.
AODV	<i>Ad-hoc On Demand Distance Vector</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
CA	Controle de Admissão
CPN	<i>Coloured Petri Nets</i>
CRSN	<i>Cognitive Radio Sensor Networks</i>
CTS	<i>Concurrent Transmission Set</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance Vector Routing</i>
DVR	<i>Distance Vector Routing</i>
ExOR	<i>Extremely Opportunistic Routing</i>
GeOpps	<i>Geographical Opportunistic Routing</i>
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPv4	<i>Internet Protocol ver. 4</i>

IPV6	<i>Internet Protocol ver. 6</i>
LSR	<i>Link State Routing</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
MCExOR	<i>Multi-Channel Extremely Opportunistic Routing</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RERR	<i>Route Error</i>
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
RO	<i>Roteamento Oportunístico</i>
RREP	<i>Route Reply</i>
RREQ	<i>Route Request</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SOAR	<i>Simple Opportunistic Adaptive Routing</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
VANET	<i>Vehicle Ad hoc Networks</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WBAN	<i>Wireless Body Area Networks</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>