

CASSIANO RIBEIRO CARNEIRO

**Estudo, desenvolvimento e avaliação de desempenho
de algoritmos de roteamento para nanoredes de
comunicação**

São Paulo
2023

CASSIANO RIBEIRO CARNEIRO

**Estudo, desenvolvimento e avaliação de desempenho
de algoritmos de roteamento para nanoredes de
comunicação**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2023

CASSIANO RIBEIRO CARNEIRO

**Estudo, desenvolvimento e avaliação de desempenho
de algoritmos de roteamento para nanoredes de
comunicação**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
3142 - Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto A. Amazonas

São Paulo
2023

Nome: Carneiro, Cassiano Ribeiro

Título: Estudo, desenvolvimento e avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento para nanoredes de comunicação

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 01 de Junho de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Roberto de Almeida Amazonas
(Escola Politécnica da Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. Alexandre Barbosa de Lima
(Pontifícia Universidade Católica de São Paulo)

Prof. Dr. William Ferreira Giozza
(Universidade de Brasília)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 28 de Julho de 2023

Assinatura do autor: *Cassiano R. Carneiro*

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Carneiro, Cassiano Ribeiro

Estudo, desenvolvimento e avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento para nanoredes de comunicação / C. R. Carneiro -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Nanoredes 2.Roteamento 3.Máquina de Estados Finitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que, misericordiosamente insistente em mim, sutilmente move montanhas em meu favor. *Eu nada seria, meu Deus, eu nada seria em absoluto se não estivesses em mim*¹.

Agradeço à minha família por todo o esforço em prol dos meus objetivos, pela confiança persistente e pelo amor perseverante e gratuito, elementos tão fundamentais na caminhada.

Agradeço ao Prof. Dr. José Roberto de Almeida Amazonas pelo tempo dedicado na supervisão deste trabalho, pela paciência e todo o valioso aprendizado. Aos demais professores e funcionários da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela cordialidade e assistência nesses últimos anos.

¹Santo Agostinho, *Confissões*, Livro I, Capítulo II

RESUMO

O avanço das pesquisas em nanomateriais, alavancadas pela descoberta dos nanotubos de carbono e do grafeno, vem ampliando os horizontes da engenharia com oportunidades revolucionárias em diversas áreas. Uma das possibilidades mais poderosas é a construção de dispositivos nanoscópicos capazes de realizar algumas tarefas com certo grau de autonomia, como sensoriamento e comunicação. Em termos técnicos, essas aplicações configuram cenários bastante desafiadores devido à limitação de recursos computacionais e energéticos inerentes aos nanodispositivos. Em geral, é necessário estabelecer uma rede de comunicação para que possam atuar de forma colaborativa, o que caracteriza as nanoredes de comunicação. Neste contexto, os algoritmos de roteamento desempenham um papel fundamental na obtenção de bons resultados. Dentre as diversas técnicas na literatura, o roteamento baseado em máquinas de estados finitos é particularmente interessante para redes com recursos limitados, das quais as nanoredes são um caso extremo. Este trabalho identifica cenários nos quais a técnica se mostra ineficiente ou mesmo inviável e propõe uma nova implementação que reduz tais restrições e agrega em termos de eficiência e versatilidade. Bons resultados foram obtidos a partir de simulações numéricas usando uma versão melhorada da técnica de *Flooding* como referência. Adicionalmente, foi considerada a possibilidade de agrupamento de nós e novas métricas foram propostas para avaliação de desempenho com base na taxa de entrega de pacotes, consumo de energia e latência.

Palavras-Chave – Nanoredes, roteamento, máquina de estados finitos.

ABSTRACT

The advancement of researches in nanomaterials, leveraged by the discovery of carbon nanotubes and graphene, has been expanding the horizons of engineering with revolutionary opportunities in several areas. One of the most powerful possibilities is the construction of nanoscopic devices capable of performing some tasks with a certain degree of autonomy, such as sensing and communication. In technical terms, these applications configure very challenging scenarios due to the limitation of computational and energy resources inherent to nanodevices. In general, it is necessary to establish a communication network so that they can act collaboratively, which characterizes the communication nanonetworks. In this context, routing protocols play a key role in obtaining good results. Among the various techniques in the literature, the finite state machine based routing is particularly interesting for resource-limited networks, of which nanonetworks are an extreme case. This work identifies scenarios in which the technique proves to be inefficient or even unfeasible and proposes a new implementation that reduces such restrictions and adds in terms of efficiency and versatility. Good results were obtained from numerical simulations using an improved version of the Flooding technique as a reference. Additionally, the possibility of grouping nodes was considered and new metrics were proposed for performance evaluation based on packet delivery rate, energy consumption and latency.

Keywords – Nanonetworks, routing, finite state machine.

LISTA DE FIGURAS

1	Comparativo de escalas entre elementos encontrados na natureza e elementos construídos pelo homem com destaque para dispositivos bioinspirados de escalas nanométricas denominados nanomáquinas	24
2	Exemplo de aplicação de nanodispositivos na área biomédica com a formação de redes para troca de informações no interior do corpo de um ser vivo e sua integração com a internet	25
3	Exemplo de aplicação de nanodispositivos no ambiente de trabalho com a formação de redes distribuídas para controle de parâmetros diversos	26
4	Modelo de arquitetura de um nanodispositivo bioinspirado constituído por elementos equiparáveis à organelas celulares	30
5	Exemplos de estruturas nanométricas reais: (a) nanomotor magnetoacústico híbrido capaz de se deslocar quando excitado por campos magnéticos ou acústicos (LI <i>et al.</i> , 2015), (b) nanomotor em forma de haste, possui a capacidade de se locomover em solução de peróxido de hidrogênio (WANG <i>et al.</i> , 2006), (c) vista em corte transversal de arranjos de nanofios de silício que reagem à incidência de luz visível (LIANG; FAN, 2018), (d) nanorobô de DNA capaz de transportar moléculas (DOUGLAS; BACHELET; CHURCH, 2012).	31
6	Exemplo de dispositivo de escalas micrométricas: (a) corpo do dispositivo capaz de se locomover quando recebe comandos via laser, (b-c) fita de platina capaz de apresentar padrões de movimento quando excitadas por sinais elétricos.	32
7	Modelo de arquitetura de nanorede	35
8	As duas principais implementações de máquinas de estados finitos: (a) máquina de Moore e (b) máquina de Mealy	44
9	Rede modelada por máquina de estados, com cada nó sendo representado por um estado da máquina	45
10	Transmissão de pacotes através da rede por uma rota de três saltos e sua representação por transições de estados na FSM	46
11	Tamanho do pacote ao longo da transmissão para as técnicas de roteamento por FSM e por <i>Flooding</i> para (a) $L_k = 2$ e (b) $L_k = 4$. No primeiro caso, o tamanho do pacote diminui devido ao descarte de rotas inválidas.	50
12	Mudança de estado da FSM por deslocamento e inserção de bits	51

13	Construção da tabela geradora de rotas - primeira etapa: construção das partes superior e inferior a partir do deslocamento de bits dos Ids dos nós de origem e destino	51
14	Construção da tabela geradora de rotas – segunda etapa: junção das partes superior e inferior com a formação natural de lacunas	52
15	Exemplo de tabela geradora de rotas	52
16	Tomada de decisão por um nó utilizando a tabela geradora de rotas	53
17	Exemplo da tabela retransmitida por um nó intermediário	53
18	Tabela de roteamento com redução de bits livres	54
19	Tabela de roteamento com redução no número de nós participantes	54
20	Tabela de roteamento com inserção de uma linha de <i>Flooding</i>	54
21	Definição do parâmetro γ	56
22	Energia para transmissão e recepção de 1 pulso	58
23	Gráfico das funções $f(x)$ e $g(x)$ utilizadas na avaliação de performance das técnicas de roteamento. A função $f(x)$ apresenta comportamento decrescente, sem se anular na faixa de interesse $0 \leq x \leq 1$, considerada adequada para a avaliação do ECP e ANH. Por outro lado, a função $g(x)$ se aproxima de zero para o intervalo $x \leq 0,7$, o que foi tomado como requisito para avaliação do PDR	61
24	Rede aleatória com $\rho = 0,32$: (a) distribuição espacial dos nós, (b) comprimento médio e grau da rede em função da distância de transmissão gamma	64
25	Rede aleatória com $\rho = 1,28$: (a) distribuição espacial dos nós, (b) comprimento médio e grau da rede em função da distância de transmissão gamma	64
26	Políticas de retransmissão de pacotes (a) com retransmissão múltipla e (b) sem retransmissão múltipla	65
27	Efeito da retransmissão múltipla por técnicas de roteamento baseadas em rotas predefinidas	66
28	Conexões entre os nós de uma rede aleatória com densidade $\rho = 0,32$: (a) com retransmissão múltipla e (b) sem retransmissão múltipla	67
29	Tomada de decisão pelo nó destinatário em técnicas de roteamento com rotas predefinidas: caso o nó destinatário, 5, possa se reconhecer destinatário a qualquer salto, ele irá processar o pacote ao recebê-lo no segundo salto ($h = 2$). Caso contrário, irá descartá-lo, uma vez que as rotas prevêem a entrega do pacote ao nó 5 apenas no quarto salto ($h = 4$).	68

30	Algoritmos executados por cada nó para tomada de decisão ao receber um pacote sob diferentes técnicas de roteamento: (a) <i>Flooding</i> com retransmissões múltiplas, (b) <i>Flooding</i> sem retransmissões múltiplas, (c) FSM e (d) T-FSM	69
31	Exemplos de resultados obtidos via simulação mostrando o comportamento dos parâmetros PDR, ECP e Φ versus γ ($\rho = 0,32$, $N_g = 4$): (a) $L_k = 1$, $N_h = 5$, (b) $L_k = 3$, $N_h = 6$	71
32	Intervalo de confiança percentual dos resultados das simulações com (a) FSM, (b) T-FSM e (c) <i>Flooding</i>	73
33	Sumário dos cenários de avaliação	74
34	Tamanho do pacote ao longo da transmissão para diferentes técnicas de roteamento ($\rho = 0,32$, $N_g = 32$, $N_h = 5$)	79
35	Construção da matriz D	83
36	Construção da matriz C ($d_{max} = 2$ mm)	84
37	Processo de simulação do roteamento <i>Flooding</i> por matrizes ($d_{max} = 2$ mm)	85

LISTA DE TABELAS

1	Funções implementáveis em nanodispositivos	36
2	Técnicas com base probabilística	37
3	Técnicas com base em agrupamento	38
4	Técnicas com base em classificação de nós	39
5	Técnicas com base em contagem de saltos	40
6	Técnicas com base em <i>wake up</i>	41
7	Outras técnicas de roteamento	42
8	Parâmetros de simulação	74
9	Resultados para os cenários em que foi dada igual importância às métricas elementares <i>PDR</i> , <i>ECP</i> e <i>ANH</i> : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,33$	75
10	Resultados para o caso em que a latência (<i>ANH</i>) foi priorizado sobre <i>PDR</i> e <i>ECP</i> : $\mu_1 = \mu_2 = 0,15$, $\mu_3 = 0,70$	76
11	Resultados para o caso em que <i>ECP</i> foi priorizado sobre <i>PDR</i> e <i>ANH</i> : $\mu_2 = \mu_3 = 0,15$, $\mu_1 = 0,70$	76
12	Resultados para o caso em que <i>ECP</i> não é levado em conta: $\mu_1 = \mu_3 = 0,50$, $\mu_2 = 0,00$	77
13	Resultados para o caso em que <i>ANH</i> não é levado em conta: $\mu_1 = \mu_2 = 0,50$, $\mu_3 = 0,00$	77
14	Resultados de cenários especiais com igual importância às métricas elementares <i>PDR</i> , <i>ECP</i> e <i>ANH</i> : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,33$	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACK** *Acknowledging Packets*
- ANH** *Average Number of Hops*
- BANNET** *Body Area Nano Network*
- BER** *Bit Error Rate*
- ECP** *Energy Consumption per Packet*
- EPUSP** *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*
- FSM** *Finite State Machine*
- IA** *Inteligência Artificial*
- IoBNT** *Internet of Bio-Nanobthings*
- IoMNT** *Internet of Multimedia Nano Things*
- IoNT** *Internet of Nano Things*
- NFV** *Network Function Virtualization*
- NBC** *Nuclear, Biological and Chemical*
- PDR** *Packet Delivery Ratio*
- SDN** *Software Defined Network*
- T-FSM** *Table-based Finite State Machine*
- WNSN** *Wireless Nano Sensor Network*
- WPT** *Wireless Power Transfer*
- WSN** *Wireless Sensor Network*

SUMÁRIO

1	Introdução	23
1.1	Conceitos básicos e aplicações	23
1.2	Motivação e objetivos	26
1.3	Metodologia	27
1.4	Organização do texto	28
2	Referencial teórico	29
2.1	Nanodispositivos	29
2.2	Nanoredes	32
2.2.1	Arquitetura de rede	34
2.2.2	Técnicas de roteamento em nanoredes	37
2.3	Roteamento por máquina de estados	43
2.3.1	Máquina de estados finitos	43
2.3.2	Roteamento por FSM	45
3	Contribuições	49
3.1	FSM por tabela	49
3.1.1	Exemplo de roteamento utilizando T-FSM	53
3.1.2	Edição de rotas utilizando T-FSM	54
3.2	Cenário com agrupamento de nós	55
3.3	Modelo de energia	55
3.4	Métricas de avaliação	59
3.4.1	Métricas de avaliação elementares	59
3.4.2	Métricas de avaliação unificada	59
4	Implementação e análise dos resultados	63
4.1	Cenários e simulações	63
4.1.1	Características da rede	63
4.1.2	Políticas de retransmissão e processamento de pacotes	65
4.1.3	Algoritmos	68
4.2	Simulações e resultados	70
4.2.1	Desempenho dos algoritmos de roteamento	80
5	Conclusões e trabalhos futuros	81

Apêndice A – Simulação do roteamento por <i>Flooding</i> via matrizes	83
Referências	87

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo traz uma breve introdução a respeito dos nanodispositivos¹ e da problemática relacionada às suas aplicações. Também são estruturados os objetivos e metodologia da pesquisa, bem como a organização do texto.

1.1 Conceitos básicos e aplicações

Os avanços na área da nanotecnologia foram acelerados nos anos 2000 (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008), mas seus conceitos e potencialidades foram apontados pela primeira vez em 1959 por Richard Feynman, Nobel de física de 1965. Nas últimas décadas, o avanço dos estudos com nanomateriais, principalmente após as primeiras observações e manipulações dos nanotubos de carbono e grafeno, tem permitido a idealização de promissoras aplicações em diversas áreas. Uma das mais revolucionárias é a construção de dispositivos em escalas nanométricas, equipados com antenas, sensores, atuadores e armazenadores de energia, capazes de realizar determinadas tarefas com certo grau de autonomia, ainda que fortemente limitados em termos de recursos computacionais, mobilidade e energia (AKYILDIZ; JORNET, 2010b).

A Figura 1 traz um gráfico de escalas apontando a posição de micro e nanodispositivos junto a estruturas já conhecidas.

¹Assim como na maioria dos trabalhos publicados em língua inglesa, o hífen após o prefixo *nano* não é empregado neste trabalho.

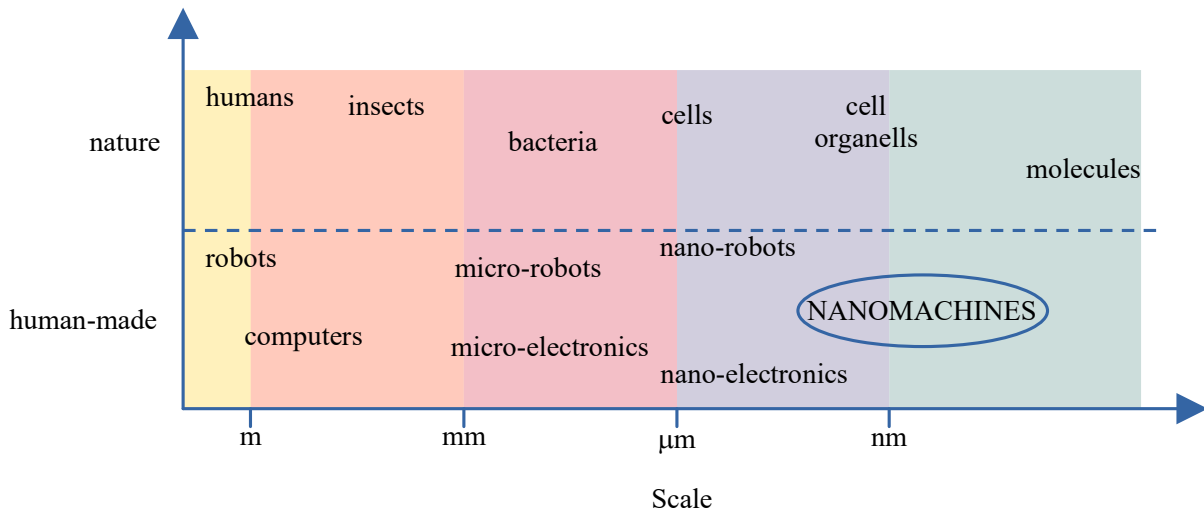


Figura 1 - Comparativo de escalas entre elementos encontrados na natureza e elementos construídos pelo homem com destaque para dispositivos bioinspirados de escalas nanométricas denominados nanomáquinas ²

Fonte: Adaptado de (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008)

(AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008) sugerem aplicações de nanoredes em quatro áreas:

- A) biomédica: estruturas biológicas são uma das principais inspirações e motivações para os estudos com nanodispositivos, que podem auxiliar em diversos processos como na detecção de organismos estranhos e células anormais, em processos recuperatórios, na entrega localizada de drogas e suplementos, na monitoração de parâmetros corporais e engenharia genética.

A Figura 2 ilustra um exemplo de aplicação em que nanoredes no interior do corpo do paciente trocam informações em tempo real via internet com especialistas.

- B) militar: nanodispositivos podem ser empregados contra ataques nucleares, biológicos e químicos (*Nuclear, Biological and Chemical (NBC)*), na detecção de agentes nocivos, na criação de tecidos especiais para camuflagem adaptativa e regulação de parâmetros corporais, bem como na entrega automatizada de drogas e suplementos e monitoramento hormonal.

²Neste trabalho, os textos nas figuras estão apresentados em língua inglesa, pois foram reproduzidos ou construídos adequados para apresentação em periódicos internacionais

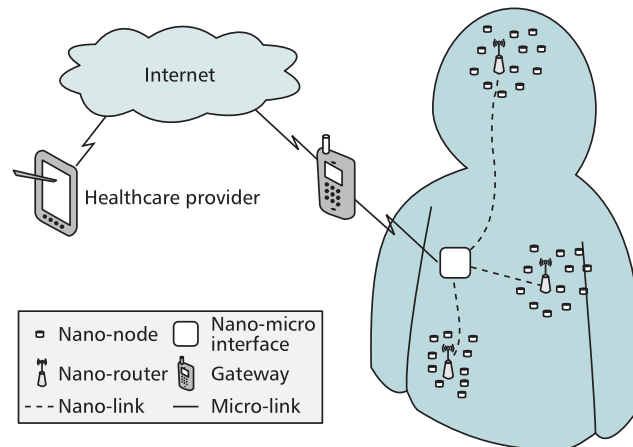


Figura 2 - Exemplo de aplicação de nanodispositivos na área biomédica com a formação de redes para troca de informações no interior do corpo de um ser vivo e sua integração com a internet

Fonte: Adaptado de (AKYILDIZ; JORNET, 2010b)

- C) ambiental: nanoredes podem ser empregadas para auxiliar no processo de biodegradação de resíduos, bem como no controle de espécies, influenciando comportamentos através da liberação localizada de substâncias. Pode também atuar no controle de qualidade do ar e da água, coletando dados e removendo substâncias nocivas.
- D) industrial: nanodispositivos podem ser utilizados no controle de qualidade, sendo capazes de coletar dados detalhados em tempo real a partir de perspectiva microscópica. Também como matéria prima na fabricação de materiais inteligentes, no estudo de comportamento dos fluidos e no processo de fabricação com precisão nanométrica.

A Figura 3 ilustra uma rede de nanodispositivos distribuídos em um escritório. Neste contexto, podem auxiliar no controle do ambiente de trabalho (temperatura, luminosidade e ruído) e dos materiais, tornando-os conectados à internet.

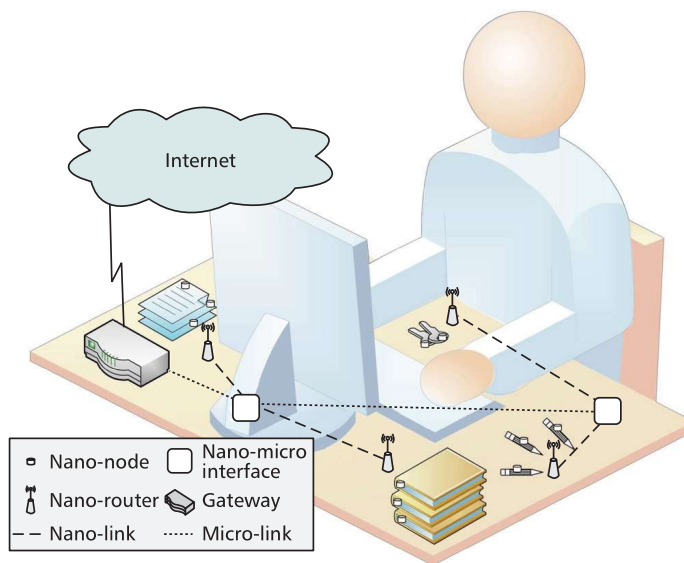


Figura 3 - Exemplo de aplicação de nanodispositivos no ambiente de trabalho com a formação de redes distribuídas para controle de parâmetros diversos

Fonte: Adaptado de (AKYILDIZ; JORNET, 2010b)

No contexto das redes convencionais (i.e., redes compostas por dispositivos de dimensões macro), novos conceitos e técnicas vêm sendo considerados para suportar grande quantidade de dispositivos conectados. A virtualização de serviços e funções e a computação em nuvem entregam grande poder de processamento aos dispositivos finais e agregam versatilidade no controle, implementação e manutenção das estruturas de rede (ZERIFI; EZZOUHAIRI; BOULAALAM, 2020). Em conjunto, essas tecnologias constituem uma base robusta para as aplicações de nanoredes conectadas à internet.

1.2 Motivação e objetivos

A comunicação entre nanodispositivos é ponto chave na maioria de suas aplicações, com o objetivo de contornar suas limitações individuais por meio do trabalho colaborativo. Neste contexto, os algoritmos de roteamento são considerados decisivos, sendo responsáveis por propiciar o fluxo de informações entre origem e destino sem onerar de forma demasiada os nanodispositivos (AL-TURJMAN, 2019). Na literatura, dos numerosos trabalhos que tratam dessa problemática, grande parte apresentam importantes restrições quanto aos cenários de aplicação ou requerem capacidades energéticas e computacionais incomuns em nanodispositivos.

No contexto das nanoredes, (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021) sugerem a aplicação da técnica de roteamento com base no conceito de *Finite State Ma-*

chine (FSM), que apresentou ótimos resultados em comparação com a técnica de roteamento por *Flooding*.

Neste trabalho, são identificados cenários em que o algoritmo de roteamento por FSM se torna ineficiente ou até ineficaz frente às limitações dos nanodispositivos. Isso se deve ao tamanho do pacote, que deve comportar rotas geradas previamente. O número de rotas aumenta exponencialmente em função dos parâmetros de roteamento adotados.

Dentre as várias abordagens construtivas para nanodispositivos, este estudo considera unicamente nanomáquinas capazes de se comunicar via ondas eletromagnéticas na faixa de Terahertz, estáticas e distribuídas em uma superfície 2D.

O intuito deste trabalho é apresentar uma abordagem mais eficiente para a técnica de roteamento baseada em FSM e avaliar seu desempenho. De forma mais específica, são considerados os seguintes objetivos:

- O1) nova métrica para identificação dos melhores parâmetros de roteamento e avaliação de desempenho;
- O2) modelo de energia aprimorado com condição inicial baseada em trabalhos anteriores;
- O3) implementação mais eficiente da técnica de roteamento baseada em FSM;
- O4) avaliação da técnica de roteamento por FSM em comparação com uma versão aprimorada do roteamento por *Flooding*;
- O5) avaliação das técnicas de roteamento em cenários com agrupamentos de nós.

Considerando esses pontos, foge do escopo deste trabalho:

- simulações mais precisas a partir de simuladores de rede;
- utilizar um modelo de energia mais completo, levando em consideração as particularidades de coleta e armazenamento de energia por nanodispositivos;
- considerar cenários com três dimensões;
- considerar cenários com mobilidade dos nós.

1.3 Metodologia

Este trabalho apresenta enfoques quantitativos, na obtenção de dados, e qualitativos, com análise e formulação de justificativas para os resultados. O estudo se baseia em simulações numéricas implementadas na linguagem R (R Core Team, 2022) empregando

modelos matemáticos que descrevem de forma simplificada os parâmetros e comportamentos de nanoredes reais.

A primeira fase da pesquisa consistiu na revisão do estado da arte, com apanhado dos trabalhos já publicados e estudo detalhado das técnicas de roteamento utilizadas.

A segunda fase teve como objetivo a construção do algoritmo para geração de redes aleatórias e simulação das regras de transmissão que caracterizam as técnicas de roteamento por *Flooding* e FSM.

Na terceira fase, foram elaborados os critérios e equações para avaliação de desempenho dos algoritmos de roteamento e extração de diversos dados das simulações. Com esses resultados, foram implementados pontos de melhoria gerais no algoritmo e nas técnicas avaliadas.

Na quarta fase da pesquisa, foi implementada a possibilidade de agrupamento dos nós e aprimoramento das políticas de transmissão complementares às técnicas de roteamento.

Por fim, a quinta fase da pesquisa teve foco na análise detalhada dos dados obtidos, com identificação e proposta de melhorias para os cenários nos quais o roteamento por *Flooding* se sobressaiu em comparação com o roteamento por FSM.

1.4 Organização do texto

O texto está disposto com a seguinte estrutura:

- este capítulo apresentou uma breve introdução aos conceitos e à motivação que justificam esse estudo. Foram colocados também o escopo, objetivos e metodologias adotadas na pesquisa.
- no Capítulo 2 são apresentados os principais referenciais teóricos que fundamentam as contribuições e discussões levantadas no restante do texto.
- no Capítulo 3 são apresentadas as contribuições deste trabalho e as ferramentas necessárias para avaliação dos resultados.
- já o Capítulo 4 traz uma descrição detalhada dos cenários considerados para avaliação das técnicas de roteamento via simulação, bem como os resultados obtidos.
- finalmente, o Capítulo 5 traz as conclusões e propostas para trabalhos futuros.
- o Apêndice A traz um método eficiente para simulação da técnica de roteamento por *Flooding*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura a respeito dos trabalhos relacionados aos nanodispositivos e nanoredes, estendendo a discussão para algoritmos e protocolos de roteamento e roteamento baseado em máquinas de estado.

2.1 Nanodispositivos

Nanorrobótica trata do desenvolvimento de dispositivos em escalas nanométricas (10^{-9} m) capazes de realizar tarefas como sensoriamento, manipulação, propulsão, atuação, sinalização, processamento de informação, inteligência e formação de colônias (MAVROIDIS; FERREIRA, 2013). Neste contexto, diversas técnicas e elementos vêm sendo desenvolvidos e aprimorados, numa evolução que se dá a passos largos (LI *et al.*, 2020).

A Figura 4 traz um modelo bioinspirado de arquitetura para nanodispositivos proposta por (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008). Os elementos desse modelo são inspirados em organelas celulares e apresentam as seguintes funções:

- A) unidade de controle: executa instruções para realização de tarefas, podendo controlar todos os demais componentes do nanodispositivo;
- B) unidade de comunicação: consiste nos componentes necessários para transmissão e recepção de dados;
- C) unidade de reprodução: responsável pela auto-multiplicação do nanodispositivo utilizando componentes externos;
- D) unidade de energia: responsável por obter e armazenar energia que sustenta todos os componentes do nanodispositivo.

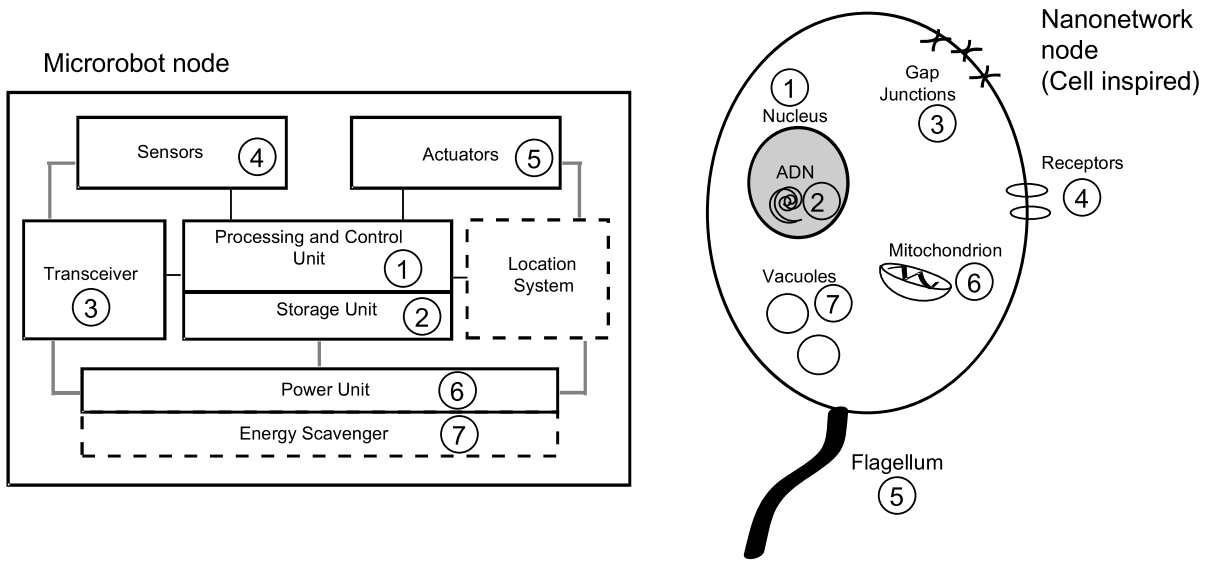


Figura 4 - Modelo de arquitetura de um nanodispositivo bioinspirado constituído por elementos equiparáveis à organelas celulares

Fonte: Adaptado de (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008)

A Figura 5 traz alguns exemplos reais de componentes de escalas nanométricas. A Figura 5a mostra um nanomotor com estrutura híbrida de haste e mola capaz de reagir à incidência de campos magnéticos e ultrassônicos. É possível controlar a direção do deslocamento a partir dos campos incidentes (LI *et al.*, 2015). A Figura 5b traz outro tipo de nanomotor, capaz de se locomover em solução de peróxido de hidrogênio que provoca uma deformidade na distribuição de cargas elétricas ao longo de sua estrutura, o que produz um campo elétrico do qual decorre a propulsão (WANG *et al.*, 2006). Ainda sobre as possibilidades de locomoção em nanoescala, a Figura 5c mostra nanofios de silício capazes de reagir à incidência de luz visível (LIANG; FAN, 2018).

Por fim, a Figura 5d mostra o emprego de nanorobôs de DNA para transporte e despejo de moléculas. A coluna central mostra o dispositivo contendo moléculas de ouro em seu interior, identificadas pelos pontos escurecidos. As figuras superiores e inferiores mostram o dispositivo em sua forma fechada e aberta, respectivamente.

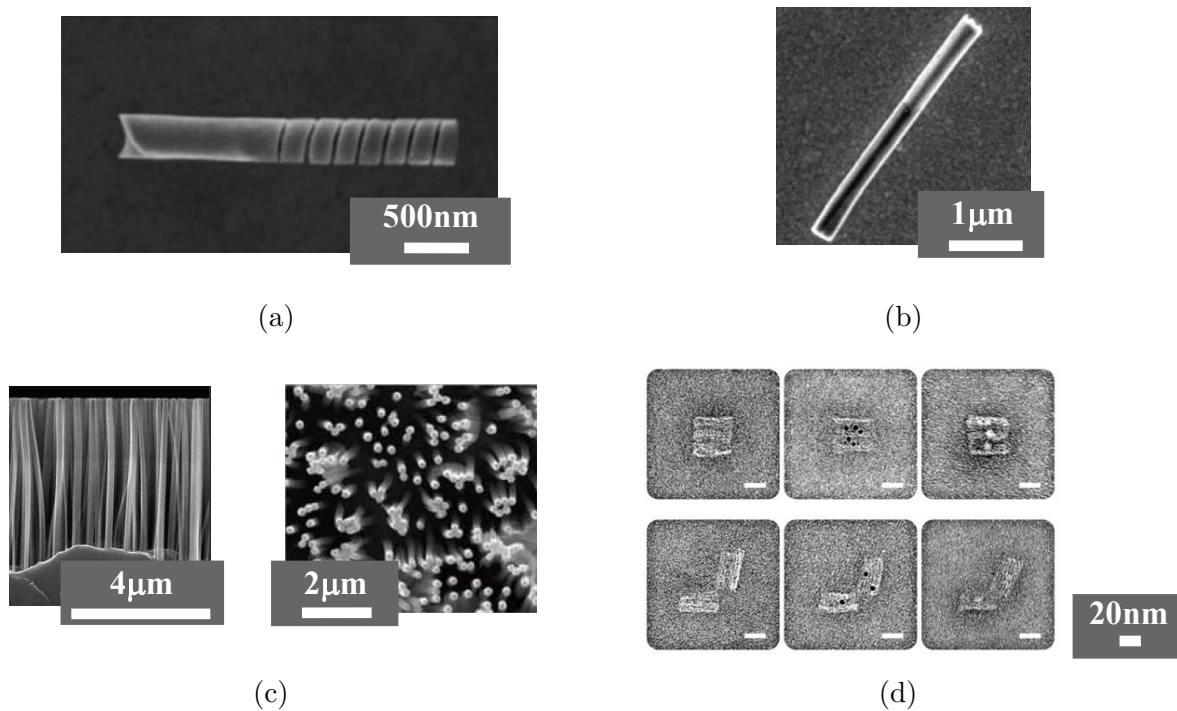


Figura 5 - Exemplos de estruturas nanométricas reais: (a) nanomotor magnetoacústico híbrido capaz de se deslocar quando excitado por campos magnéticos ou acústicos (LI *et al.*, 2015), (b) nanomotor em forma de haste, possui a capacidade de se locomover em solução de peróxido de hidrogênio (WANG *et al.*, 2006), (c) vista em corte transversal de arranjos de nanofios de silício que reagem à incidência de luz visível (LIANG; FAN, 2018), (d) nanorobô de DNA capaz de transportar moléculas (DOUGLAS; BACHELET; CHURCH, 2012).

A Figura 6a mostra um robô de escalas micrométricas desenvolvido na Universidade Cornell, Estados Unidos. Esse tipo de dispositivo pode ser produzido em larga escala sobre um substrato de material semiconductor com rendimento em torno de 90%. São projetados para receber energia e comandos a partir de feixes de laser disparados em células fotossensíveis dispostas em sua superfície. É capaz de se locomover em meio aquoso utilizando uma fita de platina de aproximadamente 12 átomos de espessura que apresenta padrões de movimento quando submetida a sinais elétricos específicos, como mostrado na Figura 6.

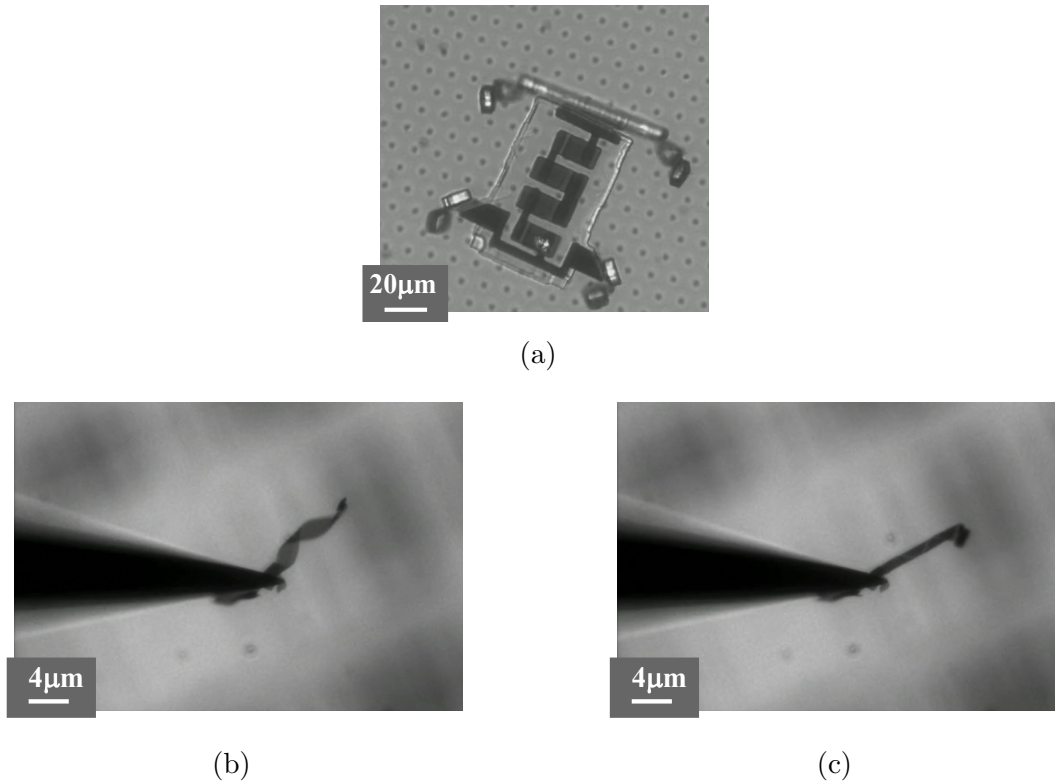


Figura 6 - Exemplo de dispositivo de escalas micrométricas: (a) corpo do dispositivo capaz de se locomover quando recebe comandos via laser, (b-c) fita de platina capaz de apresentar padrões de movimento quando excitadas por sinais elétricos.

Fonte: Adaptado de (MCEUEN; MISKIN, 2019)

2.2 Nanoredes

Na literatura, muitos trabalhos empregam o termo *nanonetwork* (ou *nano-network*). Alguns se referem às nanoredes enquanto estruturas físico-químicas, como nanoredes de carbono, ou às redes em chip (*on-chip networks* ou *network-on-chip*), sistemas integrados em chips e subdivididos em módulos que se comunicam por uma estrutura de rede (HASELMAN; HAUCK, 2009). As *bionanonetworks* se referem às conexões existentes em colônias de seres vivos de escalas nanométricas, tais como bactérias (BALASUBRAMANIAM *et al.*, 2012).

No contexto deste trabalho, nanoredes se referem unicamente a redes de comunicação compostas por máquinas de dimensões nanométricas, capazes de realizar tarefas simples com certo grau de autonomia, dotadas de diferentes níveis de mobilidade e aptas a se comunicarem.

Nanoredes compostas por nanodispositivos com capacidade de sensoriamento e comunicação sem fio definem as redes de nanosensores sem fio (*Wireless Nano Sensor*

Network (WNSN)) (AKYILDIZ; JORNET, 2010a) ou nanoredes de superfície corporal (*Body Area Nano Network* (BANNET)) (PIRO; BOGGIA; GRIECO, 2015), a depender de sua localização. A comunicação das WNSN com dispositivos externos conectados à internet define a internet das nanocoisas (*Internet of Nano Things* (IoNT)). Em um cenário futurístico, (JORNET; AKYILDIZ, 2012) traça o conceito de internet das nanocoisas multimídia (*Internet of Multimedia Nano Things* (IoMNT)), compostas por nanodispositivos avançados como nanocâmeras e nanotelefonos.

(BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) indicam quatro possibilidades para a transmissão de dados entre nanodispositivos:

- A) comunicação por ondas eletromagnéticas: os avanços na área de eletrônica molecular, impulsionados principalmente pelos estudos com nanotubos de carbono (CNT) e grafeno, tornam possível e bastante promissora a comunicação via ondas eletromagnéticas em nanoredes (DRESSLER; FISCHER, 2015) com o desenvolvimento de antenas e circuitos transceptores em escalas nanométricas (JENSEN *et al.*, 2007). Devido às dimensões desses elementos e às características do grafeno, as transmissões devem ocorrer na faixa de Terahertz ($0,3 \times 10^{12}$ Hz a $3,0 \times 10^{12}$ Hz), com altas taxas de transmissão a curtas distâncias (AKYILDIZ; JORNET, 2010b) (AKYILDIZ; JORNET; HAN, 2014) (NAYYAR; PURI; LE, 2017).
- B) comunicação molecular: essa abordagem se baseia nos mecanismos naturais de comunicação entre células biológicas e funciona a partir da codificação da informação em moléculas (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008) (SUDA *et al.*, 2005). Sendo biocompatível, é considerada em diversos estudos com nanoredes e apontada por alguns como uma das técnicas mais promissoras (NAKANO *et al.*, 2012) (ANGIONE *et al.*, 2013) (DARCHINI; ALFA, 2013) (ATAKAN; AKAN, 2008) (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008). Apesar disso, há estudos que indicam superioridade da comunicação por ondas eletromagnéticas sobre a comunicação molecular em termos de eficiência (YANG *et al.*, 2015). Outros estudos recentes empregam a comunicação molecular em IoNT e *Internet of Bio-Nanotechnology* (IoBNT) (MAVRIDPOULOS *et al.*, 2017) (AKYILDIZ *et al.*, 2015).
- C) comunicação nanomecânica: ainda pouco explorada, essa técnica consiste na codificação e transmissão de informações através de movimentos mecânicos entre nanodispositivos conectados por junções mecânicas rígidas. É necessário que o transmissor e o receptor estejam suficientemente próximos, o que é a principal desvantagem dessa abordagem (NASIF; MAHFUZ; THOTA, 2017) (AKYILDIZ; BRUNETTI; BLÁZQUEZ, 2008).

D) comunicação por ondas sonoras: ondas sonoras ultrassônicas produzidas por materiais piezoelétricos vêm sendo consideradas como alternativa às ondas eletromagnéticas por apresentarem melhor propagação em meio aquoso. Apresentam bons resultados na faixa de 10 MHz a 300 MHz (HOGG; JR, 2012) (SANTAGATI *et al.*, 2014) (KAVIANI; SADR; ABRISHAMIFAR, 2008). No entanto, apesar de consideráveis avanços no desenvolvimento de transdutores ultrassônicos de escalas nanométricas, ainda há dificuldades na integração com nanodispositivos devido às limitações de espaço e recursos (SMITH *et al.*, 2011) (RIKHTEGAR; KESHTGARY, 2013).

Alguns estudos propõem modelos de energia bastante completos para nanoredes, sugerindo possibilidades para armazenamento e obtenção de energia por parte dos nanodispositivos a partir de nanocapacitores, materiais piezoelétricos, capazes de obter energia através de vibrações do meio, e sistemas para captação de energia por ondas eletromagnéticas (*Wireless Power Transfer* (WPT)) (JORNET, 2012)(XU *et al.*, 2018)(CANOVAS-CARRASCO; GARCIA-SANCHEZ; GARCIA-HARO, 2018)(LIU *et al.*, 2015)(CHEN *et al.*, 2017). Outros trabalhos propõem modelos simplificados, levando em conta apenas o consumo de energia (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021)(TSIOLARIDOU *et al.*, 2015)(AFSANA; JAHAN; KAISER, 2015)(TAIRIN; NURAIN; ISLAM, 2017). Alguns ainda não consideram a energia na avaliação de desempenho (BÜTHER; TRAUPE; EBERS, 2018)(YU; NG; SEAH, 2015)(PIRO *et al.*, 2013a).

As características consideradas para as nanoredes também variam entre topologias 2D e 3D, com distribuições uniformes e aleatórias dos nós, e em termos de densidade (número de nós por unidade de área/volume). Alguns estudos estendem a discussão para a camada de enlace, outros se mantêm na camada de rede supondo a existência de políticas convenientes para o compartilhamento adequado do canal.

2.2.1 Arquitetura de rede

As particularidades inerentes às nanoredes requerem uma estrutura de rede específica para viabilizar aplicações reais. É necessário, por exemplo, que se tenha um orquestração adequada para o uso do canal sem oneração demasiada dos nanodispositivos.

(GALAL; HESSELBACH, 2018) propõem uma arquitetura unificada para nanoredes que agrega os conceitos mais modernos no contexto de redes de comunicação para a integração dos nanodispositivos com redes convencionais e a internet. O modelo é baseado em camadas, conforme esquematizado na Figura 7.

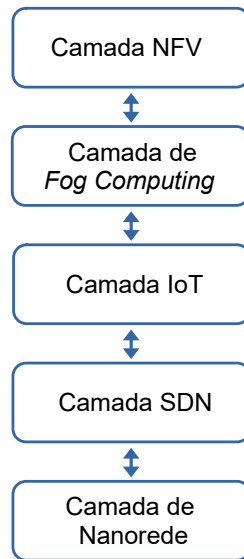


Figura 7 - Modelo de arquitetura de nanorede

Fonte: Adaptado de (GALAL; HESSELBACH, 2018)

Resumidamente, as camadas desempenham os seguintes papéis:

- A) camada de nanorede: é a camada física composta pelos dispositivos finais, como nanosensores, nanoatuadores e nano/micro-*gateways*. Desempenha o papel de transmitir dados entre os nanodispositivos e/ou dos nanodispositivos para dispositivos de macroescala da rede externa. Não conta com mecanismos de inteligência.
- B) camada *Software Defined Network* (SDN): a virtualização agrega maior versatilidade às configurações de rede e controle de tráfego via softwares especializados, além de favorecer a segurança, o gerenciamento e a otimização dos recursos da rede, funções importantes para a interface entre nanoredes e sistemas externos.
- C) camada IoT: o conceito de internet das coisas comporta funcionalidades para gerenciamento de numerosos dispositivos conectados, como o endereçamento. Aplicações nessa camada podem intermediar a comunicação entre a nanorede e os controladores SDN, que traduzem os comandos externos à nanorede em funções suportadas pelos nanodispositivos. Por outro lado, dados provenientes da nanorede são enviadas pela camada IoT para a *Fog Computing* ou diretamente aos recursos de computação em nuvem para processamento.
- D) camada *Fog Computing*: diversas aplicações de nanoredes possuem requisitos quanto à latência e segurança, fatores que podem ser aprimorados a partir da alocação de recursos computacionais geograficamente mais próximos, a fim de reduzir a troca de informações entre dispositivos a longas distâncias.

E) camada *Network Function Virtualization* (NFV): complementando as funcionalidades da SDN, a camada NFV agrega flexibilidade às funções de rede arquitetura, que passam a ser implementadas em softwares ao invés de hardware, podendo ser encarregada dos processos mais complexos de todo o sistema.

(GALAL; HESSELBACH, 2018) também propõem um conjunto de comandos elementares que atendem as diversas tarefas previstas atualmente para nanodispositivos. A Tabela 1 traz um resumo dessas instruções com tipo, parâmetros, origem e descrição.

Tabela 1 - Funções implementáveis em nanodispositivos

Função	Origem	Descrição
void ACTIVATE (instante de ativação, ID)	Controlador	O nanodispositivo assume o estado ativo a partir de determinado momento.
void DEACTIVATE (instante de desativação, ID)	Controlador	O nanodispositivo assume o estado inativo a partir de determinado momento.
void OPERATE (instante de execução, ID)	Controlador	O nanodispositivo realiza determinada tarefa em determinado momento
void MOVE (localização, ID)	Controlador	O nanodispositivo se move para determinada posição geográfica
void ABORT (ID)	Controlador	O nanodispositivo é desconectado da rede
void LISTEN (data, ID)	Nanodispositivo	O controlador se prepara para receber mensagens de um nanodispositivo
message ACK (ID)	Nanodispositivo	Mensagem de configuração enviada pelo nanodispositivo ao controlador
location LOCATE (ID)	Nanodispositivo	Mensagem contendo informação de localização enviada pelo nanodispositivo ao controlador

Fonte: Adaptado de (GALAL; HESSELBACH, 2018)

2.2.2 Técnicas de roteamento em nanoredes

Na literatura, numerosos trabalhos tratam de roteamento em redes de dispositivos com recursos limitados, considerando diversos requisitos como capacidade energética e computacional, mobilidade e conhecimento limitado da rede, sendo o consumo de energia o fator mais crítico na avaliação de desempenho da técnica (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2012). Nanoredes constituem um caso extremo desse gênero.

No geral, são impostas restrições aos nós quanto à possibilidade de retransmitir o pacote com o objetivo de aprimorar a eficiência energética através da redução do número total de transmissões (WANG *et al.*, 2018).

Em um estudo revisional dos trabalhos publicados no contexto das nanoredes, (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) sugerem uma classificação para as técnicas de roteamento composta por seis categorias:

- A) roteamento com base probabilística: nessa abordagem, as tomadas de decisão são atreladas a valores de probabilidade, estabelecidos pelo próprio nó ou de forma centralizada por nanocontroladores. Algumas possibilidades para definição desse parâmetro se relacionam com a localização dos nós ou a valores aleatórios. O *Flooding* seria um caso particular dessa abordagem na qual todos os nós transmitem com probabilidade unitária. Alguns dos principais trabalhos com base probabilística são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Técnicas com base probabilística

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(PIEROBON <i>et al.</i> , 2014)	Centralizada	Hierárquica	Estática
(OUKHATAR <i>et al.</i> , 2017)	Distribuída	Anarquista	Sensores móveis
(XU <i>et al.</i> , 2018)	Distribuída	Anarquista	Sensores móveis, Controladores estáticos
(GALAL; HESSELBACH, 2020)	Centralizada	Hierárquica	Móvel

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021), e estendido pelo autor

B) roteamento com base em agrupamento (*clustering*): a divisão dos nós em grupos é proposta com o objetivo principal de reduzir a complexidade da rede a partir da sua segmentação em subredes. No geral, são estabelecidas duas modalidades de comunicação: entre os nós de um grupo e entre grupos. No segundo caso, cada grupo deve ter ao menos um nó responsável pela recepção e retransmissão dos dados. A distribuição dos nós em grupos pode se dar sob diversas perspectivas, como por proximidade geográfica. Na maioria dos casos, é necessário que o nó tenha conhecimento de parte da rede, a fim de determinar para quem e como deve transmitir. Alguns dos principais trabalhos com base em agrupamento são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Técnicas com base em agrupamento

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(AFSANA <i>et al.</i> , 2015)	Distribuída	Hierárquica	Estática
(AFSANA; JAHAN; KAISER, 2015)	Distribuída	Hierárquica	Estática
(LEE <i>et al.</i> , 2015)	Semi-distribuída	Hierárquica	Estática
(PIRO; BOGGIA; GRIECO, 2015)	Centralizada	Hierárquica	Estática
(RIKHTEGAR; JAVIDAN; KESHTGARI, 2017)	Distribuída	Hierárquica	Sensores móveis, Controladores estáticos
(AFSANA <i>et al.</i> , 2018)	Semi-distribuída	Hierárquica	Estática

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021)

C) roteamento com base em classificação de nós: nessa abordagem, os nós são previamente classificados como retransmissores ou destinatários na rede. Essa classificação pode ser estabelecida de forma aleatória pelos próprios nós ou a partir de dados estatísticos da vizinhança de cada nó. De forma geral, apenas os retransmissores podem transmitir, enquanto os destinatários apenas recebem e processam os pacotes, o que reduz o número de retransmissões e colisões de pacotes. Alguns dos principais trabalhos com base em classificação de nós são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Técnicas com base em classificação de nós

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(LIASKOS; TSIOLIARIDOU, 2014)	Distribuída	Anarquista	Estática
(LIASKOS <i>et al.</i> , 2016)	Distribuída	Anarquista	Estática
(TSIOLIARIDOU <i>et al.</i> , 2016a)	Distribuída	Anarquista	Estática
(XIA; JORNET, 2017)	Distribuída	Hierárquica	Estática

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021), e estendido pelo autor

D) roteamento com base em contagem de saltos: com o objetivo de estabelecer caminhos mais curtos entre os nós de origem e destino, alguns trabalhos propõem métodos de roteamento baseados no mapeamento da distância entre nanosensores e nanocontroladores através do conhecimento da rede empregando a transmissão prévia de pacotes de configuração (*Acknowledging Packets* (ACK)). Em geral, cenários com mobilidade são bastante desafiadores para técnicas com essa abordagem. Alguns dos principais trabalhos com base em contagem de saltos estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Técnicas com base em contagem de saltos

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(TSIOLIARIDOU <i>et al.</i> , 2015)	Distribuída	Anarquista	Estática
(YU; NG; SEAH, 2015)	Centralizada	Hierárquico	Estática
(TSIOLIARIDOU <i>et al.</i> , 2016)	Distribuída	Anarquista	Estática
(TSIOLIARIDOU <i>et al.</i> , 2016b)	Distribuída	Anarquista	Estática
(TAIRIN; NURAIN; ISLAM, 2017)	Distribuída	Hierárquico	Estática
(TSIOLIARIDOU <i>et al.</i> , 2017), (ARRABAL <i>et al.</i> , 2019)	Distribuída	Anarquista	Estática
(BÜTHER; TRAUPE; EBERS, 2018)	Distribuída	Hierárquico	Estática ¹

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021), e estendido pelo autor

E) roteamento com base em *wake up*: essa abordagem explora a possibilidade de desativar temporariamente alguns dos nanodispositivos visando melhorar a eficiência energética. No geral, nanocontroladores enviam mensagens prévias de *wake up* para os nanonós que são ativados e se tornam aptos a participar da transmissão. Alguns trabalhos propõem que haja uma seleção para desativação dos nós baseada na quantidade de energia e na distância entre o nó e o nanocontrolador. Outra possibilidade é o *wake up* regional, pela qual o nó é ativado ao adentrar regiões sob o alcance do nanocontrolador e desativado após determinado período de tempo. As principais desvantagens dessa abordagem são relacionadas ao gerenciamento e execução dos processos de ativação e desativação dos nanonós, que em casos extremos podem ocasionar um aumento do consumo de energia e latência. Alguns dos principais trabalhos com base em *wake up* estão na Tabela 6.

¹Apesar de apresentarem apenas o cenário estático, os autores sugerem solução para cenários com mobilidade.

Tabela 6 - Técnicas com base em *wake up*

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(NEUPANE, 2014)	Distribuída	Anarquista	Estática
(LIU <i>et al.</i> , 2015)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(LIU <i>et al.</i> , 2016)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(CHEN <i>et al.</i> , 2017)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(CANOVAS- CARRASCO; GARCIA- SANCHEZ; GARCIA-HARO, 2018)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(CANOVAS- CARRASCO <i>et al.</i> , 2019)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021), e estendido pelo autor

F) outros esquemas de roteamento: alguns trabalhos propõem modificações da técnica de roteamento por *Flooding*, impedindo múltiplas retransmissões de um mesmo pacote ou simplesmente limitando o número de transmissões. Outras técnicas propõem delimitar áreas nas quais as transmissões podem ocorrer ou o envio de pacotes ACK para aquisição de conhecimento da vizinhança e determinação da energia necessária para cada conexão. Há ainda algoritmos baseados na geração prévia de rotas. A possibilidade de concentrar dados em determinados nós para posterior transmissão a nanocontroladores também é considerada para redução do número de transmissões. Muitas dessas técnicas requerem capacidades computacionais e energéticas bastante desafiadoras para dispositivos de escalas nanométricas. Alguns dos principais trabalhos são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Outras técnicas de roteamento

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(PIRO <i>et al.</i> , 2013a)	Distribuída	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(PIRO <i>et al.</i> , 2013b)	Distribuída	Hierárquica	Sensores móveis, controladores estáticos
(XU; ZHANG; WANG, 2016)	Distribuída	Hierárquica	Estático
(RONG; LEESON; HIGGINS, 2017)	Distribuída	Anarquista	Estático
(TAIRIN; ISLAM, 2017)	Distribuída	Hierárquica	Estático
(YEN, 2017)	Distribuída	Anarquista	Estático
(YU <i>et al.</i> , 2017)	Distribuída	Hierárquica	Estático
(ARRABAL; DHOUTAUT; DEDU, 2018)	Distribuída	Anarquista	Estático
(STELZNER; BUSSE; EBERS, 2018)	Distribuída	Hierárquica	Móvel
(WANG <i>et al.</i> , 2018)	Distribuída	Anarquista	Estático
(AL-TURJMAN, 2019)	Distribuída	Hierárquica	Nanodispositivos fixos, distribuídos em um corpo móvel
(ALIOUAT; MABED; BOURGEOIS, 2019), (ALIOUAT; MABED; BOURGEOIS, 2020)	Distribuída	Anarquista	Móvel

Continua na próxima página

Tabela 7 – continuação da página anterior

Trabalho	Decisão	Arquitetura	Mobilidade
(FAHIM <i>et al.</i> , 2019)	Centralizada	Hierárquica	Sensores móveis, Controladores estáticos
(FERJANI; TOUATI, 2019)	Distribuída	Hierárquica	Sensores móveis, Controladores estáticos
(AL-TURJMAN, 2020)	Centralizada	Hierárquica	Estático
(WANG <i>et al.</i> , 2020)	Distribuída	Anarquista	Estático
(AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021)	Centralizada	Anarquista	Estático ²

Fonte: Adaptado de (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020) e (LEMIC *et al.*, 2021), e estendido pelo autor

2.3 Roteamento por máquina de estados

Alguns trabalhos empregam o conceito de máquinas de estados para validação de algoritmos de roteamento (BRAND; ZAFIROPOULO, 1983). (FILHO; AMAZONAS, 2012) propõem empregar FSM na geração de rotas utilizadas posteriormente para o roteamento. Este capítulo explora o conceito de máquinas de estados e a técnica de roteamento por FSM.

2.3.1 Máquina de estados finitos

O conceito de máquina de estados finitos foi proposto pela primeira vez por (McCULLOCH; PITTS, 1943) no contexto de sistemas neurais, sendo explorado posteriormente em diversas áreas acadêmicas, principalmente com o advento da computação e a consequente demanda por ferramentas voltadas para modelagem de sistemas lógicos e complexos (SHAHBAZ; GROZ, 2009).

A ideia consiste em descrever um sistema por meio do conjunto de *estados* nos quais ele pode se encontrar e do conjunto de eventos a que está sujeito, cuja ocorrência pode levar ou não a uma alteração do seu estado atual. Deve existir um número finito de estados para que o sistema possa ser representado por uma FSM.

²Apesar de terem utilizado redes com nós estáticos, os autores sugerem que a técnica pode ser empregada em cenários com mobilidade

A Figura 8 esquematiza as duas principais implementações de FSM, propostas por (MEALY, 1955) e (MOORE *et al.*, 1956). Basicamente, se diferem pela forma como as saídas são produzidas: enquanto na máquina de Mealy o valor da entrada e o estado atual são utilizados para produzir a saída, na máquina de Moore apenas o estado atual será necessário. Existe uma equivalência entre as duas abordagens, sendo possível transformar uma FSM de Mealy numa FSM de Moore e vice-versa (AMATO; BONET; ZILBERSTEIN, 2010).

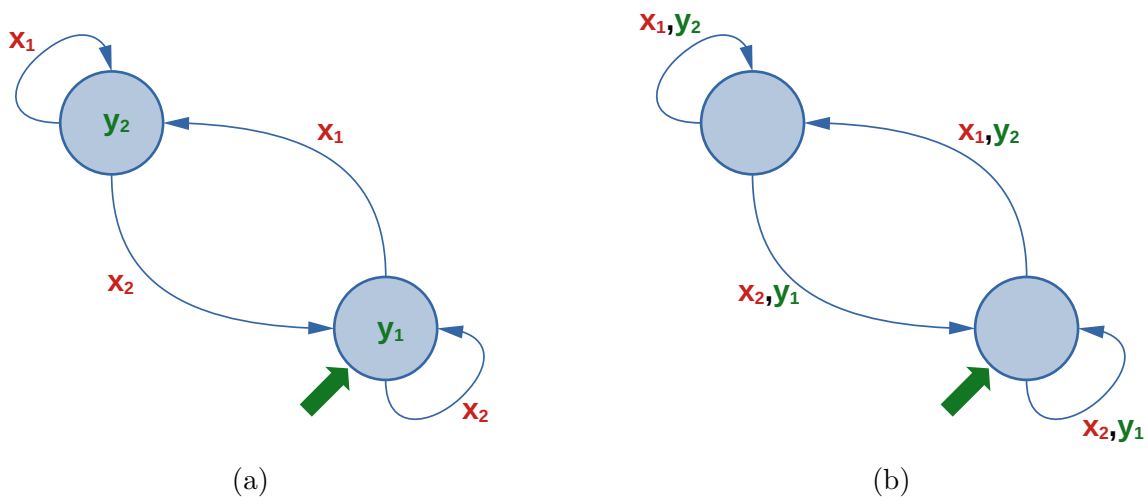


Figura 8 - As duas principais implementações de máquinas de estados finitos: (a) máquina de Moore e (b) máquina de Mealy

Fonte: Adaptado de (AMATO; BONET; ZILBERSTEIN, 2010)

As máquinas de Mealy e Moore podem ser definidas matematicamente pela sêxtupla:

$$M = (S, \Sigma, \Lambda, H, G, S_0) \quad (2.1)$$

sendo

- S o conjunto de estados (finito);
- Σ o alfabeto de entrada;
- Λ o alfabeto de saída;
- $H : S \times \Sigma \rightarrow S$ a função de transição de estado;
- $G : S \times \Sigma \rightarrow \Lambda$ a função de saída para a máquina de Mealy, $G : S \rightarrow \Lambda$ a função de saída para a máquina de Moore;
- S_0 o estado inicial ($S_0 \in S$).

2.3.2 Roteamento por FSM

No contexto das redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network (WSN)*), (FILHO; AMAZONAS, 2012) propuseram um esquema de roteamento baseado em máquina de estados, particularmente vantajoso para redes com recursos limitados, que se destaca por quatro pontos:

- A) baixa complexidade;
- B) não emprega tabelas de roteamento;
- C) não emprega pacotes de sinalização (reduzindo a latência); e
- D) é possível definir um mecanismo de auto-recuperação em caso de falhas.

A técnica se baseia na geração e transmissão de rotas pelas quais será permitido o tráfego do pacote transmitido. Cada nó deve possuir um identificador lógico (ID). Ao receber um pacote, o nó verifica se seu ID está na sequência de pelo menos uma das rotas disponíveis. Se sim, poderá retransmitir ou processar o pacote. Caso contrário, deve descartá-lo. Com isso, o número total de transmissões é reduzido, o que resulta numa melhor eficiência energética e menor latência.

Cada nó da rede é representado por um estado da FSM, como ilustrado na Figura 9. Uma *mudança de estado* corresponde a uma transmissão entre dois nós (um *salto*). Sendo assim, para que o nó n_1 se identifique como receptor do nó n_0 , da Equação 2.1, deve existir uma entrada $\sigma \in \Sigma$ que leve a máquina do estado S_0 para o estado S_1 .

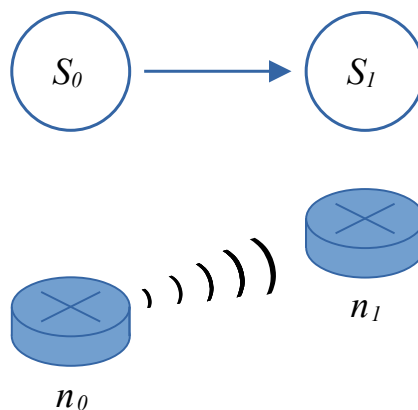


Figura 9 - Rede modelada por máquina de estados, com cada nó sendo representado por um estado da máquina

Uma rota de N_h saltos é produzida pela alteração do estado da máquina por N_h vezes, como ilustrado na Figura 10 para $N_h = 3$. É desejável que a máquina de estados seja regida por uma lógica tal que entradas distintas tendam a produzir rotas distintas. Dessa forma, a repetição do processo esquematizado na Figura 10 por N_r vezes, utilizando entradas distintas, produzirá N_r rotas.

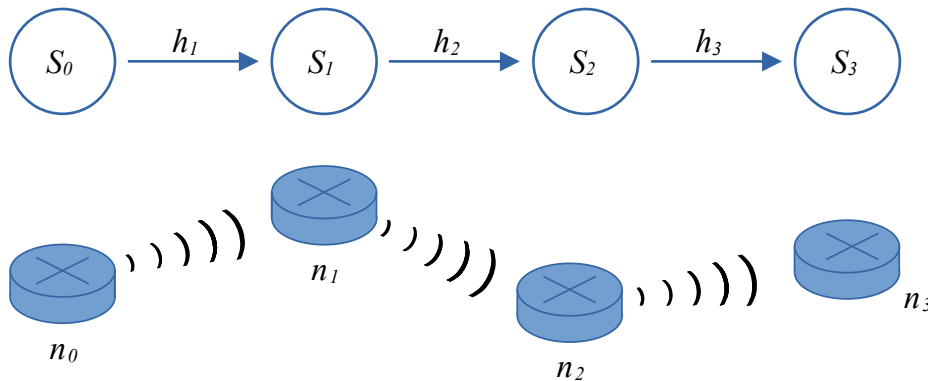


Figura 10 - Transmissão de pacotes através da rede por uma rota de três saltos e sua representação por transições de estados na FSM

Prezando pela baixa complexidade, o trabalho propõe que seja utilizada uma máquina de Moore, cuja lógica para as mudanças de estado seja baseada em uma dinâmica de deslocamentos e inserções de novos bits. Os seguintes dados são necessários para geração das rotas:

- Tamanho da sequência de entrada (L_k)
- Número de saltos permitido (N_h)
- Estado inicial da máquina (endereço do nó de origem)
- Estado final da máquina (endereço do nó de destino)

A saída da FSM pode ser empregada para tratamento de erros de transmissão, falhas e descoberta de nós.

Ao receber o pacote no h -ésimo salto, o nó deve verificar se é o destinatário. Caso não seja, deve verificar se alguma das rotas prevê que ele receba o pacote no h -ésimo salto. Se sim, é denominado um nó *intermediário* e deve retransmitir o pacote. Antes de retransmitir, as rotas nas quais o nó em não é um intermediário devem ser descartadas. Dessa forma, o tamanho do pacote é reduzido ao longo da transmissão.

Por exemplo, supondo que o pacote seja transmitido pelo nó 4 e seja recebido no primeiro salto pelo nó 2, que encontra as seguintes rotas disponíveis:

A) $4 \rightarrow 2 \rightarrow 21 \rightarrow 3$

B) $4 \rightarrow 2 \rightarrow 43 \rightarrow 3$

C) $4 \rightarrow 8 \rightarrow 10 \rightarrow 3$

D) $4 \rightarrow 7 \rightarrow 35 \rightarrow 3$

O nó 2 irá concluir que é um intermediário por conta das rotas A e B, as quais permitem que ele receba o pacote no primeiro salto. Portanto, deverá retransmitir o pacote excluindo as rotas C e D.

O conjunto de elementos do processo de roteamento por FSM consiste basicamente de registradores, comparadores e deslocadores de bits. Por tal simplicidade, (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021) consideram o emprego desse método no contexto das nanoredes de comunicação.

3 CONTRIBUIÇÕES

Neste capítulo, são discutidas as contribuições indicadas no escopo deste trabalho.

3.1 FSM por tabela

Os nanodispositivos são fortemente limitados em recursos computacionais e energéticos. No contexto de nanoredes baseadas na comunicação via ondas eletromagnéticas, (JORN-ET, 2012) sugere a utilização de ultra-nano-capacitores capazes de sustentar uma transmissão de 1600 bits com um único ciclo de carga. O mesmo estudo ainda estima que o tempo de recarga seja na ordem de 50 segundos, bastante longo para muitas aplicações. Portanto, é de suma importância que o tamanho do pacote não extrapole as capacidades energéticas do nanodispositivo. Além disso, pacotes grandes demandam um longo tempo para serem produzidos, transmitidos/recebidos e processados.

Devido ao tamanho do pacote, foi observado que a técnica de roteamento por FSM seria ineficiente ou até ineficaz em várias configurações dos parâmetros de roteamento. A Figura 11 traz o tamanho do pacote ao longo da transmissão utilizando o roteamento por *Flooding* e o roteamento por FSM com $N_h = 5$ saltos em uma rede de densidade $\rho = 0,32^1$. O tamanho do pacote é demasiadamente grande no caso da FSM.

Este trabalho propõe uma nova implementação do roteamento por FSM utilizando tabelas, denominada *Table-based Finite State Machine* (T-FSM). A ideia consiste em construir e transmitir um *gerador de rotas*, ao invés das rotas em si. Com isso, as rotas seriam produzidas naturalmente ao longo da transmissão. Será mostrado que o tamanho do pacote se mantém reduzido para uma faixa maior dos parâmetros de roteamento, sem alterações na dinâmica ou elevação considerável da complexidade da técnica original.

¹Neste trabalho, a densidade de uma nanorede é denominada ρ e dada em nós/mm².

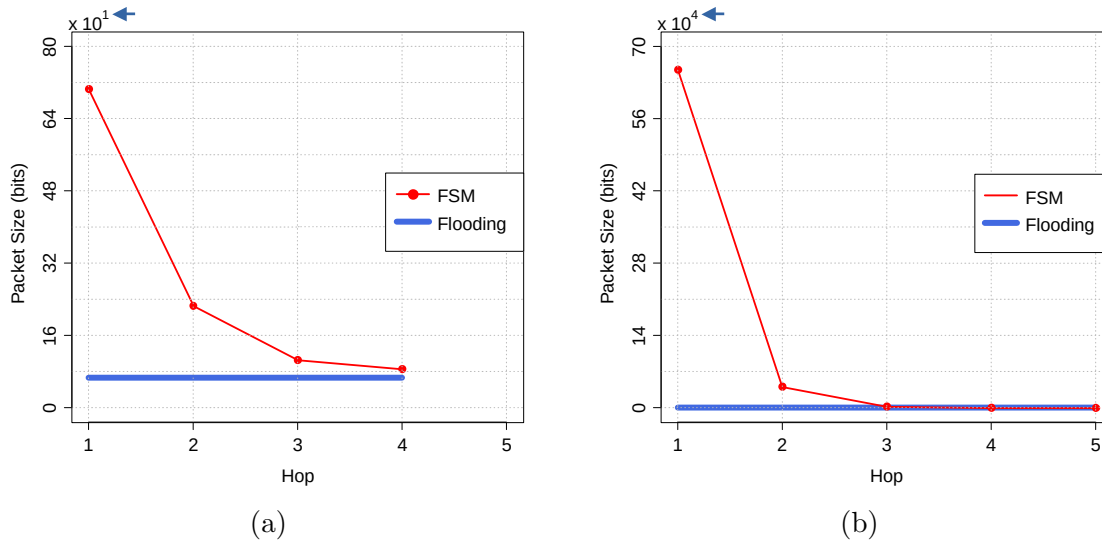


Figura 11 - Tamanho do pacote ao longo da transmissão para as técnicas de roteamento por FSM e por *Flooding* para (a) $L_k = 2$ e (b) $L_k = 4$. No primeiro caso, o tamanho do pacote diminui devido ao descarte de rotas inválidas.

Para exemplificar a proposta, será apresentado um exemplo com os seguintes parâmetros:

- rede com 32 nós (FSM de 5 bits);
- nó de origem: 17 (10001);
- nó de destino: 16 (10000);
- número de saltos: $N_h = 3$;
- tamanho da sequência de entrada: $L_k = 3$.

Na modelagem de rede por FSM, cada nó é identificado por um ID e representado pelo estado da FSM. Uma transmissão entre dois nós (um salto) é representada por uma mudança de estado na FSM. Essa mudança de estado pode ser regida por diferentes lógicas. O deslocamento de bits é uma operação de baixa complexidade e fácil implementação. A Figura 12 ilustra o processo de mudança de estado via deslocamento e inserção de bits. O deslocamento é feito de L_k bits para a direita. Neste exemplo, $L_k = 2$. x_1 e x_2 representam os novos bits que passam a ocupar as duas posições mais à esquerda do estado da máquina.

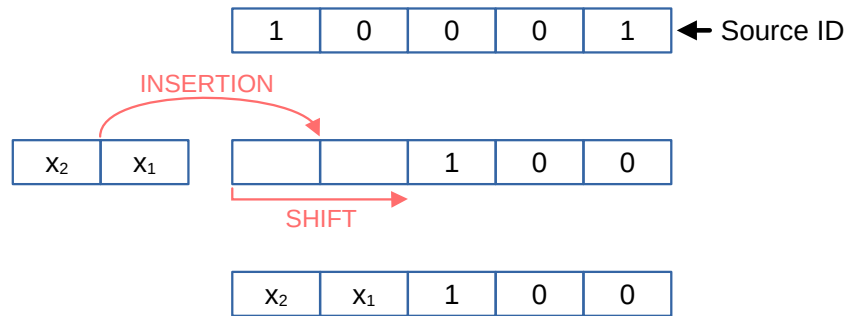


Figura 12 - Mudança de estado da FSM por deslocamento e inserção de bits

Na abordagem T-FSM, para a construção da tabela geradora de rotas, apenas a operação de deslocamento é necessária. Como esquematizado na Figura 13, o ID do nó de origem é deslocado $N_h - 1 = 2$ vezes para a direita por $L_k = 2$ bits. De forma análoga, o ID do nó de destino é deslocado para a esquerda. Cada deslocamento produz uma linha da tabela.

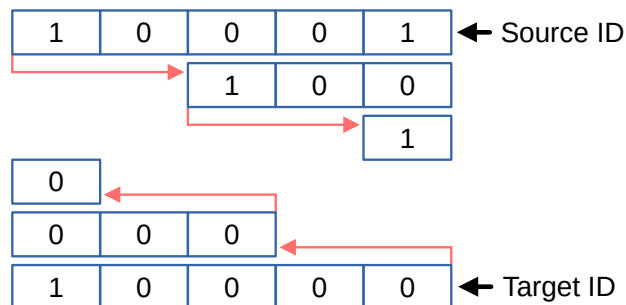


Figura 13 - Construção da tabela geradora de rotas - primeira etapa: construção das partes superior e inferior a partir do deslocamento de bits dos Ids dos nós de origem e destino

Como ilustrado na Figura 14, o próximo passo é unir as partes superior e inferior da tabela. Neste processo, podem surgir lacunas (indicadas em azul na figura) que equivalem aos bits livres do roteamento por FSM. Ao longo da transmissão, os nós que retransmitem o pacote devem preencher algumas dessas lacunas, processo que equivale ao descarte de rotas inválidas na implementação original do roteamento por FSM.

1	0	0	0	1	h1
0		1	0	0	
0	0	0		1	h3
1	0	0	0	0	

Figura 14 - Construção da tabela geradora de rotas – segunda etapa: junção das partes superior e inferior com a formação natural de lacunas

A Figura 15 traz a tabela completa. Para fins de referência, a lacuna está indicada como uma variável, x_1 . Importante notar que, pela dinâmica dos deslocamentos, é possível que algumas lacunas presentes em diferentes linhas da tabela sejam, na verdade, uma só lacuna deslocada. Esse exemplo ilustra essa situação. Neste caso, as lacunas devem ser preenchidas conjuntamente.

1	0	0	0	1
0	x_1	1	0	0
0	0	0	x_1	1
1	0	0	0	0

Figura 15 - Exemplo de tabela geradora de rotas

A política de tomada de decisão pelos nós consiste nas seguintes etapas:

- A) para determinar se é o destinatário, o nó que recebe a tabela deve verificar se seu ID é compatível com a última linha;
- B) para determinar se é um intermediário, o nó que recebe a tabela deve verificar se seu ID é compatível com a linha correspondente ao salto atual - a cada salto, a linha superior da tabela deve ser excluída, uma vez que se refere ao nó atual e não possui utilidade para os próximos nós;
- C) antes de retransmitir o pacote, o nó deve preencher algumas lacunas da tabela utilizando seu próprio ID.

3.1.1 Exemplo de roteamento utilizando T-FSM

Para ilustrar a política do roteamento por T-FSM a partir do exemplo anterior, considerando que o nó 17 (10001) transmita o pacote contendo a tabela mostrada na Figura 15 (exceto a primeira linha, que é referente ao próprio nó 17) e supondo que o nó 12 (01100) o receba, deverá ser executado o seguinte processo:

- A) verificar que não é o destinatário, uma vez que seu ID não condiz com a última linha da tabela;
- B) verificar que é um intermediário, uma vez que seu ID é condizente com a primeira linha da tabela, como ilustrado na Figura 16. A lacuna na tabela pode assumir qualquer valor, portanto não tem influência sobre essa decisão.

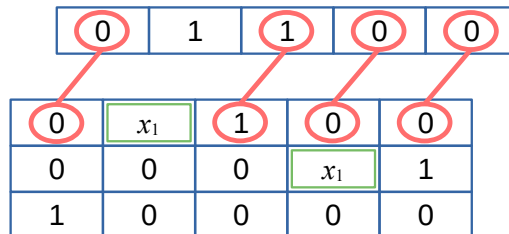


Figura 16 - Tomada de decisão por um nó utilizando a tabela geradora de rotas

- c) sendo um intermediário, o nó 12 deve editar a tabela e retransmitir o pacote. Equiparando seu ID com a primeira linha da tabela, fica claro que a lacuna precisa ser preenchida com o bit 1. Dessa forma, deve fazer $x_1 = 1$ em toda a tabela. A primeira linha se refere ao seu próprio ID e não precisa ser transmitida. O resultado está mostrado na Figura 17.

0	0	0	1	1
1	0	0	0	0

Figura 17 - Exemplo da tabela retransmitida por um nó intermediário

- D) finalmente, o nó 12 deve retransmitir o pacote.

O algoritmo do roteamento por T-FSM é simples e pode ser executado em poucos passos pelos nanonós. O fluxo de transmissão do pacote na abordagem por T-FSM é idêntico ao da abordagem por FSM.

3.1.2 Edição de rotas utilizando T-FSM

O roteamento por T-FSM, além da redução no tamanho do pacote e simplificação dos processos de geração e tomada de decisão, oferece um meio simples para edição das rotas, o que pode ser explorado para superar desafios específicos de cada cenário. Algumas possibilidades:

- A) redução do número de rotas através do preenchimento de algumas lacunas, como exemplificado na Figura 18.

1	0	0	0	1
0	1 ←	1	0	0
0	0	0	1 ←	1
1	0	0	0	0

Figura 18 - Tabela de roteamento com redução de bits livres

- B) redução de 50% do número de nós participantes da transmissão fazendo os valores das linhas intermediárias da última coluna da tabela iguais a 0 ou 1, como exemplificado na Figura 19.

1	0	0	0	1
0	x ₁	1	0	0 ←
0	0	0	x ₁	0 ←
1	0	0	0	0

Figura 19 - Tabela de roteamento com redução no número de nós participantes

- c) inserção de uma *linha de Flooding*, como exemplificado na Figura 20, que representa um salto no qual qualquer nó será considerado um intermediário, aumentando a possibilidade de retransmissão do pacote.

1	0	0	0	1
x ₆	x ₅	x ₄	x ₃	x ₂ ←
0	x ₁	1	0	0
0	0	0	x ₁	1
1	0	0	0	0

Figura 20 - Tabela de roteamento com inserção de uma linha de *Flooding*

3.2 Cenário com agrupamento de nós

(AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021) sugeriram avaliar o desempenho da técnica de roteamento por FSM em cenários com agrupamento de nós. Essa possibilidade é explorada em muitos trabalhos como forma de reduzir a complexidade da rede e limitar o número de transmissões, aprimorando a eficiência. Há também cenários em que o agrupamento é inevitável e decorrente de diversas circunstâncias.

Este trabalho avalia o agrupamento de nós sob duas perspectivas:

- A) os grupos são formados por nanodispositivos que desempenham as mesmas tarefas, tendo por objetivo atingir *ao menos* um dos nós pertencentes a determinado grupo. Neste caso, o agrupamento fornece um aumento na probabilidade de alcançar algum alvo.
- B) os grupos são formados por nanodispositivos que desempenham tarefas distintas e complementares. Dessa forma, o objetivo é atingir *todos* os nós de determinado grupo.

Para fins de entendimento, o cenário sem agrupamento de nós pode ser considerado o caso particular do cenário com agrupamento em que o número de grupos, N_g , é igual ao número de nós da rede, N .

Neste caso, o roteamento por FSM segue a mesma dinâmica do cenário sem agrupamento, mas utilizando os IDs dos grupos ao invés dos IDs individuais dos nós da nanorede.

3.3 Modelo de energia

Este trabalho considera nanoredes baseadas na comunicação por ondas eletromagnéticas. Neste contexto, um nanodispositivo seria capaz de emitir sinais que se propagam a uma distância γ . A Figura 21 ilustra a definição desse parâmetro em contraste com o consumo de energia. Em termos práticos, se tratando de nanoredes, é esperado que γ esteja na faixa de 1 nm a 1 cm (AGOULMINE *et al.*, 2012).

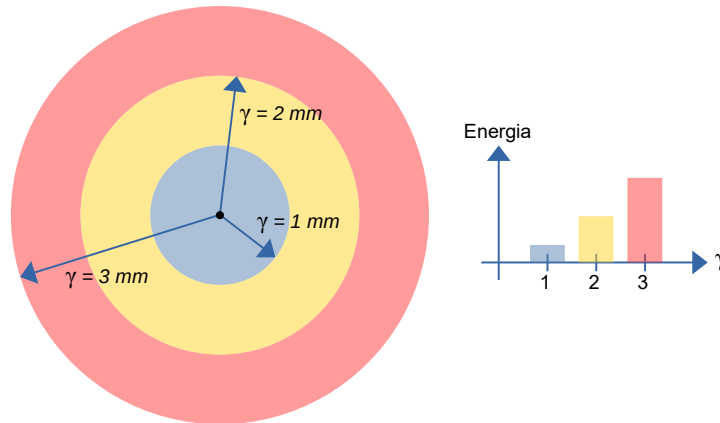


Figura 21 - Definição do parâmetro γ

No mesmo contexto, (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021) propõem um modelo matemático simplificado para o consumo de energia, no qual a energia para transmissão de um pulso poderia ser estimada com a Equação 3.1 (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021).

$$E_{tx,pulso}(\gamma) = \beta_{tx} \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{\alpha_{tx}}, \quad (3.1)$$

sendo

- β_{tx} o coeficiente de transmissão de energia,
- γ o alcance da transmissão,
- γ_0 um valor de referência para γ , e
- α_{tx} o expoente de transmissão de energia característico do meio de propagação.

No contexto dos nanodispositivos, (JORNET; AKYILDIZ, 2011) consideram sinais com as seguintes características:

- pulsos gaussianos;
- frequências na faixa de Terahertz;
- duração dos pulsos de 100 fs;
- intervalo entre os pulsos de 100 ps.

Nessa configuração, a energia despendida para transmissão de 1 pulso a uma distância de 10 mm seria de 1 pJ, apresentando uma *Bit Error Rate* (BER) da ordem de 10^{-4} (JORNET, 2012). Portanto, uma condição inicial para a Equação 3.1 pode ser estabelecida da seguinte forma:

- $\gamma_0 = 0,01$ m;
- $\alpha = 2$ (correspondente à transmissão no espaço livre);
- $E_{tx,pulso} = 10^{-12}$ J.

A partir desses valores, obtém-se $\beta_{tx} = 10^{-12}$. Dessa forma, quando $\gamma = \gamma_0 = 10$ mm, $E_{tx,pulso}$ será igual a 1 pJ. A energia total necessária para a transmissão de um pacote no h -ésimo salto é dada por:

$$E_{tx}(\gamma, h) = N_{tx}(h, \gamma) \cdot N_{bits}(h) \cdot W \cdot E_{tx,pulso}(\gamma), \quad (3.2)$$

sendo

- N_{tx} o número de transmissores no h -ésimo salto,
- N_{bits} o tamanho do pacote (em bits) no h -ésimo salto, e
- W a proporção de 1s e 0s no pacote (tipicamente, $W = 0,5$).

Para as técnicas de roteamento por FSM, o tamanho do pacote varia em função de h , uma vez que o número de rotas diminui ao longo do caminho. Para o *Flooding*, o tamanho do pacote permanece constante.

(JORNET, 2012) ainda propõe que a energia necessária para a recepção de um pulso seja considerada como sendo 10% da energia utilizada na transmissão do pulso quando $\gamma = \gamma_0 = 10$ mm, conforme a Equação 3.3.

$$E_{rx,pulso} = 0,1 \cdot E_{tx,pulso}(\gamma_0) \quad (3.3)$$

A Figura 22 ilustra o comportamento das Equações 3.1 e 3.3 com γ .

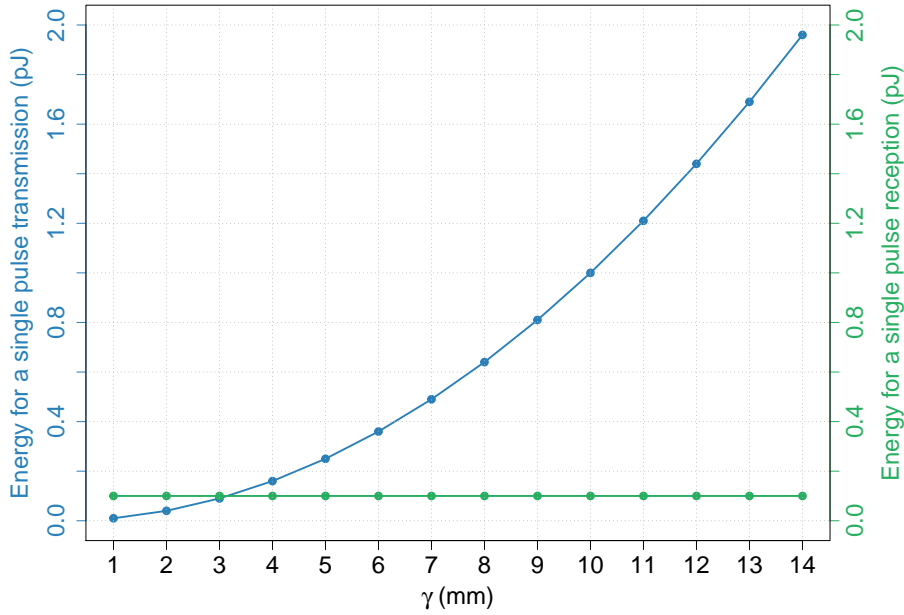


Figura 22 - Energia para transmissão e recepção de 1 pulso

A energia total utilizada na recepção de um pacote no h -ésimo salto é dada por:

$$E_{rx}(\gamma, h) = N_{rx}(h, \gamma) \cdot N_{bits}(h) \cdot W \cdot E_{rx, pulso}, \quad (3.4)$$

sendo N_{rx} o número de receptores no h -ésimo salto quando o sinal foi transmitido com alcance de uma distância γ .

Outras contribuições para o consumo de energia são:

- energia para geração das rotas (E_{rg});
- energia para tomada de decisão a respeito do pacote recebido (processar, transmitir ou descartar), em função do tamanho do pacote (E_{fw});
- energia para processar o pacote por cada destinatário (E_{dc}).

Tomando como base a condição inicial considerada anteriormente e as proporções entre os componentes de energia empregadas por (AMAZONAS; HESSELBACH; GIOZZA, 2021), chega-se a:

- $E_{rg} = 4$ pJ
- $E_{fw}(h, \gamma) = N_{rx}(h, \gamma) \cdot 1$ pJ
- $E_{dc} = 3$ pJ

3.4 Métricas de avaliação

Este capítulo trata dos indicadores de referência considerados na avaliação dos resultados e apresenta uma nova métrica para medida da eficiência energética frente à entrega de pacotes e latência.

3.4.1 Métricas de avaliação elementares

Em redes de comunicação, diversos parâmetros podem ser medidos para avaliação de desempenho das técnicas de roteamento. Para os objetivos deste trabalho, foram considerados três fatores:

- *Packet Delivery Ratio* (PDR) indica a eficácia na entrega de pacotes aos nós destinatários. Conforme mostrado na Equação 3.5, é definido como a fração dos nós destinatários que receberam o pacote *ao menos* uma vez.

$$PDR(\gamma) = \frac{N_{atingidos}}{N_{alvos}}, \quad (3.5)$$

sendo $N_{atingidos}$ o número de alvos alcançados e N_{alvos} o número total de alvos.

- *Energy Consumption per Packet* (ECP) é o somatório do total de energia despendida por todos os nós participantes da transmissão de um pacote, conforme definido na Equação 3.6.

$$ECP(\gamma) = E_{rg} + \sum_h [E_{tx}(h, \gamma) + E_{rx}(h, \gamma) + E_{fw}(h, \gamma)] + N_{atingidos}(\gamma) \cdot E_{dc} \quad (3.6)$$

- *Average Number of Hops* (ANH) é uma medida da média de latência na entrega de um pacote ao destinatário e é avaliada levando em conta o número de saltos entre os nós de origem e destino.

3.4.2 Métricas de avaliação unificada

A fim de avaliar a performance dos algoritmos de roteamento e traçar comparativos entre técnicas e cenários, é útil estabelecer uma relação entre ANH, ECP e PDR que forneça uma perspectiva adequada e direta. Com este objetivo, esta seção propõe uma métrica simples que unifica e quantifica os resultados das métricas elementares produzindo uma avaliação condizente com o contexto de nanoredes.

Primeiramente, as métricas elementares devem ser normalizadas para que assumam valores entre 0 e 1, tal como definido nas Equações 3.7 a 3.9:

$$PDR' = \frac{PDR}{\max(PDR)} \quad (3.7)$$

$$ECP' = \frac{ECP}{\max(ECP)} \quad (3.8)$$

$$ANH' = \frac{ANH}{\max(ANH)} \quad (3.9)$$

Qualitativamente, ECP e ANH devem apresentar forte influência sobre a eficiência da técnica, mas não sobre sua eficácia. Por outro lado, valores insuficientes de PDR indicam que a técnica não está cumprindo seu principal objetivo que é a entrega de pacotes aos nós destinatários. Sendo assim, o PDR deve ser avaliado por uma função crescente que apresente um comportamento próximo a uma função degrau, a fim de suprimir o intervalo de valores considerados insuficientes. Já o ECP e o ANH, contribuindo inversamente para o desempenho da técnica, devem ser avaliados por uma função decrescente e, *a priori*, sem restrições. Dentre as diversas possibilidades, este trabalho considera as funções Equações 3.10 a 3.11 satisfatórias para cumprimento desses requisitos.

$$g(x) = [1 + e^{50(\epsilon-x)}]^{-1} \quad (3.10)$$

$$f(x) = 1.5 - 10^{0,3(x-1)} \quad (3.11)$$

A Figura 23 mostra o comportamento das funções $f(x)$ e $g(x)$ para o intervalo de interesse $0 \leq x \leq 1$.

Baseada na medida de complexidade proposta por (SHINER; DAVISON; LANDSBERG, 1999), a Equação 3.12 pode ser considerada na determinação do valor de γ para o qual se obtém a melhor relação entre consumo de energia, entrega de pacotes e latência, conforme a Equação 3.13.

$$\phi(\gamma) = g^{\mu_1}(PDR') \cdot f^{\mu_2}(ECP') \cdot f^{\mu_3}(ANH') \quad (3.12)$$

sendo μ_1 , μ_2 e μ_3 pesos que priorizam a entrega de pacotes, o consumo de energia e a latência, respectivamente. Neste trabalho, $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$.

$$\gamma' = \gamma \mid \phi(\gamma') = \max(\phi(\gamma)) \quad (3.13)$$

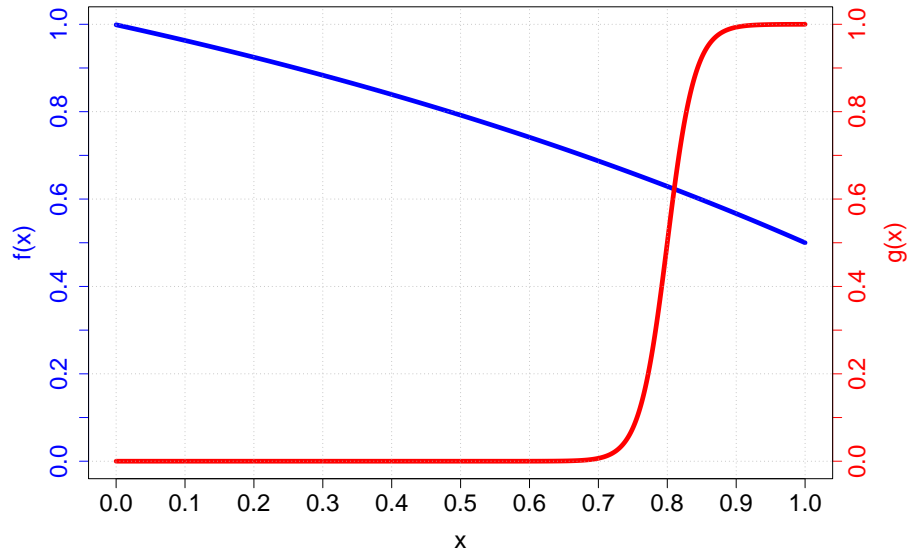


Figura 23 - Gráfico das funções $f(x)$ e $g(x)$ utilizadas na avaliação de performance das técnicas de roteamento. A função $f(x)$ apresenta comportamento decrescente, sem se anular na faixa de interesse $0 \leq x \leq 1$, considerada adequada para a avaliação do ECP e ANH. Por outro lado, a função $g(x)$ se aproxima de zero para o intervalo $x \leq 0,7$, o que foi tomado como requisito para avaliação do PDR

Tal como foi calculado, ϕ não pode ser utilizado para comparar duas técnicas, uma vez que as métricas elementares foram normalizadas com valores específicos de cada técnica. Portanto, a fim de traçar comparativos entre duas técnicas A e B , é necessário fazer:

$$PDR''_A = \frac{PDR'_A}{\max(PDR'_A, PDR'_B)} \text{ e } PDR''_B = \frac{PDR'_B}{\max(PDR'_A, PDR'_B)}, \quad (3.14)$$

$$ECP''_A = \frac{ECP'_A}{\max(ECP'_A, ECP'_B)} \text{ e } ECP''_B = \frac{ECP'_B}{\max(ECP'_A, ECP'_B)}, \quad (3.15)$$

$$ANH''_A = \frac{ANH'_A}{\max(ANH'_A, ANH'_B)} \text{ e } ANH''_B = \frac{ANH'_B}{\max(ANH'_A, ANH'_B)}. \quad (3.16)$$

Finalmente, a Equação 3.17 define o fator σ , que representa uma medida de eficiência para cada técnica e pode ser empregado na comparação de técnicas e cenários.

$$\sigma = g^{\mu_1}(PDR'') \cdot (ECP'')^{-\mu_2} \cdot (ANH'')^{-\mu_3} \Bigg|_{\gamma=\gamma'} \quad (3.17)$$

Para $\sigma_A > \sigma_B$ a técnica A se sobressai com relação à técnica B em termos de ECP, PDR e ANH.

A avaliação de desempenho por meio do cálculo de σ é simples e flexível, permitindo a atribuição de importância distinta a cada um dos fatores avaliados. Sendo composta por fatores multiplicativos, essa abordagem enfatiza a forte interdependência entre eles.

4 IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os cenários considerados para avaliação dos algoritmos via simulação, bem como os resultados obtidos.

4.1 Cenários e simulações

Os resultados foram obtidos a partir de simulações numéricas utilizando o software R (R Core Team, 2022). Esta seção trata dos detalhes considerados nas simulações: características da rede, algoritmos das técnicas de roteamento e políticas complementares.

4.1.1 Características da rede

Foram consideradas redes com densidade ρ , dada em nós por unidade de área, com nós distribuídos aleatoriamente sobre uma região 2D quadrangular com lateral de 10 mm, sem perda de generalidade para uma topologia 3D. As Figuras 24 e 25 trazem exemplos de redes deste tipo, com diferentes densidades ($\rho = 0,32$ e $\rho = 1,28$, respectivamente). Os nós de origem e destino foram escolhidos como o nó mais central e o nó mais próximo da extremidade superior direita, respectivamente.

Nas Figuras 24b e 25b são mostrados dois importantes parâmetros de rede, o grau médio e o comprimento médio, para diversos valores de γ . Por se tratar de redes aleatórias e considerando apenas nós conectados, é possível estimar tais parâmetros com as Equações 4.1 e 4.2, propostas por (WATTS; STROGATZ, 1998).

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (4.1)$$

$$\langle l \rangle = \frac{\ln N}{\ln \langle k \rangle} \quad (4.2)$$

sendo k_i o grau médio do i -ésimo nó, e N , o número total de nós na rede.

O grau médio é a média do número de nós com os quais um nó consegue se conectar diretamente. O comprimento médio é a média do número de saltos necessário para que um nó se comunique com qualquer outro nó da rede. Estes parâmetros são fortemente dependentes do alcance de transmissão (γ) do sinal emitido pelo nó. Aumentando o valor

de γ , o comprimento médio da rede é reduzido ao passo que o grau médio aumenta, chegando ao limite de cada nó poder se comunicar diretamente com todo e qualquer nó da rede ($\langle l \rangle \rightarrow 1$ e $\langle k \rangle \rightarrow N$).

Esses parâmetros são importantes para caracterização da rede e podem ser utilizados para determinação das variáveis de roteamento, o que foge do escopo deste trabalho.

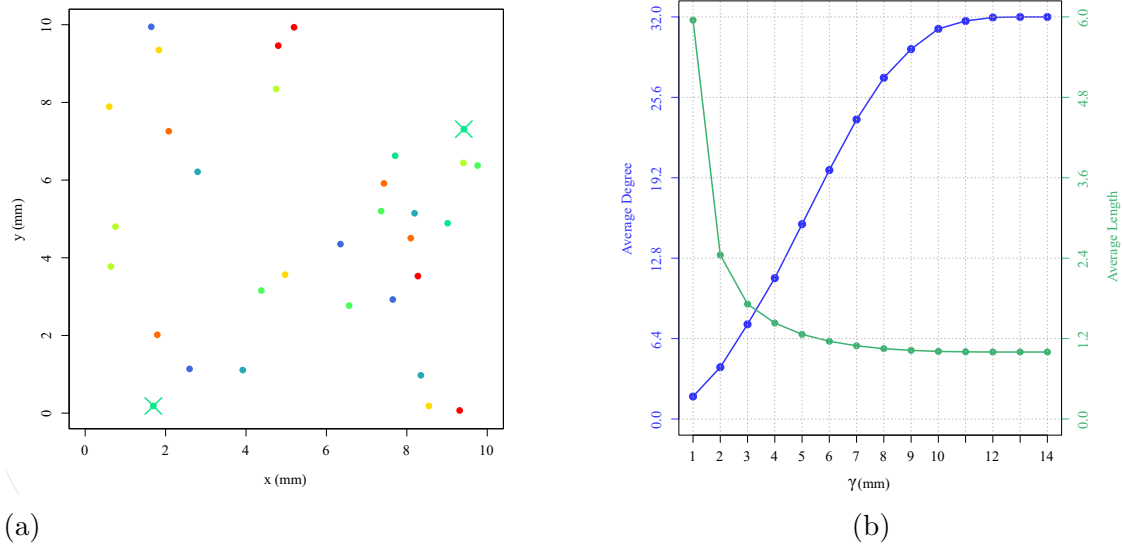


Figura 24 - Rede aleatória com $\rho = 0,32$: (a) distribuição espacial dos nós, (b) comprimento médio e grau da rede em função da distância de transmissão γ

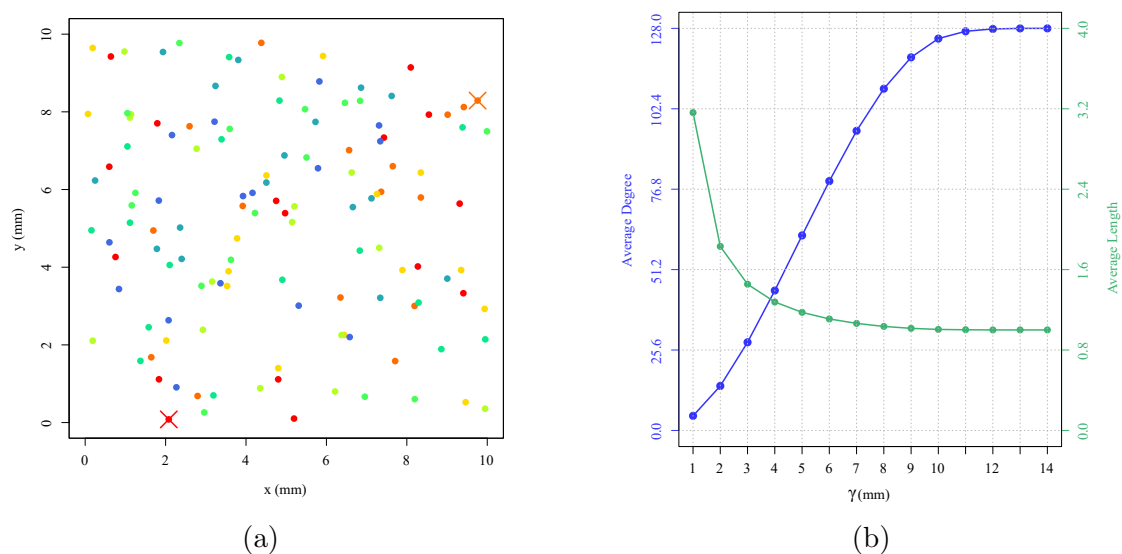


Figura 25 - Rede aleatória com $\rho = 1,28$: (a) distribuição espacial dos nós, (b) comprimento médio e grau da rede em função da distância de transmissão γ

4.1.2 Políticas de retransmissão e processamento de pacotes

Alguns trabalhos, como (BALGHUSOON; MAHFOUDH, 2020), descrevem a técnica de roteamento por *Flooding* em uma versão mais simples na qual cada nó se limita a retransmitir o pacote que recebe. A Figura 26a ilustra essa situação, onde h é o número do salto (i.e., transmissão entre dois nós) em determinada rota. O nó 3 recebe o mesmo pacote por duas rotas distintas, em saltos distintos, e o retransmite em ambas as vezes.

Outros autores, como (ABUALI *et al.*, 2018), descrevem o *Flooding* com uma importante alteração: cada nó retransmite o pacote que recebe uma única vez. Como mostrado na Figura 26b, o nó 3 retransmite o pacote após recebê-lo do nó 1, mas o descarta ao recebê-lo novamente por meio do nó 2.

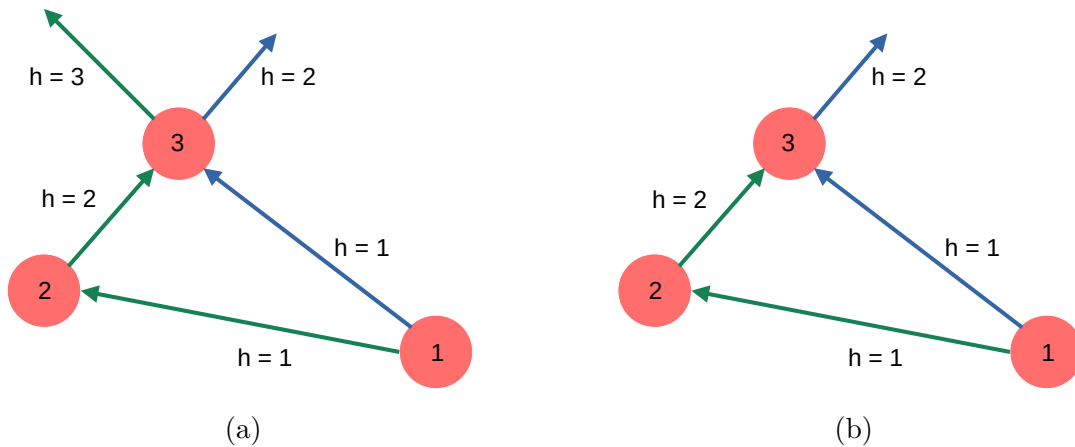


Figura 26 - Políticas de retransmissão de pacotes (a) com retransmissão múltipla e (b) sem retransmissão múltipla

Uma consequência imediata dessa modificação é a redução do consumo de energia. No entanto, pode ocorrer também uma redução na taxa de entrega de pacotes aos destinatários. Em técnicas de roteamento baseadas em rotas predefinidas, como o roteamento por FSM, várias rotas podem ser descartadas. Por exemplo, como ilustrado na Figura 27, supondo que o nó 1 precise transmitir um pacote para o nó 5 utilizando as seguintes rotas:

$$\text{A) } \boxed{1} \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow \boxed{5}$$

$$\text{B) } \boxed{1} \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow \boxed{5}$$

- no primeiro salto ($h = 1$): o nó 2 recebe o pacote do nó 1 e deve tratar a rota B como inválida, uma vez que a rota B não prevê que o nó 2 receba o pacote no primeiro salto. Portanto, o pacote é retransmitido contendo apenas a rota A. Por outro lado, o nó 3 também recebe o pacote do nó 1 e trata a rota A como inválida, por motivo análogo. Portanto, o nó 3 retransmite o pacote contendo apenas a rota B.

- no segundo salto ($h = 2$): O nó 4 recebe o pacote do nó 2 e o descarta, uma vez que a rota A não prevê que o nó 4 receba o pacote. O nó 2 recebe novamente o pacote, dessa vez através do nó 3, determina que já retransmitiu este pacote anteriormente e o descarta.

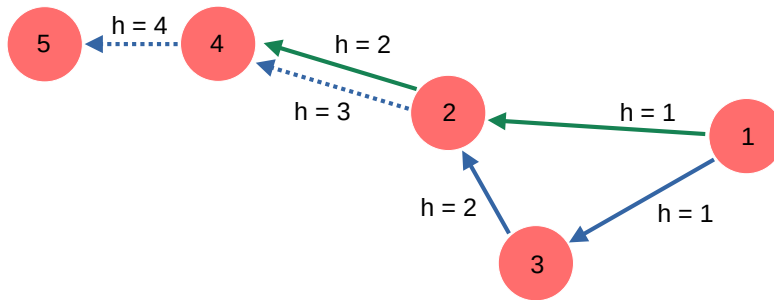


Figura 27 - Efeito da retransmissão múltipla por técnicas de roteamento baseadas em rotas predefinidas

Neste exemplo, o pacote não foi entregue ao nó destinatário. No entanto, caso a retransmissão múltipla de pacotes fosse permitida, o nó 2 teria retransmitido o pacote no terceiro salto e o nó 4 teria retransmitido o pacote no quarto salto, permitindo que o nó 5 o recebesse. Em suma, a entrega do pacote ao destinatário só seria possível através da rota B que, por sua vez, só seria válida se as retransmissões múltiplas fossem permitidas.

A Figura 28 traz resultados de simulações com e sem retransmissões múltiplas. Apesar da possibilidade de invalidação de algumas rotas, permitir retransmissões múltiplas pode ocasionar um grande número de transmissões redundantes, ou seja, que não contribuem efetivamente para a entrega de pacotes aos destinatários, mas impactam fortemente na eficiência da técnica de roteamento. Sendo assim, este trabalho considera apenas cenários sem retransmissões múltiplas.

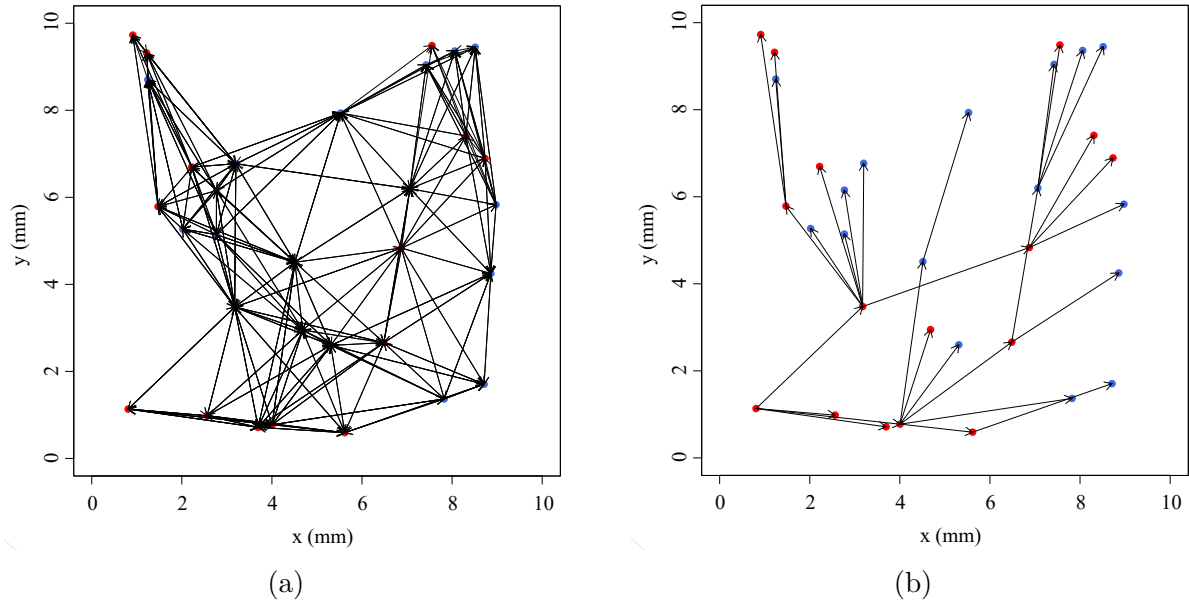


Figura 28 - Conexões entre os nós de uma rede aleatória com densidade $\rho = 0,32$: (a) com retransmissão múltipla e (b) sem retransmissão múltipla

Outro ponto importante é a possibilidade de o destinatário se reconhecer como tal a qualquer momento que receber o pacote, sem a obrigatoriedade de respeitar a sequência estipulada pelas rotas. Do exemplo anterior, se o nó destinatário (nó 5) estiver suficientemente próximo ao nó 3 de tal forma que receba o pacote no segundo salto, conforme ilustrado na Figura 29, deverá proceder com uma das seguintes possibilidades:

- A) o nó 5 descarta o pacote, uma vez que, de acordo com as rotas, só poderia recebê-lo no quarto salto ($h = 4$);
- B) o nó 5 se reconhece destinatário e processa o pacote.

Essa verificação aumenta ligeiramente o a complexidade do algoritmo de tomada de decisão, mas aumenta consideravelmente a possibilidade de entrega de pacotes. Neste trabalho, será considerada somente a segunda abordagem.

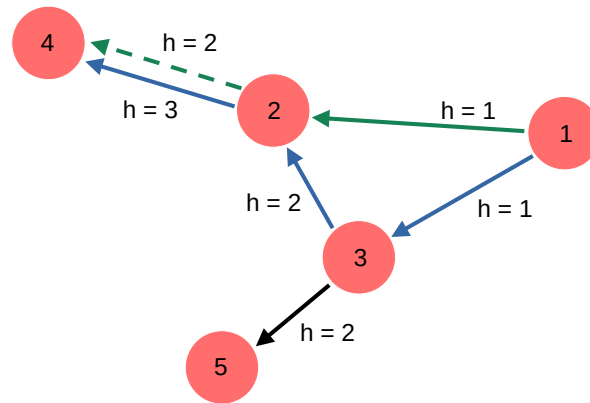


Figura 29 - Tomada de decisão pelo nó destinatário em técnicas de roteamento com rotas predefinidas: caso o nó destinatário, 5, possa se reconhecer destinatário a qualquer salto, ele irá processar o pacote ao recebê-lo no segundo salto ($h = 2$). Caso contrário, irá descartá-lo, uma vez que as rotas prevêem a entrega do pacote ao nó 5 apenas no quarto salto ($h = 4$).

4.1.3 Algoritmos

A Figura 30 traz um resumo dos algoritmos que precisam ser executados por cada nó ao receber um pacote no contexto das técnicas de roteamento por *Flooding*, FSM e T-FSM.

Na Figura 30a, o roteamento por *Flooding* é apresentado em sua forma mais simples, permitindo retransmissões múltiplas de pacotes. Na Figura 30b, é adicionada uma rotina para descarte de pacotes que já recebidos. Essa versão aprimorada do *Flooding* aumenta muito sua eficiência, sem grande prejuízo sobre sua complexidade, o que o torna um referencial bastante desafiador. O Apêndice A descreve um método eficiente de simulação do roteamento por *Flooding* via matrizes.

Neste trabalho, as técnicas de roteamento por FSM e T-FSM (Figuras 30c a 30d) são consideradas com a restrição de retransmissões múltiplas.

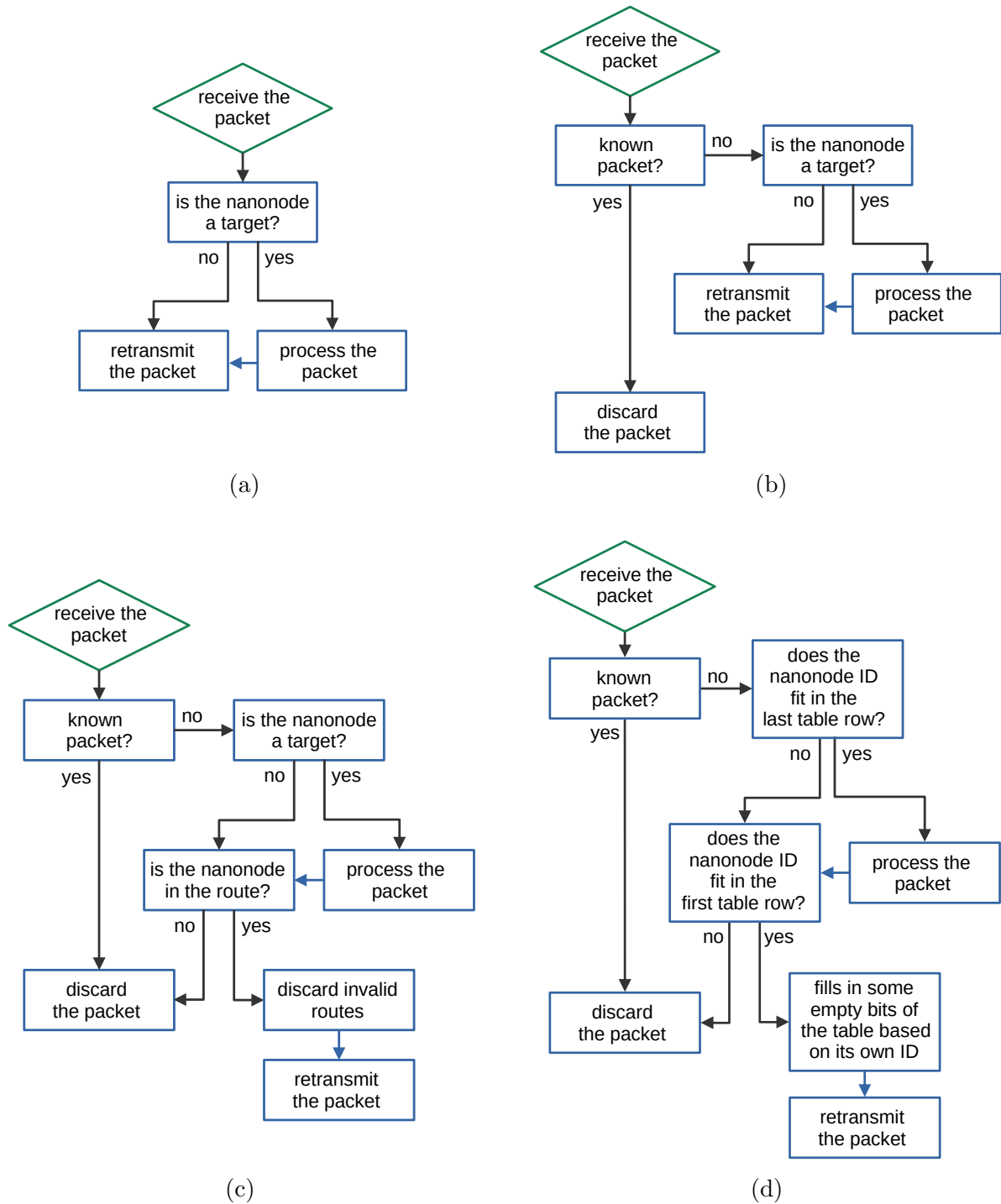


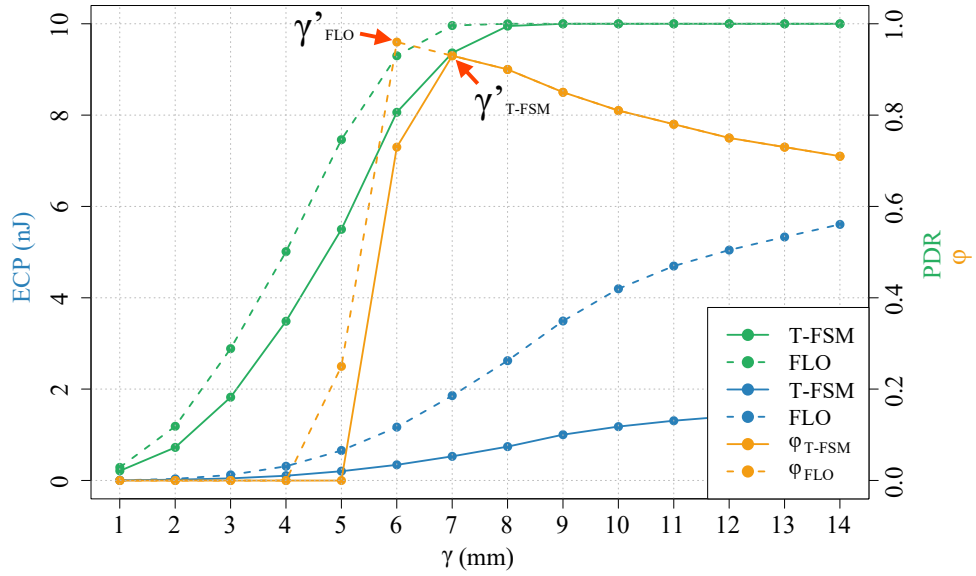
Figura 30 - Algoritmos executados por cada nó para tomada de decisão ao receber um pacote sob diferentes técnicas de roteamento: (a) *Flooding* com retransmissões múltiplas, (b) *Flooding* sem retransmissões múltiplas, (c) FSM e (d) T-FSM

4.2 Simulações e resultados

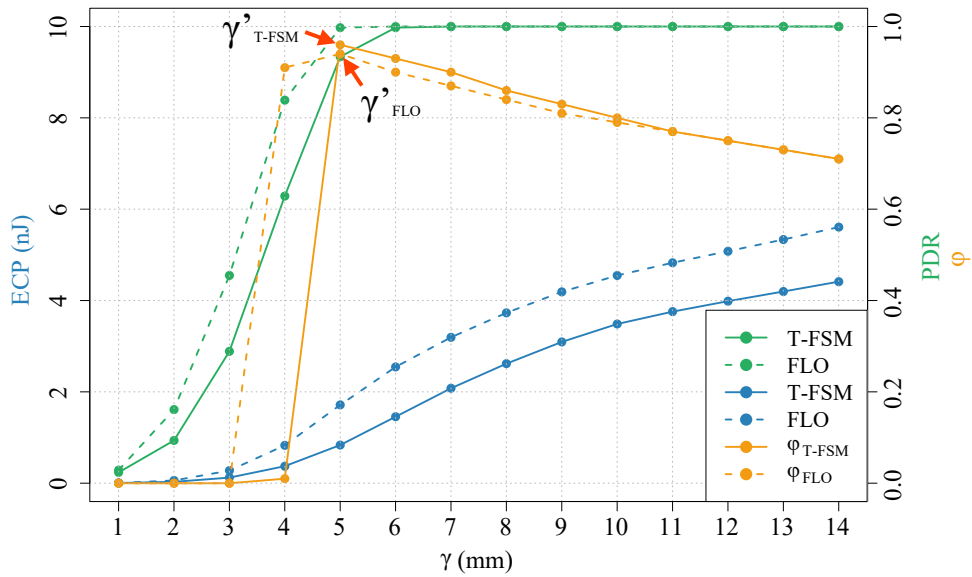
Para análise das contribuições deste trabalho, foram realizadas simulações numéricas considerando as técnicas de roteamento por FSM, T-FSM e *Flooding*. Os parâmetros de roteamento utilizados para FSM e T-FSM foram todos os pares $\{L_k; N_h\}$ para $L_k = \{1; 2; 3\}$ e $N_h = \{3; 4; 5; 6\}$. Além disso, a distância de transmissão foi considerada em $\gamma = \{1; 2; \dots; \gamma_{max}\}$, com $\gamma_{max} = \lfloor \sqrt{2 \cdot l^2} \rfloor = 14$ mm, sendo $l = 10$ mm a lateral da região de distribuição dos nós da rede.

Para demonstrar a interpretação dos resultados, a Figura 31 traz dois casos obtidos com redes de densidade $\rho = 0,32$ compostas por $N_g = 4$ grupos de nós. O ANH não está sendo considerado no cálculo de ϕ (i.e., $\mu_3 = 0$ na Equação 3.12). O ponto de máximo da curva de ϕ indica o γ para o qual a técnica apresenta melhor eficiência em termos de energia (ECP) e entrega de pacotes (PDR). Percebe-se que ϕ se mantém reduzido para a faixa de γ que resulta em PDR menor que 0,8, o que é esperado pela métrica. A amplitude de ϕ não pode ser utilizada para traçar comparativos entre as duas técnicas. Para isso é necessário calcular o σ em $\gamma = \gamma'$ para cada técnica.

Na maioria dos casos, ϕ tende a ser decrescente para toda a faixa de $\gamma > \gamma'$, uma vez que há ocorre a saturação do PDR, permanecendo o aumento exponencial do consumo de energia com γ .



(a)



(b)

Figura 31 - Exemplos de resultados obtidos via simulação mostrando o comportamento dos parâmetros PDR, ECP e Φ versus γ ($\rho = 0,32$, $N_g = 4$): (a) $L_k = 1$, $N_h = 5$, (b) $L_k = 3$, $N_h = 6$

Resultados obtidos por meio de estudos estatísticos de um conjunto de N amostras devem ser interpretados levando em conta as margens de erro às quais estão sujeitos. Considerando o conjunto de amostras $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, a média e o intervalo em torno da média onde as amostras podem estar distribuídas com certo grau de confiança podem ser calculados e representados conforme a Equação 4.3.

$$\bar{x} \pm Z_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.3)$$

sendo $Z_{\alpha/2}$ o valor crítico da distribuição normal para a porcentagem de confiança desejada, N o número de amostras, \bar{x} a média das amostras calculada com a Equação 4.4 e s o desvio padrão das amostras calculado com a Equação 4.5.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^N x_k}{N} \quad (4.4)$$

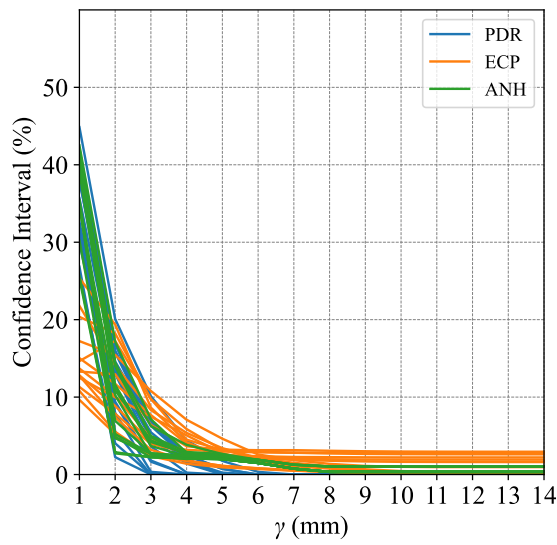
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2}{N}} \quad (4.5)$$

Finalmente, a porcentagem com a qual os resultados podem se desviar da média amostral, para mais ou para menos, pode ser estimada com a Equação 4.6.

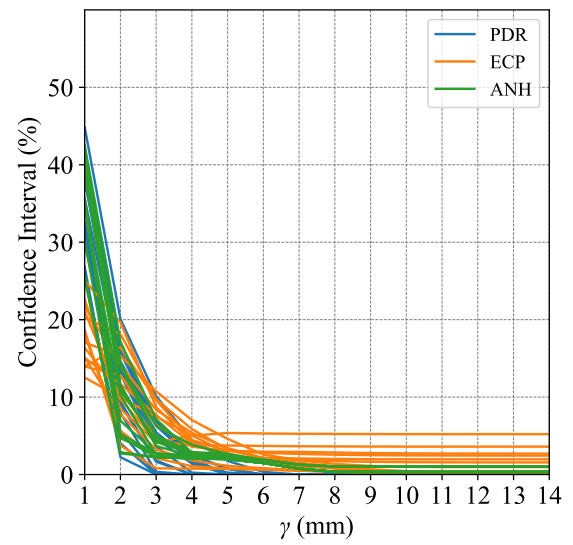
$$\text{Confidence Interval (\%)} = 100 \cdot \frac{1}{\bar{x}} \cdot \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) \quad (4.6)$$

Os conjuntos dos parâmetros N_h e L_k utilizados contabilizam 12 cenários. Foram consideradas redes com duas densidades diferentes e 3 abordagens de agrupamento dos nós. Portanto, foram levantadas $12 \times 2 \times 3 = 72$ *situações*. Cada situação foi avaliada pela média dos resultados obtidos com a simulação de 100 redes aleatórias distintas. Nesses casos, o valor obtido da Equação 4.6 varia em função de γ , uma vez que a variabilidade dos resultados tende a diminuir para valores maiores desse parâmetro.

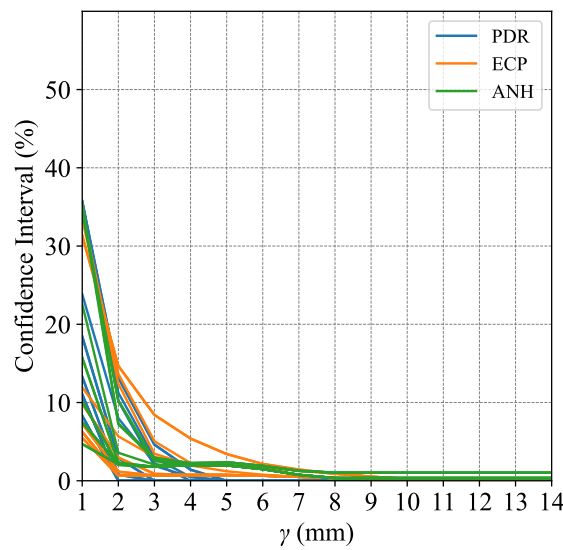
A Figura 32 traz as curvas do intervalo de confiança percentual de todas as *situações* avaliadas para cada técnica de roteamento considerando confiabilidade de 95% ($Z_{\alpha/2} = 1,96$). Percebe-se, por exemplo, que para $\gamma \geq 5$ mm, os resultados se encontram em uma faixa com no máximo $\pm 5\%$ de variação da média amostral.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 - Intervalo de confiança percentual dos resultados das simulações com (a) FSM, (b) T-FSM e (c) *Flooding*

Da Equação 3.12, os fatores μ_1 , μ_2 e μ_3 podem ser utilizados para definir cenários nos quais determinado parâmetro não constitui um ponto crítico para a operação. Por exemplo, com $\mu_3 = 0,00$, o ANH é totalmente desconsiderado do cálculo de ϕ , o que representa o caso de aplicação em que a latência na entrega do pacote não é relevante. De

forma análoga, $\mu_2 = 0,00$ caracteriza situações onde o consumo de energia não é pertinente, como no caso em que há alimentação dos nós via ondas eletromagnéticas (WPT).

A Tabela 8 traz um resumo dos parâmetros considerados nas simulações.

Tabela 8 - Parâmetros de simulação

Número de redes aleatórias	100
Distância de transmissão	$1 \text{ mm} \leq \gamma \leq 14 \text{ mm}$
Área de distribuição dos nós	10 mm x 10 mm
Tamanho da sequência de entrada	$1 \leq L_k \leq 3$
Número de saltos	$3 \leq N_h \leq 6$

A Figura 33 indica os cenários de estudo considerados e sumariza os resultados apresentados nas Tabelas 9 a 13. Nessas tabelas, as colunas referentes ao *Flooding* trazem os valores das métricas elementares (PDR, ECP e ANH) juntamente com o σ e o valor de γ utilizado. Cada técnica foi considerada no ponto de operação de maior eficiência, ou seja, em $\gamma = \gamma'$ (cf. Equação 3.13). Também, dentre todas as configurações consideradas para N_h e L_k , somente os melhores resultados são apresentados. Além disso, se tratando de variáveis de projeto, os valores desses parâmetros foram omitidos. Para evidenciar a comparação entre as técnicas, as colunas referentes à FSM e à T-FSM trazem os resultados como porcentagens em relação ao *Flooding*. As células em azul nas colunas de FSM e T-FSM indicam um melhor desempenho em comparação com o *Flooding*. Por outro lado, as células em vermelho indicam um pior desempenho dessas técnicas em comparação com o *Flooding*.


<p>A) $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.33$</p> <p>B) $\mu_1 = \mu_2 = 0.15$ $\mu_3 = 0.7$</p> <p>C) $\mu_1 = \mu_3 = 0.15$ $\mu_2 = 0.7$</p> <p>D) $\mu_1 = \mu_3 = 0.5$ $\mu_2 = 0$</p> <p>E) $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$ $\mu_3 = 0$</p>	<p>1) $\rho = 0.32$</p> <p>2) $\rho = 2.56$</p>	<p>a) $N_G = N$ without node clustering</p> <p>b) $N_G = N / 8$ reach all of the target nodes</p> <p>c) $N_G = N / 8$ reach at least one of the target nodes</p>
---	---	--

Figura 33 - Sumário dos cenários de avaliação

A Tabela 9 traz os resultados para o cenário em que se é dada igual importância ao PDR, ECP e ANH. As técnicas por FSM e T-FSM apresentam melhores resultados em todos os casos. Resultados mais expressivos são notados em redes mais densas, nas quais a redução do número de transmissões se torna um ponto ainda mais crítico e seus efeitos sobre o PDR são reduzidos, o que favorece as técnicas por FSM e T-FSM. Além disso, considerando a possibilidade de agrupamento dos nós, percebe-se que as técnicas por FSM e T-FSM se sobressaem de forma mais evidente para o caso em que o objetivo é atingir ao menos um nó do grupo de destino.

Tabela 9 - Resultados para os cenários em que foi dada igual importância às métricas elementares PDR , ECP e ANH : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,33$

	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
A.1.a	6	-15,00%	-91,21%	-4,67%	114,84%	6	-15,00%	-90,77%	-4,67%	111,37%	7	1,00	3,30	1,07	6,00
A.1.b	6	-0,25%	-64,47%	-15,06%	48,37%	6	-0,25%	-63,66%	-15,06%	47,27%	5	1,00	2,00	1,32	3,29
A.1.c	3	-8,00%	-94,93%	0,16%	160,15%	3	-8,00%	-94,85%	0,16%	158,70%	5	1,00	2,00	1,32	3,29
A.2.a	7	-2,00%	-96,30%	-47,00%	263,44%	7	-2,00%	-95,93%	-47,00%	252,42%	4	1,00	89,77	2,00	2,44
A.2.b	5	-0,88%	-86,57%	-32,60%	120,28%	5	-0,88%	-85,87%	-32,60%	116,65%	3	1,00	53,73	1,94	5,38
A.2.c	2	-16,00%	-98,82%	-29,99%	358,99%	2	-16,00%	-98,72%	-29,99%	346,94%	3	1,00	53,73	1,94	5,38


a) $N_G = N$ **b)** $N_G = N/8$ reach all **c)** $N_G = N/8$ reach at least one
1) $\rho = 0.32$ **2)** $\rho = 2.56$
A) $\mu_1 = 0.33, \mu_2 = 0.33, \mu_3 = 0.33$

Na Tabela 10, a latência na entrega dos pacotes (ANH) foi priorizada frente ao consumo de energia (ECP) e à entrega dos pacotes (PDR). As técnicas por FSM e T-FSM apresentam melhores resultados em todos os casos. Por sua natureza, o ANH tende a não variar tão expressivamente quanto os outros fatores, o que reduz as vantagens sobre o *Flooding* em comparação com o cenário anterior. Ainda assim, as técnicas por FSM e T-FSM se mostram ao menos 20% superiores ao *Flooding*.

Tabela 10 - Resultados para o caso em que a latência (*ANH*) foi priorizado sobre *PDR* e *ECP*: $\mu_1 = \mu_2 = 0,15$, $\mu_3 = 0,70$

	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
B.1.a	8	0,00%	-89,91%	0,00%	41,07%	8	0,00%	-89,40%	0,00%	40,02%	8	1,00	3,88	1,00	2,34
B.1.b	7	0,00%	-71,78%	0,00%	20,90%	7	0,00%	-71,12%	0,00%	20,48%	7	1,00	3,18	1,05	1,75
B.1.c	7	0,00%	-71,78%	0,00%	20,90%	7	0,00%	-71,12%	0,00%	20,48%	7	1,00	3,18	1,05	1,75
B.2.a	8	0,00%	-98,00%	-6,54%	88,56%	8	0,00%	-97,77%	-6,54%	85,54%	7	1,00	195,34	1,07	1,33
B.2.b	7	0,00%	-93,14%	0,00%	49,48%	7	0,00%	-92,79%	0,00%	48,35%	7	1,00	187,69	1,01	2,49
B.2.c	7	0,00%	-93,14%	0,00%	49,48%	7	0,00%	-92,79%	0,00%	48,35%	7	1,00	187,69	1,01	2,49

- a)** $N_G = N$ **b)** $N_G = N/8$ reach all **c)** $N_G = N/8$ reach at least one
1) $\rho = 0.32$ **2)** $\rho = 2.56$
B) $\mu_1 = 0.15$, $\mu_2 = 0.15$, $\mu_3 = 0.70$

Na Tabela 11, o consumo de energia é considerado o fator principal, sendo priorizado frente à latência e à entrega de pacotes. Este cenário contém o único caso (C.1.c) em que o *Flooding* apresenta uma pequena vantagem sobre as técnicas por FSM e T-FSM. Trata-se de redes pouco densas, onde a simplicidade de implementação do *Flooding* se torna mais relevante do que a redução do número de transmissões. Por outro lado, todos os outros casos, principalmente com redes mais densas, resultam em vantagem das técnicas por FSM sobre o *Flooding*, com σ até 395% superior.

Tabela 11 - Resultados para o caso em que *ECP* foi priorizado sobre *PDR* e *ANH*: $\mu_2 = \mu_3 = 0,15$, $\mu_1 = 0,70$


	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
C.1.a	6	-5,56%	-66,75%	-41,38%	132,20%	6	-5,56%	-65,07%	-41,38%	124,32%	4	0,90	0,87	1,74	55,36
C.1.b	5	5,27%	-28,13%	-36,63%	35,98%	5	5,27%	-26,57%	-36,63%	33,96%	3	0,90	0,67	2,02	18,16
C.1.c	2	0,00%	7,00%	0,00%	-4,63%	2	0,00%	8,04%	0,00%	-5,27%	2	0,83	0,07	1,30	98,17
C.2.a	7	8,89%	-86,57%	-70,47%	395,80%	7	8,89%	-85,25%	-70,47%	364,44%	2	0,90	24,75	3,59	7,53
C.2.b	4	-11,38%	-85,23%	-46,06%	310,97%	4	-11,38%	-84,47%	-46,06%	296,79%	2	1,00	26,29	2,78	32,49
C.2.c	2	-1,18%	-48,51%	-46,10%	74,30%	2	-1,18%	-44,19%	-46,10%	64,73%	1	0,85	1,24	2,52	273,43

- a)** $N_G = N$ **b)** $N_G = N/8$ reach all **c)** $N_G = N/8$ reach at least one
1) $\rho = 0.32$ **2)** $\rho = 2.56$
C) $\mu_1 = 0.70$, $\mu_2 = 0.15$, $\mu_3 = 0.15$

Na Tabela 12, o consumo de energia é totalmente ignorado frente à entrega de pacotes e à latência ($\mu_2 = 0,00$). Todas as técnicas alcançaram os melhores valores para PDR e ANH às custas de um elevado consumo de energia, apresentando máximo desempenho.

Tabela 12 - Resultados para o caso em que *ECP* não é levado em conta: $\mu_1 = \mu_3 = 0,50$, $\mu_2 = 0,00$


	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
D.1.a	8	0,00%	-89,91%	0,00%	0,00%	8	0,00%	-89,40%	0,00%	0,00%	8	1,00	3,88	1,00	1,00
D.1.b	9	0,00%	-72,23%	0,00%	0,00%	9	0,00%	-71,55%	0,00%	0,00%	9	1,00	4,19	1,03	1,00
D.1.c	9	0,00%	-72,23%	0,00%	0,00%	9	0,00%	-71,55%	0,00%	0,00%	9	1,00	4,19	1,03	1,00
D.2.a	8	0,00%	-97,85%	0,00%	0,00%	8	0,00%	-97,56%	0,00%	0,00%	8	1,00	224,01	1,00	1,00
D.2.b	8	0,00%	-93,20%	0,00%	0,00%	8	0,00%	-92,85%	0,00%	0,00%	8	1,00	215,48	1,00	1,00
D.2.c	8	0,00%	-93,20%	0,00%	0,00%	8	0,00%	-92,85%	0,00%	0,00%	8	1,00	215,48	1,00	1,00

- 
a) $N_G = N$ **b)** $N_G = N/8$ reach all **c)** $N_G = N/8$ reach at least one
1) $\rho = 0.32$ **2)** $\rho = 2.56$
D) $\mu_1 = 0.50$, $\mu_2 = 0.00$, $\mu_3 = 0.50$

Por fim, a Tabela 13 traz os resultados para o cenário em que a latência na entrega dos pacotes não é um fator relevante. As técnicas por FSM apresentaram melhores resultados em todas as situações, especialmente em redes mais densas sem agrupamento de nós ou com agrupamento de nós e objetivo de alcançar todos os nós do grupo de destino.

Tabela 13 - Resultados para o caso em que *ANH* não é levado em conta: $\mu_1 = \mu_2 = 0,50$, $\mu_3 = 0,00$

	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
E.1.a	7	7,69%	-60,25%	-61,57%	64,60%	7	7,69%	-58,22%	-61,57%	60,56%	3	0,91	0,87	2,68	16,38
E.1.b	5	5,27%	-28,13%	-36,63%	21,02%	5	5,27%	-26,57%	-36,63%	19,74%	3	0,90	0,67	2,02	4,97
E.1.c	3	-1,08%	-23,94%	-31,63%	14,05%	3	-1,08%	-22,64%	-31,63%	13,08%	2	0,93	0,13	1,93	5,64
E.2.a	7	-2,00%	-87,81%	-74,08%	183,57%	7	-2,00%	-86,62%	-74,08%	170,64%	2	1,00	27,28	4,09	4,07
E.2.b	4	-10,14%	-83,70%	-45,46%	134,82%	4	-10,14%	-82,87%	-45,46%	129,00%	2	0,99	23,82	2,75	6,18
E.2.c	2	-4,35%	-43,24%	-45,51%	29,81%	2	-4,35%	-35,26%	-45,51%	21,55%	1	0,92	2,02	3,30	20,51

- 
a) $N_G = N$ **b)** $N_G = N/8$ reach all **c)** $N_G = N/8$ reach at least one
1) $\rho = 0.32$ **2)** $\rho = 2.56$
E) $\mu_1 = 0.50$, $\mu_2 = 0.50$, $\mu_3 = 0.00$

Em praticamente todos os cenários apresentados, o roteamento por T-FSM apresentou resultados superiores ao roteamento por FSM, chegando a uma vantagem de 30% considerando a medida de eficiência por σ . No entanto, essa vantagem foi sutil, não sendo evidenciadas as limitações da implementação original da técnica por FSM. De fato, existem cenários mais apropriados para ressaltar esses pontos. Por exemplo, com regiões maiores ou com limitações aos valores de γ . Nessas circunstâncias, seria necessário explorar uma faixa maior para os parâmetros do roteamento por FSM, o que implicaria em um aumento do número de rotas e conseqüente aumento do tamanho do pacote.

Para análise desses cenários, a complexidade computacional se torna bastante elevada, o que no contexto deste trabalho foi um impeditivo para uma exploração mais detalhada. No entanto, a Tabela 14 traz dois exemplos utilizando redes de densidades $\rho = 0,32$ e $\rho = 2,56$, distribuídas em uma região quadrada com lateral $l = 20$ mm. Os parâmetros de roteamento utilizados para FSM e T-FSM foram todos os pares $\{L_k; N_h\}$ para $L_k = \{1; 2; 3\}$ e $N_h = \{5; 6; 7; 8\}$. A distância de transmissão foi avaliada em $\gamma = \{1; 2; \dots; \gamma_{max}\}$, limitando em $\gamma_{max} = 7$ mm. Não foi considerado agrupamento de nós ($N_G = N$).

Nos dois casos, o roteamento por T-FSM superou o roteamento por *Flooding*, alcançando uma eficiência até 78,94% superior em redes mais densas. Já a implementação original do roteamento por FSM apresentou grande desvantagem em comparação com o *Flooding*, com uma eficiência até 83% inferior.

Tabela 14 - Resultados de cenários especiais com igual importância às métricas elementares *PDR*, *ECP* e *ANH*: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0,33$

ρ	γ'	T-FSM				γ'	FSM				γ'	Flooding			
		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ		PDR	ECP	ANH	σ
0,32	7	-12,00%	-0,01%	-4,60%	0,97%	7	-20,00%	2500,02%	-18,10%	-83,57%	5	1,00	3,30	1,07	6,00
2,56	7	-15,00%	-79,88%	-21,25%	78,94%	7	-15,00%	728,31%	-21,25%	-47,53%	4	1,00	450,49	4,00	4,18

A Figura 34 mostra o tamanho médio do pacote ao longo da transmissão para as três técnicas de roteamento estudadas. Para as técnicas por FSM, ocorre uma redução no tamanho do pacote devida ao descarte de rotas inválidas. No roteamento por T-FSM, o tamanho do pacote se mantém ao nível do roteamento por *Flooding*, chegando a uma redução maior que 99% para $L_k = 4$.

Com a utilização de ultra-nano-capacitores de 800 pJ para armazenamento de energia em nanodispositivos (JORNET, 2012), e a partir do modelo de energia apresentado na Seção 3.3, seria necessário 0,5 nJ para transmissão de 1 pulso a uma distância de

$\gamma_{max} = 7$ mm. Considerando a modulação TS-OOK, pela qual apenas a transmissão de bits 1 consome energia, e assumindo uma razão entre bits 0 e 1 de $W = 0,5$, um ciclo de carga do capacitor seria suficiente para transmissão de 3200 bits, o que sugere que, em muitos casos de L_k e N_h , um ciclo de carga não seja suficiente para transmissão de um único pacote utilizando o roteamento por FSM.

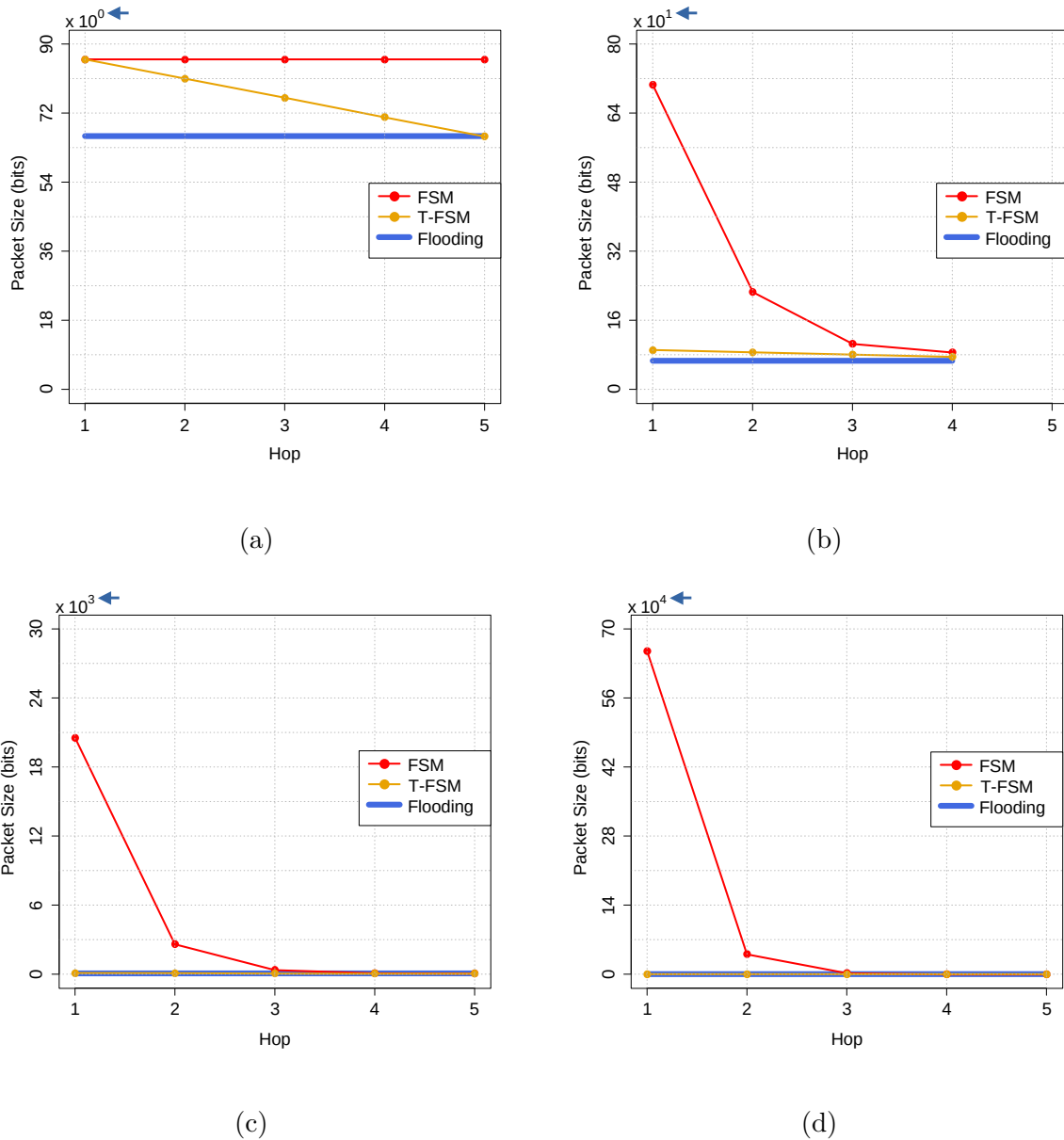


Figura 34 - Tamanho do pacote ao longo da transmissão para diferentes técnicas de roteamento ($\rho = 0,32$, $N_g = 32$, $N_h = 5$) para (a) $L_k = 1$, (b) $L_k = 2$, (c) $L_k = 3$ e (d) $L_k = 4$

4.2.1 Desempenho dos algoritmos de roteamento

Tomando a técnica de *Flooding* como referência, o roteamento por FSM apresentou melhor desempenho em grande parte das situações consideradas, especialmente em redes mais densas e quando o consumo de energia é avaliado. Também na maioria dos casos, o agrupamento de nós não aumentou a vantagem da FSM. Diferente da implementação original do roteamento por FSM, a T-FSM se mostrou superior até em cenários mais desafiadores, com redes maiores e γ limitado, ao passo que a implementação original do roteamento por FSM se mostrou ineficiente.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma visão geral do estado da arte a respeito de nanodispositivos e nanoredes, com foco em técnicas de roteamento e no roteamento por máquina de estados finitos. Foram identificadas situações em que a abordagem original da técnica seria ineficiente ou ineficaz e, a partir disso, foi proposta uma nova implementação mais versátil e eficiente. As técnicas foram avaliadas em simulações numéricas tomando como referência uma versão aprimorada do roteamento por *Flooding*, que constitui um cenário consideravelmente desafiador. Os resultados mostraram superioridade do roteamento por FSM em praticamente todos os casos considerados, com vantagem de até 395% em termos de eficiência energética. Foram propostos e discutidos modelos e políticas complementares para as simulações, bem como uma nova métrica para avaliação de desempenho considerando entrega de pacotes, consumo de energia e latência.

Dos objetivos listados na Seção 1.2, a nova métrica para identificação dos melhores parâmetros de roteamento e avaliação de desempenho (*O1*) foi construída na Seção 3.4. O modelo de energia com condição inicial baseada em trabalhos anteriores (*O2*) foi desenvolvido na Seção 3.3. A nova implementação da técnica de roteamento por FSM (*O3*) foi apresentada na Seção 3.1. Finalmente, a avaliação de desempenho das técnicas de roteamento por FSM e T-FSM em comparação com o *Flooding* (*O4*) e a possibilidade de agrupamento de nós (*O5*) compõem os resultados apresentados na Seção 4.2.

Trabalhos futuros poderão avaliar de forma mais precisa o desempenho do roteamento por T-FSM utilizando simuladores de rede. É importante considerar o comparativo com outras técnicas de roteamento além do *Flooding*, cenários tridimensionais e a mobilidade dos nanonós. A métrica apresentada neste trabalho aponta os parâmetros de roteamento com os quais são obtidos os melhores resultados em cada situação, o que pode ser útil no treinamento de uma *Inteligência Artificial* (IA) para previsão dos parâmetros que levem a uma otimização dos resultados. A vantagem da T-FSM sobre a implementação original do roteamento por FSM será mais evidente conforme novos cenários forem considerados. Regiões geograficamente mais extensas devem exigir novas etapas de geração e transmissão de rotas, o que deve evidenciar tais resultados. Além disso, considerando os limites de armazenamento de energia por parte dos nanodispositivos, restrições poderão ser

aplicadas à distância de transmissão, γ , acarretando na necessidade de considerar valores diversificados para os parâmetros de roteamento, o que também deve reforçar a superioridade da nova implementação. Por fim, as possibilidades provenientes do roteamento por T-FSM (Seção 3.1.2) precisam ser exploradas.

APÊNDICE A – SIMULAÇÃO DO ROTEAMENTO POR *FLOODING* VIA MATRIZES

Este apêndice traz uma implementação eficiente do roteamento por *Flooding* utilizando matrizes.

Considerando uma rede aleatória com N nós distribuídos em uma superfície 2D e dispondo das coordenadas de cada um desses nós, é possível produzir a *matriz de distâncias*, D , de dimensão $N \times N$, composta pelas distâncias entre os nós. Cada linha e coluna da matriz representa um nó e cada cruzamento entre linha e coluna comporta a distância entre o nó representado pela linha e o nó representado pela coluna. Sendo assim, os elementos dessa matriz podem ser calculados da seguinte forma:

$$D_{i,j} = \begin{cases} | \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} | & \text{se } i \neq j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

sendo (x_i, y_i) as coordenadas do nó representado pela linha i e (x_j, y_j) as coordenadas do nó representado pela coluna j . A Figura 35 traz um exemplo da construção da matriz D para a rede de três nós apresentada.

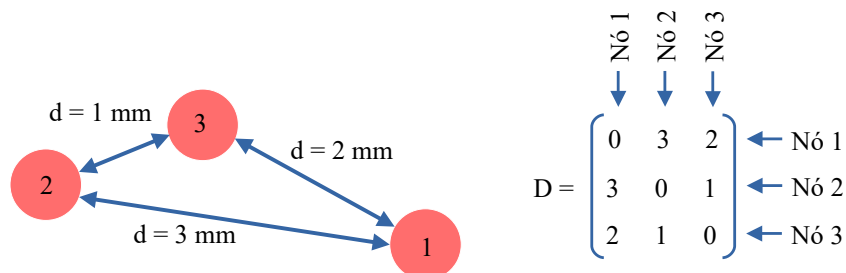


Figura 35 - Construção da matriz D

Se os nós são capazes de se comunicar a uma distância máxima d_{max} , é possível construir a *matriz de conexões*, C , a partir da matriz de distâncias, D , da seguinte forma:

$$C_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 < D_{i,j} \leq d_{max} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Dessa forma, $C_{i,j} = 1$ indica que, enviando sinais a uma distância d_{max} , o nó i conseguirá se comunicar com o nó j . Caso contrário, se $C_{i,j}$ for igual a 0, os nós estão distantes o suficiente para que não haja conexão direta entre eles. A Figura 36 ilustra a construção da matriz C para o exemplo anterior.

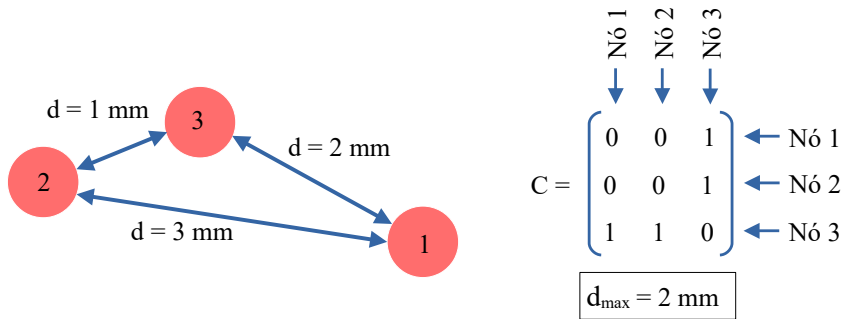


Figura 36 - Construção da matriz C ($d_{max} = 2$ mm)

Caso o nó i inicie a transmissão de um pacote, a estatística de entrega de pacotes no primeiro salto é dada pela linha i da matriz C . Do exemplo anterior, supondo que o nó 2 inicie a transmissão, o resultado após o primeiro salto será a linha 2 da matriz C , conforme ilustrado na Figura 37a. Portanto, o nó 3 recebe o pacote 1 vez.

Para determinar o resultado do segundo salto, basta multiplicar o resultado do primeiro salto pela própria matriz C . Esse processo deve se repetir pela quantidade de saltos permitidos. De forma genérica, o resultado da transmissão no h -ésimo salto pode ser escrito como:

$$R(h) = C_{i,*} \times C^{h-1}, \quad (\text{A.1})$$

sendo R uma matriz de dimensão $1 \times N$ cujas colunas representam os N nós da rede e os elementos indicam o número de vezes que cada nó recebeu o pacote no h -ésimo salto.

No segundo salto, o nó 3 retransmite o pacote e os nós 1 e 2 o recebem, como mostrado na Figura 37b. Por fim, no terceiro salto, os nós 1 e 2 retransmitem o pacote e o nó 3 o recebe duas vezes, como na Figura 37c.

Esse processo de multiplicação de matrizes deve ser feito tantas vezes quanto for o número de saltos permitidos.

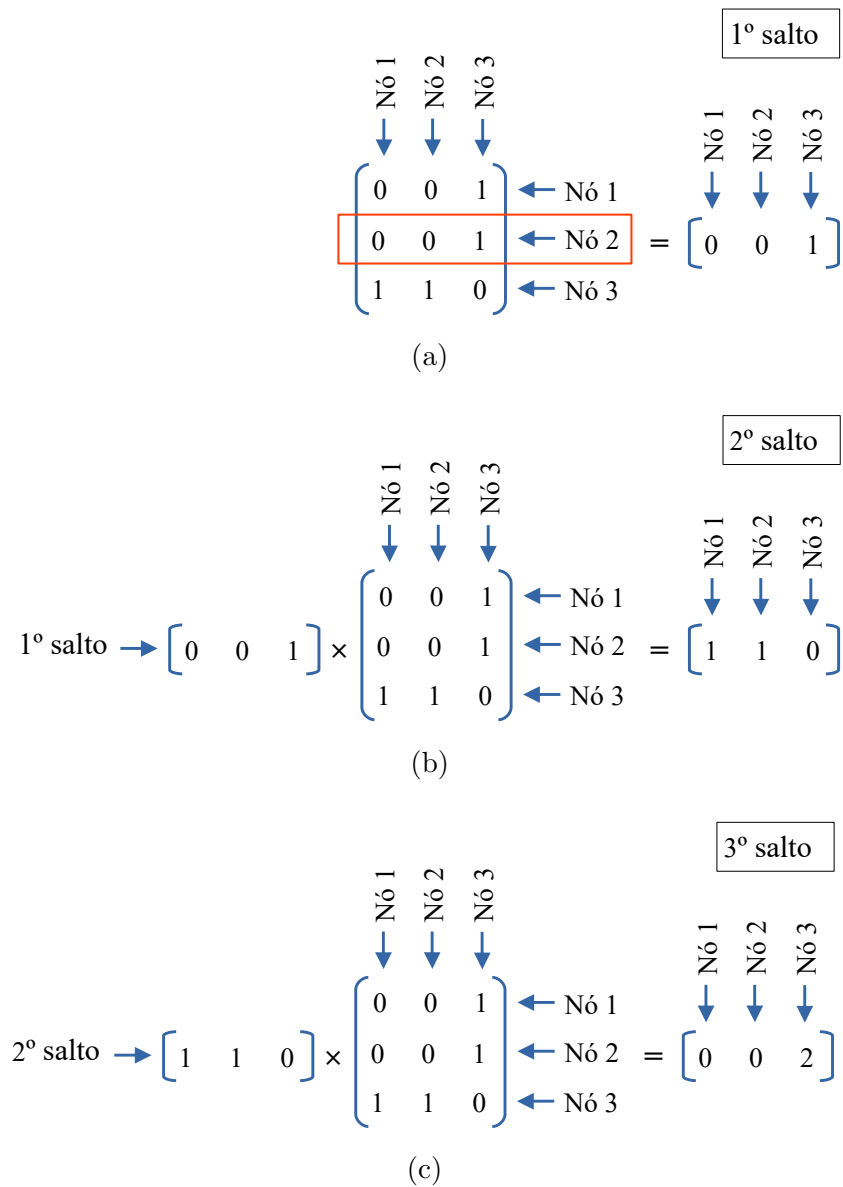


Figura 37 - Processo de simulação do roteamento *Flooding* por matrizes ($d_{max} = 2$ mm)

REFERÊNCIAS

- ABUALI, N.; ALEYADEH, S.; DJEBBAR, F.; ALOMAINY, A.; ALMAAZMI, M. M. A.; GHAIITHI, S. A. Performance evaluation of routing protocols in electromagnetic nanonetworks. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 35908–35914, 2018.
- AFSANA, F.; ASIF-UR-RAHMAN, M.; AHMED, M. R.; MAHMUD, M.; KAISER, M. S. An energy conserving routing scheme for wireless body sensor nanonetwork communication. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 9186–9200, 2018.
- AFSANA, F.; JAHAN, N.; KAISER, M. An energy efficient cluster based forwarding scheme for body area network using nano-scale electromagnetic communication. In: IEEE. *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*. [S.l.], 2015. p. 491–494.
- AFSANA, F.; MAMUN, S.; KAISER, M.; AHMED, M. Outage capacity analysis of cluster-based forwarding scheme for body area network using nano-electromagnetic communication. In: IEEE. *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*. [S.l.], 2015. p. 383–388.
- AGOULMINE, N.; KIM, K.; KIM, S.; RIM, T.; LEE, J.-S.; MEYYAPPAN, M. Enabling communication and cooperation in bio-nanosensor networks: toward innovative healthcare solutions. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 19, n. 5, p. 42–51, 2012.
- AKYILDIZ, I. F.; BRUNETTI, F.; BLÁZQUEZ, C. Nanonetworks: A new communication paradigm. *Computer Networks*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2260–2279, 2008.
- AKYILDIZ, I. F.; JORNET, J. M. Electromagnetic wireless nanosensor networks. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 3–19, 2010.
- AKYILDIZ, I. F.; JORNET, J. M. The internet of nano-things. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 58–63, 2010.
- AKYILDIZ, I. F.; JORNET, J. M.; HAN, C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. *Physical Communication*, Elsevier, v. 12, p. 16–32, 2014.
- AKYILDIZ, I. F.; PIEROBON, M.; BALASUBRAMANIAM, S.; KOUCHERYAVY, Y. The internet of bio-nano things. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 53, n. 3, p. 32–40, 2015.
- AL-TURJMAN, F. A rational data delivery framework for disaster-inspired internet of nano-things (iont) in practice. *Cluster Computing*, Springer, v. 22, n. 1, p. 1751–1763, 2019.
- AL-TURJMAN, F. A cognitive routing protocol for bio-inspired networking in the internet of nano-things (iont). *Mobile Networks and Applications*, Springer, v. 25, n. 5, p. 1929–1943, 2020.

- ALIOUAT, L.; MABED, H.; BOURGEOIS, J. Flexible multipoint-to-multipoint routing protocol in ultra-dense nanonetworks. In: *Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 81–87.
- ALIOUAT, L.; MABED, H.; BOURGEOIS, J. Efficient routing protocol for concave unstable Terahertz nanonetworks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 179, p. 107375, 2020.
- AMATO, C.; BONET, B.; ZILBERSTEIN, S. Finite-state controllers based on Mealy machines for centralized and decentralized pomdps. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 24, n. 1.
- AMAZONAS, J. R. de A.; HESSELBACH, X.; GIOZZA, W. F. Low complexity nano-networks routing scenarios and strategies. *Nano Communication Networks*, Elsevier, p. 100349, 2021.
- ANGIONE, C.; CARAPEZZA, G.; COSTANZA, J.; LIÓ, P.; NICOSIA, G. Design and strain selection criteria for bacterial communication networks. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 4, n. 4, p. 155–163, 2013.
- ARRABAL, T.; BÜTHER, F.; DHOUTAUT, D.; DEDU, E. Congestion control by deviation routing in electromagnetic nanonetworks. In: *Proceedings of the Sixth Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- ARRABAL, T.; DHOUTAUT, D.; DEDU, E. Efficient multi-hop broadcasting in dense nanonetworks. In: IEEE. *2018 IEEE 17th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. [S.l.], 2018. p. 1–9.
- ATAKAN, B.; AKAN, O. B. On channel capacity and error compensation in molecular communication. In: *Transactions on computational systems biology X*. [S.l.]: Springer, 2008. p. 59–80.
- BALASUBRAMANIAM, S. *et al.* Opportunistic routing through conjugation in bacteria communication nanonetwork. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 36–45, 2012.
- BALGHUSOON, A. O.; MAHFOUDH, S. Routing protocols for wireless nanosensor networks and internet of nano things: A comprehensive survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 200724–200748, 2020.
- BRAND, D.; ZAFIROPULO, P. On communicating finite-state machines. *Journal of the ACM (JACM)*, ACM New York, NY, USA, v. 30, n. 2, p. 323–342, 1983.
- BÜTHER, F.; TRAUPE, I.; EBERS, S. Hop count routing: a routing algorithm for resource constrained, identity-free medical nanonetworks. In: *Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- CANOVAS-CARRASCO, S.; GARCIA-SANCHEZ, A.-J.; GARCIA-HARO, J. A nanoscale communication network scheme and energy model for a human hand scenario. *Nano communication networks*, Elsevier, v. 15, p. 17–27, 2018.

- CANOVAS-CARRASCO, S.; SANDOVAL, R. M.; GARCIA-SANCHEZ, A.-J.; GARCIA-HARO, J. Optimal transmission policy derivation for iont flow-guided nano-sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 2288–2298, 2019.
- CHEN, J.; WU, Z.; LIU, H.; WANG, X.; LIU, B. Node priority strategy for energy efficient data collection scheme in wireless body area networks. In: *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Communication and Information Systems*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 49–53.
- DARCHINI, K.; ALFA, A. S. Molecular communication via microtubules and physical contact in nanonetworks: A survey. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 73–85, 2013.
- DOUGLAS, S. M.; BACHELET, I.; CHURCH, G. M. A logic-gated nanorobot for targeted transport of molecular payloads. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 335, n. 6070, p. 831–834, 2012.
- DRESSLER, F.; FISCHER, S. Connecting in-body nano communication with body area networks: Challenges and opportunities of the internet of nano things. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 6, n. 2, p. 29–38, 2015.
- FAHIM, H.; LI, W.; JAVAID, S.; FAREED, M. M. S.; AHMED, G.; KHATTAK, M. K. Fuzzy logic and bio-inspired firefly algorithm based routing scheme in intrabody nanonetworks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 24, p. 5526, 2019.
- FERJANI, H.; TOUATI, H. Efficient data dissemination in electromagnetic wireless nano-sensor networks. In: IEEE. *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [S.l.], 2019. p. 531–536.
- FILHO, D. F. L.; AMAZONAS, J. R. Tcnet: Trellis coded network—implementation of qos-aware routing protocols in wsns. In: IEEE. *2012 IEEE Latin-America Conference on Communications*. [S.l.], 2012. p. 1–6.
- GALAL, A.; HESSELBACH, X. Nano-networks communication architecture: Modeling and functions. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 17, p. 45–62, 2018.
- GALAL, A.; HESSELBACH, X. Probability-based path discovery protocol for electromagnetic nano-networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 174, p. 107246, 2020.
- HASELMAN, M.; HAUCK, S. The future of integrated circuits: A survey of nanoelectronics. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 98, n. 1, p. 11–38, 2009.
- HOGG, T.; JR, R. A. F. Acoustic communication for medical nanorobots. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 83–102, 2012.
- JENSEN, K.; WELDON, J.; GARCIA, H.; ZETTL, A. Nanotube radio. *Nano letters*, ACS Publications, v. 7, n. 11, p. 3508–3511, 2007.
- JORNET, J. M. A joint energy harvesting and consumption model for self-powered nano-devices in nanonetworks. In: IEEE. *2012 IEEE international conference on communications (ICC)*. [S.l.], 2012. p. 6151–6156.

JORNET, J. M.; AKYILDIZ, I. F. Information capacity of pulse-based wireless nanosensor networks. In: IEEE. *2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. [S.l.], 2011. p. 80–88.

JORNET, J. M.; AKYILDIZ, I. F. The internet of multimedia nano-things. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 3, n. 4, p. 242–251, 2012.

KAVIANI, B.; SADR, A.; ABRISHAMIFAR, A. Generation and detection of nano ultrasound waves with a multiple strained layer structure. *Optical and quantum electronics*, Springer, v. 40, n. 8, p. 577–586, 2008.

LEE, S. J.; JUNG, C.; CHOI, K.; KIM, S. Design of wireless nanosensor networks for intrabody application. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 11, n. 7, p. 176761, 2015.

LEMIC, F.; ABADAL, S.; TAVERNIER, W.; STROOBANT, P.; COLLE, D.; ALARCÓN, E.; MARQUEZ-BARJA, J.; FAMAHEY, J. Survey on Terahertz nanocommunication and networking: A top-down perspective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 39, n. 6, p. 1506–1543, 2021.

LI, J.; LI, T.; XU, T.; KIRISTI, M.; LIU, W.; WU, Z.; WANG, J. Magneto–acoustic hybrid nanomotor. *Nano letters*, ACS Publications, v. 15, n. 7, p. 4814–4821, 2015.

LI, M.; XI, N.; WANG, Y.; LIU, L. Progress in nanorobotics for advancing biomedicine. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, IEEE, v. 68, n. 1, p. 130–147, 2020.

LIANG, Z.; FAN, D. Visible light–gated reconfigurable rotary actuation of electric nanomotors. *Science advances*, American Association for the Advancement of Science, v. 4, n. 9, p. eaau0981, 2018.

LIASKOS, C.; TSIOLIARIDOU, A. A promise of realizable, ultra-scalable communications at nano-scale: a multi-modal nano-machine architecture. *IEEE Transactions on Computers*, IEEE, v. 64, n. 5, p. 1282–1295, 2014.

LIASKOS, C.; TSIOLIARIDOU, A.; IOANNIDIS, S.; KANTARTZIS, N.; PITSILLIDES, A. A deployable routing system for nanonetworks. In: IEEE. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.

LIU, B.; LU, P.; HAO, X.; JIANG, X.; WU, Z. Data collection scheme based on wake-up in body area nanonetworks. In: IEEE. *2016 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*. [S.l.], 2016. p. 438–443.

LIU, B.; ZHANG, Y.; JIANG, X.; WU, Z. An energy-efficient data collection scheme in body area nanonetworks. In: IEEE. *2015 Third International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*. [S.l.], 2015. p. 240–245.

MAVRIDOPOULOS, S.; NICOPOLITIDIS, P.; TSAVE, O.; KAVAKIOTIS, I.; SALIFOGLU, A. Using bacterial concentration as means of dissipating information through chemotaxis. *Nano communication networks*, Elsevier, v. 13, p. 1–8, 2017.

MAVROIDIS, C.; FERREIRA, A. Nanorobotics: past, present, and future. *Nanorobotics: Current Approaches and Techniques*, Springer, p. 3–27, 2013.

- MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, Springer, v. 5, n. 4, p. 115–133, 1943.
- MCEUEN, P.; MISKIN, M. *Tiny robots with giant potential*. 2019. Disponível em: (https://www.ted.com/talks/paul_mceuen_and_marc_miskin_tiny_robots_with_giant_potential).
- MEALY, G. H. A method for synthesizing sequential circuits. *The Bell System Technical Journal*, Nokia Bell Labs, v. 34, n. 5, p. 1045–1079, 1955.
- MOORE, E. F. *et al.* Gedanken-experiments on sequential machines. *Automata studies*, v. 34, p. 129–153, 1956.
- NAKANO, T.; MOORE, M. J.; WEI, F.; VASILAKOS, A. V.; SHUAI, J. Molecular communication and networking: Opportunities and challenges. *IEEE transactions on nanobioscience*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 135–148, 2012.
- NASIF, A. O.; MAHFUZ, M. U.; THOTA, J. Noise modeling of nanomechanical communication systems. In: IEEE. *2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*. [S.l.], 2017. p. 49–52.
- NAYYAR, A.; PURI, V.; LE, D.-N. Internet of nano things (iont): Next evolutionary step in nanotechnology. *Nanoscience and Nanotechnology*, v. 7, n. 1, p. 4–8, 2017.
- NEUPANE, S. R. *Routing in resource constrained sensor nanonetworks*. Dissertação (Mestrado) — Tampere University of Technology, 2014.
- OUKHATAR, A.; BAKHOUYA, M.; OUADGHIRI, D. E.; ZINE-DINE, K. Probabilistic-based broadcasting for em-based wireless nanosensor networks. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 232–236.
- PANTAZIS, N. A.; NIKOLIDAKIS, S. A.; VERGADOS, D. D. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 551–591, 2012.
- PIEROBON, M.; JORNET, J. M.; AKKARI, N.; ALMASRI, S.; AKYILDIZ, I. F. A routing framework for energy harvesting wireless nanosensor networks in the Terahertz band. *Wireless networks*, Springer, v. 20, n. 5, p. 1169–1183, 2014.
- PIRO, G.; BOGGIA, G.; GRIECO, L. A. On the design of an energy-harvesting protocol stack for body area nano-networks. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 6, n. 2, p. 74–84, 2015.
- PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. Nano-sim: simulating electromagnetic-based nanonetworks in the network simulator 3. In: *SimuTools*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 203–210.
- PIRO, G.; GRIECO, L. A.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. Simulating wireless nano sensor networks in the ns-3 platform. In: IEEE. *2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. [S.l.], 2013. p. 67–74.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2022. Disponível em: (<https://www.R-project.org/>).

- RIKHTEGAR, N.; JAVIDAN, R.; KESHTGARI, M. Mobility management in wireless nano-sensor networks using fuzzy logic. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, IOS Press, v. 32, n. 1, p. 969–978, 2017.
- RIKHTEGAR, N.; KESHTGARY, M. A brief survey on molecular and electromagnetic communications in nano-networks. *International Journal of Computer Applications*, Citeseer, v. 79, n. 3, 2013.
- RONG, Z.; LEESON, M. S.; HIGGINS, M. D. Relay-assisted nanoscale communication in the thz band. *Micro & Nano Letters*, IET, v. 12, n. 6, p. 373–376, 2017.
- SANTAGATI, G. E.; MELODIA, T.; GALLUCCIO, L.; PALAZZO, S. Medium access control and rate adaptation for ultrasonic intrabody sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1121–1134, 2014.
- SHAHBAZ, M.; GROZ, R. Inferring Mealy machines. In: SPRINGER. *International Symposium on Formal Methods*. [S.l.], 2009. p. 207–222.
- SHINER, J. S.; DAVISON, M.; LANDSBERG, P. T. Simple measure for complexity. *Physical review E*, APS, v. 59, n. 2, p. 1459, 1999.
- SMITH, R.; ARCA, A.; CHEN, X.; MARQUES, L.; CLARK, M.; AYLOTT, J.; SOMEKH, M. Design and fabrication of ultrasonic transducers with nanoscale dimensions. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2011. v. 278, n. 1, p. 012035.
- STELZNER, M.; BUSSE, F.; EBERS, S. In-body nanonetwork routing based on manet and thz. In: *Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- SUDA, T.; MOORE, M.; NAKANO, T.; EGASHIRA, R.; ENOMOTO, A.; HIYAMA, S.; MORITANI, Y. Exploratory research on molecular communication between nanomachines. In: CITESEER. *Genetic and evolutionary computation conference (GECCO), Late breaking papers*. [S.l.], 2005. v. 25, p. 29.
- TAIRIN, S.; ISLAM, A. A. A. Propagation loss aware routing in wireless nanosensor networks having directional nano-antennas. In: IEEE. *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN)*. [S.l.], 2017. p. 239–242.
- TAIRIN, S.; NURAIN, N.; ISLAM, A. A. A. Network-level performance enhancement in wireless nanosensor networks through multi-layer modifications. In: IEEE. *2017 International Conference on Networking, Systems and Security (NSysS)*. [S.l.], 2017. p. 75–83.
- TSIOLIARIDOU, A.; LIASKOS, C.; DEDU, E.; IOANNIDIS, S. Stateless linear-path routing for 3d nanonetworks. In: *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- TSIOLIARIDOU, A.; LIASKOS, C.; DEDU, E.; IOANNIDIS, S. Packet routing in 3d nanonetworks: A lightweight, linear-path scheme. *Nano communication networks*, Elsevier, v. 12, p. 63–71, 2017.

- TSIOLIARIDOU, A.; LIASKOS, C.; IOANNIDIS, S.; PITSILLIDES, A. Corona: A coordinate and routing system for nanonetworks. In: *Proceedings of the second annual international conference on nanoscale computing and communication*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- TSIOLIARIDOU, A.; LIASKOS, C.; IOANNIDIS, S.; PITSILLIDES, A. Lightweight, self-tuning data dissemination for dense nanonetworks. *Nano Communication Networks*, Elsevier, v. 8, p. 2–15, 2016.
- TSIOLIARIDOU, A.; LIASKOS, C.; PACHIS, L.; IOANNIDIS, S.; PITSILLIDES, A. N3: Addressing and routing in 3d nanonetworks. In: IEEE. *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- WANG, C.-C.; YAO, X.; WANG, W.-L.; JORNET, J. M. Multi-hop deflection routing algorithm based on reinforcement learning for energy-harvesting nanonetworks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, 2020.
- WANG, C. W.; XIA, Q.; YAO, X.; WANG, W.; JORNET, J. M. Multi-hop deflection routing algorithm based on q-learning for energy-harvesting nanonetworks. In: IEEE. *2018 IEEE 15th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. [S.l.], 2018. p. 362–370.
- WANG, Y.; HERNANDEZ, R. M.; BARTLETT, D. J.; BINGHAM, J. M.; KLINE, T. R.; SEN, A.; MALLOUK, T. E. Bipolar electrochemical mechanism for the propulsion of catalytic nanomotors in hydrogen peroxide solutions. *Langmuir*, ACS Publications, v. 22, n. 25, p. 10451–10456, 2006.
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *nature*, Nature Publishing Group, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998.
- XIA, Q.; JORNET, J. M. Cross-layer analysis of optimal relaying strategies for Terahertz-band communication networks. In: IEEE. *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. [S.l.], 2017. p. 1–8.
- XU, J.; JIANG, J.; WANG, Z.; ZHAO, Y. Energy harvesting based opportunistic routing for mobile wireless nanosensor networks. In: SPRINGER. *International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. [S.l.], 2018. p. 760–766.
- XU, J.; ZHANG, R.; WANG, Z. An energy efficient multi-hop routing protocol for Terahertz wireless nanosensor networks. In: SPRINGER. *International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. [S.l.], 2016. p. 367–376.
- YANG, K.; PELLEGRINI, A.; MUNOZ, M. O.; BRIZZI, A.; ALOMAINY, A.; HAO, Y. Numerical analysis and characterization of thz propagation channel for body-centric nano-communications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 419–426, 2015.
- YEN, H.-H. Energy aware and signal quality aware data aggregation routing in wireless nanosensor networks. In: IEEE. *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.], 2017. p. 879–884.

YU, H.; NG, B.; SEAH, W. K. Forwarding schemes for em-based wireless nanosensor networks in the Terahertz band. In: *Proceedings of the Second Annual International Conference on Nanoscale Computing and Communication*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

YU, H.; NG, B.; SEAH, W. K.; QU, Y. Ttl-based efficient forwarding for the backhaul tier in nanonetworks. In: IEEE. *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.], 2017. p. 554–559.

ZERIFI, M.; EZZOUHAIRI, A.; BOULAALAM, A. Overview on sdn and nfv based architectures for iot environments: challenges and solutions. In: IEEE. *2020 Fourth International Conference On Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.