

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Nanonetworks: aplicações, arquiteturas,
protocolos e avaliação de desempenho

Renan Barbosa de Ataíde

Brasília, Maio de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Nanonetworks: aplicações, arquiteturas,
protocolos e avaliação de desempenho**

Renan Barbosa de Ataíde

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Redes de Comunicação*

Banca Examinadora

Prof. William Ferreira Giozza, ENE/UnB

Orientador

Prof. Georges Daniel Amvame Nze, ENE/UnB

Examinador

Prof. Fábio Lúcio Lopes de Mendonça,

ENE/UnB
Examinador

Agradecimentos

Agradeço à minha família pela base de princípios e conhecimento que me foi oferecida através de intenso trabalho e sacrifícios. Com esta base foi possível construir um carácter e determinação que me permitiram realizar essa graduação. Agradeço à minha esposa pelos anos de apoio, força e paciência que foram indispensáveis para o sucesso nessa tarefa e que me confortou nos momentos mais difíceis, ao meu orientador William Giozza pelo conhecimento compartilhado e paciência em me orientar nesse trabalho e a Deus pela saúde e força que me permitiram chegar até aqui.

Renan Barbosa de Ataíde

RESUMO

Nanodispositivos conectados por Nanonetworks, realizando a transmissão de dados coletados e tarefas específicas, possibilitam o desenvolvimento de aplicações em nanoescala que têm a expectativa de revolucionar diversos campos da ciência. Áreas de estudo como a da medicina, meio ambiente e indústria anseiam por dispositivos que possibilitariam aplicações como a produção não invasiva de imagens de dentro do corpo humano, entrega localizada de medicamentos e a detecção de feromônios e componentes químicos prejudiciais.

Nas últimas duas décadas várias propostas de modelos para Nanonetworks foram produzidas. Este trabalho apresenta uma introdução a nanonetworks baseada principalmente na proposta de comunicação eletromagnética sem fio na banda Terahertz (THz). Apesar dos desafios característicos da comunicação eletromagnética na escala nano que vêm sendo observados nas pesquisas, esse modelo de nano-comunicação vem inspirando bastantes propostas de implementação de nanonetworks e aparenta ser a mais promissora.

À medida que novas propostas são criadas, a necessidade de avaliar e comparar o desempenho dos diferentes modelos entre si se torna essencial. A falta de padronização nas métricas e formas de avaliação de desempenho é um desafio. Este trabalho seleciona métricas de desempenho significativas para o estudo de nanonetworks e integra diferentes ferramentas de simulação para modelar e avaliar o desempenho de diferentes protocolos de roteamento propostos na literatura para a implementação de nanonetworks.

ABSTRACT

Nanodevices connected by Nanonetworks carrying out the transmission of collected data and performing specific tasks enable the development of applications at the nanoscale that are expected to revolutionize several fields of science. Areas of study such as medicine, environment and industry crave for devices that would enable applications such as non-invasive production of images from within the human body, localized delivery of drugs and detection of pheromones and harmful chemical components.

In the past two decades, numerous proposals of models for Nanonetworks have been produced. This work presents an introduction to nanonetworks based mainly on the proposal for wireless electromagnetic communication in the terahertz (THz) band. Despite the characteristic challenges of electromagnetic communication on the nanoscale that has been observed in research, this nanocommunication model has inspired many proposals for the implementation of nanonetworks and seems to be the most promising.

As new proposals are created, the need to evaluate and compare the performance of the different models against each other becomes essential. The lack of standardization of metrics and forms of performance evaluation is a challenge. This work selects significant performance metrics for the study of nanonetworks and integrates different simulation tools to model and evaluate the performance of different routing protocols proposed in the literature for the implementation of nanonetworks.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 NANONETWORKS: APLICAÇÕES, CARACTERÍSTICAS E TECNOLOGIAS.	4
2.1 APLICAÇÕES POTENCIAIS	4
2.1.1 BIOMEDICINA	4
2.1.2 AMBIENTAL	5
2.1.3 INDUSTRIAL	5
2.1.4 MILITAR	5
2.2 TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO MOLECULAR	6
2.3 TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	8
2.3.1 NANOMATERIAIS PARA COMUNICAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	8
2.3.2 NANODISPOSITIVO	9
2.4 ARQUITETURA DE NANONETWORKS DE COMUNICAÇÃO ELETROMAGNÉTICA ..	11
2.4.1 CAMADA FÍSICA	12
2.4.2 CAMADA DE ENLACE	16
2.4.3 CAMADA DE REDE	16
2.4.4 MODELO DE ARQUITETURA UNIFICADA	20
3 MÉTRICAS, FERRAMENTAS E CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	23
3.1 MÉTRICAS	23
3.1.1 MÉTRICAS DE CAMADA FÍSICA	23
3.1.2 MÉTRICAS DA CAMADA DE ENLACE	24
3.1.3 MÉTRICAS DE CAMADA DE REDE	24
3.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	24
3.2.1 NANO-SIM	24
3.2.2 TERASIM	25
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE PROTOCOLOS NOS MÓDULOS DO SIMULADOR NS-3	26

3.3.1	VALIDAÇÃO DOS MÓDULOS TERA-SIM E NANO-SIM	26
3.3.2	IMPLEMENTAÇÃO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	27
3.3.3	VALIDAÇÃO DOS PROTOCOLOS IMPLEMENTADOS.....	30
4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	33
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE PROTOCOLOS	33
5	CONCLUSÃO	43
5.1	TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	ANEXOS.....	48
I	RESULTADOS DE VALIDAÇÃO DO MÓDULO TERA-SIM.....	49
II	RESULTADOS DE VALIDAÇÃO DO MÓDULO NANO-SIM.....	52

LISTA DE FIGURAS

2.1	Componentes do sistema de comunicação molecular [9]	6
2.2	Componentes de comunicação molecular a distancia [9]	8
2.3	Dispositivos de comunicação eletromagnética sem fio na nanoescala [Autor]	10
2.4	Ilustração do <i>Time Spread On-Off Keying</i> (TS-OOK)[26]	15
2.5	Nós de uma nanonetwork modelados por um FSM [41]	18
2.6	Exemplo de criação de rota FSM [Autor]	19
2.7	Tabela de roteamento com bits livres [42]	19
2.8	Tabela de roteamento com exemplo de rota gerada por FSM por tabelas [42]	20
2.9	Esquemático do modelo de arquitetura unificada [Adaptado de 43]	22
3.1	Estrutura de objetos do TeraSim [6]	27
3.2	Fluxo do pacote no TeraSim [6]	28
3.3	Topologia física para 32 nano-rodeadores	29
3.4	Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do artigo	31
3.5	Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do TeraSim	31
3.6	Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do artigo	32
3.7	Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do TeraSim	32
4.1	Gráfico de comparação de consumo de energia total para 32 nano-rodeadores	35
4.2	Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 32 nano-rodeadores	35
4.3	Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 32 nano-rodeadores	36
4.4	Gráfico de comparação de consumo de energia total para 64 nano-rodeadores	37
4.5	Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 64 nano-rodeadores	38
4.6	Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 64 nano-rodeadores	39
4.7	Gráfico de comparação de consumo de energia total para 128 nano-rodeadores	40
4.8	Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 128 nano-rodeadores	40
4.9	Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 128 nano-rodeadores	41
4.10	Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida dos dois melhores protocolos para as três densidade simuladas	42
I.1	Resultado do Teste thz-rx-pds-nano	49

I.2	Resultado do Teste thz-directional-antenna	50
I.3	Resultado do Teste thz-path-loss	50
I.4	Resultado do Teste thz-pds-macro	51
II.1	Resultados do Artigo: perda de pacotes de Transparent-MAC with Selective flooding	52
II.2	Resultado de Simulação: perda de pacotes de Transparent-MAC with Selective flooding	53
II.3	Resultado do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC and Selective flooding	53
II.4	Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC and Selective flooding	54
II.5	Resultados do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing	54
II.6	Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing	55
II.7	Resultado do Artigo: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding.....	55
II.8	Resultado de Simulação: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding	56
II.9	Resultados do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing	56
II.10	Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing	57
II.11	Resultado do Artigo: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding.....	57
II.12	Resultado de Simulação: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding	58

LISTA DE TABELAS

3.1	Configurações de validação.....	30
4.1	Configurações de simulação.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS

Acrônimos

ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
ESA-MAC	<i>Energy and Spectrum-Aware Medium Access Control</i>
FSM	<i>Finite State Machine</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
ID	Identificação
IoNT	<i>Internet of Nano-Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LLS-MAC	<i>Link-Layer Synchronization and Medium Access Control</i>
LoS	<i>Light of Sight</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NFV	<i>Network Functions Virtualization</i>
ns-3	<i>Network Simulator 3</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PAM	<i>Pulse-Amplitude Modulation</i>
PHLAME	<i>Physical Layer Aware Medium Access Control</i>
PLBS	<i>Pulse-Level Beam-switching</i>
PPM	<i>Pulse-Position Modulation</i>
RDMA	<i>Rate Division Multiple Access</i>
RIH-MAC	<i>Receiver-Initiated Harvesting-aware Medium Access Control</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SRH-TOOK	<i>Symbol Rate Hopping Time-Spread On-Off Keying</i>
TCNets	<i>Trellis Coded Networks</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
THz	Terahertz
TS-OOK	<i>Time-Spread On-Off Keying</i>
TTL	<i>Time To Live</i>
VIM	<i>Virtualized Infrastructure Manager</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O físico ganhador do Nobel de 1965, Richard Feynman, fez um famoso discurso na reunião anual da Sociedade Física Americana na Caltech em 29 de dezembro de 1959, com o título "There's Plenty of Room at the Bottom"[1]. Feynman expressou sua crença na miniaturização do computador e na reorganização dos átomos. Estudos de nanotecnologia estão trabalhando na visão do futuro de Feynman. "A nanotecnologia consiste principalmente no processamento de, separação, consolidação e deformação de materiais por um átomo ou por uma molécula"[2]. Esta foi a primeira definição de Nanotecnologia; ela foi dada por Norio Taniguchi. O desenvolvimento de tecnologia na nanoescala potencialmente trará grandes avanços na criação de soluções para benefício da humanidade em diversas áreas.

Os dispositivos criados em nanoescala permitem o monitoramento preciso e a execução de tarefas específicas em nível molecular. Essas minúsculas máquinas podem se tornar mais eficientes com a comunicação. Nanodispositivos se comunicando entre si, tornam-se nanonetworks. A conectividade fornecida pelas nanonetworks pode tornar nanodispositivos, que estão limitados a realizar tarefas muito simples, em poderosos sistemas distribuídos com recursos estendidos e uma gama de aplicações.

Neste trabalho apresentamos uma introdução às nanonetworks. As aplicações, características e tecnologias das nanonetworks são apresentadas para os principais modelos propostos. As aplicações biomédicas são as mais entusiasmantes devido aos potenciais benefícios à saúde que significariam um avanço no combate a muitas doenças. Abbasi et al [3] apresentam uma revisão das nano-comunicações para aplicações biomédicas com muitas vantagens previstas. As aplicações industriais, ambientais e militares também devem trazer muito progresso para cada área de estudo.

Devido ao seu tamanho minúsculo, os nanodispositivos são extremamente limitados em energia, memória e processamento. A restrição de recursos será discutida durante todo o trabalho como um dos maiores desafios para dar vida a essa tecnologia. Dispositivos extremamente limitados precisam de uma abordagem completamente nova para o seu desenvolvimento quando comparados com a tecnologia atual que confia em dispositivos poderosos em recursos para entregar resultados

de qualidade. No desenvolvimento da nano-comunicação, os pesquisadores estão sempre buscando equilibrar diferentes características, como confiabilidade e eficiência energética, ou robustez e simplicidade para a entrega do melhor resultado possível.

Há propostas para o uso de pelo menos quatro tecnologias como modelo de nano-comunicação: comunicações acústicas, nano-mecânicas, moleculares e eletromagnéticas [3]. À medida que os modelos vêm sendo desenvolvidos, mais foco tem sido dado aos esquemas moleculares e eletromagnéticos. Dentre as listadas a nano-comunicação sem fio eletromagnética é a tecnologia mais pesquisada e promissora [4]. Este trabalho tem o foco em nanonetworks com tecnologia de comunicação eletromagnética. Reduzir a tecnologia de comunicação eletromagnética atual à nanoescala é um desafio que envolve escolher o material para construir os dispositivos, modelar o canal de comunicação, definir as características do dispositivo e os protocolos para cada cenário.

A banda de comunicação sem fio mais proposta para nanonetworks tem sido a banda Terahertz (THz). Espera-se que a banda Thz ofereça uma eficiência energética satisfatória e alta largura de banda. A revisão bibliográfica sobre Nano-comunicação e nanonetworks em Terahertz por Lemit et. al. [4] é uma das principais fontes de referências para este trabalho, pois apresenta um vasto levantamento de artigos de pesquisa sobre comunicação THz que oferecem desde a modelagem de canais até protocolos de rede para nanonetworks. Junto com as promessas da banda THz surgem novos desafios específicos para essa banda. Devido ao comprimento de onda, as moléculas no meio geram interferência molecular, e uma perda significativa de propagação deve ser levada em conta. [4]

Dispositivos, arquiteturas e protocolos tem sido propostos para a realização da nano-comunicação e algumas das suas principais características são apresentadas neste trabalho. Com o crescimento na quantidade de abordagens e modelos, surge a necessidade de avaliar e comparar o desempenho das diferentes propostas. Simuladores de nanonetworks tem sido desenvolvidos, porém a falta de padronização nos modelos propostos impede uma comparação justa e a obtenção de conclusões consistentes em relação a quais abordagens possuem mais potencial. A convergência na implementação de modelos, em uma plataforma de código aberto bem estabelecida na comunidade de pesquisa, pode contribuir com o estabelecimento de base em comum para a avaliação, comparação e consequente indicação de estruturas mais potencialmente promissoras para a implementação de nanonetworks.

1.2 Objetivos

Diante da grande quantidade de protocolos e modelos, a necessidade de avaliação e comparação é evidente. A modelagem matemática e ferramentas de simulação são utilizadas como soluções para avaliação de desempenho. Um dos maiores desafios da comparação entre protocolos para a implementação de nanonetworks é a falta de padronização, cada autor propõe suas métricas e ferramentas de avaliação de acordo com seu julgamento sobre o que é importante concluir. Assim, uma avaliação de desempenho padronizada e a comparação de resultados ainda são um desafio aberto. Alguns simuladores têm sido propostos como terreno sólido para os pesquisadores construírem seus protocolos e terem uma plataforma comum para testes.

Como objetivos gerais para este trabalho, temos:

- Identificação das principais propostas para implementação de Nanonetworks.
- Avaliação de desempenho de protocolos de roteamento para Nanonetworks.

Para atender ao segundo objetivo geral foram identificados e selecionados os módulos de simulação Nano-Sim [5] e Tera-Sim [6], componentes do pacote de simulação Network Simulator (ns-3) [7], para a modelagem arquitetural de uma nanonetwork e os estudos de desempenho com protocolos de roteamento.

Como objetivos específicos para o desenvolvimento dos estudos de desempenho, temos:

- Identificação e comparação das características dos módulos de simulação Nano-Sim e TeraSim do ns-3.
- Integração dos módulos Nano-Sim e TeraSim;
- Implementação de novas propostas de protocolos de redes no ambiente de simulação integrado.
- Avaliação e comparação do desempenho de protocolos de roteamento para nanonetworks.

Neste trabalho, foram implementados quatro protocolos de roteamento no ambiente integrado de simulação construído cujos desempenhos foram avaliados e comparados como forma de contribuição aos estudos de nanonetworks.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta as Nanonetworks através de uma abordagem geral de suas aplicações, arquiteturas e protocolos, e de uma abordagem específica da avaliação de desempenho por simulação. Ele está estruturado da seguinte forma: Capítulo 1, Introdução com a contextualização e objetivos do trabalho; Capítulo 2, apresenta as aplicações potenciais, bem como as principais características, tecnologias e arquiteturas propostas para nanonetworks, discutindo mais especificamente dos protocolos e modelos de cada camadas para nano-comunicação eletromagnética. propostas para nanonetworks. Capítulo 3, fornece informações sobre os modelos testados e comparados, ferramentas utilizadas, contribuições deste trabalho por implementação de novas propostas nos módulos de simulação e estabelece cenários de comparação dos protocolos implementados. Capítulo 4, apresenta os resultados obtidos na comparação dos protocolos de roteamento implementados no ambiente integrado de com as conclusões observadas. Capítulo 5, apresenta as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Nanonetworks: aplicações, características e tecnologias.

A nanotecnologia depende dos recursos de uma comunicação eficaz para poder fornecer quase todas as aplicações imaginadas. Os modelos que foram propostos, até agora, baseiam-se em uma das seguintes tecnologias: tecnologias acústicas [8], nano-mecânicas [9], eletromagnéticas[4] ou de comunicação molecular[3]. As propostas acústicas e nano-mecânicas tem sido menos estudadas nas pesquisas devido às dificuldades esperadas para sua implementação. As tecnologias eletromagnéticas e moleculares são as mais pesquisadas e promissoras, sendo a eletromagnética a tecnologia com mais propostas de desenvolvimento.

2.1 Aplicações potenciais

Nanonetworks têm uma variedade de potenciais aplicações nos campos ambiental, industrial, militar e biomédico. Embora as aplicações da vida real ainda não estejam implementadas, muito se pensa em como os dispositivos em nanoescala podem efetivamente impactar cada campo e os potenciais avanços que eles podem trazer para a ciência.

2.1.1 Biomedicina

A possibilidade de ter nanodispositivos espalhados pelo corpo humano torna o campo biomédicos o mais entusiasmado com suas aplicações. Produção de imagem de forma ativa para diagnóstico de doença, sensoriamento móvel para diagnóstico de doença, engenharia de tecidos, implantes bio-híbridos, terapia localizada, entrega precisa de medicamentos, manipulação de células e cirurgia minimamente invasiva, formam uma lista de aplicações previstas com estudos em andamento que usam nanodispositivos conectados por nanonetworks para realizar o que não é possível com a tecnologia biomédica atual.[3]

À medida que o tamanho das câmeras com luzes e lentes integradas atingem a microescala, haverá a possibilidade de produzir imagens ativas de espaços como o fluido da medula espinhal, o

ducto biliar e os lóbulos cerebrais [10]. A adição de mobilidade e controle a sensores e a construção deles em uma microescala permitiria uma rede de sensores médicos dentro do corpo humano para monitoramento ativo da saúde [10]. Há propostas de desenvolver uma rede com micro-robôs magnéticos que poderiam alcançar a detecção óptica de oxigênio para medições intraoculares, permitindo detectar a pressão intraocular para o diagnóstico precoce e o tratamento do glaucoma para evitar a perda de visão [11]. Uma aplicação potencial de alto nível de nanonetworks é uma cirurgia minimamente invasiva. Exemplos de operações cirúrgicas que poderiam ser realizadas por tais dispositivos são a abertura de vasos entupidos ou outros canais, cauterização, hipertermia, biópsia, oclusão, estimulação elétrica, injeção, corte, perfuração, remoção de biomaterial ou adição a um determinado alvo, etc.[12][13][14]

2.1.2 Ambiental

Nano-sensores químicos podem ser usados para detectar compostos que estão sendo liberados e trocados entre plantas. As plantas usam esses compostos para fins como regular a floração e atrair predadores de insetos que as atacam. Uma rede de nano-sensores poderia monitorar esses sinais e as informações coletadas usadas para potencializar a agricultura [15]. O manuseio do lixo poderia ser melhorado pelo uso de nano-sensores para etiquetar materiais a serem processados e o uso de nano-atuadores para ajudar no processo de biodegradação.[16]

2.1.3 Industrial

O desenvolvimento de nano-sensores poderia permitir que a indústria realizasse um controle de qualidade muito preciso. Nanonetworks podem ajudar a detectar pequenas bactérias e componentes tóxicos que podem afetar a qualidade do produto [16]. Água e alimentos seriam monitorados de perto e sua qualidade garantida.

Novos materiais para funcionalidades de tecido poderiam ser desenvolvidos com capacidades como a de ser antimicrobiana ou repelente de manchas, usando novos materiais nano funcionalizados como cristais de sal de prata de nano-tamanho apresentados no trabalho por Tessier et. al. [17]. Essas características poderiam melhorar a qualidade dos produtos da indústria de colchões, impactando significativamente em novos materiais antialérgicos, por exemplo.

2.1.4 Militar

Nanonetworks têm múltiplas aplicações no meio militar. O monitoramento desde de grandes áreas de campos de batalha até parâmetros de saúde dos soldados poderia ser realizado por nano-sensores. A detecção agentes químicos e biológicos agressivos forneceria informações poderosas para coordenar a resposta defensiva [18].

A capacidade mencionada anteriormente de usar nanonetworks para desenvolver novos materiais têxteis poderia beneficiar muito o uniforme militar. Camuflagem avançada, bem como roupas auto-reguladoras de temperatura para soldados são exemplos de vantagens que as nanonetworks

poderiam trazer para o campo [19].

2.2 Tecnologias de Comunicação Molecular

A comunicação molecular é baseada na transmissão e recepção de moléculas que codificam a mensagem desejada. Desde o início dos estudos sobre nanonetworks, a comunicação molecular tem sido considerada um modelo muito promissor especialmente por causa dos muitos exemplos disponíveis encontrados na natureza a partir dos quais ideias e propostas podem ser inspirados.

Há estudos para desenvolver modelos de comunicação molecular para diferentes cenários, três dessas propostas teóricas são apresentadas abaixo. São os motores moleculares, a sinalização de cálcio e a comunicação de feromônios.[9]

Motores moleculares são máquinas biológicas que convertem várias fontes de energia em movimento mecânico. Esses motores transportam partículas importantes entre organelas para atingir o objetivo celular desejado. Exemplos de motores moleculares incluem miose, cinesinas e dyneins responsáveis por atividades como contração muscular e transporte de vesícula intracelular. Motores moleculares usam microtúbulos, também chamados de trilhos moleculares, como caminhos para se mover de sua posição para o destino desejado e alguns motores moleculares são capazes de transportar moléculas ao longo dos trilhos, conforme ilustrado na figura 2.1. [9]

Devido à natureza orgânica do processo, a ideia de comunicação de motores moleculares só é viável em um contexto específico. O meio deve ser aquoso com condições biologicamente adequadas, como temperatura e viscosidade. Variações sobre as condições desejadas do meio impactam na qualidade da comunicação. A infraestrutura dos microtúbulos, trilhos por onde as mensagens passam, deve ser estabelecida antes que a comunicação possa acontecer. Essa é uma das maiores questões desse modelo e o desafio para os pesquisadores trazerem essa ideia à prática.

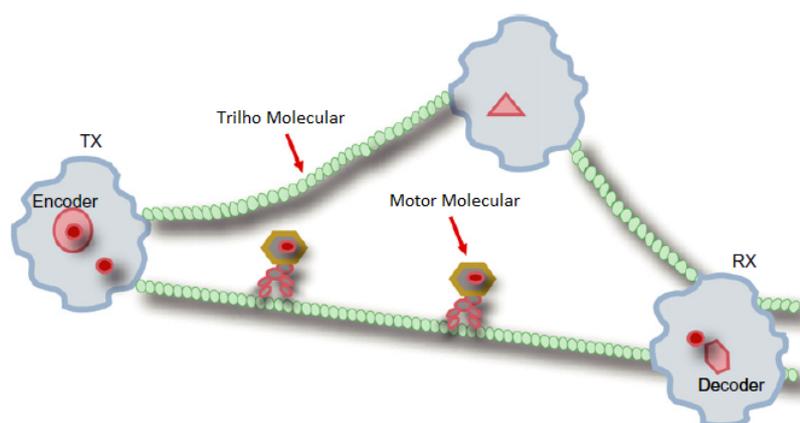


Figura 2.1: Componentes do sistema de comunicação molecular [9]

A comunicação de sinalização de cálcio é o uso de íons de cálcio (Ca^{2+}) responsáveis por tarefas importantes na célula, como fertilização, contração ou secreção. A comunicação pode ser usada para células fisicamente conectadas entre si ou para células não fisicamente conectadas, mas a uma

curta distância entre si. [9]

O processo de codificação da comunicação é feito pela amplitude e frequência da função de concentração de Ca^{2+} . Uma vez que um estímulo esperado ocorre, a nanomáquina gera o sinal de cálcio com a mensagem que quer transmitir. Em contato direto a transmissão do sinal químico acontece pela estimulação das células vizinhas para replicar o sinal para a próxima célula conectada. No cenário de contato indireto, os nanodispositivos emitem o sinal de forma contínua, resultando no processo de difusão. O processo de propagação do sinal químico é diretamente afetado pelo fluxo médio, temperatura e ruído de outras reações químicas que acontecem simultaneamente; todas essas variáveis devem ser consideradas pelo transmissor para o sucesso da comunicação.

A recepção no acesso direto poderia ser concluída fechando as lacunas de acesso no receptor. No acesso indireto, o receptor deve converter o sinal externo em comunicação interna. A decodificação é então feita pelo receptor interpretando a concentração de (Ca^{2+}) na ação desejada. A comunicação de sinalização de cálcio é uma comunicação de transmissão, portanto, mais de um receptor pode decodificar a mensagem enviada.

Feromônios são substâncias químicas que são produzidas e liberadas no ambiente com uma mensagem específica que está destinada a afetar o comportamento ou a fisiologia dos receptores. Na natureza, eles são usados especialmente por mamíferos e insetos. Inspirado por este modelo de comunicação, foi proposto o uso de feromônios para realizar a comunicação na nanoescala de longo alcance.[15]

O processo de comunicação utilizando feromônios poderia ser estabelecido utilizando conceitos como difusão e concentração de moléculas no meio. O ruído no processo é encontrado em várias fontes, como temperatura, dispersão e fluxo médio. Dependendo da proporção do ruído, a comunicação pode ser comprometida.

O processo teórico começa com a codificação da mensagem escolhendo um feromônio específico que será entendido especificamente por um determinado receptor ou grupo de nano receptores. Uma vez selecionado, o feromônio é então liberado no ambiente em líquido ou gases, dependendo do meio. Por difusão, a mensagem viaja até seu destino. Para ajudar na comunicação efetiva, os modelos de concentração de moléculas no meio poderiam ser utilizados para os receptores, a fim de reconhecer o recebimento da mensagem. Uma vez que a mensagem é recebida, o nanodispositivo a decodifica e toma a ação desejada, conforme ilustrado na Figura 2.2.

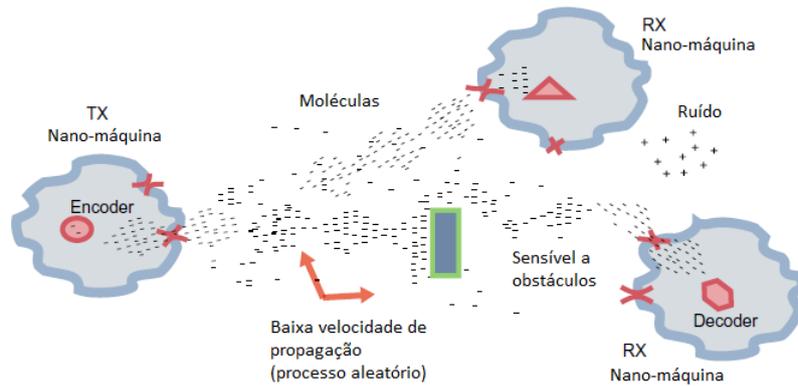


Figura 2.2: Componentes de comunicação molecular a distancia [9]

2.3 Tecnologia de Comunicação eletromagnética

A comunicação nano-eletromagnética baseia-se na ideia de reduzir a tecnologia existente para operar na escala desejada. A transmissão e recepção da radiação eletromagnética deve acontecer com material miniaturizado existente ou pelo desenvolvimento de novos nanomateriais capazes de realizar a comunicação.

Novos materiais como nanotubos de carbono e grafeno estão sendo desenvolvidos, e seu uso para nanonetworks é teoricamente promissor. A faixa de frequência a ser utilizada na nanoescala é o Terahertz (THz); Há estudos em andamento sobre a propagação de ondas THz em diferentes cenários e sobre a capacidade do canal. Há também estudos avançados sobre a segurança da frequência THz no corpo humano, e os resultados são muito satisfatórios. [10]

Uma vez que este modelo de comunicação é o mais promissor e estudado, as próximas seções deste trabalho se concentram na comunicação eletromagnética para nanonetworks e apresentam os recentes desenvolvimentos sobre a área de pesquisa como nanomateriais, dispositivos e arquiteturas propostos.

2.3.1 Nanomateriais para comunicação eletromagnética

O desafio de reduzir o tamanho da tecnologia atual à nanoescala está sendo enfrentado com uso de materiais atuais como o metal ou com o desenvolvimento de novos materiais, como nanotubos de carbono e grafeno, tentando assim desenvolver materiais capazes de entregar os requisitos da nanotecnologia.

Uma das maiores dificuldades da tecnologia de *downscaling* é a rede de comunicação. A redução de uma antena para esta escala resultaria em frequências operacionais extremamente altas, e comprometeria a comunicação e a segurança dos usuários de nanonetworks. Algumas propostas estão sendo feitas para usar materiais adequados para construir antenas e transceptores que permitam que o sinal na frequência desejada seja utilizado a comunicação. Apresentamos aqui um pouco do que está sendo feito para nanotubos de metal, grafeno e carbono para nanonetworks.

2.3.1.1 Metal

Amplamente utilizado nas redes atuais, existem algumas nanoantenas à base de metal propostas. Uma nano antena plasmônica metálica foi projetada para uso no campo das aplicações biomédicas. Simulações para validar a recepção de uma antena nano-dipolo à base de ouro foram bem sucedidas. Também foram propostas uma antena óptica metálica de nano-dipolo, bem como técnicas de óxido de metal para o desenvolvimento de antenas. Notou-se que a escolha do material para nanoantenas é muito mais crucial do que para as redes tradicionais. [3]

2.3.1.2 Grafeno

O grafeno é uma única camada de átomos de carbono. A combinação de múltiplas camadas de grafeno constrói os materiais grafíticos. Há muita expectativa para o uso do grafeno em muitas áreas de pesquisa devido às características distintas dele. É mais forte que um diamante, mais leve que o alumínio, mais resistente que o aço e é super condutivo. O grafeno é considerado um super material com diversas aplicações esperadas para o mundo.

O grafeno tem potencial para ser usado em nanonetworks para a construção de antenas para funcionar nas frequências Terahertz (THz). Estudos mostram que é possível usar nano-antenas de grafeno (fitas de grafeno com largura inferior a 50 nm) para construir nano antena à base de grafeno, trabalhando com o comportamento das ondas *Surface Plasmon Polariton* em nanofitas para alcançar as frequências desejadas de operações THz [20].

2.3.1.3 Nanotubos de Carbono

O termo nanotubo de carbono geralmente se refere a tubos de parede única feitos de carbono. Estes tubos têm as características mecânicas de serem muito fortes e rígidos. Eles são considerados metálicos ou quase metálicos dependendo de sua estrutura de carbono e teoricamente possuem características supercondutoras. Este recurso elétrico instiga muita pesquisa de seu uso para construção de processadores, por exemplo. Os nanotubos de carbono também têm características ópticas e térmicas satisfatórias, como fotoluminescência e condução balística.

O uso de nanotubos de carbono em nano-redes eletromagnéticas também é proposto para a construção de antenas para funcionar nas frequências Terahertz (THz). Eles podem emitir radiação THz quando a diferença potencial é aplicada em suas extremidades. Também é viável usar campos magnéticos para permitir a transição óptica para detectar radiação THz. [3]

2.3.2 Nanodispositivo

Uma nanomáquina poderia ser definida como "um dispositivo, consistindo de componentes de escala nanométrica, capazes de realizar uma tarefa específica em um nível nanométrico, como comunicação, computação, armazenamento de dados, sensoriamento e/ou atuação", disse Drexler, 1992 [21]. Em outras palavras, os nanodispositivos são máquinas muito simples que se limitam

a tarefas de baixa complexidade devido ao seu limitado espaço de trabalho, memória, poder de processamento e capacidades de comunicação. Como o nome nanodispositivos se auto explica, espera-se que esses dispositivos sejam construídos de alguns nanômetros a algumas centenas de nanômetros.

Outras características dos nanodispositivos variam dependendo da abordagem utilizada para o seu desenvolvimento. A abordagem de cima para baixo consiste em trazer a tecnologia atual para a nanoescala sem um controle de estruturas de nível atômico que é o proposto na tecnologia eletromagnética [22][23]. A abordagem de baixo para cima propõe a construção de nano-máquinas usando moléculas individuais como constituintes [9][21]. A abordagem bio-híbrida é inspirada em nano-máquinas biológicas, em que estruturas biológicas encontradas em organismos vivos, como organelas celulares humanas, são usadas como modelos para desenvolver novas nanomáquinas ou como blocos de construção integrando-as a sistemas mais complexos, como nano-robôs [9].

Nanonetworks têm inúmeras aplicações; no entanto, há uma semelhança nas arquiteturas propostas. Os componentes que estruturam esse tipo de arquitetura são: nano-nós, nano-rodeadores e interfaces Nano-micro conforme ilustrado na Figura 2.3.

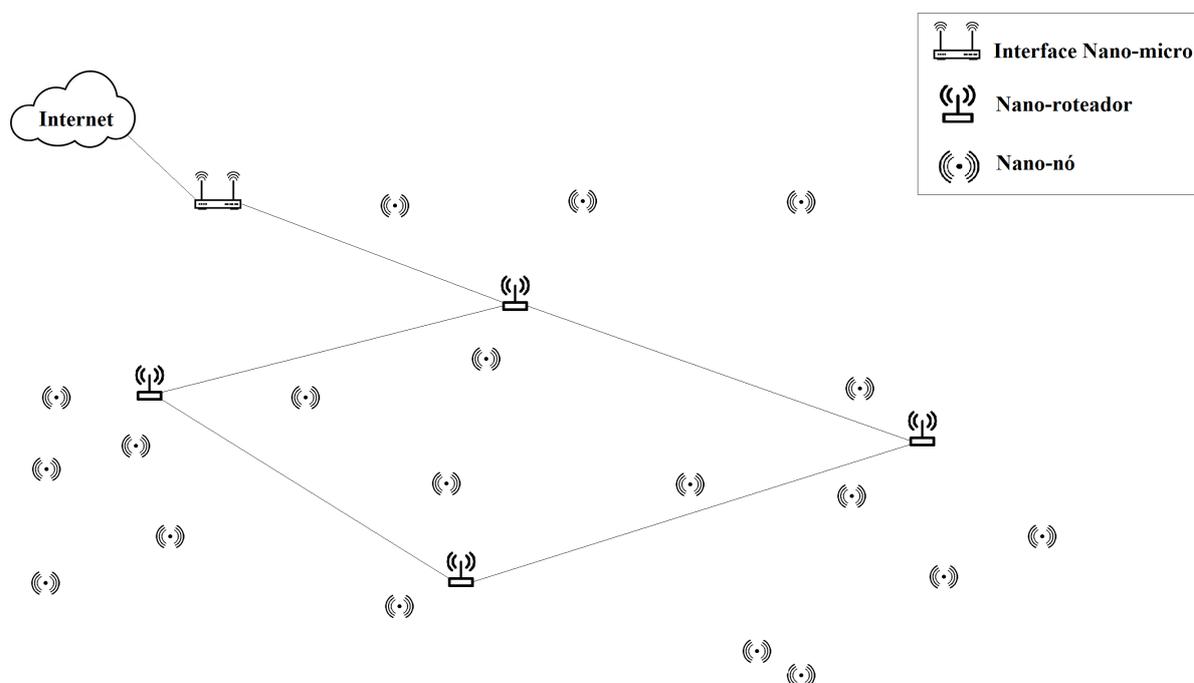


Figura 2.3: Dispositivos de comunicação eletromagnética sem fio na nanoescala [Autor]

2.3.2.1 Nano-nós

Nano-nós são os menores e mais simples dispositivos em uma nanonetwork. Devido ao seu tamanho mínimo, eles estão limitados a realizar tarefas simples. Eles também têm poder e memória limitados, só podem realizar cálculos simples, e são capazes de transmitir apenas em curtas

distâncias. Seu uso geralmente estará relacionado à obtenção de informações sobre a área alvo como sensores.

2.3.2.2 Nano-roteadores

Nano-roteadores são nanodispositivos com mais recursos do que os nano-nós. Eles são capazes de realizar computação mais complexa, que incluem agregar as informações provenientes de nano-nós, controlar o comportamento dos nano-nós com a emissão de mensagens de controle simples e enviar informações para os próximos componentes da arquitetura. Devido aos seus recursos amplificados em comparação com nano-nós, os nano-roteadores têm um tamanho maior tornando-se mais invasivos dependendo da aplicação.

2.3.2.3 Interfaces nano-micro

As interfaces nano-micro também são mais ricas em recursos do que os dispositivos anteriores na arquitetura, os nano-roteadores. Uma interface nano-micro é capaz de agregar dados de nano-roteadores e se tornar a interface entre o nano e o micro mundo convertendo os dados em comunicação eletromagnética convencional, como wi-fi e sinal de redes móveis. O contrário também é uma prática realizada por eles.

2.4 Arquitetura de Nanonetworks de Comunicação Eletromagnética

As nanonetworks e suas características de baixa potência, memória limitada e pequenas capacidades de processamento não são capazes de implementar a pilha de protocolos TCP/IP, uma vez que este modelo é destinado a redes multi-uso de alto processamento. Novas pilhas de protocolos foram propostas para atender às necessidades de nanonetworks, e tornou-se uma área ativa de pesquisa. Os modelos podem ser categorizados em modelos sem camada e modelos baseados em camadas.

No modelo sem camada é proposto o uso de nanonetworks de um nível. O modelo apresenta a ideia de que as camadas de enlace, rede, transporte e aplicação podem ser combinadas na camada física com base na comunicação de inundação (*flooding*). O *flooding* é utilizado com o objetivo de simplificar a comunicação eliminando a necessidade de endereçamento e identificação de nós, bem como roteamento e encaminhamento. Embora a estrutura de um nível lide com as limitações dos nanodispositivos, ela falha ao lidar com os desafios de mobilidade das nanonetworks e despreza o custo de classificação e o processamento de sinal em tempo real.

Os modelos baseados em camadas propostos tentam simplificar e adaptar a pilha de protocolos TCP/IP a nanonetworks ou sugerem modelos baseados em camadas projetados especificamente para nanonetworks. As camadas de protocolo com pesquisas e protocolos significativos propostos são as camadas físicas, de link e de rede. As seções seguintes apresentam uma visão geral das

múltiplas ideias sobre cada camada e fornecem a descrição dos modelos mais presentes em estudos recentes.

2.4.1 Camada física

2.4.1.1 Canal de Comunicação Eletromagnética

A faixa de operação de frequência mais comumente proposta para nano-redes sem fio tem sido o Terahertz. Embora o uso de frequências de Megahertz seja muito atraente para alcançar uma comunicação de longa distância, a necessidade de comunicação muito eficiente em termos de energia volta o foco para o Terahertz, variando de 0,1 a 10,0 THz, com comprimento de onda entre 3 μm e 3 mm, como a banda de frequência de nano comunicação.

Como a banda THz é um novo espectro a ser usado, a interferência de outras fontes de comunicação é praticamente inexistente. As características de baixa utilização, alta atenuação e grande largura de banda da frequência tornam a interferência menos provável de aumentar no futuro.

2.4.1.2 Modelagem do canal em Terahertz

Existem alguns modelos para caracterização e modelagem da banda THz que explora o que acontece com as ondas eletromagnéticas à medida que se propagam até chegarem ao receptor. Os modelos cobrem as possíveis perdas, dispersão e ruído para fornecer as considerações necessárias para projetar a codificação adequada para as aplicações desejadas.

Ao contrário da propagação de frequências bem estudadas, os canais THz têm novos desafios, como o aparecimento de efeitos de absorção molecular que podem criar picos de atenuação dependendo da composição molecular média e distância de propagação. Outro desafio é que alguns materiais se tornam meios de perda e reflexivos para esta banda, enquanto que não são para micro-ondas, por exemplo.

A modelagem do canal tem relação direta com o meio. Espera-se que as nanonetworks sejam utilizadas em uma variedade de aplicações como mencionado anteriormente, assim, os modelos de propagação devem ser desenvolvidos para aplicações e cenários específicos para que a generalização não deixe determinada aplicação com modelos imprecisos.

2.4.1.3 Modelos de Propagação em Terahertz

O comprimento de onda em THz está em uma dimensão que o tipo de moléculas que o meio tem e as irregularidades nas superfícies em que reflete começam a interferir na sua propagação. Os modelos de propagação devem explicar estes efeitos antes insignificantes.

Um modelo proposto por Kokkonieni et al. em [24] chega a uma equação de perda de caminho no espaço livre para a propagação em linha de visada é dada como mostrado na equação (1). A perda de passe ($A_{LoS}(f)$) leva em conta a perda de propagação ($A_{spr}(f)$), a absorção molecular

($A_{mol}(f)$) e a perda de dispersão ($A_{sca}(f)$).

$$A_{LoS}(f) = A_{spr}(f)A_{mol}(f)A_{sca}(f) \quad (2.1)$$

Além disso, Jornet e Akyildiz em [25] propuseram um modelo para a temperatura do ruído, como mostrado na equação. (2.2). Quando o ruído eletrônico típico (T_{sys}) é adicionado ao ruído de absorção molecular (T_{mol}) e qualquer outra fonte de ruído adicional (T_{other}) presente no momento.

$$T_{noise} = T_{sys} + T_{mol} + T_{other} \quad (2.2)$$

A absorção molecular está relacionada com a conversão de energia radiante em energia de oscilação de molécula excitada. Isso acontece na atmosfera devido a frequência de ressonância de algumas moléculas comuns está nos THz. Jornet e Akyildiz propuseram a atenuação $A_{mol}(f)$ causada pela absorção molecular apresentada na equação (2.3).

$$A_{mol}(f, d) = e^{Ka(f)d} \quad (2.3)$$

O coeficiente de absorção média representado por $Ka(f)$ está relacionado à sua composição molecular e a frequência f ; d é a distância de transmissão. O ruído molecular mencionado também foi modelado como mostrado na equação (2.4).

$$T_{mol}(f, d) = T_0(1 - e^{-Ka(f)d}) \quad (2.4)$$

A temperatura de referência é representada por T_0 . A atenuação da dispersão de partículas (A_{sca}) mencionada na equação (2.1) é dada por

$$A_{sca} = e^{Ks(f)d} \quad (2.5)$$

O coeficiente de dispersão de partículas $Ks(f)$ está relacionado com a frequência que Jornet e Akyildiz [25] utilizaram seu modelo para estudar a absorção com base na composição do meio e seu impacto na capacidade do canal.

2.4.1.4 Protocolos de comunicação

As nanonetworks eletromagnéticas sem fio devem estruturar a camada física para transmitir efetivamente seus bits de comunicação na frequência THz. Os mesmos indicadores de taxas de dados e de erro como em comunicação sem fio tradicional são esperados na nanoescala. Como mencionado anteriormente, a nano-comunicação THz trouxe uma série de variáveis, como a absorção molecular, que requerem novos métodos para lidar com suas restrições. A maioria das propostas defende o uso de modulação não complexa, como *On-Off Keying*.

On-Off Keying (OOK) é um tipo de modulação em amplitude por chaveamento (*Amplitude Shift Keying* - ASK) em sua forma mais simples. O OOK consiste em representar dados digitais usando ASK em que a onda portadora tem dois níveis, e um deles é de frequência zero. Assim, a

detecção de um portador por algum tempo definido representa o um binário, e a não detecção de portadora representa o zero binário.

O trabalho de Lemic et. al. [4] apresenta uma série de protocolos propostos ao longo do tempo com o objetivo de satisfazer as demandas de camadas físicas. Foram feitas comparações entre OOK baseado em pulso sem portador e outros protocolos como o modelo de chave de mudança de fase binária (BPSK), modulação de amplitude de pulso (PAM) e Modulação de Posição de Pulso (PPM). O resultado da comparação dos modelos é que o BPSK é mais complexo devido à sua lógica de decodificação, no entanto, é o mais eficiente e confiável na comparação. OOK e PPM foram claramente mais simples com resultados mais baixos, e PAM foi desencorajado por seu desempenho indesejável. O desafio é claro entre eficiência e recursos escassos. O BPSK pode não ser acessível para nanodispositivos, por isso foram propostos ajustes no OOK.[4]

Apresentamos a seguir o protocolo de destaque TS-OOK [26] e ressaltamos que uma série de outros protocolos de camada física foram propostos para a nano-comunicação de THz como o *Symbol Rate Hopping TS-OOK* de Mabed [27], ASRH-TOOK de Mabed e Bourgeois [28] e o *Pulse-level beam-switching (PLBS)* de Lin e Weitnauer em [29] que são melhorias ao TS-OOK. O desenvolvimento das nanonetworks continua teoricamente. As propostas são matematicamente estudadas e simuladas, no entanto, a experimentação prática ainda não é possível. Os materiais de dispositivos THz na nanoescala ainda estão sendo estudados e a materialização dele ainda não é viável.

2.4.1.4.1 TS-OOK

Jornet e Akyildiz em [26] propuseram uma modulação baseada em pulso chamada *Time-Spread On-Off Keying* (TS-OOK) com o objetivo de manter a simplicidade do OOK e trabalhar na melhoria de sua eficiência. O trabalho baseia-se no uso de pulsos de cerca de 100 femtosegundos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) de duração e mantendo um intervalo entre pulsos muito maior do que o pulso em si. O uso de pulsos extremamente curtos permite o alcance de larguras de banda THz e o longo intervalo entre eles proporciona eficiência energética.

Na comunicação TS-OOK, um 1 lógico é representado pelo pulso de 100 fs e um 0 lógico é representado pelo silêncio. Os nanodispositivos não controlam precisamente a amplitude e a fase dos pulsos transmitidos, mantendo assim a simplicidade do OOK. Para distinguir entre o silêncio de um "0" lógico e nenhuma transmissão, propõe-se o uso de preâmbulos de inicialização e pacotes de comprimento constante. Com o tempo determinado entre a transmissão o receptor não precisa estar continuamente sentindo o canal, uma vez que o preâmbulo de inicialização acontece, ele apenas aguarda a próxima transmissão. O modelo não requer sincronização precisa continuamente, uma vez apresentado o preâmbulo de inicialização, os dispositivos específicos ficam sincronizados.

A presença de vários usuários em um cenário de comunicação TS-OOK é possível devido ao fato de que o tempo entre as transmissões é muito maior do que a duração do pulso. A curta duração dos pulsos torna as colisões menos propensas a acontecer. Um exemplo com dois usuários está ilustrado na Figura 2.4, onde no topo temos o primeiro usuário transmitindo a sequência "1100"; no meio o segundo usuário transmitindo a sequência "1001" e na parte inferior, as sequências sobrepostas no lado do receptor. É possível perceber que a transmissão quase que simultânea não gerou colisão

entre os sinais enviados e que o sinal em verde, apesar de ter sofrido perda de propagação, foi recebido com uma amplitude suficiente para sua correta decodificação.

A simplicidade do OOK torna as colisões quase que inexistentes entre os silêncios e isso só acontece entre um pulso e um silêncio quando um silêncio é esperado. Assim, colisões são improváveis, mas podem acontecer e, conseqüentemente, criam interferências multi-usuárias.[26]

Modelos para melhorar o controle de interferência de vários usuários ao TS-OOK foram propostos por vários autores. Também foram propostas variações de TS-OOK em busca da otimização e particularização do modelo para uma série de cenários.

Uma Divisão de Taxa de Acesso Múltiplo (RDMA) é proposta para minimizar a interferência a baixo custo. A combinação de TS-OOK com PPM também está presente em pesquisas. Consiste em representar cada símbolo como o tempo entre pulsos, a ideia permite a transmissão de múltiplos bits entre cada pulso e é muito eficiente em termos de energia.

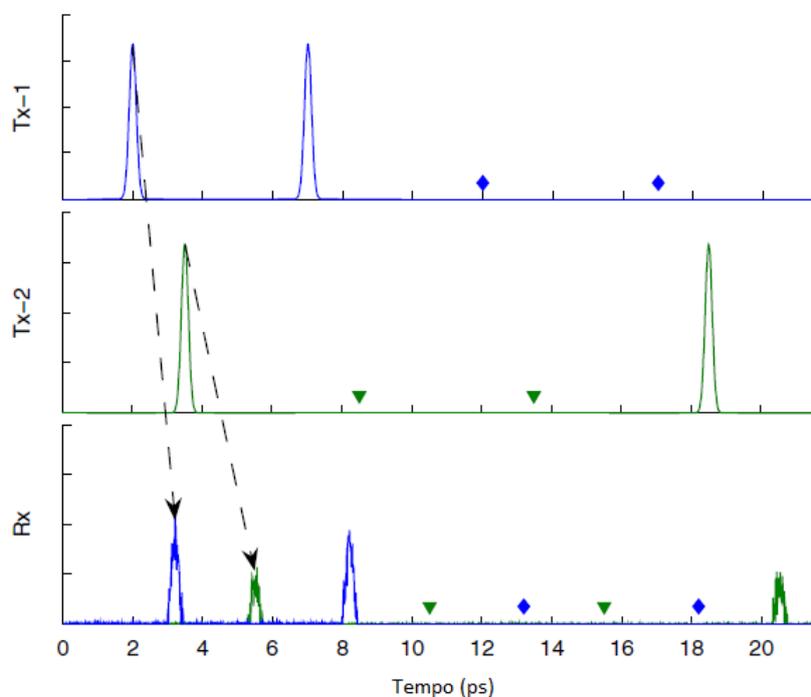


Figura 2.4: Ilustração do *Time Spread On-Off Keying* (TS-OOK)[26]

O próximo passo para avançar com a modulação de camadas físicas foi o uso de codificação para melhorar a eficiência energética e reduzir a complexidade dos comunicadores. O TS-OOK juntamente com a codificação de baixo peso, como a verificação de paridade de baixa densidade, foi a primeira ideia com resultados teóricos que mostram que a interferência pode ser reduzida e, ao mesmo tempo, manter ou mesmo aumentar a taxa de informação.

2.4.2 Camada de enlace

As características da camada de enlace de fornecer os meios de transferência de dados entre dispositivos de rede e métodos para detectar ou até mesmo corrigir erros que aconteceram na camada física podem beneficiar bastante as nanonetworks. No entanto, o desafio segue sendo oferecer soluções adequadas às limitações das nanonetworks.

Uma vez que a comunicação THz está no foco da pesquisa para nanonetworks da comunidade científica, protocolos de camada de enlace projetados para nano-comunicação THz foram propostos. Apresentamos quatro deles nas seções abaixo e citamos aqui uma série de outros também protocolos, sendo eles: *Distributed timely throughput optimal scheduling* de Akkari et. al. [30], *A link-layer synchronization and medium access control protocol – LLS-MAC* de Xia et. al. in [31], *An energy and spectrum-aware MAC protocol – ESA-MAC* de Wang et. al. [32], *Pulse arrival scheduling - APIS* de Yu et. al. [33], *Energy Efficient Wireless Nano Sensor Network MAC protocol (EEWNSN-MAC)* de Rikhtegar et. al. [34] e *slotted CSMA/CA based energy efficient MAC protocol (CSMA-MAC)* de Lee et. al. [35]. Cada um com abordagens simplificadas buscando oferecer formas de controle de acesso ao meio consumindo a menos quantidade de recursos possível.

2.4.2.1 Transparent-MAC

O trabalho de Piro et. al. [5] propõe dois protocolos MAC: o Transparent-MAC e o Smart-MAC.

O protocolo transparent-MAC funciona como uma ponte entre a camada de rede e a camada física sem executar qualquer tipo de procedimento ou controle. Ele simplesmente entrega o pacote de uma camada para a outra.

2.4.2.2 Smart-MAC

O Smart-MAC propôs mais eficiência. Um pacote recebido da camada de rede é armazenado pela primeira vez em uma fila. O protocolo executa um aperto de mão para descobrir os nanodispositivos dentro de seu alcance que são capazes de estabelecer comunicação. Quando há nós dentro do alcance, o MAC manuseia o pacote até a camada física. Se a camada de rede não tiver determinado o nó de destino, o MAC escolhe-o aleatoriamente entre o nós dentro de alcance. Quando nenhum nó é detectado, o MAC espera um tempo de recuo aleatório e inicia o aperto de mão novamente. Quando a fila tem vários pacotes, a transmissão acontece em intervalos de horário definidos pelo mesmo mecanismo de recuo aleatório mencionado acima. O trabalho pioneiro de Piro et. al. [5] é referência para protocolos mais avançados que se seguiram.

2.4.3 Camada de rede

Nanomáquinas que não podem se comunicar efetivamente com servidores de controle são na maioria dos cenários inúteis. As nanonetworks exigem protocolos confiáveis de camada de rede

para poder executar suas aplicações imaginadas.

A fim de permitir que as nano-redes sejam totalmente funcionais, foram propostos protocolos de camada de rede para funcionar em cima dos protocolos de comunicação THz de camada física e de enlace anteriormente mencionados. Esta seção apresentará alguns protocolos que foram propostos. Eles foram projetados com diferentes métodos, como encaminhamento e inundações (*flooding*) buscando o equilíbrio entre a limitação de recursos e eficiência. Exemplos de protocolos propostos além dos apresentados abaixo são: *Cross-layer analyses of optimal relaying strategies* de Xia and Jornet [36], *Forwarding scheme for EM-based wireless nanonetworks* de Yu et al [37], *Relay-assisted nanocommunication* de Rong et. al. [38], *Energy and signal quality aware data aggregation routing -PESAWNSN* de Yen [39] e *Lightweight self-tuning data dissemination protocol* de Tsioliariidou et. al. [40].

2.4.3.1 Flooding

Piro et. al. [5] apresenta o uso do protocolo já conhecido *flooding* agora aplicado em nano-networks. O *flooding* determina que quando o nó recebe uma mensagem de uma camada superior a de rede ou de um outro dispositivo pelas camadas inferiores ele envia esse pacote a todos os dispositivos que se encontram dentro do seu alcance de transmissão. Este é um protocolo extremamente simples que exige baixa capacidade de processamento, memória e energia para seu funcionamento.

Com o intuito de evitar o desperdício de largura de banda e energia foi proposto uma melhoria para o *flooding* para evitar a transmissão duplicada de pacotes, um cabeçalho contendo informação de um número de identificação (ID) e um número de identificação do nó de origem (*source-ID*) é acrescido a cada pacote e cada nó armazena uma pequena lista dos últimos pacotes enviados evitando a retransmissão desnecessária de pacotes. Chamamos esta versão do protocolo de *flooding* sem retransmissão.

2.4.3.2 Random Routing

Piro et. al. [5] apresenta um protocolo de roteamento que consiste em, quando houver pacotes a serem enviados, escolher aleatoriamente entre seus vizinhos um nó e enviá-lo o pacote. O protocolo espera que cada nó conheça todos os outros nós que estão dentro do seu alcance transmissão. Ou seja, este protocolo deve trabalhar em conjunto com um protocolo de camada de enlace que faça a descoberta de vizinhos. Para evitar que retransmissões cíclicas (*loops*) ocorram, as informações de ID do pacote e ID do nó do próximo salto são salvas e utilizadas para que o nó sempre escolha um próximo salto aleatório não repetido, evitando *loops*.

2.4.3.3 Finite State Machine (FSM)-based routing

Amazonas, Hesselbach e Giozza apresentam em [41] um protocolo capaz de realizar o roteamento de pacotes através do uso de rotas geradas por um mecanismo baseado no *Trellis Coded Networks* (TCNets) e implementado por máquinas de estado finita (*Finite State Machine* - FSM).

Buscando proporcionar roteamento por rotas sem a necessidade de armazenamento de tabelas de roteamento e rotinas de descoberta de vizinhos. A Figura 2.5 ilustra nós de uma rede modelados por FSM, o estado (i) representa o nó(i), com o deslocamento dado pela sequência $k(n)$ passa para o estado (j) que representa o nó(j).

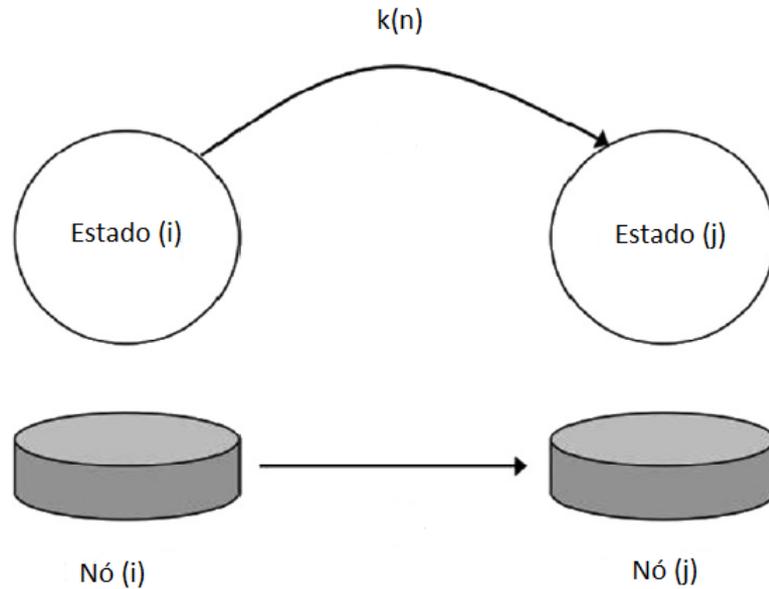


Figura 2.5: Nós de uma nanonetwork modelados por um FSM [41]

Para esclarecer o funcionamento do protocolo, um exemplo do mecanismo de geração de rotas do protocolo é apresentado, conforme ilustrado na figura 2.6. Considerando que cada nó de uma nanonetwork de 32 nós é identificado por um endereço lógico de 5 bits e considerando que buscamos uma rota de três saltos (hops =3) com o uso de deslocamentos de dois bits ($k = 2$) entre o nó 15 e o nó 26. Temos que o estado inicial é o endereço do nó de origem dado em número binário por 01111, o primeiro passo é realizar o deslocamento dos bits da esquerda para a direita deixando espaço para dois novos bits, $01111 \rightarrow _ _ 011$, em seguida um sequência $k(n)=(k_1, k_0)=(00)$ é inserida, $00 \rightarrow \underline{00}011 = 3$, ou seja o segundo estado é o nó 3, repetindo o processo para o próximo salto, $00011 \rightarrow _ _ 000 \rightarrow \underline{01}000 = 8$, e finalmente, $01000 \rightarrow _ _ 010 \rightarrow \underline{11}010 = 26$, assim uma rota válida entre o nó 15 e 26 utilizando o protocolo FSM-based com três saltos é $15 \rightarrow 3 \rightarrow 8 \rightarrow 26$. Uma outra possível rota entre os mesmo nós seria $15 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 26$. Quanto maior a quantidade de saltos e de deslocamentos de bits, maior a quantidade de rotas válidas entre dois nós. O processo de geração de rotas é completamente cego em relação à topologia física da rede, a latência das transmissões é superior por não se utilizar de mecanismos de descoberta de vizinhos, o consumo de energia é reduzido em relação a abordagens de retransmissão sem restrições e a implementação pode ser realizada em hardware de baixa complexidade com registros de deslocamento de bits e portas lógicas *xor*.

Exemplo do protocolo FSM para $h=3$ e $k=2$:

$$\begin{aligned}
 15 &= 01111 \rightarrow _ _ 011 + k_seq = \underline{00}011 = 03 \\
 03 &= 00011 \rightarrow _ _ 000 + k_seq = \underline{01}000 = 08 \\
 08 &= 01000 \rightarrow _ _ 010 + k_seq = \underline{11}011 = 26
 \end{aligned}$$

Logo a rota é $15 \rightarrow 03 \rightarrow 08 \rightarrow 26$

Figura 2.6: Exemplo de criação de rota FSM [Autor]

2.4.3.4 Finite State Machine (FSM)-based routing by tables

Carneiro e Amazonas [42] apresentam uma nova abordagem ao roteamento baseado em máquina de estado finita que busca melhorar a eficiência energética e a taxa de entrega de pacotes por meio da utilização de tabelas de roteamento ajustáveis ao invés de rotas previamente calculadas como na proposta original.

Considerando uma rede com 128 nós, cada um com um endereço lógico de 7 bits, e buscando gerar rotas com deslocamento de 3 bits ($k=3$) e quatro saltos. Uma forma de gerar rotas, por exemplo, do nó 71, 1000111 em binário, para o nó 47, 0101111 em binário, é ilustrada pelas tabelas da Figura 2.7.

1	0	0	0	1	1	1
c	b	a	1	0	0	0
1	e	d	c	b	a	1
1	1	1	1	e	d	c
0	1	0	1	1	1	1

c	b	a	1	0	0	0
1	e	d	c	b	a	1
1	1	1	1	e	d	c
0	1	0	1	1	1	1

1	e	d	c	b	a	1
1	1	1	1	e	d	c
0	1	0	1	1	1	1

1	1	1	1	e	d	c
0	1	0	1	1	1	1

Figura 2.7: Tabela de roteamento com bits livres [42]

A tabela é composta por bits fixos e livres. Os bits fixos estão relacionados aos endereços lógicos de origem e destino e não podem ser alterados os bits livre são preenchidos à medida que os saltos acontecem. Inicialmente o nó 71 envia o pacote com a tabela a partir da segunda linha, os nós que estão dentro do seu alcance recebem o pacote e analisam a tabela verificando primeiramente se seu endereço lógico é igual ao da última linha da tabela (o endereço de destino), caso afirmativo o pacote foi recebido no destino, caso contrário o nó verifica se o seu endereço é compatível ao endereço da primeira linha, por exemplo, se o nó 8 (0001000) recebe ele é um possível nó intermediário assim ele retransmite o pacote removendo a linha compatível com seu endereço e preenchendo seu bits na linha seguinte. Todos os nós ao alcance do nó 8 recebem a mensagem e fazem a mesma avaliação caso o nó 65 (1000001) receba a mensagem ele a reencaminhará e se o nó 120 receber ele poderá encaminhar diretamente para o destino 71. Ou seja, não é necessário geral

2^n rotas, onde n é o número de bits livres, e verificar em cada uma se o nó recebendo a mensagem faz parte dela. Essa melhora na abordagem pode oferecer significativa melhoria de desempenho energético e de entrega de pacotes.

		a	b	c	d	e			
		0	0	0	0	0			
		C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
71	← 1000111 ←	1	0	0	0	1	1	1	R5
8	← 0001000 ←	0	0	0	1	0	0	0	R4
65	← 1000001 ←	1	0	0	0	0	0	1	R3
120	← 1111000 ←	1	1	1	1	0	0	0	R2
47	← 0101111 ←	0	1	0	1	1	1	1	R1

Rota 1	71 → 8 → 65 → 120 → 47
--------	------------------------

Figura 2.8: Tabela de roteamento com exemplo de rota gerada por FSM por tabelas [42]

2.4.4 Modelo de arquitetura unificada

As nanonetworks, como tem sido discutida até agora, têm sua maior limitação relacionada às restrições de energia, memória e processamento dos nanodispositivos. O uso da comunicação de banda THz para nanonetworks é promissor, no entanto, as redes de comunicação precisam de protocolos de camada confiáveis como apresentado acima. A modulação, esquemas de codificação, detecções de erros, agregação de dados, roteamento eficiente e controle de acesso médio são exemplos de medidas capazes de fornecer a comunicação confiável necessária. Obviamente, quanto menos atividades de processamento são realizadas por nanodispositivos, mais viável seu uso se torna. Assim, a maioria dos autores acredita que a computação pesada deve ser feita por máquinas poderosas fora do contexto dos nanodispositivos.

O trabalho de Galal e Hesselback [43] propõe um modelo de arquitetura flexível unificada de Nanonetworks baseado em uma plataforma de redes definidas por software (Software Defined Networks - SDN), internet das coisas (Internet of Things- IoT), computação em nuvem e Tecnologias de Virtualização de Funções de Rede (NFV). O modelo é composto por cinco camadas, camada de SDN, camada IoT, camada de computação de borda e camada NFV, conforme ilustrado na Figura 2.5.

A camada de nanonetworks compreende a estrutura discutida nas seções anteriores. Contém os nanodispositivos, nano-roteadores e interfaces nano-micro ou gateways. Esta camada é responsável por coletar dados de nanosensores e transmitir as instruções para nanomáquinas. A camada é a mais limitada em recursos e deixa a tomada de decisão para as camadas acima.

A camada de SDN é responsável pelo encaminhamento de dados de e para os nanodispositivos de forma otimizada. Seus switches habilitados para SDN programáveis recebem comandos de um controlador SDN que define as redes para a configuração mais adequada para cada cenário.

A camada IoT, ou mesmo a camada internet de nano-coisas (IoNT), é uma camada de serviço onde os aplicativos IoT podem controlar o controlador SDN e, conseqüentemente, as nanonetworks. Essa camada oferece gerenciamento de dispositivos como operação, atualização, registro e monitoramento.

A camada de computação de borda consiste em um serviço que não é tão robusto quanto o oferecido pela camada NFV, mas é extremamente ágil, oferecendo assim grande responsividade às nanonetworks.

A camada NFV é o núcleo da estrutura. Ele controla o sistema por um gerenciador de infraestrutura virtualizada (VIM) que usa computadores de alto desempenho. A virtualização da rede permite que uma série de estruturas heterogêneas co-habitem na estrutura, cada uma contida conforme necessário para o melhor desempenho da rede. Esta poderosa camada usa seus recursos para controlar sistematicamente os nanodispositivos e lidar com os desafios de suas restrições, bem como com as peculiaridades da comunicação de banda THz.

O desenvolvimento de tecnologias como SDN, IoT e NFV certamente será usado para a vantagem das nanonetworks. À medida que os campos apresentados se desenvolvem, a estrutura proposta pode ser testada e melhorada para futura implementação da vida real.

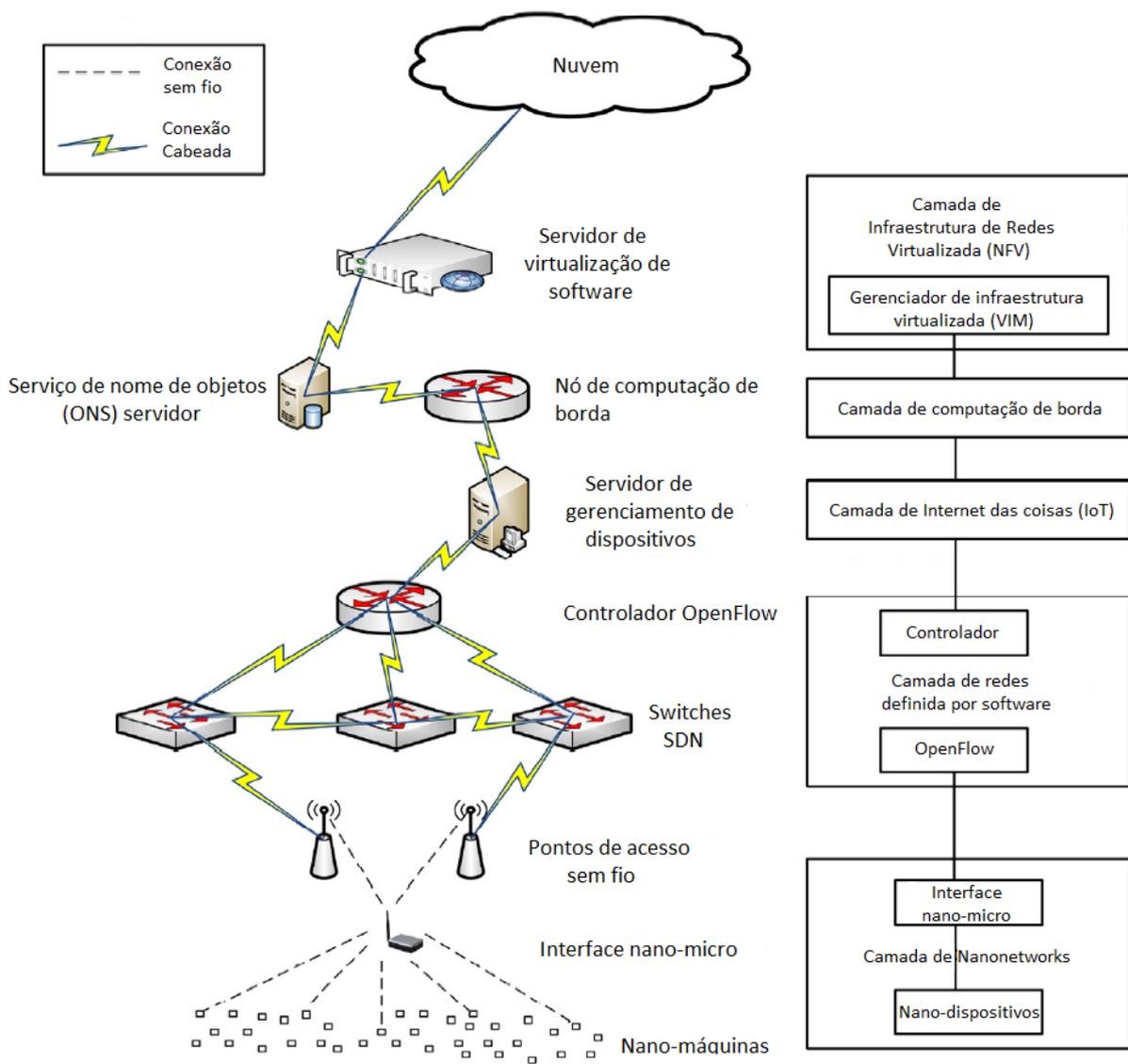


Figura 2.9: Esquemático do modelo de arquitetura unificada [Adaptado de 43]

Capítulo 3

Métricas, Ferramentas e Cenários de Simulação

A avaliação de desempenho de redes de comunicação tradicionais tem sido feita de diversas maneiras ao longo dos anos, muitas ferramentas e métricas são usadas para analisar o quão bem elas proporcionam comunicação. Por as nanonetworks ainda não terem sido implementadas no sentido prático, a modelagem matemática e a simulação são os instrumentos de avaliação comumente. Nesta seção apresentamos uma visão geral de como os protocolos de nano-redes que tem sido propostos são avaliados.

3.1 Métricas

Cada um dos autores tem tentado analisar suas propostas com base nas melhorias que fazem nas nanonetworks. Não há um padrão de como cada tipo de protocolo foi avaliado, no entanto, superar as restrições de recursos das nanonetworks tem sido o objetivo de todos os autores, assim as métricas estão sempre relacionadas à melhora do consumo de energia, à redução do uso de memória e à demanda de processamento, levando em conta as peculiaridades da frequência Terahertz. Uma visão geral das métricas é apresentada nas seções a seguir, organizada por camadas.

3.1.1 Métricas de camada física

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos protocolos de camada física foram principalmente focadas em determinar a capacidade do protocolo de entregar um bom throughput com baixa probabilidade de colisão e perda de pacotes. O protocolo TS-OOK, apresentado no Capítulo 2, foi avaliado com a avaliado pelo consumo de energia, taxa de dados por usuário e taxa de dados agregada, por exemplo. Os demais modelos seguem com métricas iguais ou similares.

3.1.2 Métricas da camada de enlace

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos protocolos de camada de enlace foram focadas na perda de pacotes, atraso e consumo de energia, o que é muito compatível com a natureza do controle de acesso meio feito por essa camada. Dos protocolos apresentados neste trabalho o Transparent-MAC por não realizar nenhuma atividade de camada de enlace, não foi avaliado individualmente; O Smart-MAC utilizou a relação de perda de pacotes e a escalabilidade.

3.1.3 Métricas de camada de rede

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos protocolos de camada de rede foram focadas em toda a capacidade da rede para se comunicar entre todos os dispositivos levando em conta as limitações das nanonetworks. Dos protocolos de camada de rede apresentados neste trabalho, todos foram avaliados pelo consumo de energia e taxa de entrega de pacotes. Estas duas métricas serão utilizadas nas avaliações de desempenhos realizadas neste trabalho cujos resultados serão apresentados no Capítulo 4.

3.2 Ferramentas de simulação

Para avaliar propostas de nano-redes, ferramentas de simulação foram desenvolvidas para fornecer um certo nível de evidência de que a pesquisa está progredindo na direção certa. Alguns simuladores mais recentes são o Vouivre de Boillot et. al. [44], o BitSimulator de Douthaut et. al. [45], e os módulos de simulação do simulador ns3, o NanoSim e o TeraSim apresentados abaixo.

3.2.1 Nano-Sim

Nano-Sim [5] é uma ferramenta de simulação que foi desenvolvida em cima do Network Simulator 3 (ns-3), um simulador de rede de eventos discretos para sistemas de internet, focado principalmente em pesquisa e uso educacional. Nano-Sim foi projetado para fornecer simulação sólida para redes de nano-sensores sem fio baseadas na comunicação eletromagnética na banda THz.

O Nano-Sim fornece três tipos de nanodispositivos para configuração de arquitetura de rede: nano-nós, nano-roteadores e interfaces nano-micro. Os autores acreditam que essa estrutura é capaz de ser utilizada para simulações de diversas aplicações, como monitoramento da saúde no campo biomédico, monitoramento de plantas no campo ambiental, escritórios interligados no campo industrial e defesas químicas no campo militar.

Os nanodispositivos apresentados podem ser avaliados tanto em cenários estáticos quanto móveis. O Nano-Sim é compatível com modelos de mobilidade do ns-3 que permitem simulação de posição constante, aceleração constante, velocidade constante, caminhada aleatória, direção aleatória e simulação de pontos de passagem aleatórios.

O simulador fornece protocolos de nanonetworks de camada física, de enlace e de rede. Alguns desses protocolos são propostos pelos autores como novos modelos. A camada física é baseada no protocolo TS-OOK que implementa o esquema de modulação mais promissor para a comunicação THz até agora. Os parâmetros TS-OOK, como energia de pulso, duração e tempo de intervalo, podem ser configurados pelo usuário para corresponder aos seus cenários específicos. A camada física é capaz de detectar se a colisão ocorreu pela sobreposição de pulsos de diferentes transmissões.

A camada de link é composta por dois protocolos, o Transparent-MAC e o Smart-MAC. Os parâmetros de atraso do Smart-MAC, extraídos do intervalo (tempo mínimo de *backoff*, tempo máximo de *backoff*) são modificáveis pelos usuários.

A camada de rede do Nano-Sim fornece uma estrutura flexível para a implementação de novos protocolos. A camada de rede é responsável pelo cabeçalho do pacote que contém cinco campos: dev-ID de origem, Dev-ID do remetente, Dev-ID do nó do próximo salto, ID do pacote e *Time To Live* (TTL). Junto com essas informações, há uma informação que determina se o pacote deve ser enviado para a interface nano-micro ou para nano-nós. Os dois protocolos disponíveis para simulações são o *flooding* e o *random routing*.

3.2.2 TeraSim

O trabalho de Hossain et. al. [6] propõe o TeraSim, um simulador de banda nanonetworks THz sem fio. O objetivo deste simulador é fornecer os recursos esperados para nanodispositivo, as especificidades do canal THz e a solução com protocolos de camada física e de enlace para comunicação THz. O TeraSim é construído em cima do ns-3, herdando todas as suas funcionalidades amplamente validadas. O simulador foi projetado não só para comunicação nanoescala THz, mas também para macroescala.

O TeraSim implementa o modelo de canal seletivo de frequência que leva em conta a absorção molecular na comunicação THz e possui dois conjuntos de módulos de camada física e MAC, um para nanoescala e outro para simulações de macroescala. Ele implementa um modelo de colheita de energia para simulação de nanoescala e modelo de antena direcional para simulação de macroescala. Possui um módulo de canal comum para protocolos de camadas superiores tanto para cenários nano quanto de macroescala.

A camada física oferece o modelo TS-OOK baseado em pulso para cenários nano e modelo de onda contínua para cenário de macroescala. A camada de enlace fornece protocolos simplificados baseados no ALOHA e CSMA como o Transparent-MAC e o Smart-MAC. O TeraSim como um repositório aberto destina-se a oferecer à comunidade de pesquisa uma solução para validar ideias de comunicação de THz com a precisão sem ter que se preocupar com as peculiaridades da parte física dos modelos THz.

3.3 Implementação de protocolos nos módulos do simulador ns-3

Como contribuição às ferramentas de simulação de nanonetworks de comunicação na banda THz sem fio disponíveis no ns3, foi selecionado o módulo TeraSim para a implementação de protocolos de roteamento. O Nano-Sim apesar de ter implementado protocolos de todas as camadas, ainda não leva em consideração peculiaridades da frequência THz e da nanoescala que afetam o desempenho dos protocolos como o TeraSim faz. Assim, com o objetivo de obter o melhor dos dois módulos foi realizada a validação de ambos módulos e selecionado o protocolo de roteamento de melhor desempenho no Nano-Sim, o *flooding* sem retransmissão, e um protocolo recém proposto, roteamento baseado em FSM, para a implementação no módulo de simulação TeraSim.

Conforme disponibilizado pelo Northeastern University Lab, o TeraSim não possui protocolos de roteamento implementados, porém apresenta protocolos de camada física e enlace. Duas versões do protocolo de roteamento *flooding* foram implementadas, uma a tradicional sem nenhum controle de retransmissão e a outra melhorada com o controle de retransmissão como apresentada por Piro et. al. [5] e implementada no Nano-Sim. O *flooding* é um dos protocolos mais simples e mais utilizados na comparação de desempenho entre novos protocolos para nanonetworks.

Duas versões do protocolo de roteamento baseado em máquina de estado finita (FSM) foram implementadas. A primeira versão é a apresentada por Amazonas et. al. [41] com a criação de uma tabela de rotas possíveis e a segunda conforme apresentado por Carneiro e Amazonas [42] com o modelo por tabelas apresentado na seção 2.4.3.4. O protocolo FSM ainda não havia sido implementado no ns3, apenas em linguagem R, assim, busca-se avaliar o desempenho do protocolo levando em conta não somente a camada de rede como já desenvolvido, mas considerando as camadas física e de enlace e as características da tecnologia implementada.

3.3.1 Validação dos módulos TeraSim e Nano-Sim

As simulações realizadas neste trabalho foram feitas utilizando o simulador Network Simulator 3, simulador desenvolvido na linguagem de programação C++, versão 3.30, em uma máquina com sistema operacional Linux Ubuntu, versão 18.04, sobre um processador de oito núcleos com 3,6 GHz de frequência e 8GB de memória RAM.

O simulador NS-3 na versão utilizada apresenta um mecanismo de teste e validação de módulos cuja execução produz como resultado a afirmação que o módulo funciona conforme programado pelo desenvolvedor ou não. O TeraSim possui quatro arquivos teste que foram executados, *test-thz-pds-macro*, *test-thz-pds-nano*, *test-thz-directional-antenna* e *test-thz-path-loss* com o resultado de aprovado em todos. Os resultados de validação estão apresentados no Anexo I.

O módulo Nano-Sim não possui arquivos teste, logo, sua validação foi feita por meio de replicação da simulação do artigo de apresentação [5] e análise dos resultados por tendências devido a falta de documentação dos resultados em valores absolutos no artigo. Os gráficos com os resultados da replicação da simulação estão disponíveis no Anexo II.

3.3.2 Implementação dos protocolos de roteamento

O módulo TeraSim é composto por objetos Nodes que possuem um ou mais objetos THzNetDevice que é derivado do objeto NetDevice padrão do ns3. O THzNetDevice possui ponteiros para os objetos THzMac e THzPhy que proporcionam os protocolos e mecanismo das camadas física e de enlace. O THzPhy utiliza o THzSpectrumValueFactory para geração de pulso da comunicação com o protocolo TS-OOK que são enviados ao objetos THzChannel permitindo assim a comunicação com outros nós. O THzChannel utiliza o THzSpectrumPropagationLoss para simular as características do canal de transmissão. A Figura 3.1 apresenta uma ilustração da arquitetura de objetos do módulo TeraSim.

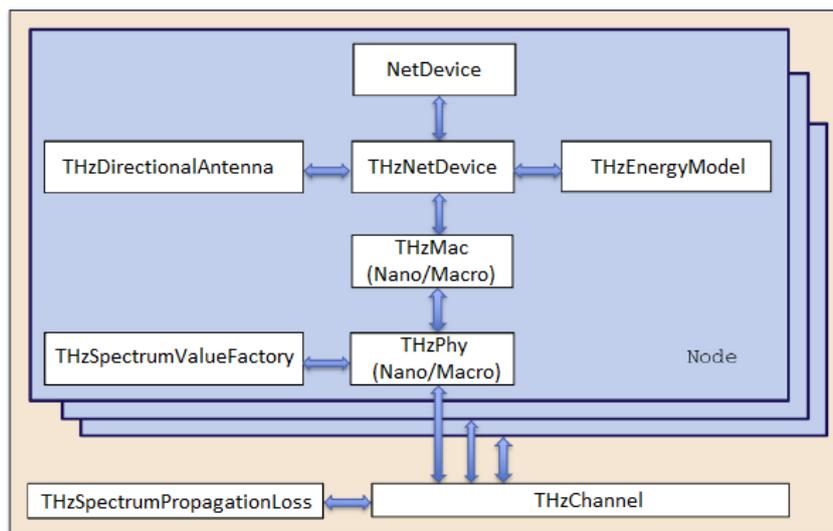


Figura 3.1: Estrutura de objetos do TeraSim [6]

O módulo THzNetDevice serve como base para o desenvolvimento de protocolos de camada de rede e através dele estes protocolos recebem e enviam demandas das camadas superiores e inferiores. Os protocolos foram implementados por meio da introdução de funções no objeto THzNetDevice que representam a camada de rede, assim como a implementação do modelo de energia apresentado por Amazonas et. al. [48] através de um novo objeto THzEnergyFsm. O fluxo de pacotes pelo módulo seguem a lógica ilustrada na Figura 3.2.

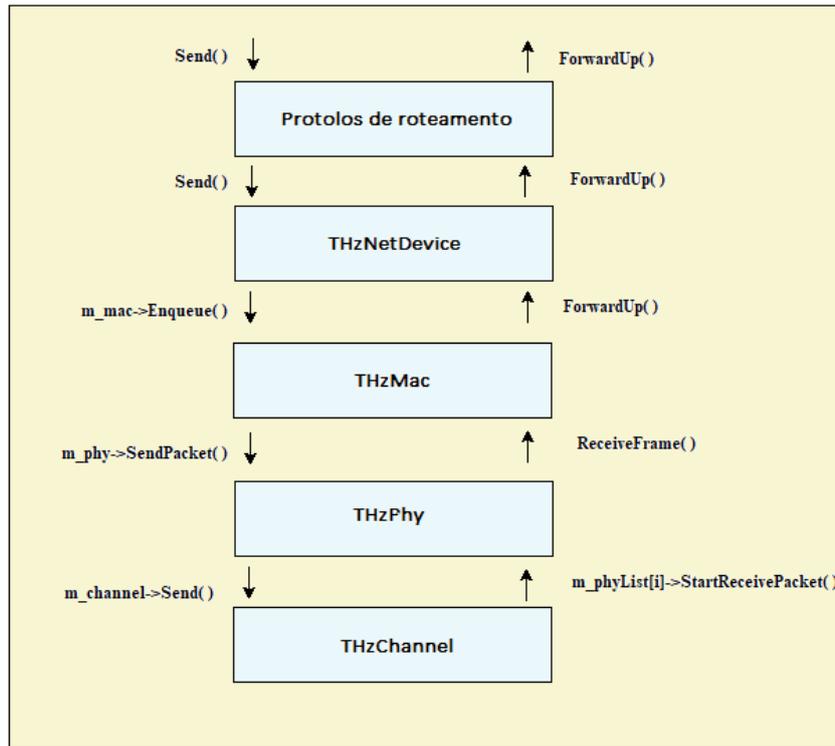


Figura 3.2: Fluxo do pacote no TeraSim [6]

Além da implementação dos protocolos no objeto THzNetDevice um novo objeto chamado NanoL3Header foi implementado para a inclusão do cabeçalho de camada de rede aos pacotes criados. Com essas implementações os protocolos podem ser simulados utilizando a base apresentada pelo TeraSim, assim como os modelos de pacotes, mobilidade, dispositivos e outros disponíveis no NS-3.

O modelo de energia implementado e utilizado nas simulações para o registro do total de energia é o proposto em [41] que registra o consumo de energia por pacote (CEP), que consiste na soma da energia gasta por cada participante da rota no processo de transmissão. O modelo considera as seguintes contribuições:

- E_{rg} é a energia necessária para gerar uma rota;
- E_{tx} é a energia necessária para transmitir um pacote;
- E_{fw} é a energia necessária para encaminhar um pacote, ou seja, a energia necessária para identificar que o pacote não chegou ao destino e deve ser encaminhado para o próximo nó;
- E_{rx} é a energia necessária para receber um pacote;
- E_{dc} é a energia necessária para decodificar um pacote e prepará-lo para ser processado pelo nó de destino.

A energia necessária para transmitir um pacote, E_{tx} , é dada por:

$$E_{tx} = (E_{tx})_c * (Tx\ range)^{\alpha_{tx}} \quad (3.1)$$

Onde

- $(E_{tx})_c$ é o coeficiente de transmissão de energia;
- $Tx\ range$ é o alcance de transmissão;
- α_{tx} é o expoente de transmissão de energia.

A energia necessária para levar um pacote da fonte para o destino é dada por

$$CEP = E_s + N_h E_h + E_d \quad (3.2)$$

Onde E_s , E_h e E_d são a energia consumida pela fonte, nós intermediários e de destino, e N_h é o número de nós intermediários na rota. E_s , E_h e E_d são, respectivamente, dados pelas equações abaixo:

$$E_s = E_{rg} + E_{tx} \quad (3.3)$$

$$E_h = E_{rx} + E_{fw} + E_{tx} \quad (3.4)$$

$$E_d = E_{rx} + E_{dc} \quad (3.5)$$

Consideramos como métrica de consumo de energia para as simulações, a energia total consumida, que é a soma dos consumo de energia por pacote de todos os pacotes transmitido do nó central aos demais nós.

A Figura 3.3 apresenta um exemplo da topologia física dos nano-roteadores para a semente 1 utilizada na simulação e validação das implementações. O nó 20 neste cenário é o mais próximo do centro da topologia, logo é o nó central. A próxima seção apresenta as configurações de simulação para a comparação entre os protocolos que validaram os protocolos implementados no módulo TeraSim.

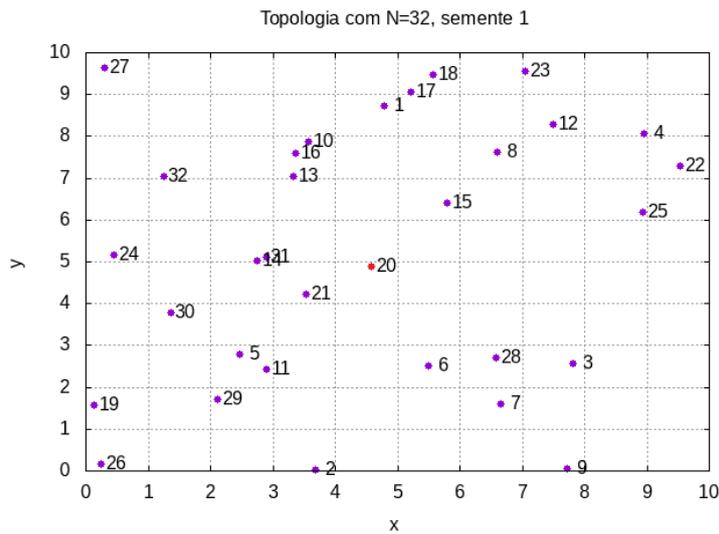


Figura 3.3: Topologia física para 32 nano-roteadores

3.3.3 Validação dos protocolos implementados

Para validação do correto funcionamento dos protocolos implementados no simulador, foi feita a replicação da simulação apresentada no artigo de apresentação dos protocolos [48]. A configuração de simulação está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Configurações de validação.

Parâmetro	Valor
Tempo total para estabilização	230 μ s
Parâmetros de roteamento	
Tamanho da sequência k	{2}
Número máximo de saltos	{4}
Nó de origem	Central
Configuração da topologia	
Geometria	Quadrado
Tamanho do lado	10
Densidade de nós	{0.32}
Parâmetros do modelo de energia	
E_{rg}	5
$(E_{tx})_c$	2
α_{tx}	2
E_{rx}	1
E_{fw}	3
E_{dc}	3

A partir da configuração apresentada, onde o tempo total de estabilização é o tempo necessário para que o simulador ative todas as configurações e esteja apto a começar a simular e fazer amostras precisas, foi feita a simulação dos protocolos *flooding* com retransmissão e o protocolo FSM. Foram avaliados as métricas de energia total consumida (na Figura 3.4 expressa por *Total energy*) e taxa de entrega de pacotes (na Figura 3.6 expressa por PDR (*Packet Delivery Rate*)) variando o alcance de transmissão (nas Figuras 3.4 e 3.6 expressa por *Tx range*) dos dispositivos dos valores de 1 a 15 mm. As figuras 3.4 a 3.7 apresentam os resultados das simulações realizadas para fins de verificação e validação da ferramenta de simulação utilizada neste trabalho.

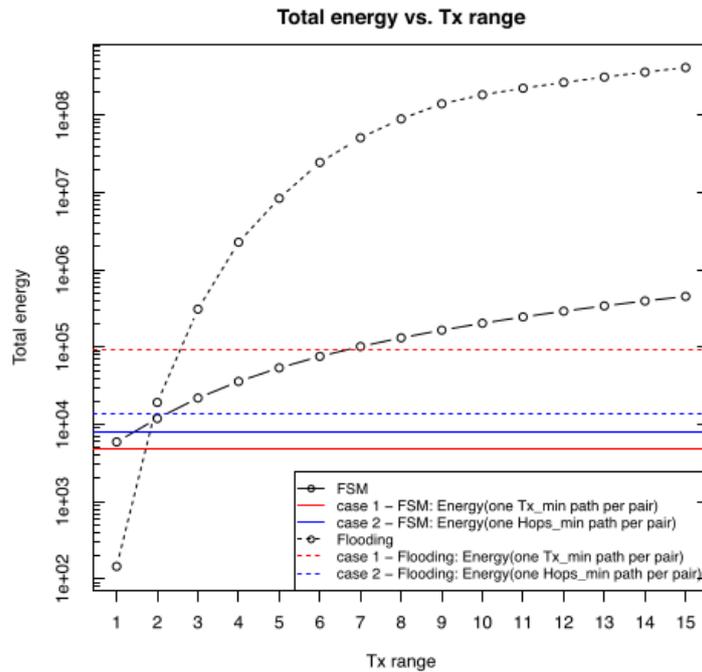


Figura 3.4: Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do artigo

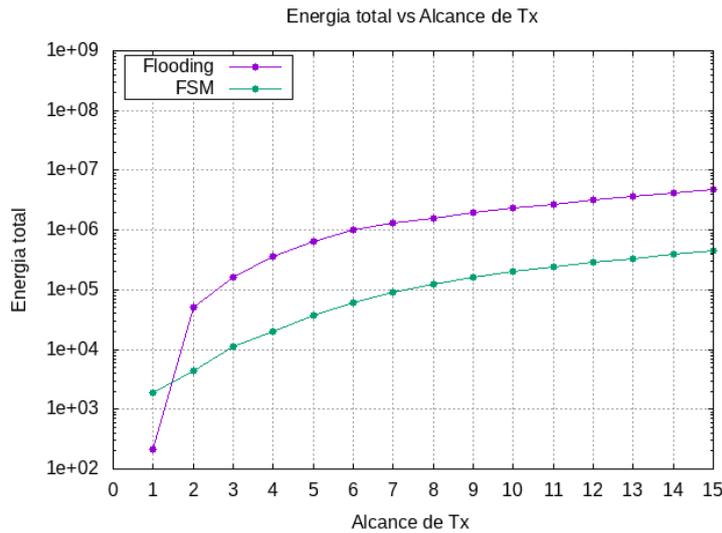


Figura 3.5: Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do TeraSim

É possível observar nas Figuras 3.4 e 3.5 que as curvas do protocolo FSM apresentam resultados de consumo total de energia similares tanto em valores absolutos quanto em tendência de crescimento, porém a curva do protocolo *flooding* implementado no TeraSim apresenta um consumo de energia menor apesar de ter uma tendência de crescimento similar à curva obtida no artigo. Esse comportamento se dá devido ao modelo de propagação do TeraSim que diferentemente do simulado em [41] leva em consideração as colisões entre pacotes. Assim, devido ao crescimento exponencial de pacotes causado pelo *flooding* com retransmissão uma parte considerável os pacotes colidem e não são recebidos nem retransmitidos, reduzindo assim o consumo de energia dos dispositivos.

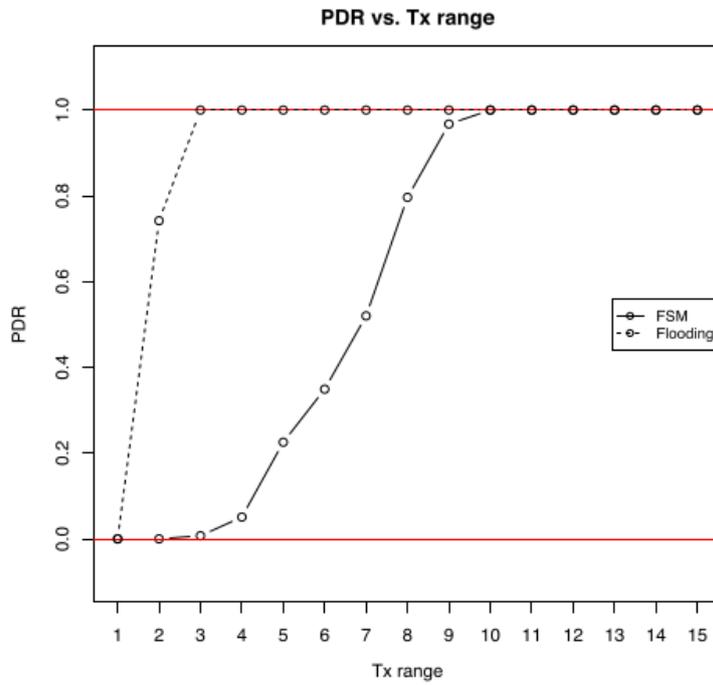


Figura 3.6: Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do artigo

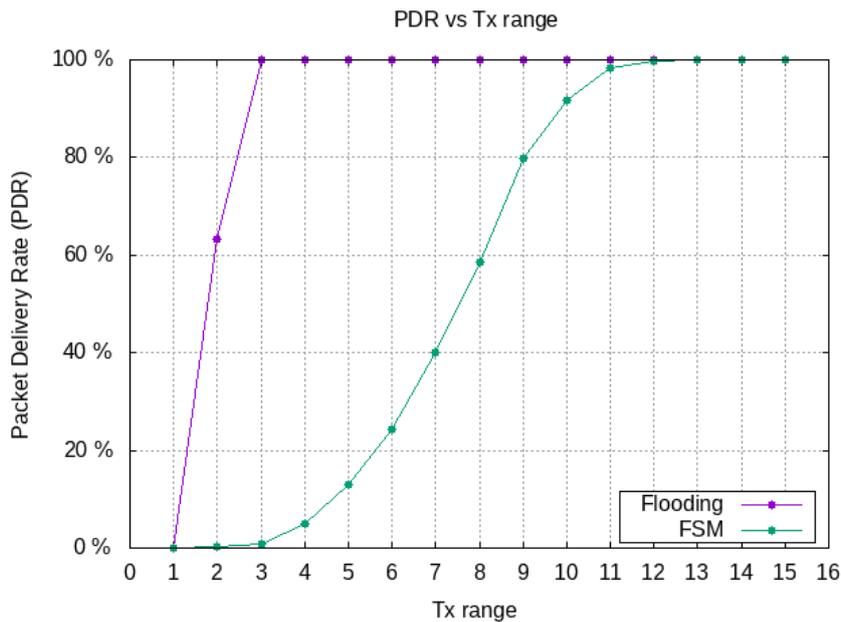


Figura 3.7: Resultados de simulação com $n=32$ $h=4$ $k=2$ do TeraSim

As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam os resultados de taxa de entrega de pacotes versus o alcance de transmissão dos protocolos *flooding* e FSM, a comparação entre os dois gráficos permite concluir que são compatíveis com os resultados em [41]. Assim, a implementação foi bem sucedida, considerando que há variações em valores absolutos, influenciados por condições iniciais de simulação assim como as diferentes camadas implementadas no TeraSim que foram desconsideradas em [41].

Capítulo 4

Avaliação de Desempenho dos Protocolos de Roteamento

4.1 Comparação entre protocolos

Partindo da validação dos protocolos *flooding* e FSM no módulo TeraSim, realizamos a implementação de uma melhora no protocolo *flooding* impedindo a retransmissão de pacotes e consequentemente reduzindo o uso de banda e energia conforme explicado na seção 2.4.3.1 de tal forma que temos agora um *flooding* com retransmissão e o *flooding* sem retransmissão. Para o protocolo FSM foi implementado a proposta apresentada na seção 2.4.3.4 onde o protocolo passa a gerar tabelas com bits livres ajustáveis e não rotas definidas. Assim temos quatro protocolos para avaliar e comparar em desempenho: *flooding*, *flooding* sem retransmissão, FSM e FSM por tabelas.

Foi preparada uma simulação com o mesmo cenário (Tabela 4.1) utilizado no artigo de apresentação por Amazonas et. al. [41]. A simulação considera uma área quadrada, de lado 10 mm, onde nano-nós são posicionados por uma distribuição aleatória normal a uma determinada densidade. O nó central da distribuição é responsável pelo envio de pacotes de dados para cada um dos outros nós presentes na topologia. As mensagens enviadas pelo nó central podem apresentar um ou múltiplos percursos a depender dos parâmetros avaliados.

Todos os nós são nano-rodeadores, têm uma identificação (ID), transmitem em modo *broadcast* com um alcance de transmissão configurável, não conhecem seu posicionamento físico e têm mecanismo para detecção de pacotes duplicados e descartes configuráveis. O nó central tem recursos para a geração de rotas e transmite um pacote para cada rota gerada.

Os protocolos FSM são configuráveis por duas variáveis a mais: a sequência k e o número máximo de saltos h . O processo de geração de rotas é cego em relação a topologia física de tal forma que apesar de uma rota ser logicamente correta, um dos nós no caminho pode estar fora do alcance de transmissão simulado e consequentemente o pacote ser perdido.

Os protocolos *flooding* geram um pacote para cada destino e se distinguem apenas por ter ou não retransmissão de pacotes.

Os protocolos foram comparados utilizando os parâmetros de taxa de entrega de pacotes e energia total consumida, ambos relacionados ao alcance de transmissão dos nano-roteadores.

Os resultados obtidos pelos protocolos FSM foram avaliados antes de compará-los com os protocolos *flooding*, pois além da densidade e semente de aleatoriedade de simulação, o tamanho da sequência k e o número máximo de saltos impactam no desempenho dos protocolos. Assim, foi avaliado qual configuração obteve o melhor desempenho e foi constatado que o tamanho de sequência 2 e número máximo de saltos 3 obteve um melhor desempenho energético em relação a taxa de entrega de pacotes para a simulação com densidade $0,32 \text{ nós}/\text{mm}^2$ e $0,64 \text{ nós}/\text{mm}^2$ nós, porém com o aumento da densidade para $1,28 \text{ nós}/\text{mm}^2$ a configuração não é capaz de gerar rotas para todos os destinos possíveis na topologia. Assim, para a densidade de $1,28 \text{ nós}/\text{mm}^2$, a configuração com tamanho de sequência 2 e número máximo de saltos 4 possui o melhor desempenho. Os protocolos *flooding* foram avaliados apenas alterando a densidade e semente de aleatoriedade, pois não há aplicação de sequência k ou número máximo de saltos em seu algoritmo.

Tabela 4.1: Configurações de simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo total para estabilização	230 μs
Parâmetros de roteamento	
Nó de origem	Central
Configuração da topologia	
Geometria	Quadrado
Tamanho do lado	10 mm
Densidade de nós	{0.32, 0.64, 1.28}
Parâmetros do modelo de energia	
E_{rg}	5
$(E_{tx})_c$	2
α_{tx}	2
E_{rx}	1
E_{fw}	3
E_{dc}	3
Parâmetros para FSM	
Tamanho da sequência k	{2,3}
Número máximo de saltos	{3,4}

A Tabela 4.1 resume as configurações de simulação utilizadas neste trabalho. Apresentamos a seguir (Figuras 4.1 a 4.3) os gráfico de desempenho energético e de taxa de entrega de pacotes para a densidade de $0,32 \text{ nós}/\text{mm}^2$. A simulação levou em conta dados obtidos após a estabilização dos dispositivos, obtida aos $200\mu\text{s}$, e a elaboração de tabelas para o protocolo FSM, concluída após outros $35\mu\text{s}$. Cada ponto no gráfico representa a média aritmética das amostras coletadas para cada cenário de simulação.

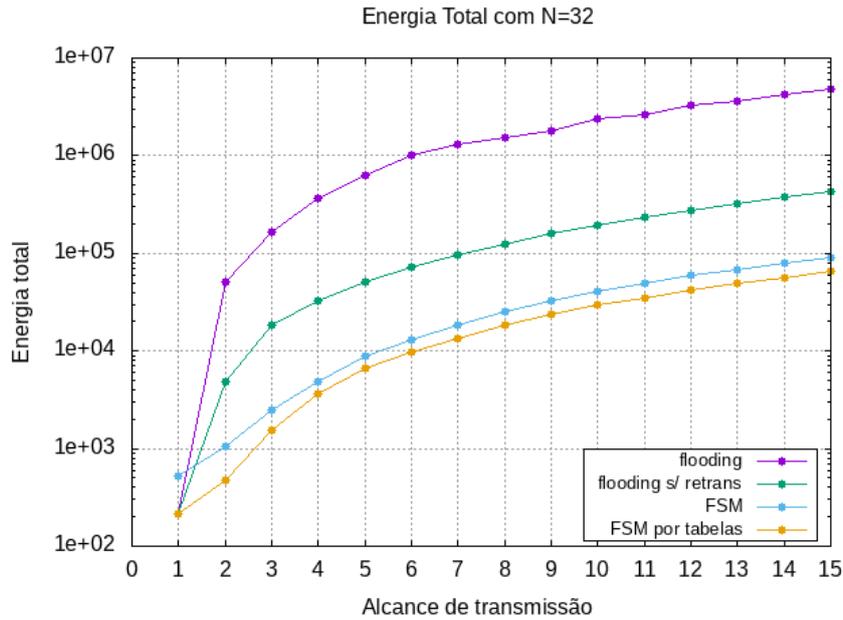


Figura 4.1: Gráfico de comparação de consumo de energia total para 32 nano-roteadores

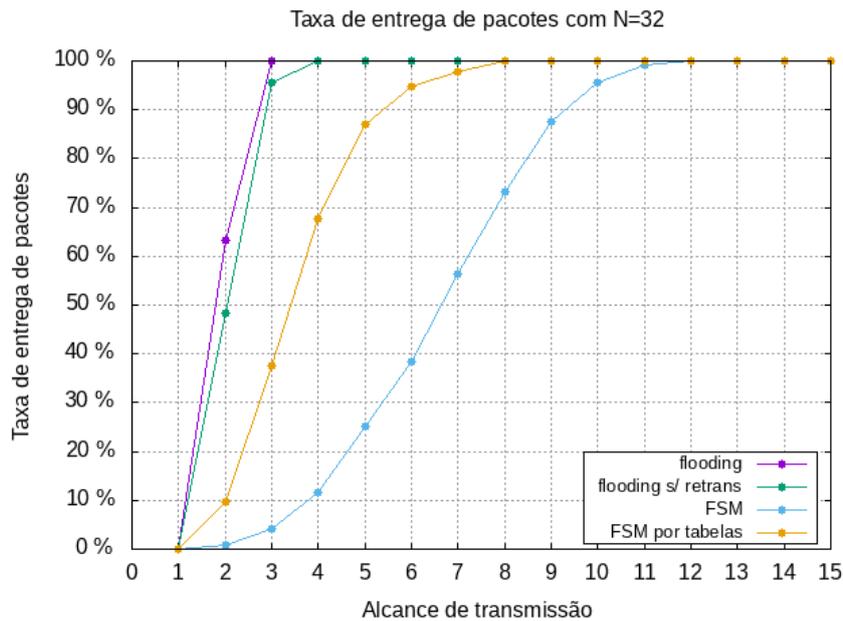


Figura 4.2: Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 32 nano-roteadores

Analisando o gráfico da Figura 4.1, é possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), assim como na validação, consome mais energia que os demais protocolos. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) tem uma melhora bastante significativa e passa a ter um consumo de energia uma ordem de grandeza menor, semelhante ao FSM tradicional (curva azul). O FSM implementado por tabelas também resulta numa melhora significativa de consumo de energia em relação ao FSM tradicional, reduzindo o consumo à aproximadamente metade do

tradicional. Concluimos que o protocolo FSM por tabela obteve o melhor desempenho em consumo total de energia da configuração.

Analisando o gráfico da Figura 4.2, é possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), assim como na validação, obtém uma taxa de entrega de pacotes muito rapidamente obtendo 100% de entrega com alcance configurado a 3 mm. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) não deixa a desejar na taxa de entrega de pacotes, mantendo a eficiência similar ao *flooding* com retransmissão (cor roxa). O FSM tradicional (curva azul), assim como na validação, possui um desempenho de entrega de pacotes em relação ao alcance de transmissão bem inferior ao *flooding*. O FSM implementado por tabelas resulta numa melhora significativa na taxa de entrega de pacotes em relação ao FSM tradicional, obtendo 100% no alcance de transmissão de 8 mm, enquanto o original só obteve esse resultado com o alcance de 12 mm. Concluimos que o protocolo *flooding* obteve o melhor desempenho em taxa de entrega de pacotes relacionada ao alcance de transmissão da configuração. Porém, o FSM por tabelas aparece bastante competitivo com uma boa taxa de entrega de pacotes.

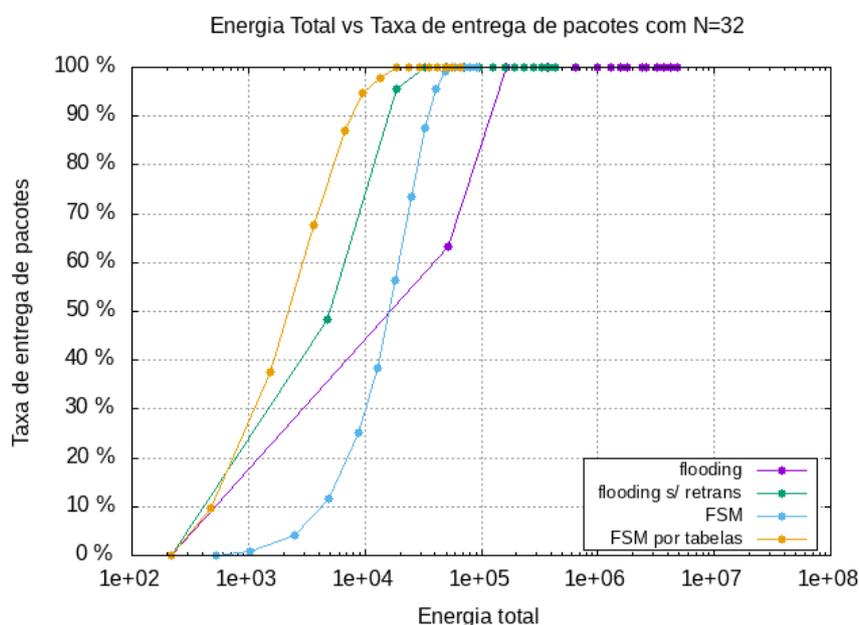


Figura 4.3: Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 32 nano-roteadores

O gráfico da Figura 4.3 apresenta uma relação entre a taxa de entrega de pacotes e a energia total consumida para entregar cada taxa. É possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que apesar de obter uma taxa de entrega de pacotes de 100% com apenas 3 mm de alcance, o protocolo consome até uma ordem de grandeza a mais de energia para tal, na melhor configuração. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) obtém uma melhora expressiva em relação ao *flooding* com retransmissão que consumiu 165.797 unidades de energia, enquanto o modelo sem retransmissão entrega a taxa de 100% com o consumo de 32.891 unidades de energia e com o alcance de 4 mm. O protocolo FSM obteve um desempenho inferior ao *flooding* sem

retransmissão consumindo 58.812,6 unidades de energia para obter a taxa de 100% com um alcance de 12 mm. O FSM implementado por tabelas obteve a taxa de 100% consumindo 18.547 unidades de energia com o alcance de 8 mm. É possível concluir que no cenário simulado, o protocolo FSM por tabelas obteve melhor desempenho em geral para os parâmetros avaliados, pois apesar de necessitar que os nós transmitam com um alcance maior, ele realiza menos transmissões, logo consome menos energia entregando uma taxa de 100% dos pacotes.

Apresentamos a seguir (Figuras 4.4 a 4.6) os gráfico de desempenho energético e de taxa de entrega de pacotes para a densidade de $0,64 \text{ nós}/\text{mm}^2$. A simulação levou em conta dados obtidos após a estabilização dos dispositivos, obtida aos $200\mu\text{s}$, e a elaboração de tabelas para o protocolo FSM, concluída após outros $35\mu\text{s}$. Cada ponto no gráfico representa a média aritmética das amostras coletadas para cada cenário de simulação.

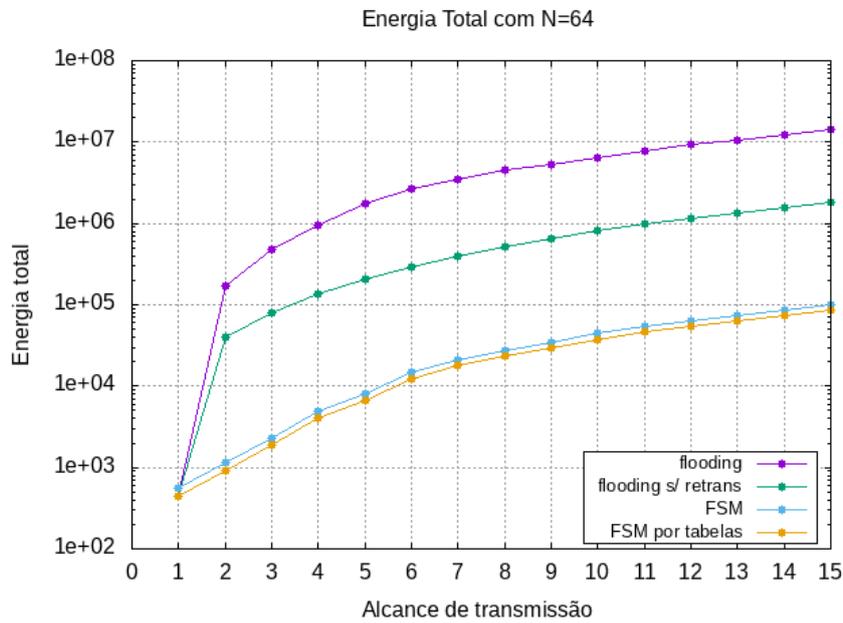


Figura 4.4: Gráfico de comparação de consumo de energia total para 64 nano-roteadores

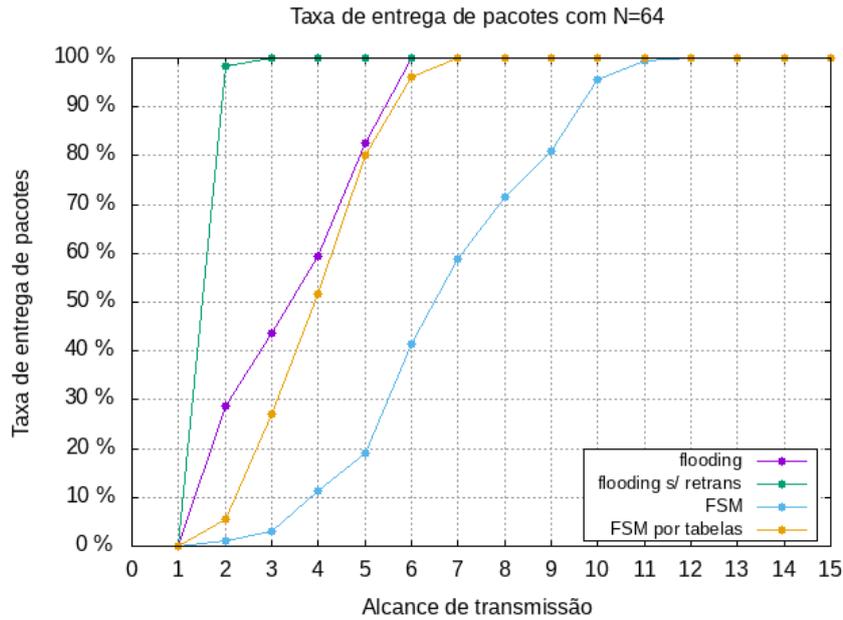


Figura 4.5: Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 64 nano-roteadores

Analisando o gráfico da Figura 4.4 é possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que ele consome mais energia que os demais protocolos. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) tem uma melhora bastante significativa e passa a ter um consumo de energia uma ordem de grandeza menor. O FSM tradicional (curva azul) apresenta um consumo de energia bem mais eficiente que ambos os *floodings* reduzindo o consumo em mais de uma ordem de grandeza em relação ao *flooding* sem retransmissão. O FSM implementado por tabelas resulta numa melhora bem singela de consumo de energia em relação ao FSM tradicional, reduzindo o consumo mas não significativamente. Concluímos que o protocolo FSM por tabela obteve o melhor desempenho em consumo total de energia da configuração e logo em seguida vem o FSM tradicional. Podemos concluir também que com o aumento da densidade de nós ambos *floodings* tem uma queda drástica na eficiência energética.

Analisando o gráfico da Figura 4.5 é possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que ele obtém uma taxa de entrega de pacotes de 100% de entrega com alcance configurado a 6 mm enquanto que na configuração com densidade de $0,32 \text{ nós}/\text{mm}^2$ era necessário apenas 3 mm de alcance. Essa queda de desempenho se deve a característica de simulação da camada física do TeraSim que leva em consideração colisões entre os pacotes transmitidos na rede, como o *flooding* original não tem controle de retransmissão, a quantidade de pacotes cresce exponencialmente de tal forma que os pacotes colidem antes de alcançar seu destino, sendo assim necessário um alcance maior, que leva a um número menor de saltos, para que os pacotes alcancem seus destinos. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) impede o crescimento sem controle de pacotes sendo transmitidos e consegue alcançar 100% de entrega com um alcance de 3 mm.

O FSM tradicional (curva azul), assim como na validação, possui um desempenho de entrega de pacotes em relação ao alcance de transmissão bem inferior ao *flooding*. O FSM implementado

por tabelas resulta numa melhora significativa na taxa de entrega de pacotes em relação ao FSM tradicional, obtendo 100% no alcance de transmissão de 7 mm, enquanto o original só obteve esse resultado com o alcance de 12 mm. Concluimos que o protocolo *flooding* sem retransmissão obteve o melhor desempenho em taxa de entrega de pacotes relacionada ao alcance de transmissão da configuração.

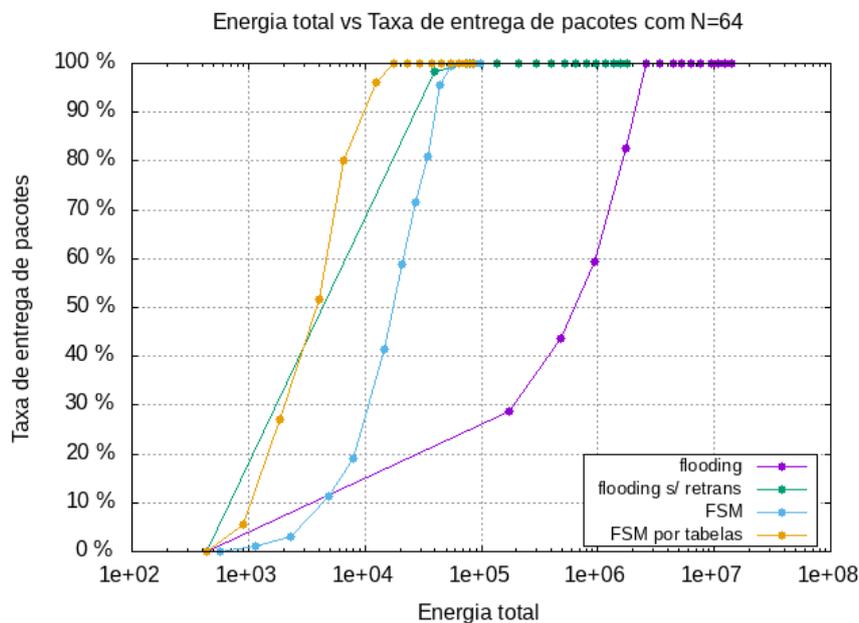


Figura 4.6: Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 64 nano-roteadores

O gráfico da Figura 4.6 apresenta uma relação entre a taxa de entrega de pacotes e a energia total consumida para entregar cada taxa. É possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que o protocolo obteve uma queda de eficiência tanto na entrega de pacotes quanto na energia total consumida com o aumento da densidade de pacotes. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) obtém uma melhora expressiva em relação ao *flooding* com retransmissão que consumiu $4,47 \times 10^6$ unidades de energia, enquanto o modelo melhorado entrega a mesma taxa de 100% com o consumo de $7,98 \times 10^4$ unidades de energia e com o alcance de 3 mm. O protocolo FSM obteve um desempenho inferior ao *flooding* sem retransmissão consumindo $7,98 \times 10^4$ unidades de energia para obter a taxa de 100% com um alcance de 12 mm. O FSM implementado por tabelas obteve a taxa de 100% consumindo $1,77 \times 10^4$ unidades de energia com o alcance de 7 mm. É possível concluir que no cenário simulado o protocolo FSM por tabelas obteve melhor desempenho em geral para os parâmetros avaliados, pois apesar de necessitar que os nós transmitam com um alcance maior, ele realiza menos transmissões, logo consome menos energia para entregar a taxa de 100%.

Apresentamos abaixo os gráfico de desempenho energético e de taxa de entrega de pacotes para a densidade de $1,28 \text{ nós/mm}^2$. A simulação levou em conta dados obtidos após a estabilização dos dispositivos, obtida aos $200 \mu\text{s}$, e a elaboração de tabelas para o protocolo FSM, concluída após

outros $35\mu s$. Cada ponto no gráfico representa a média aritmética das amostras coletadas para cada cenário de simulação.

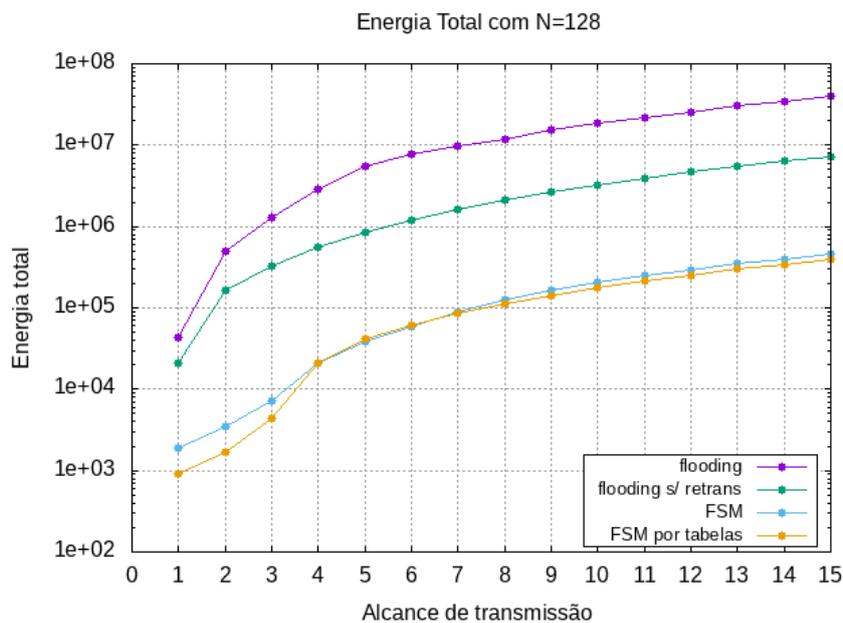


Figura 4.7: Gráfico de comparação de consumo de energia total para 128 nano-roteadores

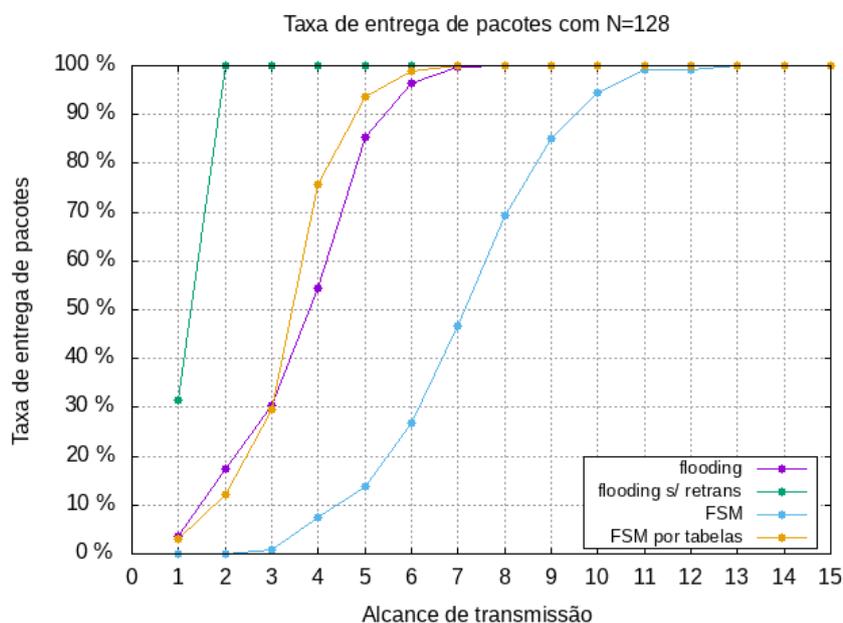


Figura 4.8: Gráfico de comparação de taxa de entrega de pacotes para 128 nano-roteadores

Analisando o gráfico da Figura 4.7 é possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que ele consome mais energia que os demais protocolos. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) tem uma melhora bastante significativa e passa a ter um consumo de energia uma ordem de grandeza menor. O FSM tradicional (curva azul) apresenta um consumo

de energia bem mais eficiente que ambos os *floodings* reduzindo o consumo em mais de uma ordem de grandeza em relação ao *flooding* sem retransmissão. O FSM implementado por tabelas resulta numa melhora bem singela de consumo de energia em relação ao FSM tradicional, reduzindo o consumo, mas não significativamente. Concluimos que o protocolo FSM por tabela obteve o melhor desempenho em consumo total de energia da configuração seguido do FSM tradicional com resultado similar. Podemos concluir também que com o aumento da densidade de nós ambos *floodings* tem uma queda drástica na eficiência energética assim como ocorreu no aumento de 0,32 nós/ mm^2 para 0,64 nós/ mm^2 .

Analisando o gráfico da Figura 4.8 é possível observar pela curva do procolo *flooding*(cor roxa), obtém uma taxa de entrega de pacotes de 100% de entrega com alcance configurado a 7 mm enquanto que na configuração com densidade de 0,64 nós/ mm^2 era necessário apenas 6 mm de alcance. Essa queda de desempenho é esperada devido o aumento de colisões que ocorre com o aumento da densidade. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) impede o crescimento sem controle de pacotes sendo transmitidos e consegue alcançar 100% de entrega com um alcance de 2 mm obtendo uma melhora em relação a densidades menores indicando que seu desempenho é melhor para a entrega de pacotes quanto maior for a densidade de nós.

O FSM tradicional(curva azul) possui um desempenho de entrega de pacotes em relação ao alcance de transmissão bem inferior ao *flooding* com ou sem retransmissão. O FSM implementado por tabelas resulta numa melhora significativa na taxa de entrega de pacotes em relação ao FSM tradicional, obtendo 100% no alcance de transmissão de 6 mm, enquanto o original só obteve esse resultado com o alcance de 13 mm. Concluimos que o protocolo *flooding* sem retransmissão obteve o melhor desempenho em taxa de entrega de pacotes relacionada ao alcance de transmissão da configuração.

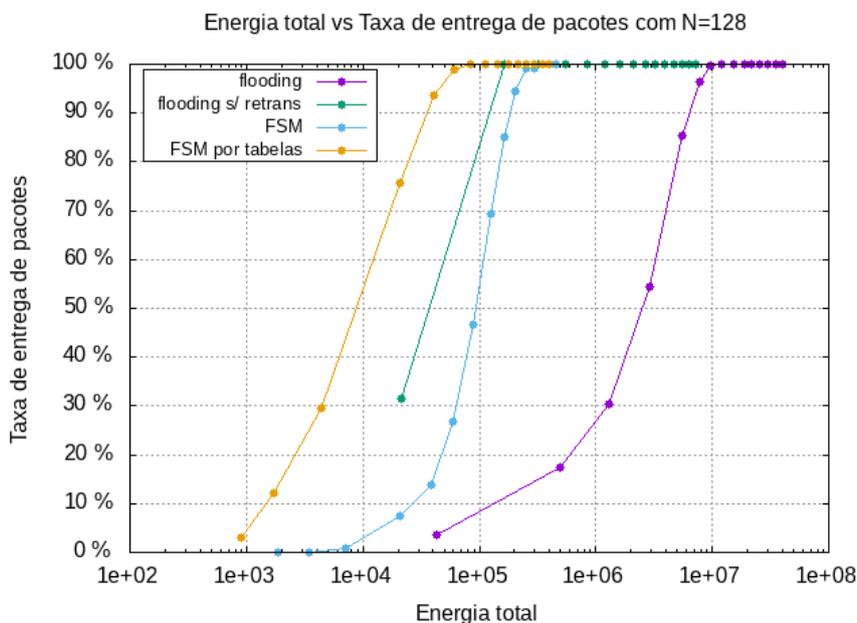


Figura 4.9: Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida para 128 nano-roteadores

O gráfico da Figura 4.9 apresenta uma relação entre a taxa de entrega de pacotes e a energia total consumida para entregar cada taxa. É possível observar pela curva do protocolo *flooding* (cor roxa), que o protocolo obteve a menor eficiência na relação entrega de pacotes versus a energia total consumida, consumindo muita energia para entregar pacotes. Com a não retransmissão de pacotes ativada, o *flooding* (curva verde) obtém uma melhora expressiva em relação ao *flooding* com retransmissão que consumiu $1,19 \times 10^7$ unidades de energia, entregando a mesma taxa de 100% com o consumo de $1,62 \times 10^5$ unidades de energia com o alcance de 2 mm. O protocolo FSM obteve um desempenho inferior ao *flooding* sem retransmissão consumindo $3,47 \times 10^5$ unidades de energia para obter a taxa de 100% com um alcance de 13 mm. O FSM implementado por tabelas obteve a taxa de 100% consumindo $8,49 \times 10^4$ unidades de energia com o alcance de 7 mm. É possível concluir que no cenário simulado o protocolo FSM por tabelas obteve melhor desempenho em geral para os parâmetros avaliados, pois apesar de necessitar que os nós transmitam com um alcance maior, ele realiza menos transmissões, logo consome menos energia para entregar a taxa de 100%.

O gráfico da Figura 4.10 apresenta a evolução dos protocolos com os dois melhores resultados obtidos até aqui, o *flooding* sem retransmissão e o FSM por tabelas. Os dados nos permitem ver que o aumento da densidade acarretou maior consumo de energia especialmente para o *flooding* que apesar que precisar de um pequeno alcance de transmissão para entregar 100% dos pacotes consome bastante energia para entregar seu pacotes.

Concluimos com a realização desta simulação que o protocolos FSM por tabelas obteve o melhor desempenho de energia consumida para entregar 100% dos pacotes enviados em todos as densidades de nano-roteadores. Assim, fica evidente que o FSM possui potencial para oferecer serviços de roteamento em nanonetworks com características semelhantes à simulada.

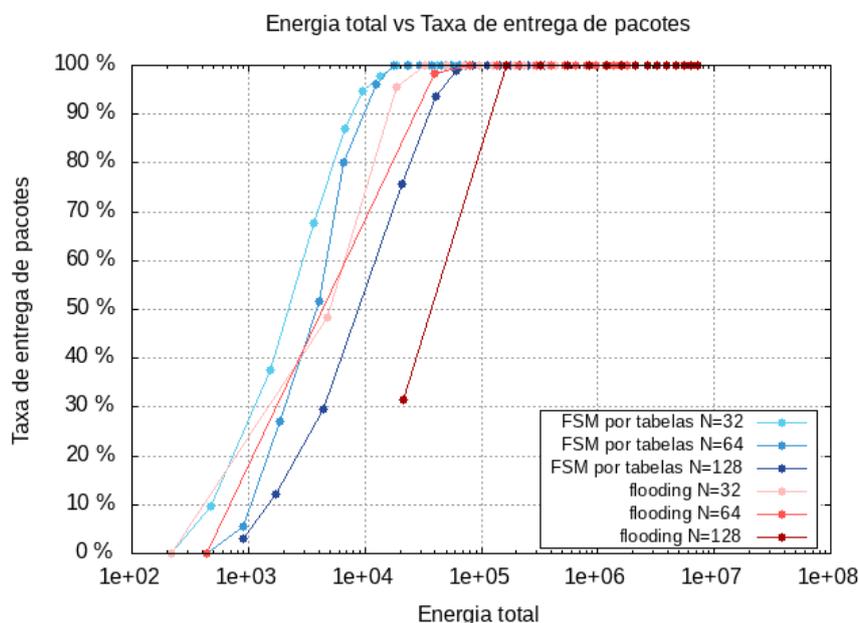


Figura 4.10: Gráfico de comparação da taxa de entrega de pacotes versus a energia total consumida dos dois melhores protocolos para as três densidade simuladas

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho fornece uma visão geral do que as nanonetworks são teoricamente e quais aplicações elas devem trazer para a ciência e o mundo. Foram apresentadas as aplicações vislumbradas, as características de nanodispositivos e as tecnologias de comunicação propostas. A comunicações eletromagnéticas, na maioria das publicações, foi apresentada como a mais promissora tecnologia de comunicação para nanonetworks e seus materiais, modelos e dispositivos esperados foram discutidos. Uma visão geral dos protocolos propostos para comunicação eletromagnética na banda THZ foi dada e as métricas de avaliação de desempenho resumidas. Protocolos de roteamento para nanonetworks foram implementados em uma plataforma integrada de simulação baseada em módulos do no simulador ns-3, e avaliados em termos de desempenho considerando as métricas mais comuns.

É evidente a partir deste trabalho que muitos modelos teóricos foram propostos para nanonetworks, porém poucas comparações entre propostas tem sido realizadas. A padronização de métricas e implementação de protocolos em plataformas compartilhadas é uma medida que se mostra necessária para que os modelos sigam progredindo até sua implementação real.

5.1 Trabalhos Futuros

O modulo de simulação TeraSim possui métricas e características de simulação relacionadas a controle de acesso ao meio, interferência molecular e perdas por espalhamento de sinal que podem ser analisadas utilizando o mesmo cenário de simulação realizado neste trabalho. Novos protocolos propostos podem ser implementados para uma nova avaliação de desempenho e características de cenário como mobilidade e modelos em três dimensões podem ser alterações interessantes a observar na simulações. O avanço na comparação e padronização de modelos é uma oportunidade para trabalhos futuros a partir do realizado até aqui.

Referências Bibliográficas

- [1] Richard Feynman (1959), “There’s Plenty of Room at the Bottom. An Invitation to Enter a New Field of Physics”, Em: 29 de dezembro de 1959 na annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Caltech). Publicado pela primeira vez na Engineering and Science Magazine 1960, vol. XXIII, no. 5.
- [2] N. Taniguchi (1974), “On the basic concept of nano-technology”, Em: Proceeding of the International Conference on Production Engineering.
- [3] Abbasi Q. H., Yang K., Chopra N., Jornet J. N., Abuali N. A., Qaraqe K. A., Alomainy A. (2016). “Nano-Communication for Biomedical Applications: A Review on the State-of-the-Art From Physical Layers to Novel Networking Concepts”, Em: IEEE Access, 4, 3920-3935.
- [4] F. Lemic, S. Abadaly, W. Tavernierz, P. Stroobantz, D. Collez, E. Alarc’ony, J. MarquezBarja e J. Famaey, “Survey on Terahertz Nanocommunication and Networking: A Top-Down Perspective” Em: ArXiv:1909.05703v2 [cs.NI], Cornell University, 2020.
- [5] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, “Nano-Sim: Simulating electromagnetic-based nanonetworks in the network simulator 3,” Em: ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and, 2013, pp. 203–210.
- [6] Z. Hossain, Q. Xia, and J. M. Jornet, “TeraSim: An ns-3 extension to simulate terahertz-band communication networks”, Em: Nano Communication Networks, vol. 17, pp. 36–44, 2018.
- [7] Riley G.F., Henderson T.R.; “The ns-3 Network Simulator”. Em: Wehrle K., Güneş M., Gross J. (eds) Modeling and Tools for Network Simulation. Springer, Berlin, Heidelberg.(2010) <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3-2>
- [8] T. Hogg and R. A. Freitas, Jr. (2012), “Acoustic communication for medical nanorobots,” Em: Nano Commun. Netw., vol. 3, no. 2, pp. 83102, 2012.
- [9] I. F. Akyildiz a, F. Brunetti, C. Blázquez (2008), “Nanonetworks: A new communication paradigm”, Em: Computer Networks 52 (2008) 2260–2279.
- [10] M. Sitti, H. Ceylan, W. Hu, J. Giltinan, M. Turan, S. Yim, E. Diller, (2015). “Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots”, Em: Proc. IEEE, vol. 103, no. 2, pp. 205224.
- [11] Ergeneman O, Dogangil G, Kummer MP, Abbott JJ, Nazeeruddin MK, Nelson BJ (2008). “A magnetically controlled wireless optical oxygen sensor for intraocular measurements”. Em: IEEE Sensors J. 2008; 8:29–37.
- [12] Fox IJ, Daley GQ, Goldman SA, Huard J, Kamp TJ, Trucco M. Stem cell therapy (2014). “Use of differentiated pluripotent stem cells as replacement therapy for treating disease”. Em: Science. Aug.2014 345:1247391. [PubMed: 25146295].
- [13] Hajba L, Guttman A (2014). “Circulating tumor-cell detection and capture using microfluidic devices”. Em: TrAC Trends in Analytical Chemistry 2014; 59:9–16.
- [14] Collins CH (2014). “Cell-cell communication special issue”. Em: ACS Synth Biol. Apr.2014

3:197–198. [PubMed: 24742176].

[15] M. Heil, J. Ton (2008), “Long-distance signalling in plant defence”, Em: *Trends in Plant Science* 13 (6) (2008) 264–272.

[16] J.W. Aylott (2003), “Optical nanosensors – an enabling technology for intracellular measurements”, Em: *Analyst* 128 (2003) 309–312.

[17] D. Tessier, I. Radu, M. Filteau (2005), “Antimicrobial fabrics coated with nano-sized silver salt crystals”, Em: *NSTI Nanotech* 1 (May) (2005) 762–764.

[18] R. Smalley, M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. Avouris (2001), “Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications”, In: M.S. Dresselhaus (Ed.), Springer, 2001.

[19] M. Endo, T. Hayashi, Y.A. Kim, H. Muramatsu (2006), “Development and applications of carbon nanotubes”, Em: *Japanese Journal of Applied Physics* 46 (June) (2006) 4883–4892.

[20] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, “Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks”, Em: *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 12, pp. 685–694, Dec. 2013.

[21] E. Drexler (1992), “Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation”, Em: John Wiley and Sons Inc., 1992.

[22] A. Tseng, K. Chen, C. Chen, K. Ma, (2003), “Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development”, Em: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 26 (April) (2003) 141–149.

[23] H.H. Lee, E. Menard, J.A.R.N.G. Tassi, G.B. Blanchet, (2005), “Large area microcontact printing presses for plastic electronics”, Em: *Materials Research Society Bulletin* 846 (2005) 731–736.

[24] J. Kokkonen, J. Lehtomaki, K. Umabayashi, and M. Juntti, “Frequency and Time Domain Channel Models for Nanonetworks in Terahertz Band”, Em: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 2, pp. 678–691, 2015.

[25] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, “Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band,” Em: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221, 2011.

[26] J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, “Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band,” Em: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, 2011, pp. 1–6.

[27] H. Mabed, “Enhanced spread in time ON-OFF keying technique for dense terahertz nanonetworks,” Em: *Computers and Communications (ISCC)*, 2017 IEEE Symposium on, IEEE, 2017, pp. 710–716.

[28] H. Mabed and J. Bourgeois, “A flexible medium access control protocol for dense terahertz nanonetworks,” Em: *ACM Nanoscale Computing and Communication*, ACM, 2018, p. 10.

- [29] J. Lin, M. A. Weitnauer, “Pulse-level beam-switching for terahertz networks”, Em: *Wireless Networks* 25, pages 3047–3062 (2019).
- [30] N. Akkari, P. Wang, J. M. Jornet, E. Fadel, L. Elrefaei, M. G. A. Malik, S. Almasri, and I. F. Akyildiz, “Distributed timely throughput optimal scheduling for the Internet of Nano-Things,” Em: *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 1202–1212, 2016.
- [31] Q. Xia, Z. Hossain, M. Medley, and J. M. Jornet, “A link-layer synchronization and medium access control protocol for terahertz-band communication networks,” Em: *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2015, pp. 1–7.
- [32] P. Wang, J. M. Jornet, M. A. Malik, N. Akkari, and I. F. Akyildiz, “Energy and spectrum-aware MAC protocol for perpetual wireless nanosensor networks in the terahertz band,” Em: *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 2541–2555, 2013.
- [33] H. Yu, B. Ng, and W. K. Seah, “Pulse arrival scheduling for nanonetworks under limited iot access bandwidth,” Em: *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN)*, IEEE, 2017, pp. 18–26.
- [34] N. Rikhtegar, M. Keshtgari, and Z. Ronaghi, “EEWNSN: Energy efficient wireless nano sensor network MAC protocol for communications in the terahertz band”, Em: *Wireless Personal Communications*, vol. 97, no. 1, pp. 521–537, 2017.
- [35] S. J. Lee, H. Choi, and S. Kim, “Slotted csma/ca based energy efficient mac protocol design in nanonetworks,” Em: *International Journal of Wireless Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 10, 2018.
- [36] Q. Xia and J. M. Jornet, “Cross-layer analysis of optimal relaying strategies for terahertz-band communication networks”, Em: *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, IEEE, 2017, pp. 1–8.
- [37] H. Yu, B. Ng, and W. K. Seah, “Forwarding schemes for EM-based wireless nanosensor networks in the terahertz band”, Em: *Nanoscale Computing and Communication*, ACM, 2015, p. 17.
- [38] Z. Rong, M. S. Leeson, and M. D. Higgins, “Relay-assisted nanoscale communication in the THz band”, Em: *Micro Nano Letters*, vol. 12, no. 6, pp. 373–376, 2017.
- [39] H.-H. Yen, “Energy aware and signal quality aware data aggregation routing in wireless nanosensor networks”, Em: *Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, 2017 14th IEEE Annual, IEEE, 2017, pp. 879–884.
- [40] A. Tsioliariidou, C. Liaskos, S. Ioannidis, and A. Pitsillides, “Lightweight, self-tuning data dissemination for dense nanonetworks”, Em: *Nano Communication Networks*, vol. 8, pp. 2–15, 2016.
- [41] J.R. Amazonas, X. Hesselbach e W. F. Giozza, Low complexity nano-networks routing scenarios and strategies, Em: *Nano Communication Networks*, Volume 28, 2021, 100349, ISSN 1878-7789, <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2021.100349>.

[42] C. R. Carneiro e J.R. Amazonas, Proposals for the routing with FSM, Comunicação Pessoal, Escola Politécnica of the University of São Paulo – EPUSP, Março de 2021.

[43] A. Galal, X Hesselbach, “Nano-networks communication architecture: Modeling and functions”, Em: Nano Communication Networks 17, p45-62, 2018.

[44] N. Boillot, D. Dhoutaut, and J. Bourgeois, “Scalable simulation of wireless electro-magnetic nanonetworks”, Em: Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), IEEE, 2015, pp. 83–89.

[45] D. Dhoutaut, T. Arrabal, and E. Dedu, “Bit simulator, an electromagnetic nanonetworks simulator”, Em: ACM Nanoscale Computing and Communication, ACM, 2018, p. 30.

ANEXOS

ANEXO I

Resultados de Validação do módulo TeraSim

```
renan@renan-All-Series:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.30$ ./test.py -s thz-rx-psd-nano
Waf: Entering directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Waf: Leaving directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (0.604s)

Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge          buildings        config-store
core            csma             csma-layout
dsv             dsr              energy
fd-net-device   flow-monitor     internet
internet-apps  lr-wpan          lte
mesh            mobility         mpi
netanim (no Python) network          nix-vector-routing
olsr            point-to-point  point-to-point-layout
propagation     sixlowpan       spectrum
stats           tap-bridge      test (no Python)
thz (no Python) topology-read   traffic-control
uan             virtual-net-device visualizer
wave           wifi            wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite           click            openflow

PASS: TestSuite thz-rx-psd-nano
1 of 1 tests passed (1 passed, 0 skipped, 0 failed, 0 crashed, 0 valgrind errors)

*** Note: ns-3 examples are currently disabled. Enable them by adding
*** "--enable-examples" to ./waf configure or modifying your .ns3rc file.
```

Figura I.1: Resultado do Teste thz-rx-pds-nano

```

renan@renan-All-Series:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.30$ ./test.py -s thz-directional-antenna
Waf: Entering directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Waf: Leaving directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (0.615s)

Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge           buildings        config-store
core             csma             csma-layout
dsdv            dsr             energy
fd-net-device    flow-monitor     internet
internet-apps   lr-wpan         lte
mesh            mobility         mpi
netanim (no Python) network          nix-vector-routing
olsr            point-to-point  point-to-point-layout
propagation     sixlowpan       spectrum
stats          tap-bridge      test (no Python)
thz (no Python) topology-read   traffic-control
uan            virtual-net-device visualizer
wave          wifi            wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite           click           openflow

PASS: TestSuite thz-directional-antenna
1 of 1 tests passed (1 passed, 0 skipped, 0 failed, 0 crashed, 0 valgrind errors)

*** Note: ns-3 examples are currently disabled. Enable them by adding
*** "--enable-examples" to ./waf configure or modifying your .ns3rc file.

```

Figura I.2: Resultado do Teste thz-directional-antenna

```

renan@renan-All-Series:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.30$ ./test.py -s thz-path-loss
Waf: Entering directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Waf: Leaving directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (0.607s)

Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge           buildings        config-store
core             csma             csma-layout
dsdv            dsr             energy
fd-net-device    flow-monitor     internet
internet-apps   lr-wpan         lte
mesh            mobility         mpi
netanim (no Python) network          nix-vector-routing
olsr            point-to-point  point-to-point-layout
propagation     sixlowpan       spectrum
stats          tap-bridge      test (no Python)
thz (no Python) topology-read   traffic-control
uan            virtual-net-device visualizer
wave          wifi            wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite           click           openflow

PASS: TestSuite thz-path-loss
1 of 1 tests passed (1 passed, 0 skipped, 0 failed, 0 crashed, 0 valgrind errors)

*** Note: ns-3 examples are currently disabled. Enable them by adding
*** "--enable-examples" to ./waf configure or modifying your .ns3rc file.

```

Figura I.3: Resultado do Teste thz-path-loss

```

renan@renan-All-Series:~/repos/ns-3-allinone/ns-3.30$ ./test.py -s thz-psd-macro
Waf: Entering directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Waf: Leaving directory `/home/renan/repos/ns-3-allinone/ns-3.30/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (0.627s)

Modules built:
antenna                aodv                   applications
bridge                 buildings              config-store
core                   csma                   csma-layout
dsdv                   dsr                     energy
fd-net-device          flow-monitor           internet
internet-apps         lr-wpan                lte
mesh                   mobility               mpi
netanim (no Python)   network                nix-vector-routing
olsr                   point-to-point         point-to-point-layout
propagation            sixlowpan              spectrum
stats                  tap-bridge             test (no Python)
thz (no Python)        topology-read          traffic-control
uan                    virtual-net-device     visualizer
wave                   wifi                   wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite                   click                  openflow

PASS: TestSuite thz-psd-macro
1 of 1 tests passed (1 passed, 0 skipped, 0 failed, 0 crashed, 0 valgrind errors)

*** Note: ns-3 examples are currently disabled. Enable them by adding
*** "--enable-examples" to ./waf configure or modifying your .ns3rc file.

```

Figura I.4: Resultado do Teste thz-pds-macro

ANEXO II

Resultados de Validação do módulo Nano-Sim

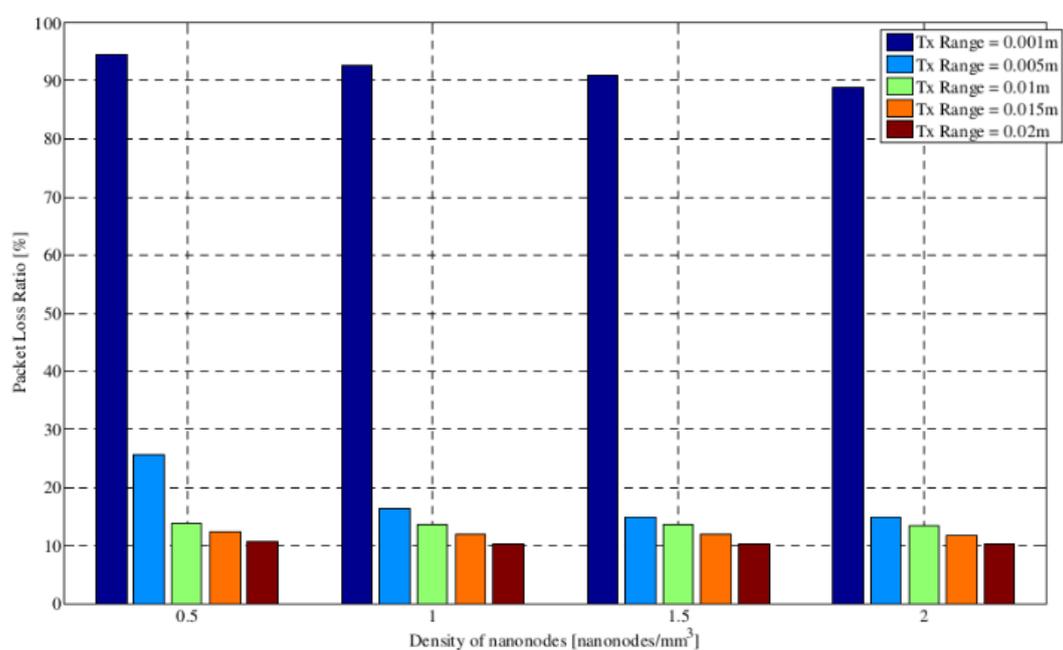


Figura II.1: Resultados do Artigo: perda de pacotes de Transparent-MAC with Selective flooding

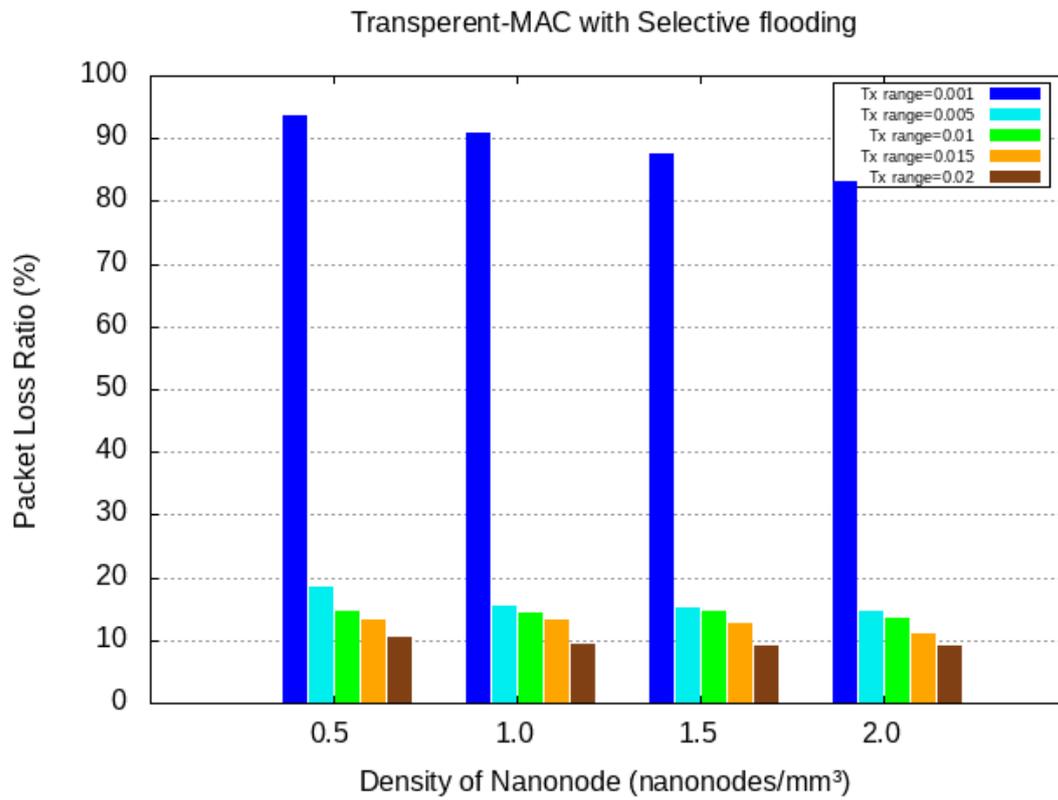


Figura II.2: Resultado de Simulação: perda de pacotes de Transparent-MAC with Selective flooding

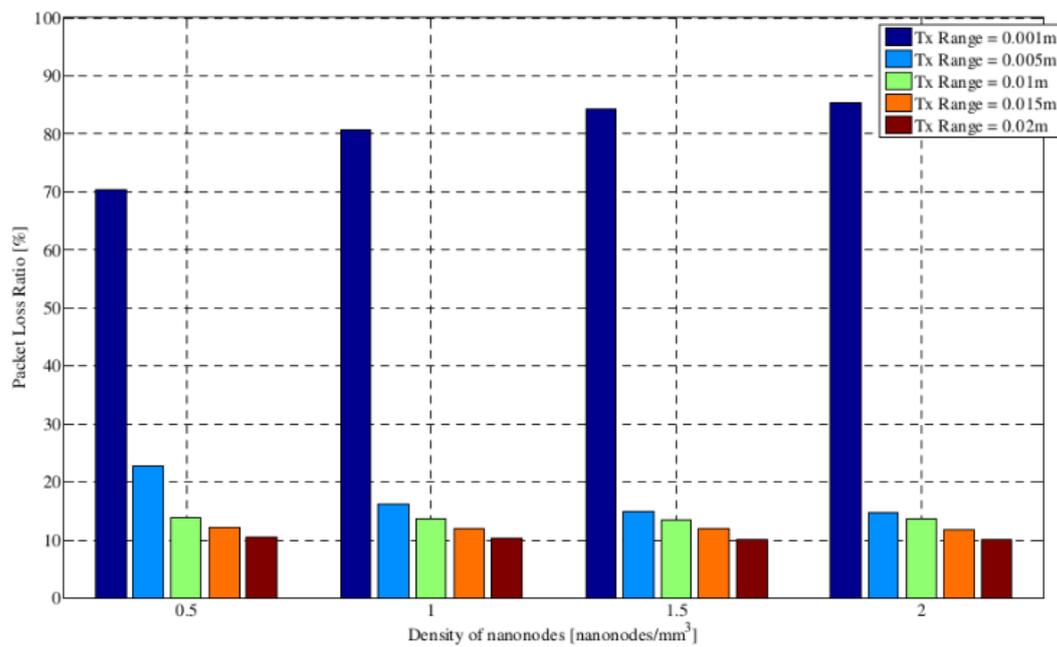


Figura II.3: Resultado do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC and Selective flooding

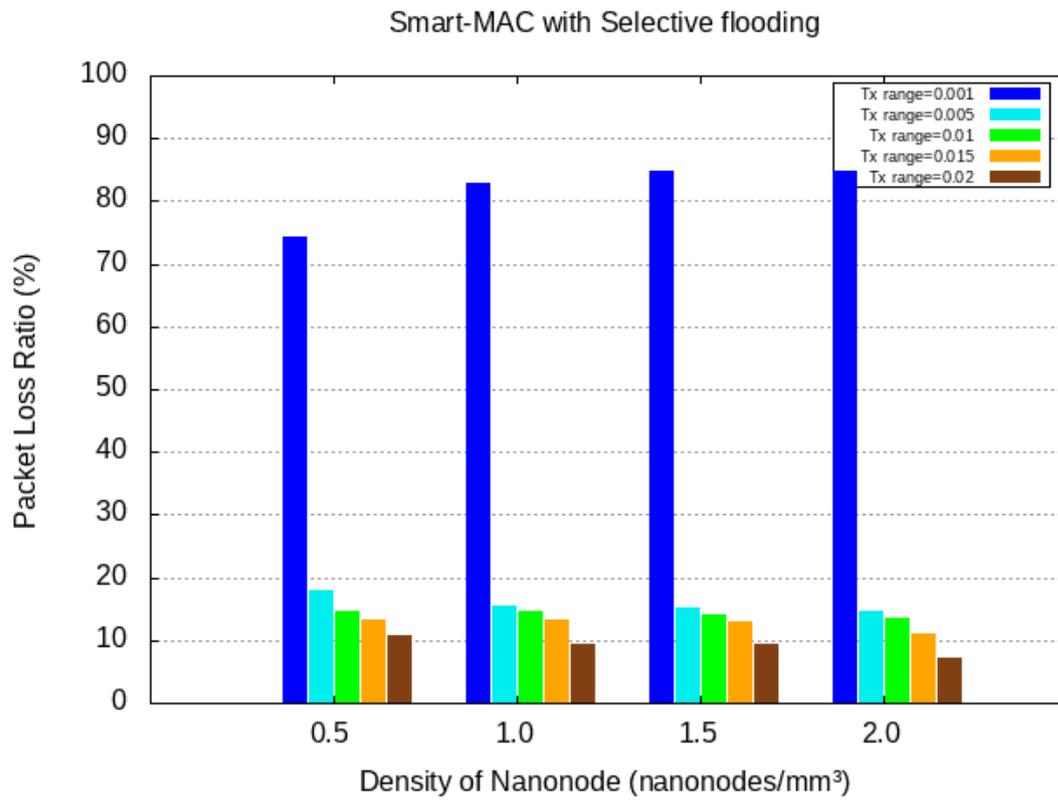


Figura II.4: Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC and Selective flooding

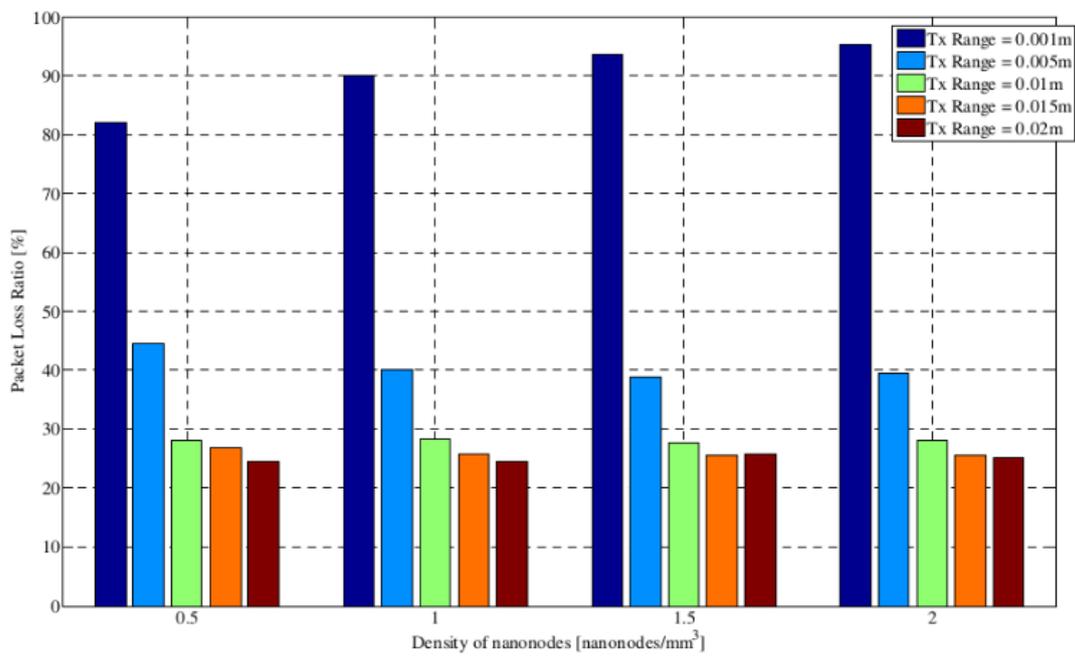


Figura II.5: Resultados do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing

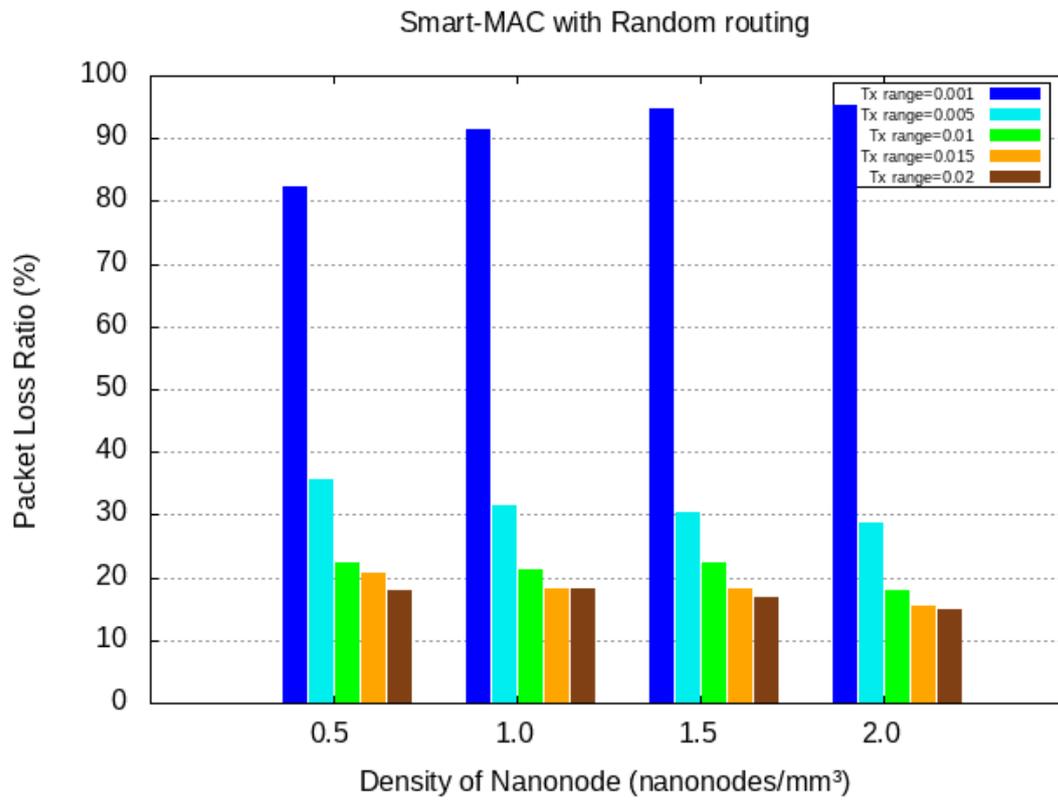


Figura II.6: Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing

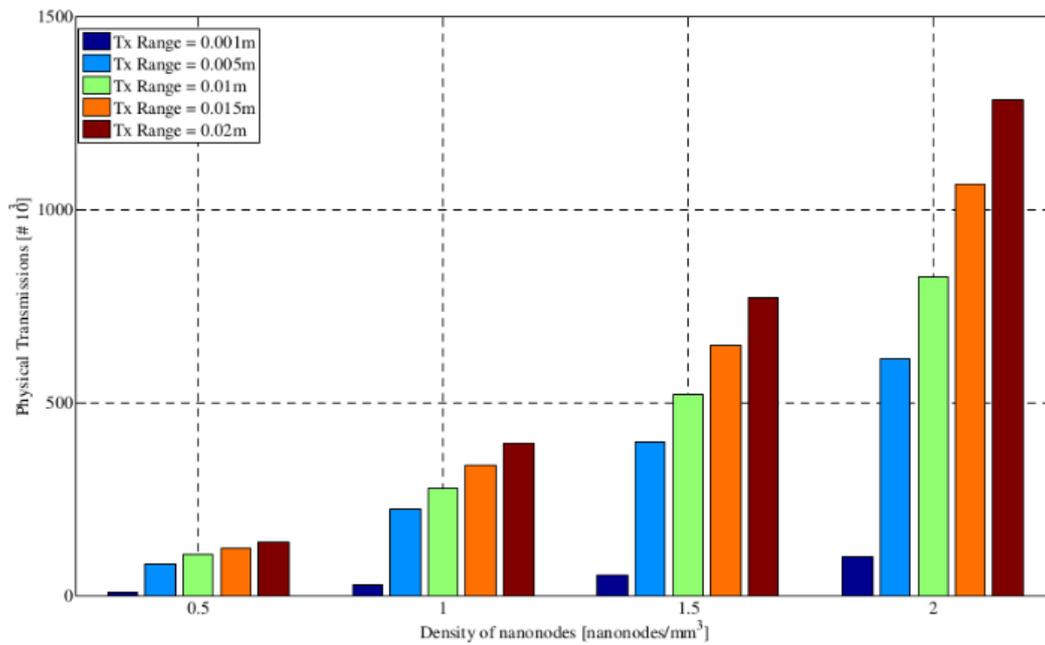


Figura II.7: Resultado do Artigo: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding

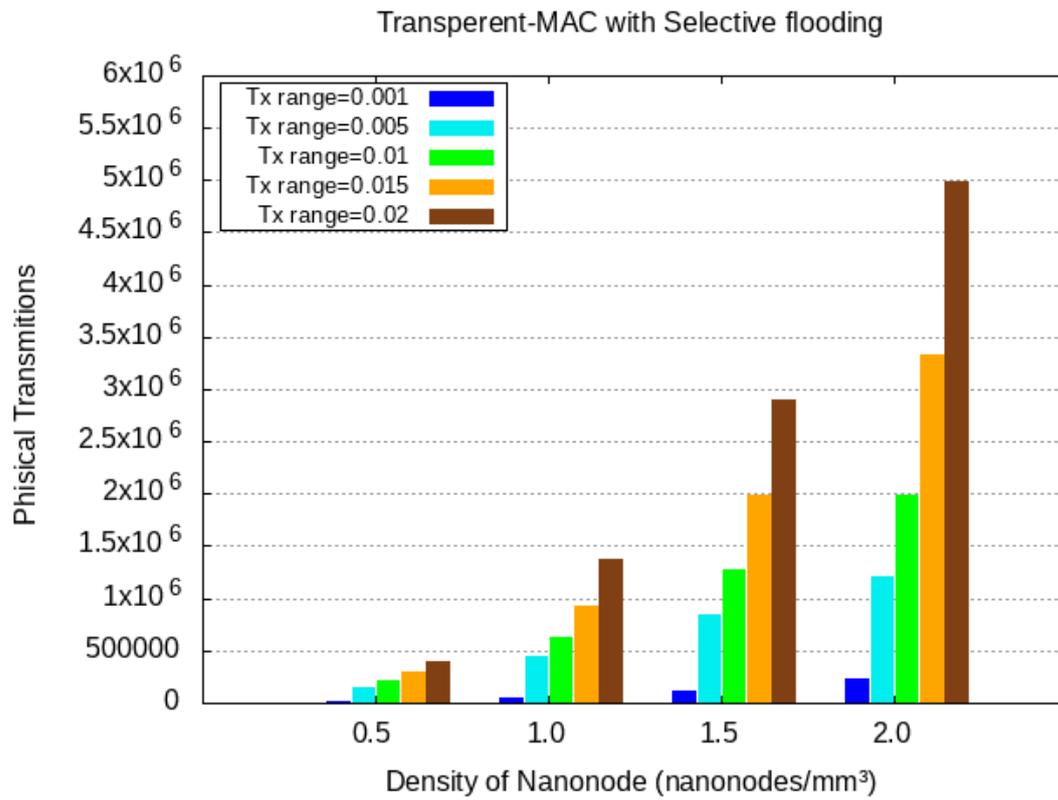


Figura II.8: Resultado de Simulação: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding

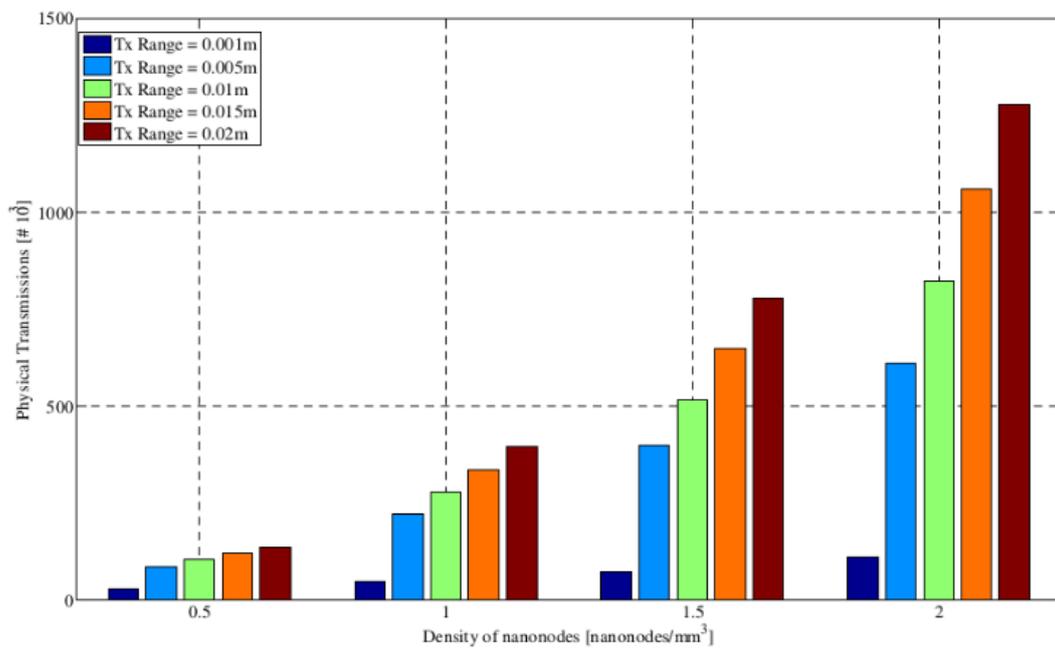


Figura II.9: Resultados do Artigo: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing

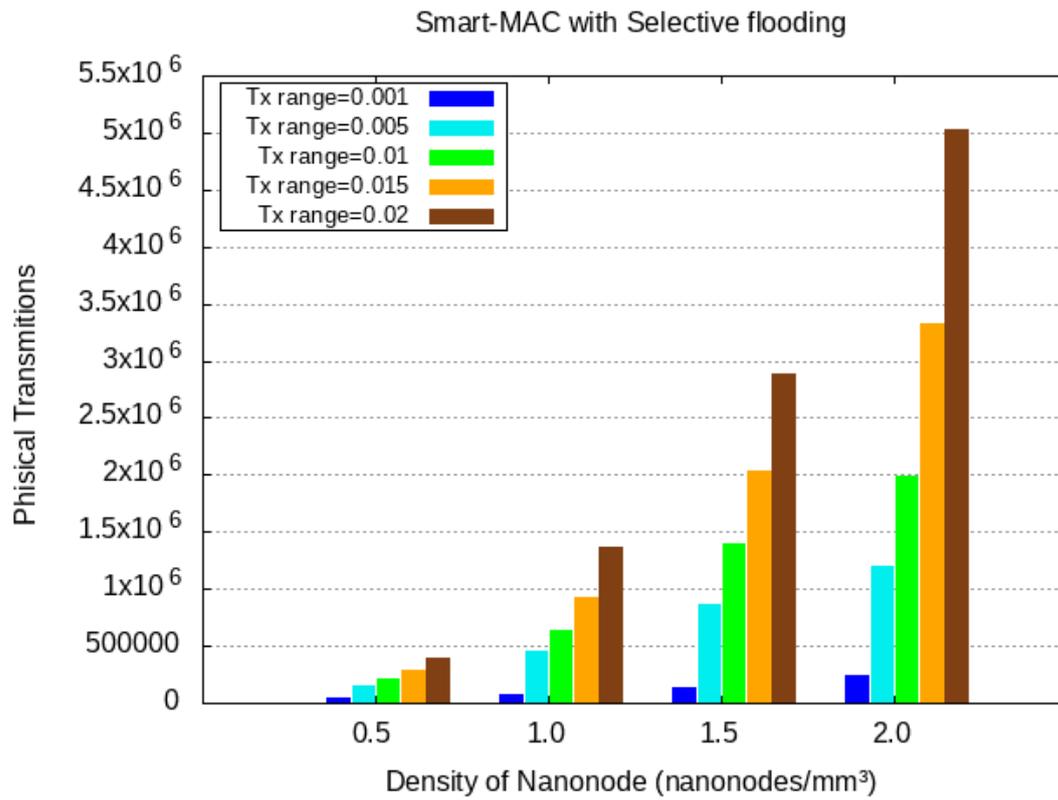


Figura II.10: Resultado de Simulação: perda de pacotes de Smart-MAC e Random routing

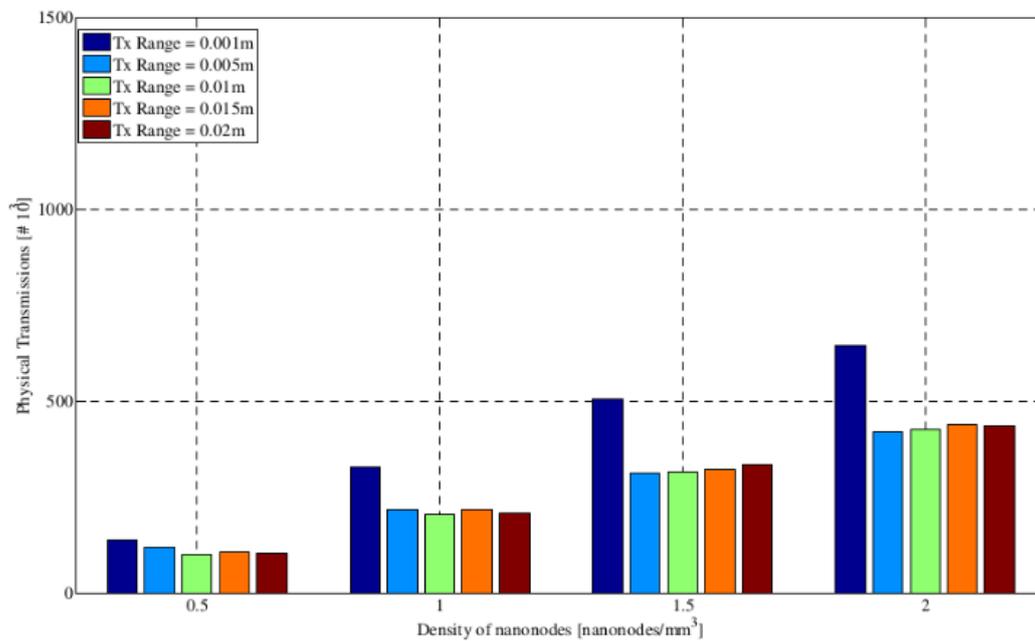


Figura II.11: Resultado do Artigo: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding

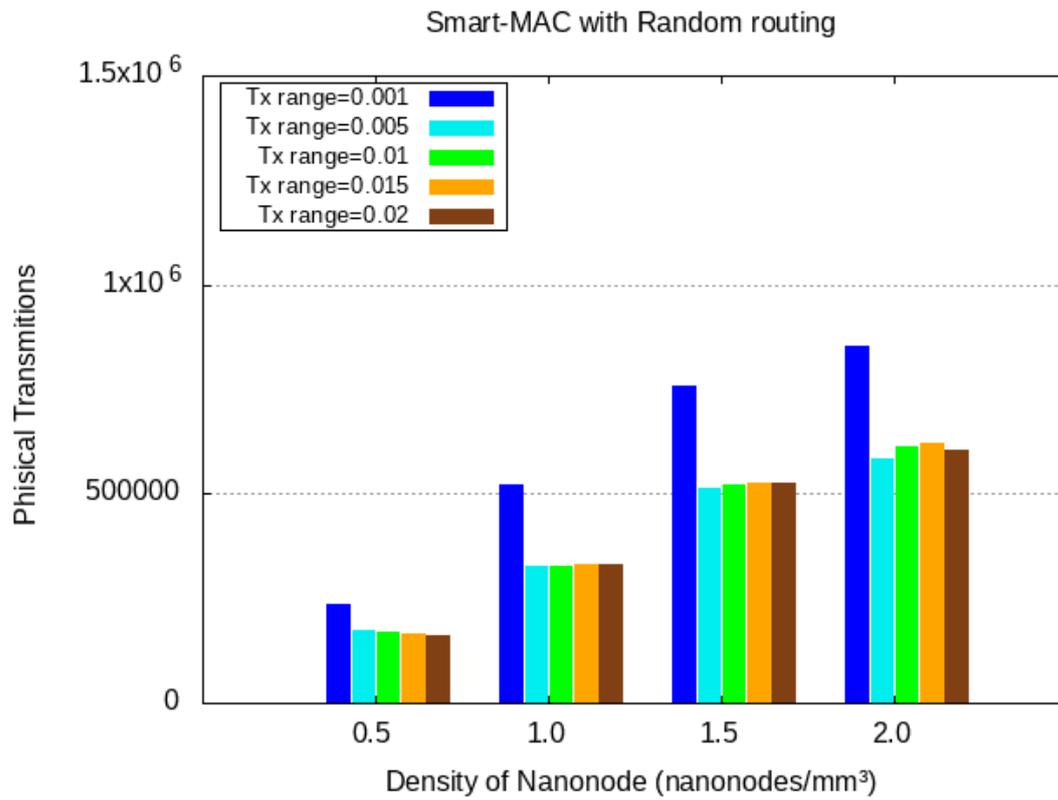


Figura II.12: Resultado de Simulação: Transmissões realizadas por Transparent-MAC with Selective flooding