



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS ARARANGUÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Felipe Adam Menegon Cieslak

**Análise do protocolo 6LowPAN/RPL para simulação de redes de sensores  
voltadas sem fio voltadas ao IoT Healthcare utilizando o COOJA/Contiki**

Araranguá  
2021

Felipe Adam Menegon Cieslak

**Análise do protocolo 6LowPAN/RPL para simulação de redes de sensores voltadas sem fio voltadas ao IoT Healthcare utilizando o COOJA/Contiki**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Profa. Analucia Schiaffino Morales, Dra.

Araranguá

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cieslak, Felipe

Análise do protocolo 6LowPAN/RPL para simulação de redes de sensores sem fio voltadas ao IoT Healthcare utilizando o COOJA/Contiki / Felipe Cieslak ; orientador, Analucia Schiaffino Morales, 2021.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Internet das Coisas (IoT). 3. 6LowPAN/RPL. 4. Healthcare. 5. Simulação de Redes de Sensores sem Fio. I. Schiaffino Morales, Analucia . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. III. Título.

Felipe Adam Menegon Cieslak

**Análise do protocolo 6LoWPAN/RPL para simulação de redes de sensores voltadas sem fio voltadas ao IoT Healthcare utilizando o COOJA/Contiki**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, Setembro de 2021.



Documento assinado digitalmente  
Fabricio de Oliveira Ourique  
Data: 23/09/2021 15:01:05-0300  
CPF: 916.167.860-00  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Analucia Schiaffino Morales  
Data: 23/09/2021 14:49:43-0300  
CPF: 622.256.420-87  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Profa. Analucia Schiaffino Morales, Dra.  
Orientador



Documento assinado digitalmente  
Fabricio de Oliveira Ourique  
Data: 23/09/2021 15:01:24-0300  
CPF: 916.167.860-00  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Jim Lau  
Data: 23/09/2021 15:26:37-0300  
CPF: 613.464.702-00  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Jim Lau, Dr  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

# Análise do protocolo 6LowPAN/RPL para simulação de redes de sensores sem fio voltadas ao IoT Healthcare utilizando o COOJA/Contiki

Felipe Adam Menegon Cieslak\*

Analucia Schiaffino Morales†

2021, SETEMBRO

## Resumo

Devido ao grande crescimento da Internet das Coisas, o avanço das tecnologias de comunicação e a difusão das redes de sensores sem fio, o 6LowPAN, protocolo de utilização do IPv6 para dispositivos IoT, junto ao RPL, responsável pela transmissão e conectividade entre os nodos de uma rede IPv6, tem se mostrado a próxima geração da tecnologia sem fio aplicada junto a sensores, tornando-se um forte candidato a substituir as tecnologias presentes nos hospitais para aquisição de dados de pacientes. Este estudo tem como objetivo analisar diferentes cenários de *healthcare* utilizando o protocolo 6LowPAN/RPL como principal tecnologia de comunicação de uma rede de sensores sem fio. As simulações destes cenários serão realizadas no simulador para dispositivos IoT do Contiki-OS, COOJA. Foram analisadas quatro diferentes topologias de rede buscando elucidar quais os principais aspectos presentes nas tecnologias utilizadas fazendo assim um estudo comparativo entre as topologias escolhidas. As redes simuladas apresentaram um baixo custo energético e uma ótima conectividade apesar da grande quantidade de nodos presentes na rede, o que vai de encontro com a proposta da tecnologia. Verificou-se também que o principal fator que deve ser levado em consideração ao implementar o 6LowPAN/RPL em cenários de *healthcare* é a organização da rede, onde as distâncias entre os nodos, quantidade de nós *sink* e *sender* da rede e a disposição destes nós influenciam diretamente no desempenho da rede como um todo.

**Palavras-chaves:** Internet das Coisas, IoT, 6LowPAN, RPL, COOJA/Contiki-OS, *Healthcare*.

---

\*felipecieslak@gmail.com

†analucia.morales@ufsc.br

# Analysis of the 6LowPAN / RPL protocol for simulating IoT healthcare-oriented wireless sensor networks using COOJA / Contiki

Felipe Adam Menegon Cieslak\*      Analucia Schiaffino Morales†

2021, SETEMBRO

## Abstract

Due to the big growth of the Internet of Things (IoT), the advance of communication technologies and the spread of wireless sensor networks, 6LowPAN, a protocol for using IPv6 for IoT devices, together with RPL, the responsible for the transmission and connectivity between the nodes of a IPv6 network, has shown to be the next generation of wireless technology applied to sensors, becoming a strong candidate to replace the technologies present in hospitals for patient data acquisition. This study aims to analyze different healthcare scenarios using the 6LowPAN/RPL protocol as main communication technology of a wireless sensor network. The simulations of these scenarios will be carried out in the Contiki-OS simulator for IoT devices, COOJA. Four different network topologies were analyzed seeking to elucidate which are the main aspects present in the technologies used, thus making a comparative study between the chosen topologies. The simulated networks had a low energy cost and excellent connectivity despite the large number of nodes present in the network, which is aligned with the 6lowPAN technology proposal. It was also found that the main factor that should be taken into account when implementing 6LowPAN/RPL in healthcare scenarios is the organization of the network, where the distances between the nodes, the number of sink and sender nodes in the network and the arrangement of these nodes directly influence the performance of the network as a whole.

**Keywords:** Internet of Things, IoT, 6LowPAN, RPL, COOJA/Contiki-OS, Healthcare.

---

\*felipecieslak@gmail.com

†analucia.morales@ufsc.br

# 1 Introdução

Estudos levantados apontam que existam hoje, mais de 15 bilhões de dispositivos conectados em todo o mundo, incluindo smartphones e computadores, porém esse número pode mais que dobrar até 2025 devido a Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT), em inglês, atingindo 35 bilhões de dispositivos conectados (aproximadamente cinco vezes a população mundial hoje) (CONSÓRCIO, 2018). A previsão é que a IoT terá um impacto econômico equivalente a até 11% da economia mundial até 2025, chegando a US\$ 11,1 trilhões por ano até essa data (Patrícia Ellen, 2016). A IoT desponta como uma área de pesquisa promissora e com uma grande quantidade de novas aplicações, tais como, cidades inteligentes, sistemas de saúde com dispositivos de monitoração integrados, automação residencial e comercial, sistemas de monitoramento em larga escala e agricultura de precisão. No Brasil, foi insituído em 2019, com a publicação do decreto N°9.854, o Plano Nacional de Internet das Coisas e a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas (BRASIL, 2019). O conteúdo deste documento está baseado no estudo feito e publicado pelo plano de ação recomendado pelo Relatório Final de Estudos, publicado em 2018, pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). A aspiração da implantação de IoT em áreas prioritárias visa contribuir para a ampliação do acesso a serviços de qualidade no país, sendo uma excelente oportunidade para alavancar novos modelos de negócios, principalmente em áreas como a saúde e a rural. Isso deve-se aos últimos acontecimentos que sobrecarregaram os sistemas de saúde em escala mundial e alavancaram a demanda pela produção de alimentos, o Brasil tem como uma das metas até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes (CONSÓRCIO, 2018).

Em termos de tecnologia no entanto, existem várias lacunas para atender esta demanda. A área de comunicação apresenta grande diversidade em termos de protocolos para integrar redes de sensores e Internet das Coisas. As redes de sensores sem fio (RSSF), incluindo as LLNs (*Low Power and Lossy Networks*), têm sido utilizadas para a aquisição de dados e controle de dispositivos remotos, demonstrando simplicidade e baixo consumo de energia. As RSSFs são indicadas em casos que a complexidade ou o custo de um sistema de comunicação de dados convencional dificultaria, ou mesmo impediria a sua implementação (CULLER; ESTRIN; SRIVASTAVA, 2004). É possível solucionar problemas reais e fazer o gerenciamento do mesmo através do uso e facilidade de conectividade apresentadas pelas RSSFs. O e-Noé (Raquel Vieira, 2019) é um caso onde redes de sensores sem fio são utilizadas para benefício comum da população. Por meio de sua RSSF, o e-Noé mede o nível de água em pontos críticos e em períodos de grandes chuvas, conseguindo assim alertar previamente a defesa civil de um possível alagamento na região. Destaca-se também o volume de aplicações que tem sido publicadas na área da saúde. Vão desde o uso de sensores para monitorar células com câncer, doenças cardíacas, doenças respiratórias, monitoração em tempo real da pressão arterial, monitoração de idosos e pacientes com distúrbios mentais, como por exemplo, Parkinson, epilepsia e depressão. As redes de sensores tem sido aplicadas, também, em áreas como a gestão hospitalar e monitoração de atividades físicas (QADRI et al., 2020), (RAHMANI et al., 2018).

As RSSFs diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande número de nodos distribuídos, têm restrições de energia, e devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nodos (LOUREIRO et al., 2015). Outro

ponto a destacar, é que com o crescimento da IoT, o protocolo IPv4 ficou para trás. Segundo (MAINETTI; PATRONO; VILEI, 2011), devido ao número potencialmente grande de dispositivos conectados, o IPv4 não pode ser usado pois seu espaço de endereçamento é limitado. Nessa situação a escolha é utilizar o protocolo IPv6 com seus endereços de 128 bits. (NAIDU et al., 2018) explica que dispositivos IoT geralmente se referem a dispositivos com restrição de recursos (potência e memória) uma vez que nós finais da rede IoT podem ser identificados exclusivamente com endereços IPv6. A IoT está atrelada fortemente a conexão sem fio, e o protocolo que gerencia a comunicação entre esses dispositivos é o IEEE802.15.4. Uma vez que numa comunicação IPv6 tradicional são utilizados 1280 bytes para a troca de mensagens, em uma rede de dispositivos sem fio o tamanho do pacote é de 127 bytes. Assim, essas redes devido seu baixo processamento são denominadas LowPAN (*Low-rate Personal Area Network*). A utilização do protocolo IPv6 em cima destas redes LowPAN ficou conhecido como 6lowPAN padronizado pela IETF (MONTENEGRO et al., 2007) em 2007. (NAIDU et al., 2018) explica que para o IPv6 conseguir transmitir nesse meio sem fio além da restrição de recursos em termos de tamanho do pacote, memória do dispositivo, alcance de transmissão e taxa de dados, uma vez que os nós 6LoWPAN são operados principalmente por bateria, deve-se levar em conta o consumo de energia também como uma das principais limitações. O responsável pelo roteamento de redes sem fio baseadas em IPv6 é o *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks* (RPL). Graças à capacidade de transportar pacotes IPv6 além do baixo consumo de energia e de possuir a camada física IEEE 802.15.4 de baixa taxa, através do protocolo 6LoWPAN, o IETF2 projetou um protocolo de roteamento adaptado para LLNs, dando origem a um protocolo de redes de baixa potência e com perdas conhecido como RPL (KAMGUEU; NATAF; NDIE, 2018).

Considerada uma transmissão de curto alcance, devido a camada física baseada no IEEE 802.15.4, o 6LowPAN é indicado para ambientes fechados, além da limitação da transmissão, trata-se de um protocolo de baixo consumo de energia. Na literatura científica, tem sido apontado como um protocolo para a área de monitoração de *Healthcare* (HUZOOREE; KHEDO; JOONAS, 2019). Além disso, o impacto econômico nos sistemas de saúde nos últimos dois anos de pandemia, é uma grande preocupação. A capacidade hospitalar teve que ser ampliada, incluindo contratação de profissionais de saúde, compra de suprimentos e EPIs, equipamentos, medicamentos e instalações hospitalares. É necessário investigar abordagens e tecnologias que possam ser adotadas para reduzir os custos com monitoração de pacientes, ou mesmo outras aplicações para auxiliar na gestão de tomadas de decisão nas redes hospitalares e unidades de saúde (MIETHKE-MORAIS et al., 2020). Ressalta-se que existem requisitos para adotar os sistemas de IoT na área da saúde, como por exemplo, a confiabilidade, a interoperabilidade, a eficiência energética das baterias, baixa latência, mobilidade e segurança (RAHMANI et al., 2018). Neste sentido, o 6LowPAN com RPL apresenta-se como alternativa para uso nestes ambientes. O objetivo do presente trabalho é investigar o funcionamento destes protocolos através da ferramenta de simulação COOJA/Contiki. Diferentes cenários de uma rede de sensores sem fio serão simulados utilizando o 6LowPAN/RPL e conceitos de IoT, visando trazer uma possível configuração de rede para uso em ambientes da saúde, onde os nodos das redes simuladas representam sensores utilizados nestes ambientes para a captação de sinais vitais de pacientes.

Este artigo está organizado em seis seções. A segunda seção apresenta fundamentos da Internet das Coisas e o *healthcare*, incluindo um breve estudo sobre esta área de aplicação. A terceira seção apresenta as principais características das tecnologias que são apresentadas nesse artigo, são elas, redes de sensores sem fio, IEEE 802.15.4, 6LowPAN e



RPL e uma descrição do simulador utilizado COOJA/Contiki-OS. O desenvolvimento do trabalho apresentado na quarta seção, demonstrando o que foi empregado na modelagem das simulações incluindo os parâmetros e as métricas empregados. Ainda nesta seção são apresentados os cenários escolhidos e suas respectivas topologias. Na quinta seção são discutidos os resultados obtidos. Na sequência, a sexta seção apresenta a conclusão e as propostas para trabalhos futuros, seguido das referências bibliográficas.

## 2 Internet das Coisas e *Healthcare*

Ao investigar o surgimento do termo *Internet of Things* (IoT), ou Internet das Coisas na língua portuguesa, foram encontradas várias informações. Segundo (KEVIN, 2010) a primeira vez que o termo *Internet of Things* foi citado aconteceu em sua apresentação na *Procter & Gamble* (P&G) em 1999, onde foi utilizado o termo para chamar a atenção dos executivos sobre o RFID, tecnologia que estava sendo apresentada. Desde então o termo ficou cada vez mais popular e passou a ser utilizado em quase todos os artigos da *Scientific American* em nome da conferência da União Européia, defende ele. A idéia básica do funcionamento da IoT é trazida com (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010) que nada mais é do que a presença generalizada ao nosso redor de uma variedade de coisas ou objetos - RFIDs, tags, sensores, atuadores, telefones, celulares, etc - que por meio de esquemas de endereçamento exclusivos, são capazes de interagir uns com os outros e cooperar com seus vizinhos para alcançar um objetivo em comum. As tecnologias *Wireless Sensor Network* (WSN) e a possibilidade de estar em qualquer lugar, permite uma variedade de aplicações e funcionalidades como medir, inferir, compreender indicadores, gerenciar mudanças climáticas, monitorar recursos naturais, e outros recursos rurais e urbanos. O uso destes dispositivos associados a recursos de redes de comunicação cria um sistema de IoT, onde sensores e atuadores se misturam perfeitamente com o ambiente ao redor, e as informações podem ser compartilhadas através de plataformas e dispositivos de *dashboards* (GUBBI et al., 2013).

### 2.1 Arquiteturas para IoT *Healthcare*

Uma das áreas mais promissoras para a IoT é a área de cuidados à saúde ou *Healthcare* (QADRI et al., 2020). Esses paradigmas baseados nas tecnologias da informação e comunicação estão redesenhando a saúde com perspectivas tecnológicas, econômicas e sociais promissoras. Esses avanços poderão auxiliar a mitigar uma série de questões relacionadas ao setor de saúde, tais como, melhorar a qualidade de atendimento, acompanhar as pessoas que sofrem de doenças crônicas ou obesidade, ou mesmo, recursos para enfrentar o envelhecimento da população apontado pela OMS. Considera-se a IoT aplicada ao *Healthcare* como um ecossistema composto por diversos sensores, recursos de comunicação incluindo protocolos e dispositivos, gateways e servidores em nuvem para a infraestrutura e armazenamento, e o que mais for necessário para coletar dados, processá-los, analisá-los, tomar decisões e vincular as ações relacionadas à comunidade de saúde envolvida, sejam pacientes, médicos ou profissionais de saúde (RAHMANI et al., 2018). O espaço para a implantação pode ser um hospital, uma unidade de saúde, uma clínica, uma residência, ou até mesmo, todo este contexto inserido em um universo maior denominado cidade inteligente, onde todas as áreas e coisas estarão interligadas. Uma arquitetura para atender as necessidades computacionais de um problema extremamente complexo, que envolve um enorme volume de dados de diferentes tipos, problemas de transmissão e necessidade de redução de latência (atrasos) para dados em tempo real, privacidade de informações

de pacientes, integração e interoperabilidade entre vários tipos de protocolos e redes de comunicação (CATARINUCCI et al., 2015).

A arquitetura para IoT em cuidados da saúde considerada neste trabalho se baseia em três camadas com funções bem definidas e descentralizadas, conforme ilustra a Figura 1. Já a Figura 2 apresenta um modelo padrão de uma aplicação completa para redes 6LowPAN voltadas ao IoT *healthcare*. Recentemente, foi publicado um trabalho a respeito das arquiteturas de IoT para a área de saúde e aponta que ainda não existe um padrão definido (MORALES; OURIQUE; CAZELLA, 2021). Uma camada composta de sensores que poderá coletar dados sobre o estado de saúde do paciente, ou coletar dados sobre funcionamento de equipamentos, ou ainda sobre o uso de medicamentos (camada de aquisição dos dados). Uma segunda, que recebe os dados coletados, que pode ser conforme a aplicação um gateway ou mesmo uma camada intermediária chamada de *fog layer*, onde são transmitidos os dados e poderão sofrer uma análise e processamento dependendo do tipo de aplicação e recursos disponíveis (comunicação dos dados), sendo posteriormente, os resultados exibidos em tempo real para as pessoas interessadas (aplicação e *cloud computing*). Ressalta-se que estão previstos vários protocolos para uma arquitetura deste tipo. O nível de aquisição de sinais, para ambientes internos devido a questões relacionadas a alcance e bateria, tem sido cogitado o uso de 6LowPAN devido a capacidade de utilizar endereçamento IPv6 e integração com outros protocolos a nível de rede. Outro protocolo que faz parte deste conjunto de camadas, em um nível de troca de mensagens tem sido o MQTT (MQ Telemetry Transport) (RAHMANI et al., 2018).

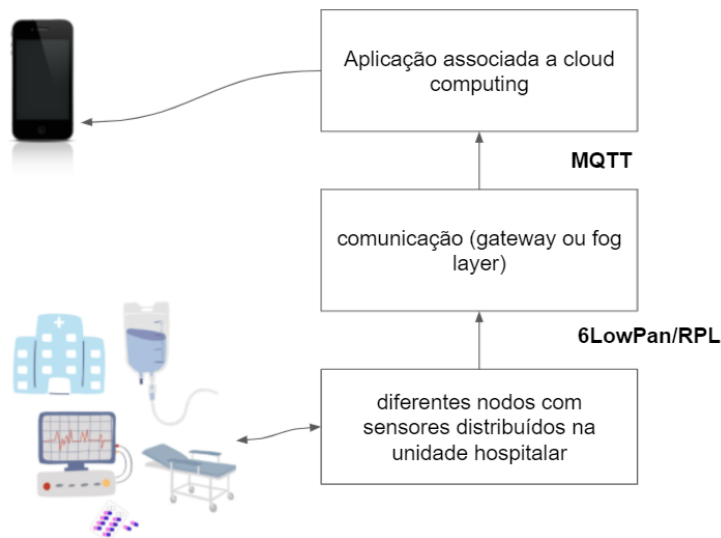


Figura 1 – Camadas IoT para *Healthcare*. Fonte: Próprio Autor

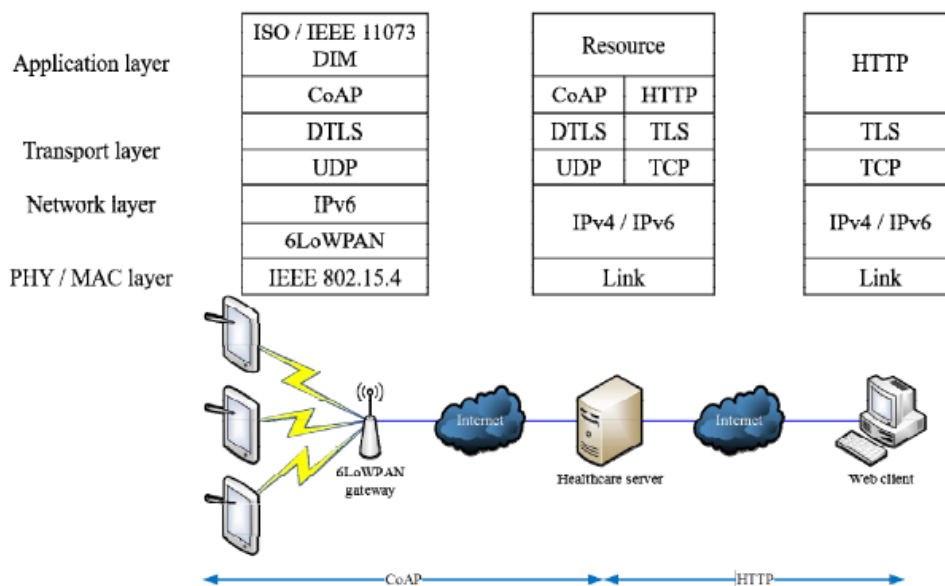


Figura 2 – Arquitetura 6LoWPAN IoT para *Healthcare*. Fonte: (KANG; KIM; KOH, 2016)

### 2.1.1 Aquisição de dados

Se for considerado um exemplo simples de monitoração de pacientes dentro de um hospital. Ou seja, o paciente fica constantemente monitorado por um equipamento e que estes dados de tempos em tempos são atualizados para o dispositivo móvel do médico responsável pelo paciente. Este dado é coletado pelo sensor, transmitido para uma estrutura de comunicação e distribuição e então chega ao médico, todos os dados puros da monitoração em tempo real. Os dispositivos serão acessíveis através da Internet, permitindo as aplicações explorar os dados coletados (CATARINUCCI et al., 2015). No entanto, estes dados podem ser refinados de forma a chegar ao médico sob o formato de informações mais inteligentes para auxiliá-lo no processo de tomar as decisões de forma segura e assertiva com relação ao paciente (QADRI et al., 2020). A camada de aquisição de dados caracteriza-se pela presença de sensores para coletar os dados ou os parâmetros fisiológicos dos pacientes ou usuários. Esta coleta pode ser contínua, ou em tempo real dependendo do problema que está sendo monitorado. Nesta camada, situam-se os sensores e suas antenas para transmitir o sinal coletado. Dependendo do tipo de rede associado, esta transmissão pode ser direta para o nodo coordenador da rede ou para um outro nodo intermediário. Isso vai depender da tecnologia que está sendo utilizada e da topologia adotada (MORALES; OURIQUE; CAZELLA, 2021).

### 2.1.2 Camada de comunicação

Retomando o exemplo anterior, se a transmissão dos dados do paciente for dentro de um ambiente hospitalar. Tecnicamente, isso exige muito cuidado, pois os sinais transmitidos pelo dispositivo no paciente, precisam chegar sem alterações no destinatário, assim como qualquer tipo de mensagem que utiliza rede para transporte. No caso, de informações de pacientes, existe um agravante pois a chegada do dado pode implicar na vida do paciente. Nos sistemas de IoT aplicado aos cuidados de saúde é adicionada uma camada de comunicação, responsável pela transmissão dos dados. Neste sentido, algumas plataformas

incluem gateways para a transferência de sinais entre nodos, diferentes protocolos de transmissão sem fio e outros mecanismos necessários para que a transferência de dados seja alcançada de forma bem sucedida (QADRI et al., 2020). Encontra-se também duas funcionalidades destinadas ao processamento dos dados na borda da rede, ou seja, várias arquiteturas para IoT possuem a presença de dispositivos chamados fog computing ou edge computing, ou ambos. Estas entidades são incluídas na arquitetura para a reduzir a latência de transmissão de dados, adicionando um processamento de dados na rede local, antes de enviar para a distribuição na nuvem. As estruturas de *fog computing* possuem um papel fundamental dentro destas estruturas (RAHMANI et al., 2018). Esta camada poderá auxiliar a reduzir a latência e o tempo de resposta; reduzir o consumo de energia; otimizar o tráfego da rede; aprimorar a segurança dos dados transmitidos ou até mesmo melhorar as transmissões do sistema considerando as diversas interferências que possam existir dentro do ambiente hospitalar.

### 2.1.3 Camada de aplicação e distribuição

Voltando ao exemplo de monitoração de pacientes em um hospital, os sensores coletaram e transmitiram para uma camada intermediária responsável pelo processamento dos dados. Após processados, estes dados serão enviados ao destinatário para auxiliar na tomada de decisões. O uso de sistemas de distribuição de *cloud computing*, pode ser uma estratégia para assegurar a entrega dos dados entre diferentes tipos de equipamentos. Através de recursos de *cloud computing*, estes dados podem ser entregues a vários destinatários ao mesmo tempo. Estes dados precisam chegar até o médico para que se certifique da situação e realize decisões, e ao mesmo tempo, podem informar as condições do paciente para seus familiares. Obviamente, as informações disparadas ao médico seriam diferentes das informações destinadas a família, porém ambas são derivadas dos sinais fisiológicos e processamento de dados transmitidos. Uma das vantagens de empregar uma infraestrutura computacional descentralizada na qual dados, processamento, armazenamento e aplicativos são distribuídos, de forma eficaz, entre a fonte de dados (sensores) e a *cloud computing* é reduzir a latência, necessitar menor largura de banda e através de sistemas de cloud computing assegurar questões relacionadas a privacidade e segurança (QADRI et al., 2020).

## 2.2 Estado da Arte

A tecnologia apresentada neste artigo pode promover melhorias ao sistema de saúde, e também melhorar o atendimento ao paciente. Além disso, esta tecnologia é uma forte aliada para contenção de gastos, agilidade e precisão no diagnóstico e no tratamento de doenças. A seguir foram selecionados alguns trabalhos relacionados ao uso do protocolo 6LowPAN/RPL e IoT para a área de *Healthcare*.

O estudo de (TABISH et al., 2014) propõe um sistema 3G/Wifi baseado no protocolo 6LowPAN que permite o monitoramento remoto do estado de saúde dos pacientes e o fornecimento de *feedbacks* e ações remotas pelos prestadores do serviço médico-hospitalar.

Com a proposta de estruturar um sistema de saúde ponta a ponta personalizado (JARA; ZAMORA-IZQUIERDO; SKARMETA, 2013) apresenta um *framework* para interconexão *mobile* baseada em Internet das Coisas. Utilizando um *gateway* 6LowPAN e o RFID, o sistema faz o monitoramento contínuo dos sinais vitais do paciente além de permitir o monitoramento e a supervisão dos pacientes de forma remota.

Segundo (Minh Dang et al., 2019) o desenvolvimento da IoT e da computação em nuvem está melhorando a segurança do paciente, a satisfação da equipe, e eficiência

operacional na indústria médica. Seu estudo apresenta as últimas tendência do mercado de IoT para saúde assim como os componentes de IoT utilizados e suas aplicações. O 6LowPAN é uma das tecnologias abordadas neste estudo que buscou analisar desde 2015 quais seriam as tecnologias mais interessantes para com os cuidados com a saúde (*healthcare*). Outro estudo comparativo foi apresentado por (SUELL; CASTRO; LEÃO, 2019) que gerou um mapeamento sistemático do estado da arte de aplicações de IoT para o *healthcare*. Nele, novamente foi destacado os benefícios da utilização do 6LowPAN, exaltando suas principais características como consumo de energia e tolerância a falhas, destacando a tecnologia para utilização no âmbito da saúde.

A premissa do protocolo 6LowPAN prover uma rede de dispositivos *wireless* de baixo custo é bastante difundida no meio acadêmico. Um desses exemplos é a pesquisa de (KUMAR, 2018) que faz a análise das principais arquiteturas utilizadas para elaboração dessas redes *low-cost*. A pesquisa exalta ainda que quando sensores IoT são integrados numa plataforma de hardware e são coordenados com sistemas de processamento, isso resulta em um "*multisensor*" para o *healthcare* de ponta a ponta, com baixo custo, preços acessíveis e amplamente instalável em todas as geografias.

Utilizar sistemas inteligentes baseados em redes de sensores sem fio para auxiliar na qualidade do serviço de saúde e aumentar o número de pacientes atingidos pode tornar-se uma importante ferramenta para o tratamento e monitoramento de algumas doenças, principalmente as cardiovasculares como mostra a pesquisa de (HU; WU; LIANG, 2019). A pesquisa traz alguns dados interessantes sobre esse tipo de doença na população chinesa. Um deles é relatado de acordo com o Índice de Saúde Cardiovascular Chinês (2017), onde a mortalidade causada por doenças cardiovasculares e cerebrovasculares tem aumentado. Segundo o autor, se fosse possível monitorar sutis sinais vitais via sensores sem fio e ainda utilizar medidas eficazes de prevenção, cerca de 70-80% dos pacientes poderiam ter suas vidas salvas. O modelo de *framework* IPv6 proposto no texto tem como base sensores que utilizam a tecnologia 6LowPAN para seu funcionamento.

A importância da infraestrutura de um sistema de IoT para a saúde com *gateways* e as camadas intermediárias de *fog* e *edge computing* são amplamente discutidas em (RAHMANI et al., 2018). A posição estratégica do uso de gateways na borda da rede serve para oferecer vários serviços de nível superior, como armazenamento local, processamento de dados em tempo real nos gateways, o uso de mineração de dados incorporada, entre outros. O estudo apresenta uma solução para o sistema de saúde hospitalar com sensores utilizando o 6LowPAN e diferentes topologias. As questões relacionadas as características do 6LowPAN como a mobilidade, a eficiência energética, a escalabilidade e questões relacionadas a confiabilidade também são discutidas no texto.

Avanços em termos de tecnologia e como tem transformado os sistemas de IoT em *healthcare*, bem como o seu impacto no futuro, ao melhorar a Qualidade de Serviço (QoS, do inglês Quality of Service) e o uso de diferentes tipos de tecnologias de comunicação (QADRI et al., 2020). Os autores ilustram a era da Medicina 4.0, na qual sistemas de monitoramento dos pacientes ganharam espaço e são uma ferramenta de diagnóstico precoce e de planejamento de tratamento pró-ativo, apoiando a tomada de decisão do profissional da saúde. Diversos aspectos em tecnologia e inteligência artificial são apresentados neste trabalho, apontando tendências e lacunas a serem desenvolvidas para o desenvolvimento de sistemas inteligentes em saúde apoiados no uso de recursos de IoT.

### 3 Rede de sensores sem fio

É inegável o crescimento de redes de sensores sem fio nos últimos anos. A corrida da indústria pelo mercado promissor do IoT tem se refletido na crescente oferta para diferentes tipos de redes, tipos de dispositivos, alcances variados nas faixas de frequência de ISM e diferentes opções para as taxas de transmissão. No entanto, o presente trabalho tem foco nos protocolos que compõem o conjunto de camadas física, enlace e rede, respectivamente, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN e RPL.

#### 3.1 IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é um padrão para comunicações em redes LoWPAN (*Low-Power Wireless Personal Area Network*) introduzido pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) para abordar as redes sem fio de baixa potência e baixa taxa de requisitos. Um dispositivo em uma rede 802.15.4 pode usar um endereço IEEE de 64 bits ou um endereço de 16 bits, endereço curto, atribuído durante o procedimento de associação. Uma rede 802.15.4 pode acomodar até 64k ( $2^{16}$ ) dispositivos. O comprimento do quadro é limitado a 127 bytes porque os links sem fio de baixa potência são utilizados para comunicação e os dispositivos (sensores) têm capacidades de buffer limitadas (OLIVEIRA; De Sousa; RODRIGUES, 2011).

A especificação original do padrão IEEE 802.15.4 foi estabelecido em 2003 pela (IEEE. . . , 2003), onde definiu-se as frequências de banda e o *bit rate* utilizáveis para essa tecnologia. As Figuras 3 e 4 apresentam as faixas de frequências, modulações, taxas de transferência e a distribuição dos canais, respectivamente.

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

Figura 3 – Tabela de frequência de banda e taxa de dados (*bit rate*) padrão do 802.15.4 .  
Fonte: (IEEE. . . , 2003)

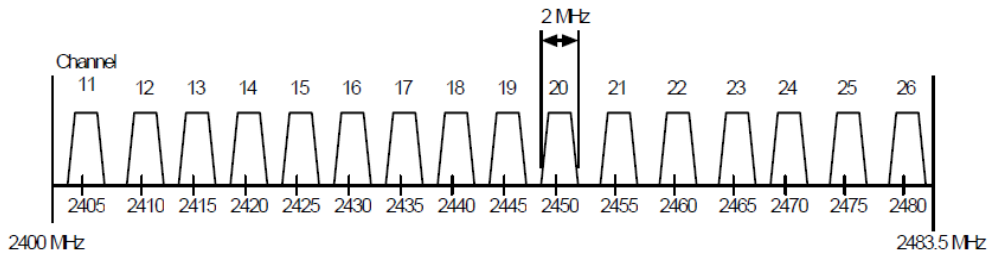


Figura 4 – Distribuição dos canais presentes na faixa de frequência 2.4MHz IEEE 802.15.4 . Fonte: (IEEE. . . , 2006)

Entre as principais características do IEEE 802.15.4 destacam-se (MA; LUO, 2008):

- Baixa taxa: Os PHYs de 868/915 MHz suportam taxas de dados de 20 kb/s, 40 kb/s, e opcionalmente 100kb/s e 250kb/s pelo ar. O PHY de 2450 MHz suporta taxa de dados de 250 kb/s. O PHY escolhido depende do local, de regulamentos e da preferência do usuário.
- Baixa potência: Pequenas baterias que duram por meses ou até mesmo anos.
- Baixo custo: Geralmente usa um dispositivo embarcado de baixo nível com recurso de hardware limitado.
- Distância curta: O alcance da cobertura do sinal é de 10m a 100m.
- Vários tipos: Os dispositivos geralmente incluem o FFD (*Full Function Device*) e o RFD (*Reduced Function Device*). O FFD inclui coordenador e roteador, onde o coordenador pode formar uma rede e pacotes de rota, já o roteador pode rotear os pacotes mas pode também ter funções adicionais. Já o RFD é o dispositivo final que possui função limitada e fica ocioso a maior parte do tempo.
- Múltiplos modos: Dois modos de transmissão são definidos pela camada MAC, um é o *beacon-enabled mode* e o outro o *nonbeacon-enabled mode*. O *nonbeacon-enabled mode* PAN utilizada o CSMA-CA para evitar colisões. No entanto, o *beacon-enabled mode* PAN identifica sincronização através da estrutura de superquadro, o uso de intervalos de tempo baseados no mecanismo CSMA-CA podem deixar o dispositivo inativo no estado de economia de energia baixa para economizar energia.

### 3.2 Protocolo 6LowPAN

O protocolo 6LowPAN está regido através de sua RFC (*Request for Comments*) (MONTENEGRO et al., 2007), definido pela IETF (*Internet Engineering Task Force*) como um protocolo para otimização da utilização do IPv6 sobre redes de baixas velocidades LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*). O MTU (*Maximum Transmission Unit*) padrão do IPv6 é de 1280 bytes, entretanto um pacote IPv6 completo não cabe em um *frame* IEEE 802.15.4. Para implementação do 6LowPAN em redes IEEE 802.15.4 foi necessário então a adição de uma camada de adaptação capaz de eliminar campos desnecessários da compressão dos protocolos UDP (*User Datagram Protocol*) e IPv6,



reduzindo assim o tamanho do datagrama a ser transmitido pela rede (MONTENEGRO et al., 2007).

A Figura 5 apresenta as camadas do protocolo 6LowPAN:

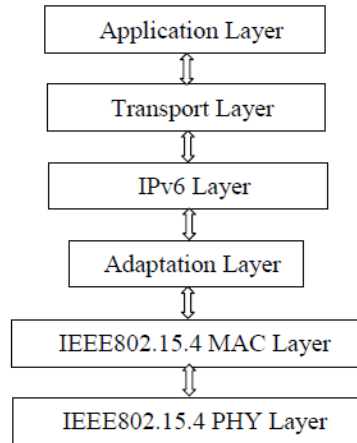


Figura 5 – Modelo de pilha referência do 6lowPAN. Fonte: (MA; LUO, 2008)

Devido ao tamanho limitado da carga útil da camada de enlace nas redes 6LoWPAN, o padrão 6LoWPAN também define a fragmentação e remontagem do datagrama. O tamanho do quadro IEEE 802.15.4 pode exceder o tamanho da Unidade Máxima de Transmissão (MTU) de 127 bytes para dados de grande aplicativo, nesse caso fragmento (s) adicional (is) são necessários (PONGLE; CHAVAN, 2015).

A camada de adaptação deve ser fornecida para cumprir os requisitos do MTU mínimo do IPv6, mas espera-se que a maioria das aplicações do IEEE 802.15.4 não utilizem grandes pacotes e ainda que aplicações com pequenos payloads junto com a compressão adequada do cabeçalho produzirá pacotes que encaixem dentro de um único quadro IEEE 802.15.4 (MONTENEGRO et al., 2007).

Entre as vantagens técnicas do uso do 6LowPAN em redes de baixa potência, velocidade e custo, destacam-se (MA; LUO, 2008):

- Popularização : A aplicação da rede IP é generalizada. O IPv6 como sendo a tecnologia central da próxima geração de Internet, acelera o ritmo de sua popularidade.
- Aplicabilidade : A estrutura da pilha de protocolo de rede IP é amplamente conhecida, as LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) podem ser exploradas com base nesta estrutura.
- Maior espaço de endereçamento : O maior ponto de luminescência da aplicação do IPv6 em uma rede LR-WPAN é o enorme espaço de endereço (isso significa que são aproximadamente  $6,67 * 10^{27}$  endereços IPv6 por metro quadrado no nosso planeta), e isto satisfaz exatamente a necessidade de disposição das LR-WPAN em larga escala e com alta densidade de dispositivos.
- Suporte à configuração automática de endereços sem estado : No IPv6, quando o nó começa a funcionar, ele pode ler o endereço MAC automaticamente e implantar o endereço IPv6 de acordo com as regras relativas do protocolo.



- De fácil acesso: LR-WPAN utilizam a tecnologia IPv6, que seria mais fácil para acessar outras redes baseadas na tecnologia IP, aproveitando assim o máximo da tecnologia IP para desenvolvimento.

Diferente de redes cabeadas onde os nós de uma rede são diretamente alcançáveis entre eles, por se tratar de RSSFs com múltiplos saltos (*multi-hops*), a comunicação entre os nós de uma rede 6LoWPAN não pode ser dado por encaminhamento da camada de enlace, pela utilização do endereço MAC do nó de destino. Por este motivo há necessidade de se estabelecer mecanismos de encaminhamento de pacotes diferentes. (MÁRCIO LUIZ FERREIRA MIGUEL, 2018). Assim existem duas possibilidades de roteamento em uma rede 6LoWPAN de múltiplos saltos. A primeira delas seria o roteamento *mesh*. Segundo (OLIVEIRA; De Sousa; RODRIGUES, 2011), o grupo 6LoWPAN considerou originalmente apenas a abordagem "*mesh-under*" para oferecer suporte ao roteamento. O "*mesh-under*" fornece um link de transmissão virtual para o protocolo IP. Neste caso, a camada de rede pode supor que todos os nós dentro de uma sub-rede sejam diretamente alcançáveis, portanto, o modelo de IP não necessita mudança. Na abordagem *mesh-under*, o roteamento e o encaminhamento ocorrem na camada de enlace de dados (Figura 6) ou na camada de adaptação 6LoWPAN (Figura 7).

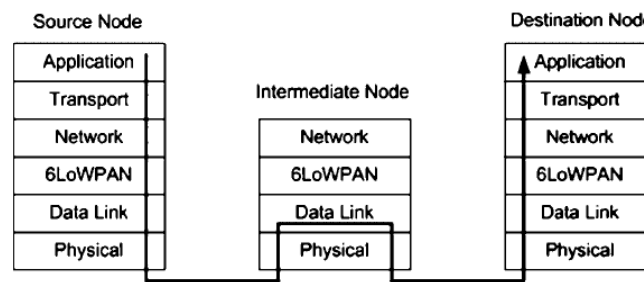


Figura 6 – Roteamento *mesh-under* camada de enlace de dados. Fonte: (OLIVEIRA; De Sousa; RODRIGUES, 2011)

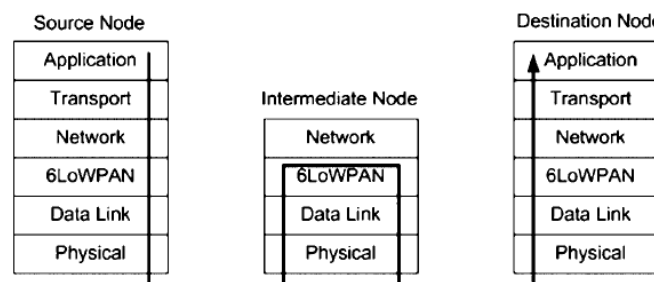


Figura 7 – Roteamento *mesh-under* camada de adaptação 6LoWPAN. Fonte: (OLIVEIRA; De Sousa; RODRIGUES, 2011)

A segunda forma de roteamento seria o "*route*". Chamado de "*route-over*" consiste em utilizar os protocolos de roteamento disponíveis atualmente, ou novos protocolos de roteamento projetados, para serem mais eficientes para redes de baixa potência e de largura de banda limitada. Esses protocolos devem gerenciar as tabelas de roteamento IP para

permitir que protocolo IP faça o "roteamento" entre os vários nós (MULLIGAN, 2007). Neste tipo de roteamento cada pacote é encaminhado para o endereço IPv6 de *next-hop* do nó intermediário (que atua como roteador) e em seguida é encaminhado para os próximos nós sucessivamente até que chegue à raiz da árvore (o destino) (MÁRCIO LUIZ FERREIRA MIGUEL, 2018). A Figura 8 apresenta as camadas para este tipo de protocolo e interações entre origem e destino.

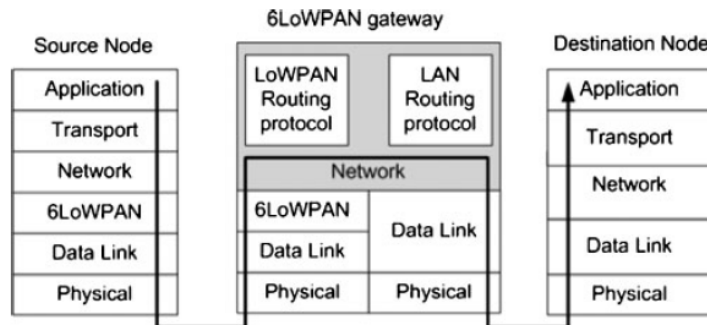


Figura 8 – Roteamento *route-over* 6LoWPAN. Fonte: (OLIVEIRA; De Sousa; RODRIGUES, 2011)

### 3.3 RPL

O RPL (*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) é um dos algoritmos pertencentes a classe "route", e um dos mais difundidos com a utilização do 6LoWPAN. Elaborado pela grupo "ROLL" do IETF, o RPL está regido por sua RFC (ALEXANDER et al., 2012), e foi proposto pela mesma como uma possível solução para o roteamento em redes LLNs (*Low Power and Lossy Networks*) onde as baixas taxas de entrega de pacotes e a baixa velocidade da rede são os principais problemas.

Os nós de uma rede de sensores que utiliza o RPL para seu roteamento são interconectados pela topologia DODAG (*Destination Oriented Directed Acyclic Graph*). Esta topologia une o conceito DAG (*Directed Acyclic Graph*) que tem sua premissa baseada em um gráfico direcionado com a propriedade de que todas as arestas do gráfico sejam orientadas de forma que não existam ciclos. Todas as arestas estão contidas em caminhos orientados e terminam em um ou mais nós raiz. Uma raiz DAG é um nó, dentro do DAG, que não possui saída. Por se tratar de um gráfico acíclico todos os DAGs devem ter pelo menos uma raiz DAG e todos os caminhos do gráfico terminam em uma raiz DAG (ALEXANDER et al., 2012).

Na topologia de árvore DODAG do RPL, o nó raiz também é chamado de nó coletor. O funcionamento do algoritmo começa quando o nó raiz inicia a formação da topologia transmitindo as mensagens DIO (*DODAG Information Object*). Estes nós que recebem as mensagens DIO selecionam o pai para o remetente, com o valor da classificação calculado em relação ao valor da classificação dos pais e outros parâmetros. O valor da classificação pode ser dependente da distância do nó raiz, energia do link, etc. Os nós continuam a transmitir via *broadcast* a mensagem DIO e a formar a topologia em árvore (PONGLE; CHAVAN, 2015).

Além das mensagens DIO que servem para identificar a árvore de roteamento da rede o RPL possui mais 2 tipos de mensagens de comunicação sendo elas DAO (*DODAG*

*Destination Advertisement Object*) e DIS (*DODAG Information Solicitation*). As mensagens do tipo DAO tem a função de estabelecer conexão inversa em comparação as mensagens do tipo DIO. Uma vez que as mensagens DIO partem do nó raiz da rede as mensagens do tipo DAO são enviadas a partir dos nodos filhos e tem como principal objetivo fazer conexão com o coordenador da rede. Já as mensagens do tipo DIS são utilizadas quando um novo nó é adicionado a rede ou quando um nó já pertencente a rede perde conexão com a mesma. As mensagens DIS são responsáveis pela adaptação da rede (ALEXANDER et al., 2012).

Afim de reduzir a sobrecarga de roteamento, o RPL usa o algoritmo *Trickle Timer*. Ao utilizar o algoritmo *Ticker Timer*, o envio atualizado das informações de roteamento (mensagens DIO) podem ser feitas de forma adaptativa utilizando o conceito de cronômetro ou tempo. Usando este algoritmo, a sobrecarga de roteamento pode ser minimizada e têm um impacto muito bom nas redes que exigem uma conexão estável e possuem longa duração (PRAWIRA; ABDUROHMAN; PUTRADA, 2019).

As demais particularidades do algoritmo serão explicadas conforme o desenvolvimento do trabalho.

### 3.4 Simulador COOJA/CONTIKI

O Contiki-OS é um sistema operacional de código aberto, altamente portátil e multitarefas utilizado para sistemas embarcados em redes com uso eficiente de energia e para redes de sensores sem fio. O Contiki-OS fornece comunicação tanto IPv4 como IPv6 e é desenvolvido em conjunto pela indústria e pela academia que tem á frente de suas pesquisas/desenvolvimento Adam Dunkels (Adam Dunkels, 2012). O Contiki é usado em vários sistemas comerciais e não comerciais, como monitoramento de som urbano, iluminação pública, medidores de energia elétrica em rede, monitoramento industrial, monitoramento de radiação, monitoramento de canteiro de obras, entre outros (GROUP, 2015). Incluso ao Contiki desde a versão 2.0 (Benoît Thébaudeau, 2019), o simulador COOJA é a ferramenta ideal para simulações que utilizem protocolos de roteamento baseado em redes de sensores sem fio. Mais detalhes do simulador COOJA e do sistema operacional Contiki-OS são abordados na sessão 4.1.

## 4 Desenvolvimento do Trabalho

Nesta seção, será apresentado o desenvolvimento do trabalho. Será abordado quais foram os tipos de cenários utilizados para simulação, a disposição da rede, bem com seus parâmetros e as métricas escolhidas para o estudo.

### 4.1 Visão Geral: Modelagem da Rede

Para modelagem da rede foi utilizado o sistema operacional ContikiOS-3.0 junto com seu simulador COOJA. O sistema executa em uma máquina virtual linux com 4GB de Memória RAM, 10GB de armazenamento inteiro e 2 núcleos com 4 *cores* cada com velocidade de 3.8GHz.

A construção da rede é dada através de um conjunto de nodos. Estes nodos no simulador COOJA são apresentados como "*motes*". Existe uma grande variedade de tipos de "*motes*", para a construção da rede do presente trabalho foi utilizado o tipo "*sky motes*".

Seu hardware físico descrito pelo simulador encontra-se abaixo na Figura 9, junto com as demais informações *default* sobre o "mote".

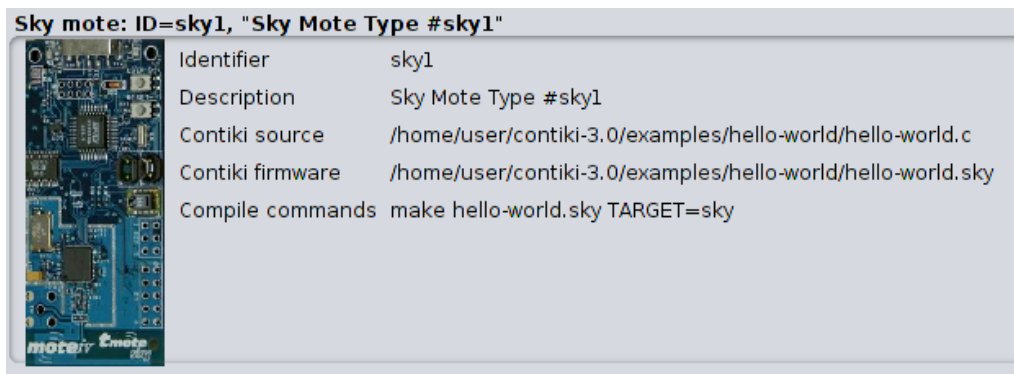


Figura 9 – "Sky Mote" - Hardware e descrições genéricas. Fonte: Próprio Autor

Em cada cenário, os seguintes parâmetros precisam ser configurados. Abaixo uma breve descrição do que significa cada um destes parâmetros:

- *Wireless Channel*: Canal de transmissão das mensagens de rádio dos atuadores da rede. O *Distance Loss* indica a perda do sinal caso um atuador da rede fique fora do *range* de cobertura da radio frequência de outros atuadores.
- *Ranges ratio TX/RX* : Métrica responsável pela taxa de envio das mensagens de comunicação na rede (TX) e taxa de recepção das mesmas (RX).
- *MAC Layer* : Tecnologia presente na camada de enlace de comunicação.
- *Transmission range* : Distância limite de transmissão de mensagens de um atuador da rede.
- *Mote type* : Tipo do nodo (atuador) presente na rede.
- *Number of motes* : Quantidade total de nodos presentes na rede.
- *Sink nodes* : Quantidade de nodos fonte (*sink*) presente na rede.
- *Sender nodes* : Quantidade de nodos senders ou na prática, sensores de monitoramento da rede.
- *Simulation Time* : Tempo total de simulação do cenário.

## 4.2 Disposição da Rede

Conforme mencionado na seção anterior, a área de *healthcare* é uma área promissora para uso da tecnologia 6LowPAN/RPL devido as características de transmissão e de alcance e uso de baterias. A principal aplicação seria para monitoramento remoto. Para a simulação dos cenários apresentados a disposição dos nodos da rede representam, em uma aplicação real, sensores utilizados em hospitais para obtenção de sinais biométricos ou fisiológicos de pacientes, podendo esses serem medidores de temperatura e batimentos cardíacos, sensores de detecção de queda ou até mesmo monitoramento do sono, medidores de pressão

arterial e oxigenação no sangue, por exemplo. Algumas aplicações poderiam associar diferentes sensores e transmitir através da camada de aquisição de sinais para a camada de comunicação, como foi mencionado na seção de Internet das Coisas e *healthcare*

Para todas as simulações os nodos representados pela cor amarela são os nodos *senders* da rede, ou na aplicação real, os sensores de monitoramento de pacientes, e por sua vez o nodo representado pela cor verde é a fonte (*sink*) da rede, responsável por coordenar a rede. Cada cenário apresenta o conjunto de parâmetros empregados na modelagem. Ressalta-se um ponto importante, definido para os cenários, devido o tempo de processamento da simulação e recursos computacionais, a partir de 40 motes (Tabelas 3 e 4) o tempo de simulação sofre uma redução afim de preservar o funcionamento do completo do simulador, uma vez que conforme a quantidade de motes sobe na rede o consumo de memória do simulador COOJA também é aumentado.

#### 4.2.1 Cenário 1

A tabela a seguir apresenta a descrição dos parâmetros empregados no cenário 1.

Parâmetros	Cenário 1
Wireless channel	Unit Disk Graph Medium: Distance Loss
Ranges ratio TX/RX	80%/85%
Mac Layer	802.15.4
Transmission range	50m
Mote type	Sky mote
Number of motes	11
Sink nodes	1
Sender Nodes	10
Simulation Time	1h

Tabela 1 – Parâmetros de simulação cenário 1

A partir da configuração da Tabela 1, o cenário apresenta a seguinte topologia (Figura 10):

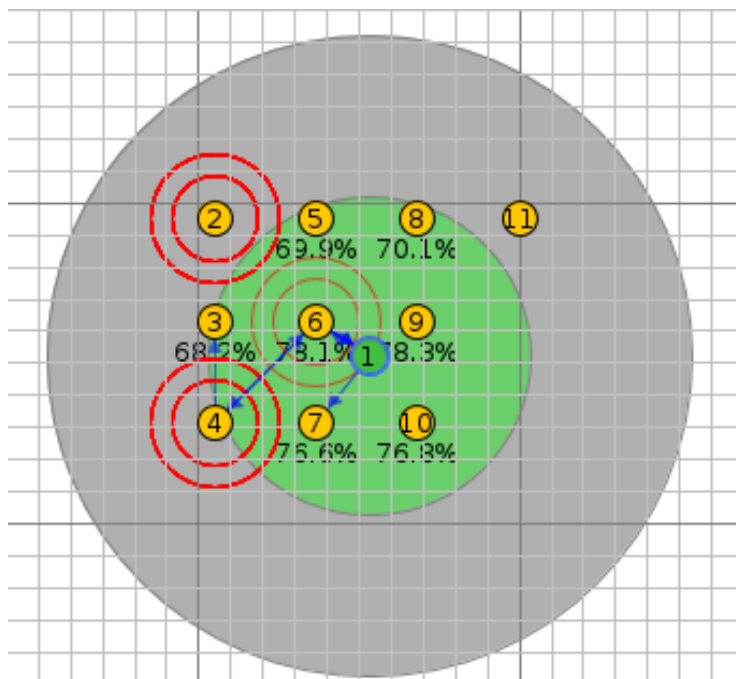


Figura 10 – Topologia da rede cenário 1. Fonte: Próprio Autor

Uma vez que o RPL é um DODAG e não possui ciclos, o que o difere de uma topologia de árvore convencional, ao final da simulação é obtido o *network graph*, ou gráfo da rede, ou ainda árvore de roteamento, onde é possível visualizar o melhor caminho que o nodo *sender* utilizou para enviar as informações da rede para a fonte. O peso das arestas (valor decimal em azul) representado na Figura 11, é o valor ETX do link *wireless*. A métrica ETX (*The Expected Transmission Count*) é definida como  $1/(Df * Dr)$ , onde  $Df$  é a probabilidade medida de que um pacote é recebido pelo seu vizinho e  $Dr$  é a probabilidade medida de que o pacote de confirmação (ACK) foi recebido com sucesso (BARTHEL et al., 2012). O Protocolo de Roteamento para Redes de Baixa Potência e Perdas (RPL) permite o uso de funções objetivo para construir rotas que otimizam ou restringem uma métrica de roteamento nos caminhos. Esta especificação descreve o ETXOF (*The Expected Transmission Count Objective Function*), uma função objetivo que minimiza ETX. O cálculo do caminho RPL usando ETXOF resulta em caminhos de ETX mínimo dos nós para as raízes DAG, ou seja, caminhos que minimizam o número de transmissões de pacotes para entrega de pacotes de nós na rede para a raiz DAG (ALEXANDER et al., 2012).

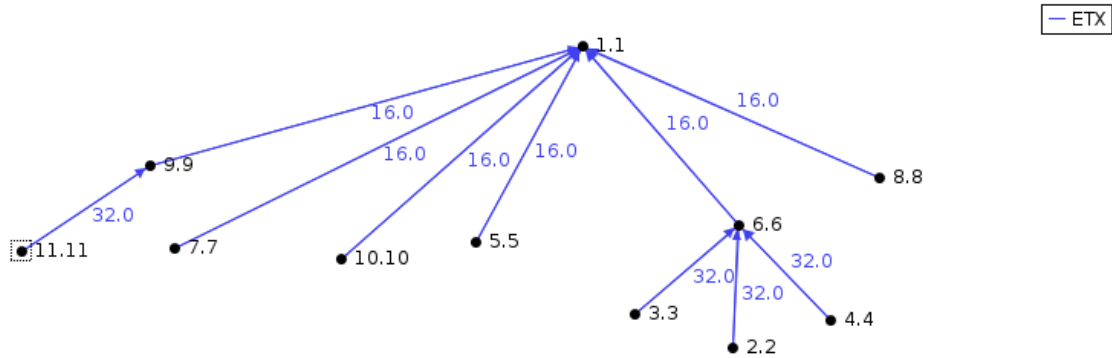


Figura 11 – *Network graph* da rede cenário 2. Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.2 Cenário 2

Parâmetros	Cenário 1
Wireless channel	Unit Disk Graph Medium: Distance Loss
Ranges ratio TX/RX	80%/85%
Mac Layer	802.15.4
Transmission range	50m
Mote type	Sky mote
Number of motes	21
Sink nodes	1
Sender Nodes	20
Simulation Time	1h

Tabela 2 – Parâmetros de simulação cenário 1

No cenário 2, a quantidade de nodos *senders* da rede aumentou 2x (duas vezes) afim de observar como a rede se comporta quando mais sensores são adicionados a ela. A Tabela 2 apresenta os parâmetros que foram utilizados, enquanto a 12 apresenta a topologia para este conjunto de parâmetros.



Figura 12 – Topologia da rede cenário 2. Fonte: Próprio Autor

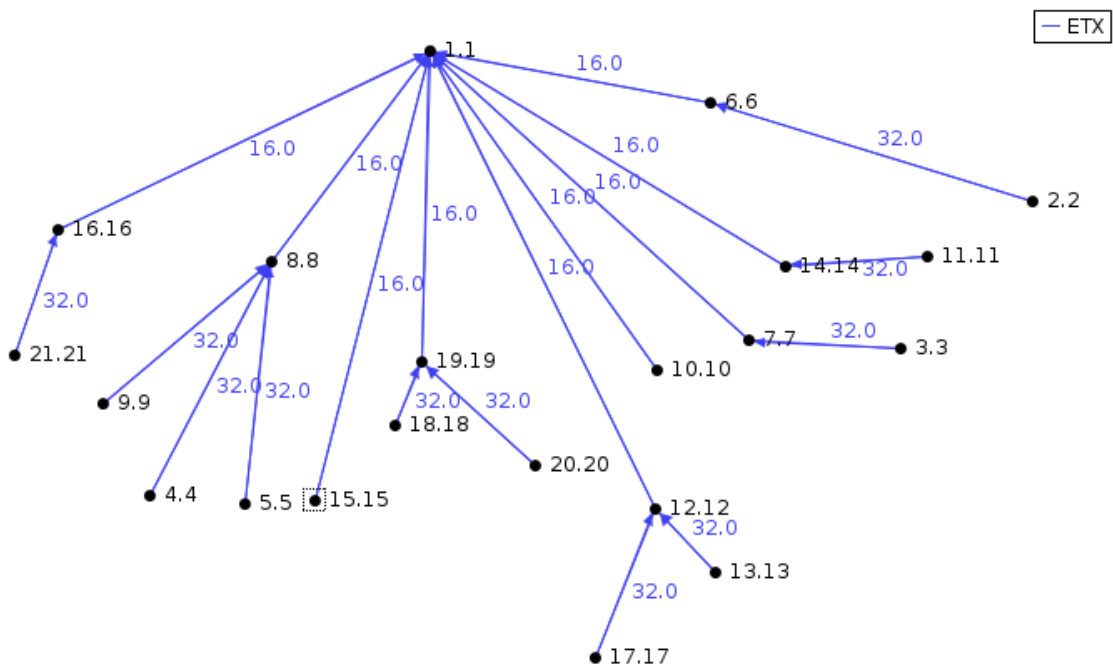


Figura 13 – Network graph da rede cenário 2. Fonte: Próprio Autor

Com a adição de novos nodos na rede e a partir da construção da sua árvore de roteamento (Figura 13) é possível visualizar que os nodos mais periféricos da rede possuem um valor ETX maior devido a necessidade deste nodos fazer um maior número de transmissões de pacotes para chegar até a raiz (fonte) da rede.



### 4.2.3 Cenário 3

Parâmetros	Cenário 1
Wireless channel	Unit Disk Graph Medium: Distance Loss
Ranges ratio TX/RX	80%/85%
Mac Layer	802.15.4
Transmission range	50m
Mote type	Sky mote
Number of motes	44
Sink nodes	4
Sender Nodes	40
Simulation Time	15m

Tabela 3 – Parâmetros de simulação cenário 3.

Na configuração do cenário 3 a densidade da rede é aumentada novamente (como pode ser observado pelos dados apontados pela Tabela 3, porém desta vez junto ao aumento dos nós *senders* da rede, é possível verificar a adição de nós fonte (*sink*) à rede (Figura 14).



Figura 14 – Topologia da rede cenário 3. Fonte: Próprio Autor

Como a árvore de roteamento da rede é dada na perspectiva do coordenador da rede (*sink*), para o cenário 3 existem 4 diferentes tipos de árvore de roteamento. As Figuras 15 e 16 apresentam o *network graph* das fontes que possuem um maior número de nós filhos conectados a ela. O *network graph* das demais fontes encontram-se parte Anexos da seção 6.2.

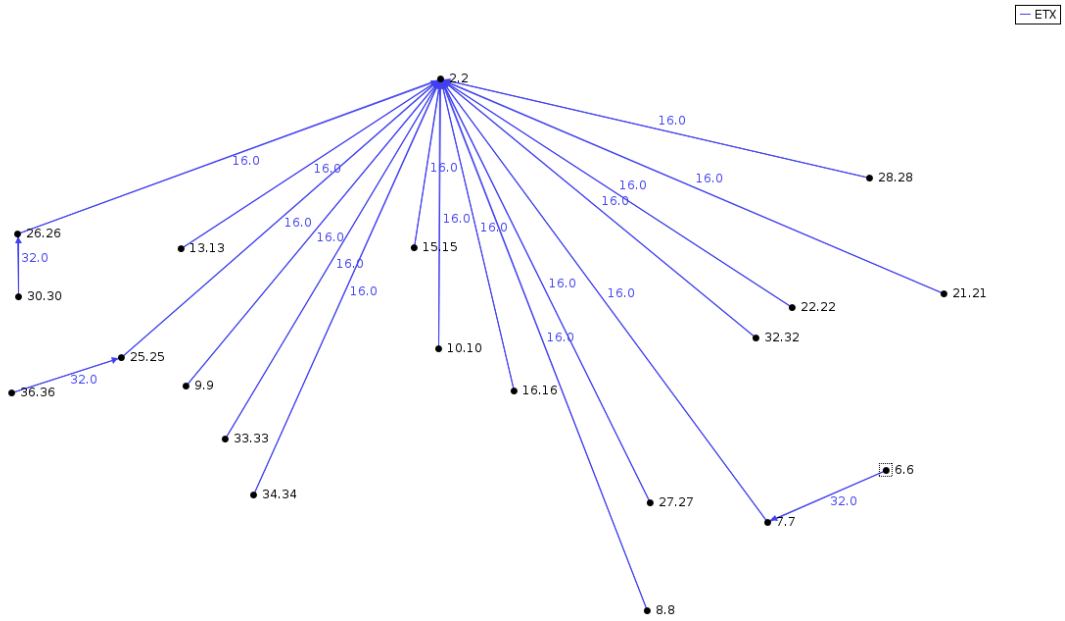


Figura 15 – *Network graph* da rede cenário 3 visão nodo (fonte) 2. Fonte: Próprio Autor

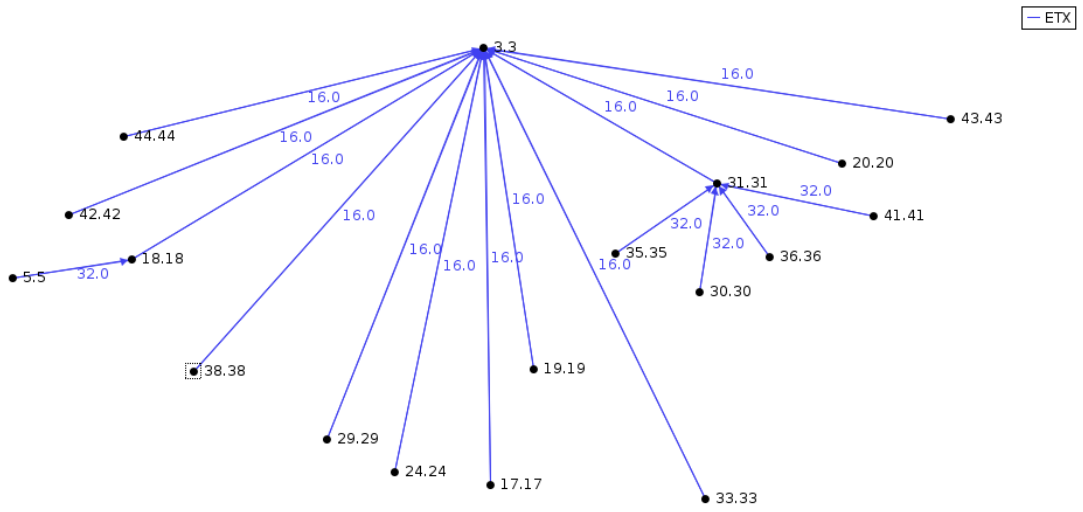


Figura 16 – *Network graph* da rede cenário 3 visão nodo (fonte) 3. Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.4 Cenário 4

Parâmetros	Cenário 1
Wireless channel	Unit Disk Graph Medium: Distance Loss
Ranges ratio TX/RX	80%/85%
Mac Layer	802.15.4
Transmission range	50m
Mote type	Sky mote
Number of motes	52
Sink nodes	2
Sender Nodes	50
Simulation Time	15m

Tabela 4 – Parâmetros de simulação cenário 4.

Para o cenário 4 a configuração da rede muda novamente. Os parâmetros que foram utilizados podem ser conferidos a partir da Tabela 4. São adicionados mais 10 nós *senders* a rede e a quantidade de nós fonte é reduzida de 4 para 2, se comparado ao cenário 3, o intuito dessa modificação é verificar como a rede se comporta com a sobrecarga de mensagens que transitam nela. Assim a topologia da rede 4 é representada pela Figura 17 :



Figura 17 – Topologia da rede cenário 4. Fonte: Próprio Autor

A partir da simulação do cenário 4 é possível observar que o *network graph* da fonte 1 e 2 (Figuras 18 e 19) da rede é muito mais denso se comparado aos outros cenários apresentados, especialmente do ponto de vista da fonte 2. Isso se dá devido ao fato de que uma maior quantidade de nodos está conectada diretamente a estas fontes.

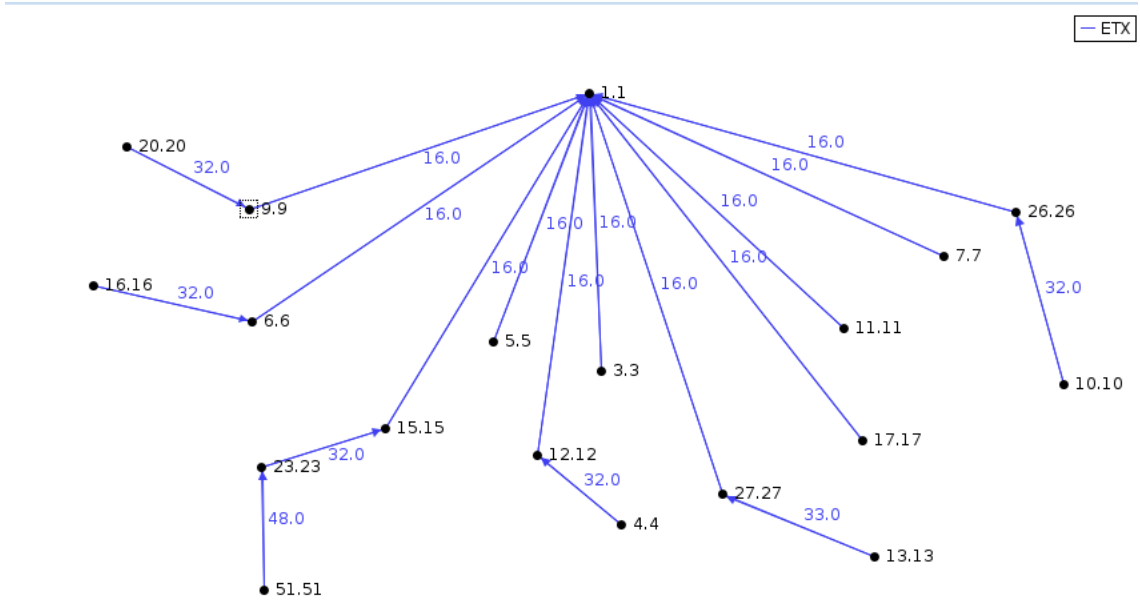


Figura 18 – *Network graph* da rede cenário 4 visão nodo (fonte) 1. Fonte: Próprio Autor

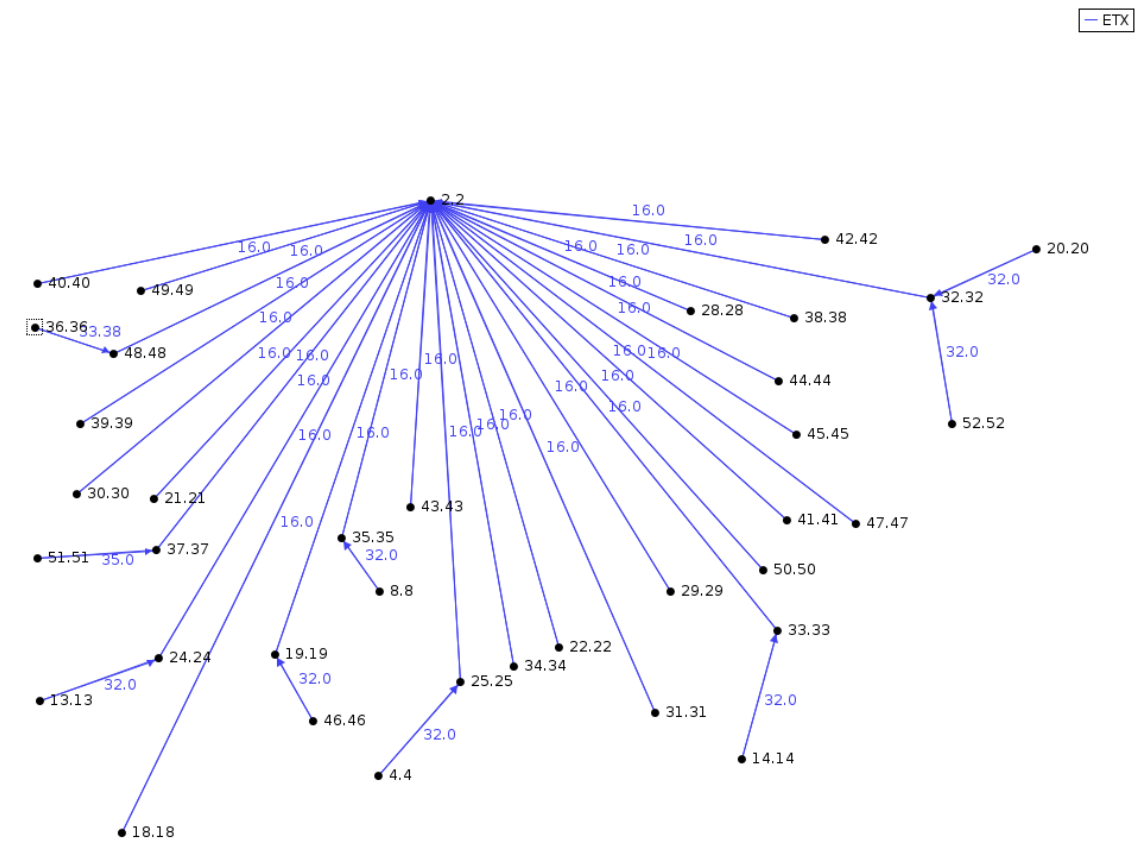


Figura 19 – *Network graph* da rede cenário 4 visão nodo (fonte) 2. Fonte: Próprio Autor

## 5 Resultados e Discussões

Os resultados obtidos a partir das simulações são considerados com a função objetivo do RPL sendo MRHOF (*Minimum Rank with Hysteris Objective Fucntion*), onde é possível sua identificação via Wireshark na figura 20. Uma vez que, simulações realizadas no simulador Cooja mostram que MRHOF tem melhor desempenho do que OF0 (*Objective Function Zero*) como função objetivo. Nesta configuração as mensagens de controle são enviadas periodicamente em vez de continuamente, o que ajuda no uso eficiente de energia (JADHAO; SOLAPURE, 2018).

28541	723.644000	fe80::212:740e:e:e0e	ff02::1a	ICMPv6	97 RPL Control (DODAG Information Object)
28542	723.663000	fe80::212:740e:e:e0e	ff02::1a	ICMPv6	97 RPL Control (DODAG Information Object)
28543	723.663000	fe80::212:740e:e:e0e	ff02::1a	ICMPv6	97 RPL Control (DODAG Information Object)
28544	723.702000	fe80::212:740e:e:e0e	ff02::1a	ICMPv6	97 RPL Control (DODAG Information Object)
28545	723.723000	fe80::212:740e:e:e0e	ff02::1a	ICMPv6	97 RPL Control (DODAG Information Object)
28546	723.980000	2002:db8::212:7419:19:1919	2002:db8::1	UDP	97 Source port: 8775 Destination port: ggz
28547	724.000000	2002:db8::212:7419:19:1919	2002:db8::1	UDP	97 Source port: 8775 Destination port: ggz
28548	724.020000			IEEE 802.15.4	5 Ack

```

Destination Advertisement Trigger Sequence Number (DTSN): 246
Flags: 0x00
Reserved: 00
DODAGID: aaaa::1 (aaaa::1)
▼ ICMPv6 RPL Option (DODAG configuration)
  Type: DODAG configuration (4)
  Length: 14
  ▶ Flag
    DIOIntervalDoublings: 8
    DIOIntervalMin: 12
    DIORedundancyConstant: 10
    MaxRankInc: 1792
    MinHopRankInc: 256
    OCP (Objective Code Point): 1
    Reserved: 0
    Default Lifetime: 255
    Lifetime Unit: 65535
  ▼ ICMPv6 RPL Option (Prefix Information aaaa::/64)
    Type: Prefix Information (8)
    Length: 20
  
```

Figura 20 – Análise via Wireshark da Função Objetivo de um pacote RPL do cenário 3.  
Fonte: Próprio Autor

Para a avaliação dos cenários propostos em 4.1 foi considerado os seguintes resultados pós-simulação: *Duty Cycle* ou Ciclo de Trabalho, que indica o percentual de quanto tempo aquele nodo ficou ligado (funcionando), *Average Power Consumption* ou Consumo Médio de Energia, dado em mW (miliwatts) apresenta o consumo total de energia de cada nodo na simulação, *Recieved Packets* ou Pacotes Recebidos, métrica que exhibe quantos pacotes cada nodo recebeu e por fim *Network Hops* ou Saltos na Rede, que avalia a quantidade de saltos que um nodo teve que realizar para comunicar-se com a fonte.

As figuras 21, 22, 23 e 24 apresentam os resultados obtidos através da simulação para o cenário 1.

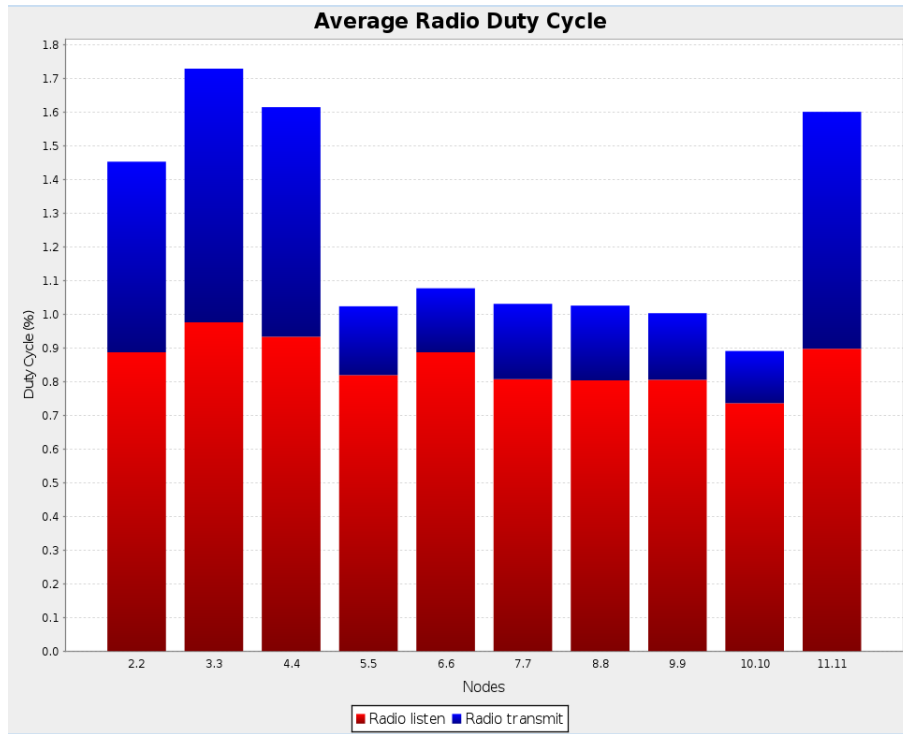


Figura 21 – *Duty Cycle* cenário 1. Fonte: Próprio Autor

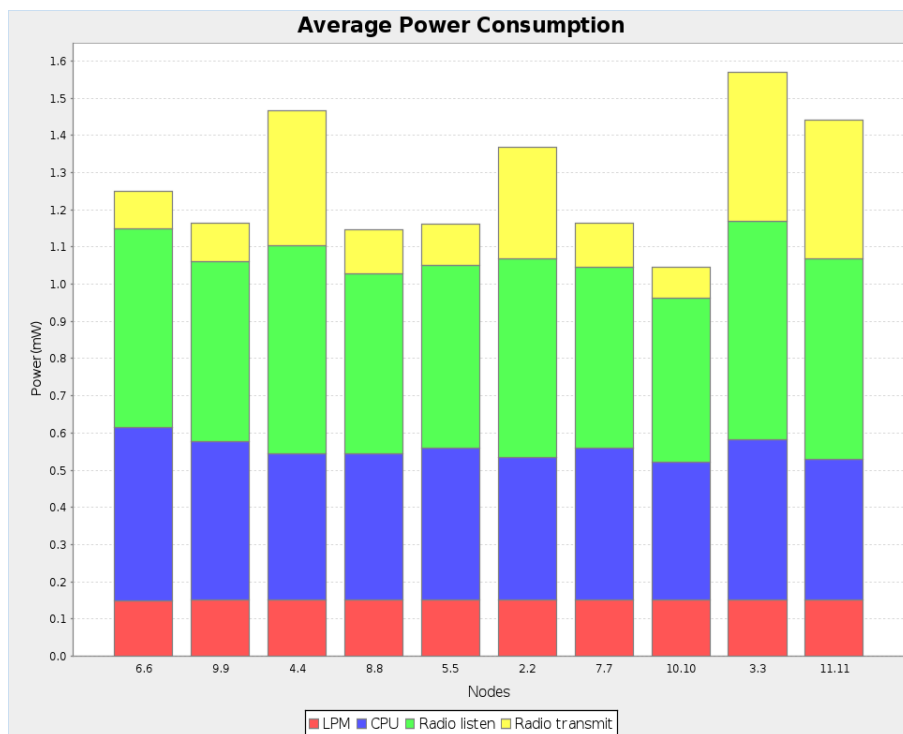


Figura 22 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 1. Fonte: Próprio Autor

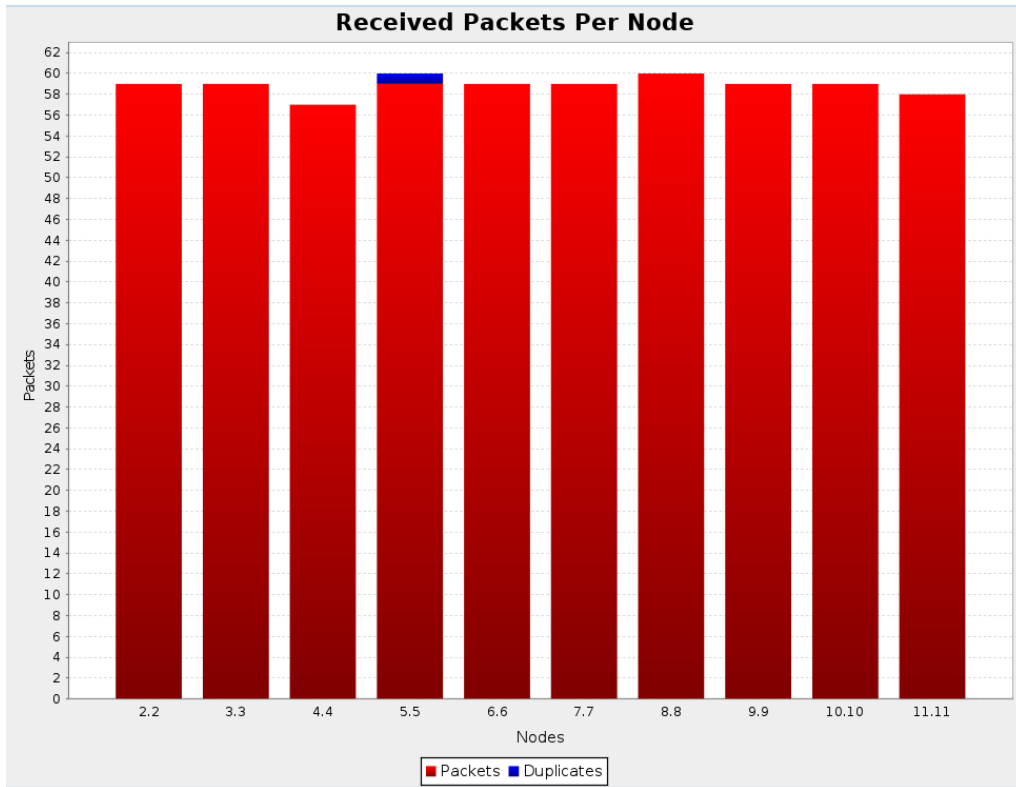


Figura 23 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo cenário 1. Fonte: Próprio Autor

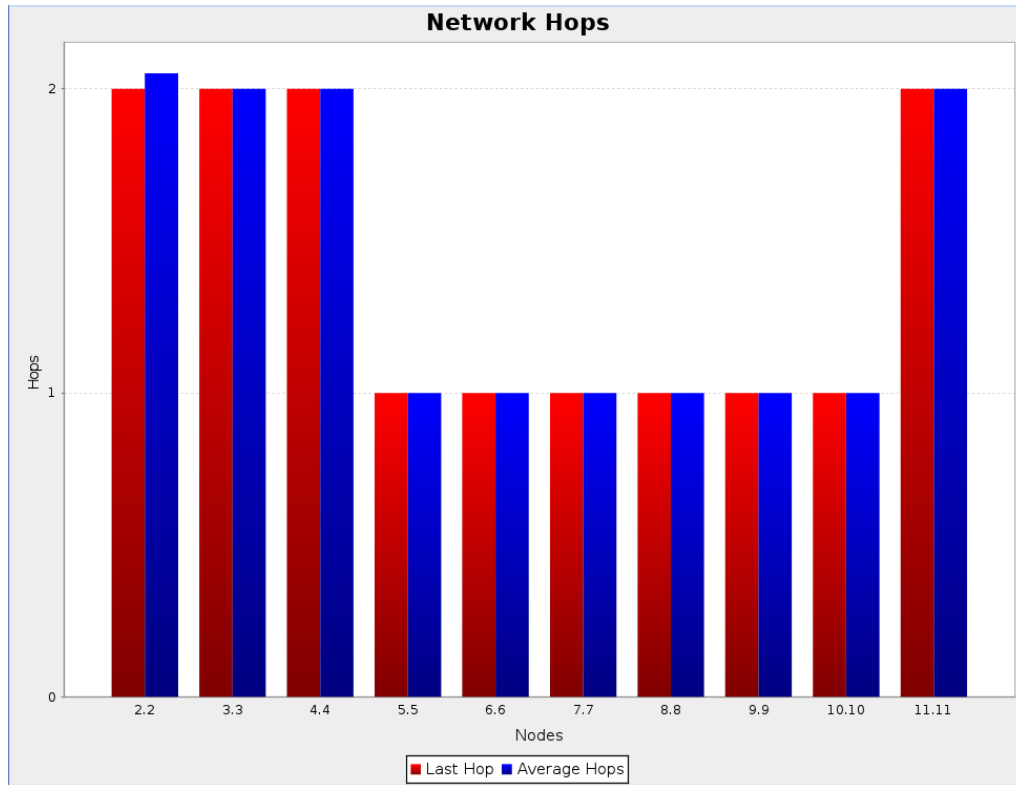


Figura 24 – Número de *hops* de cada nodo cenário 1. Fonte: Próprio Autor

A partir dos resultados obtidos para o cenário 1 observa-se que o *Duty Cycle* (Figura 21) possui valores baixos, confirmando assim a particularidade da tecnologia, uma vez que a redução do tempo de funcionamento do sensor está diretamente ligada a quantidade de energia gasta pelo mesmo no sistema. Já a quantidade de pacotes (Figura 23) é relativamente baixa, para seu tempo de simulação (1 hora), devido ao fato que seu tempo de funcionamento também é curto. O último gráfico (Figura 24) indica que o valor do *Network Hops* está diretamente ligado a forma como os nodos estão dispostos na rede, onde os nodos marginais que não possuem uma conexão direta com a fonte são os que apresentam um maior número de saltos e conseqüentemente um maior valor no ETX.

Uma vez que o cenário 2 apresenta o dobro da quantidade de nodos *senders* presentes no cenário 1, observa-se o funcionamento da rede conforme os resultados abaixo:



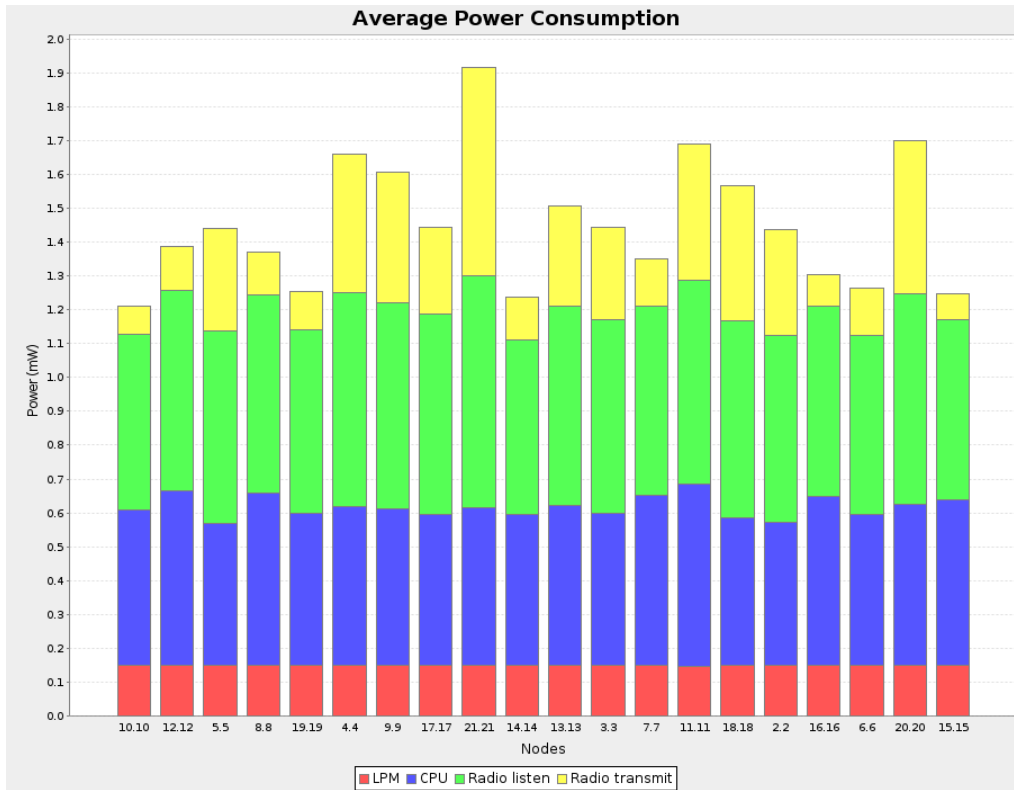


Figura 25 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 2. Fonte: Próprio Autor

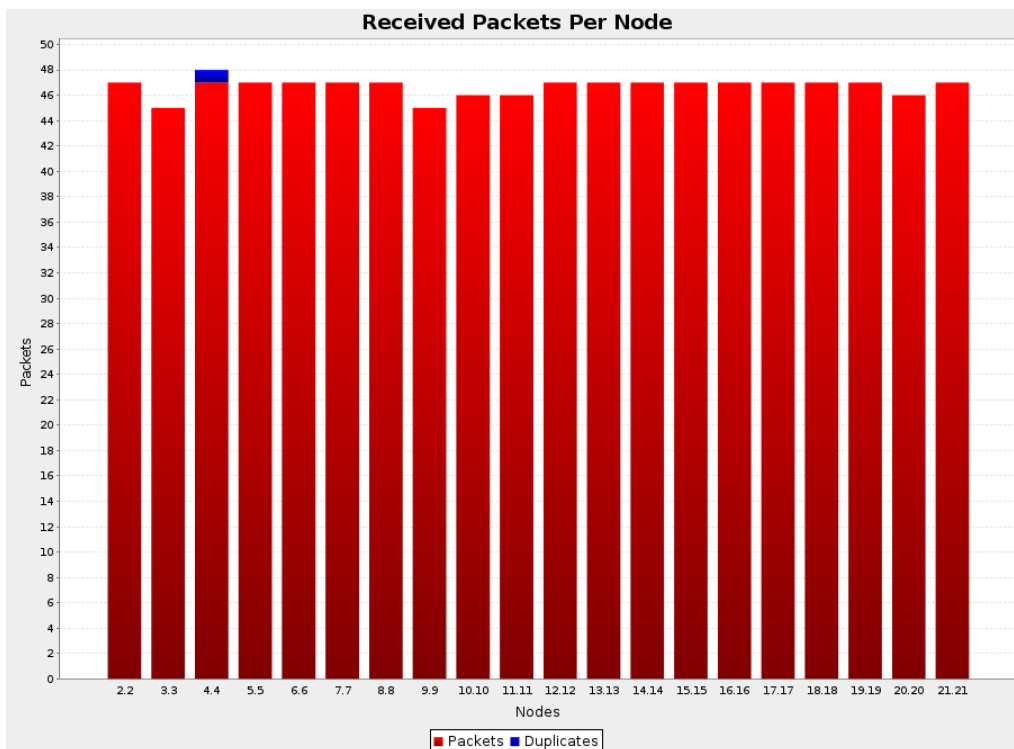


Figura 26 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo cenário 2. Fonte: Próprio Autor

Independente do aumento da quantidade de nodos na rede do cenário 2 em relação ao cenário 1 é possível identificar que os valores presentes nos resultados, para o cenário 2, são praticamente os mesmos. No *Average Power Consumption* (Figura 25), por exemplo, pode-se verificar que apesar da quantidade de nodos ser 2x (duas vezes) maior que do cenário anterior o valor máximo atingido foi 1.9 *mW* no nodo 21. Se comparado o valor deste nodo com o valor do nodo mais energético do cenário 1 é identificado um aumento de 18,75% no consumo. Já o valor médio do ganho em porcentagem do consumo de energia da rede do cenário 2 se comparado ao cenário 1 é dado em por:

$$Gp(\%) = \frac{\sum Pf - \sum Po}{\sum Po} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde  $Gp$  é o ganho de energia em porcentagem que o cenário  $f$  tem em relação ao cenário  $o$ ,  $Pf$  representa o consumo de energia de todos os nodos do cenário  $f$  e  $Po$  é o consumo de energia de todos os nodos do cenário  $o$ . Assim, o consumo médio da rede como um todo teve um ganho de 13,7% no cenário 2 em relação ao cenário 1. Como o consumo é dado em *mW*, em um sistema real esse ganho é desprezível. De forma geral todos os parâmetros tiveram um aumento, mesmo esses sendo na maioria das vezes irrisório. O parâmetro *Packets Received* (Figura 26) foi a única métrica que não obteve um aumento se comparado de forma isolada, do ponto de vista do nodo. Entretanto, como a densidade da rede é maior consequentemente a quantidade de pacotes da rede como um todo é superior a apresentada no cenário 1.

Análogo ao cenário 2, para análise do cenário 3 a quantidade de nodos *senders* da rede é 2x (duas vezes) maior que o cenário anterior, porém nesta etapa, a quantidade de nodos *sink* (fonte) é aumentada para de 2 para 4, afim de observar o comportamento do cenário de forma escalável principalmente pela visão dos nodos fontes.

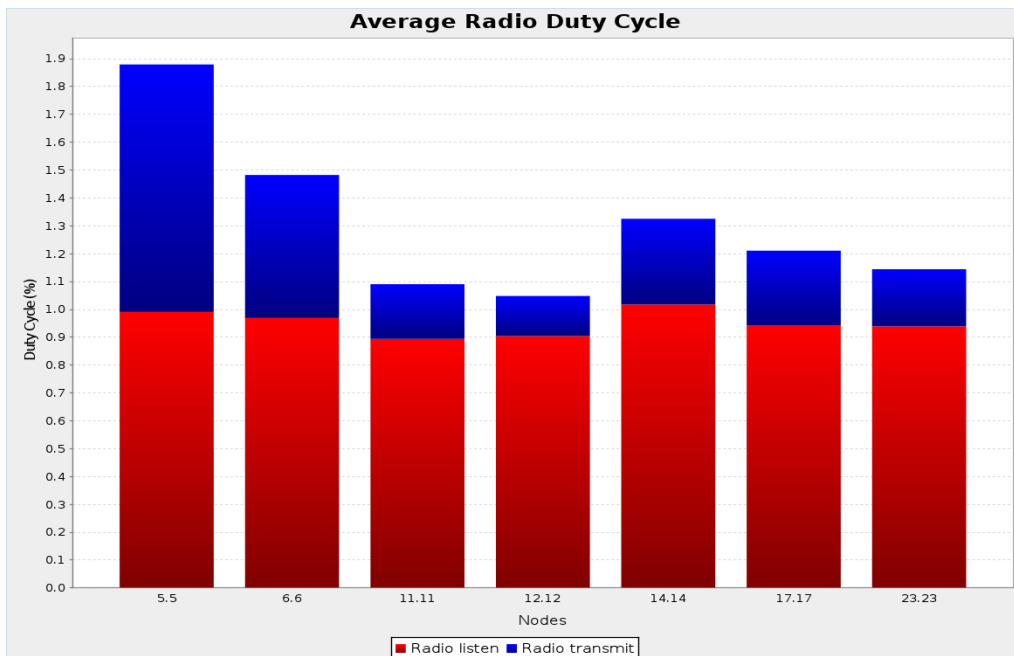


Figura 27 – *Duty Cycle* cenário 3 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

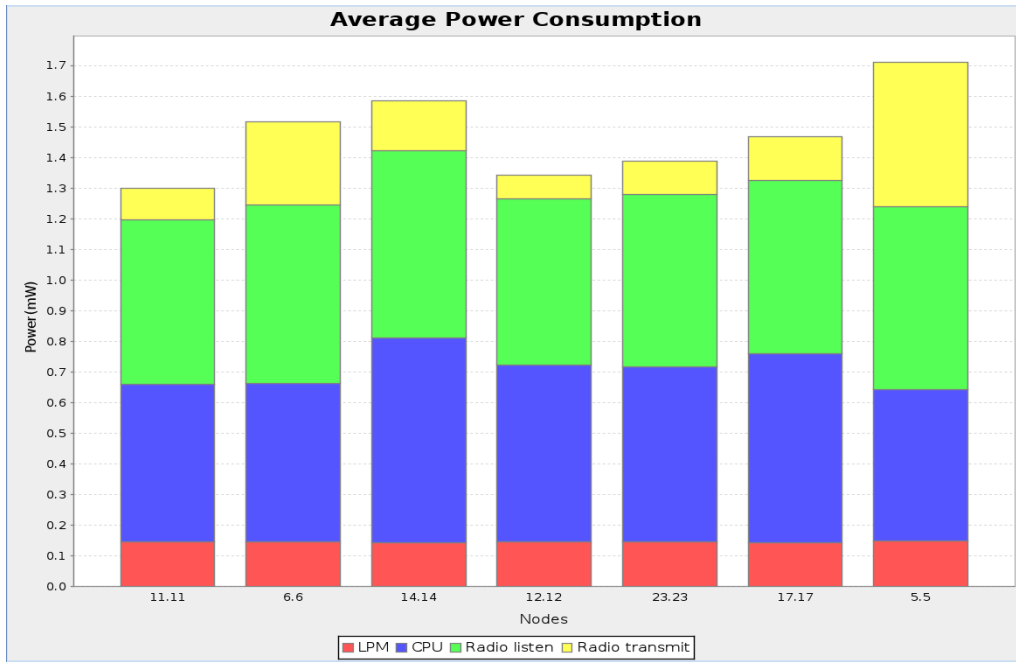


Figura 28 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 3 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

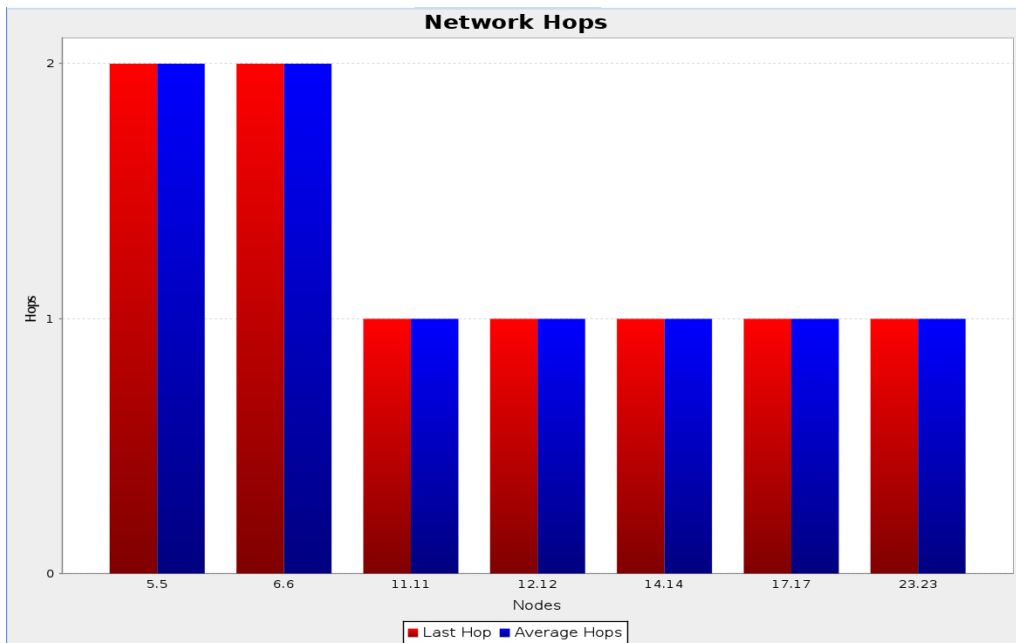


Figura 29 – Número de hops de cada nodo cenário 3 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

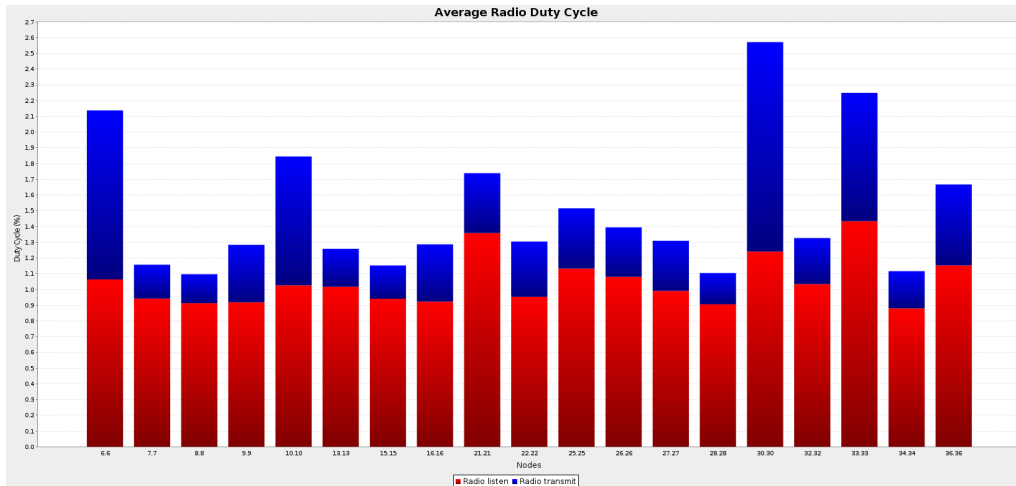


Figura 30 – *Duty Cycle* cenário 3 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor

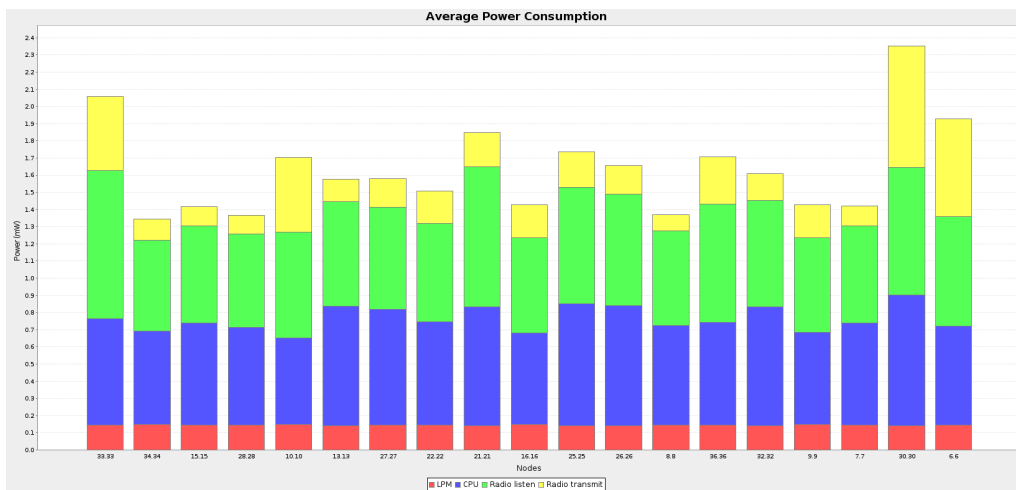


Figura 31 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 3 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor

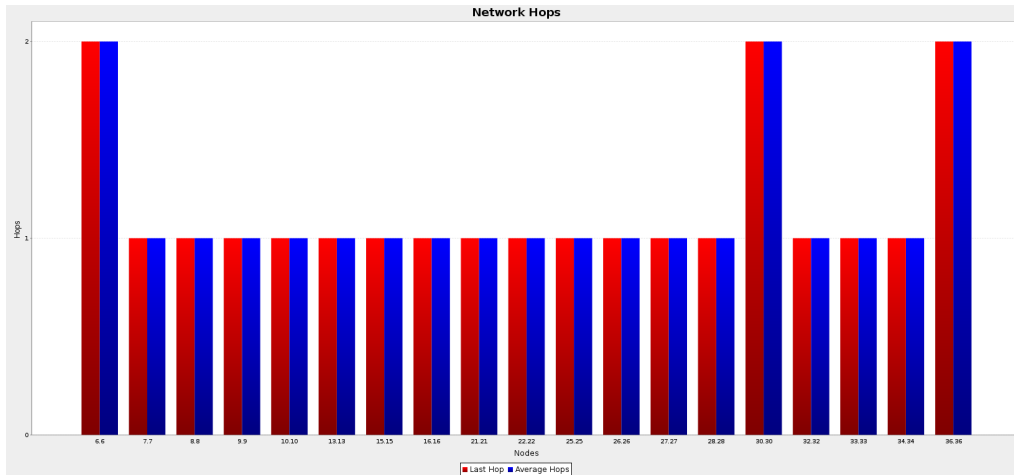


Figura 32 – Número de *hops* de cada nodo cenário 3 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor

É possível identificar a partir dos resultados obtidos, resultados das fontes 3 e 4 encontram-se na parte Anexos da seção 6.2, que a adição de mais fontes a uma rede 6LowPAN/RPL não significa que necessariamente o consumo de energia, o *duty cycle*, a quantidade de saltos (*hops*) e a quantidade de pacotes recebidos irão diminuir. A performance dos nodos fonte da rede está diretamente ligada com o *network graph*, ou árvore de roteamento, um vez que as fontes que possuem mais iteração com os nodos filhos da rede (nodos *senders*) são conseqüentemente as que geram um maior gasto energético e possuem um maior *duty cycle*. No cenário 3 as fontes 2 e 3 são aquelas que abrangem uma maior quantidade de nodos conectados diretamente a elas, via *network graph*, portanto, sendo assim as que mais ocupam processamento na rede. É importante pontuar que quanto maior a rede 6LowPAN/RPL for, e quanto maior for o número de nodos que estiverem no alcance da radio frequência de outros nodos da mesma rede, mais intenso será o tráfego de mensagens gerada pelo algoritmo RPL, implicando assim em um maior fluxo de dados nessa rede. Esse tráfego acentuado é característico do algoritmo uma vez que o mesmo possui uma alta adaptabilidade da rede devido a sua auto configuração e auto regeneração, permitindo assim que caso algum nodo perca conexão com a rede o mesmo seja capaz de se conectar novamente a ela.

Como descrito na seção anterior, para o cenário 4 a quantidade de fontes foi diminuída de 4 para 2 unidades afim de observar o comportamento da rede quando a mesma possui poucos nodos fontes para bastante nodos *senders*.

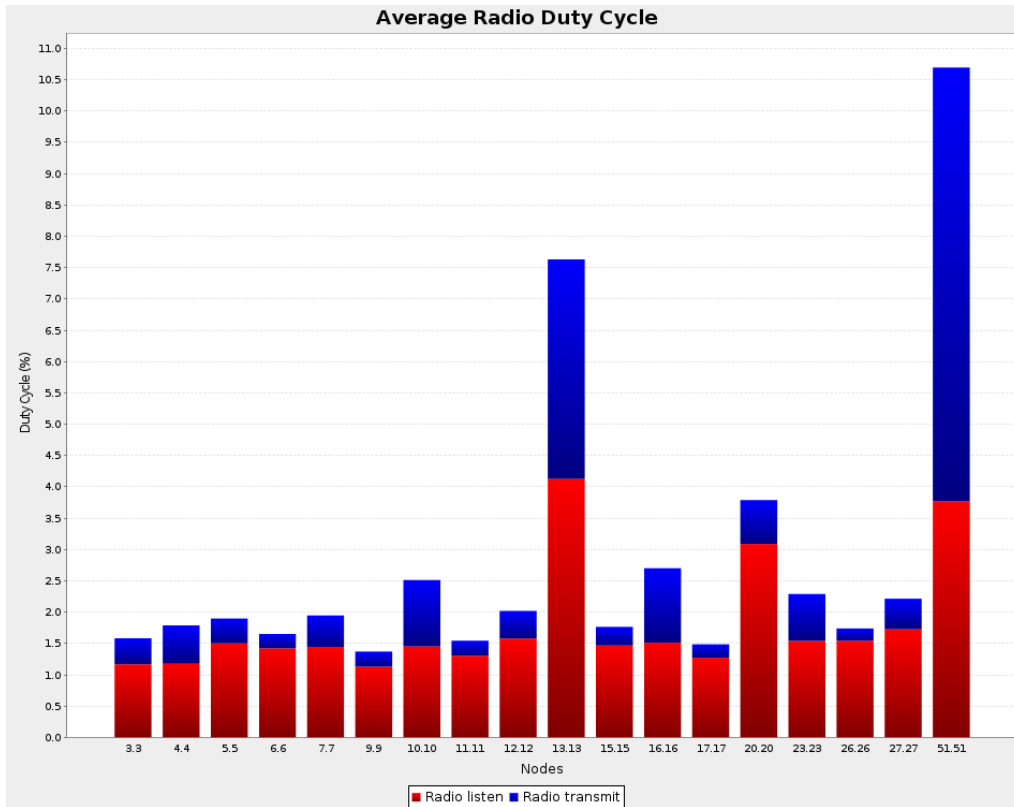


Figura 33 – *Duty Cycle* cenário 4 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

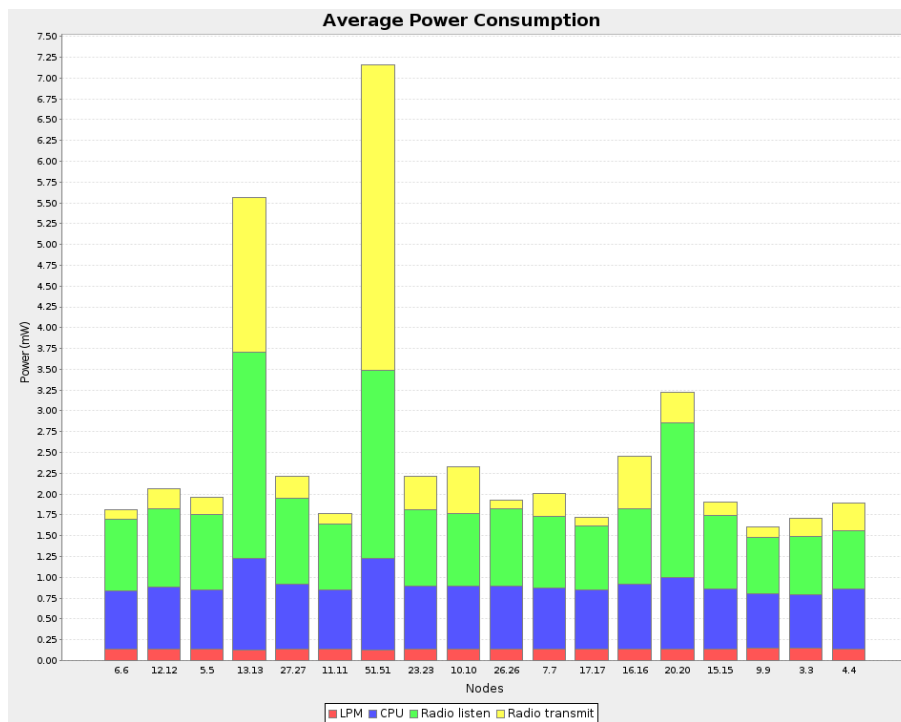


Figura 34 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 4 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

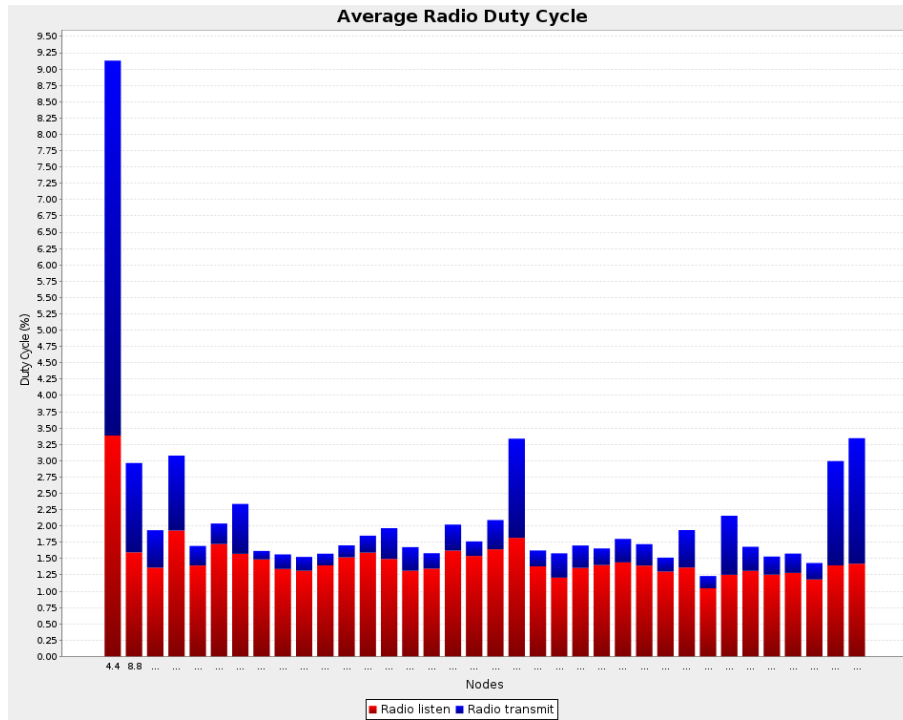


Figura 35 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 4 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor

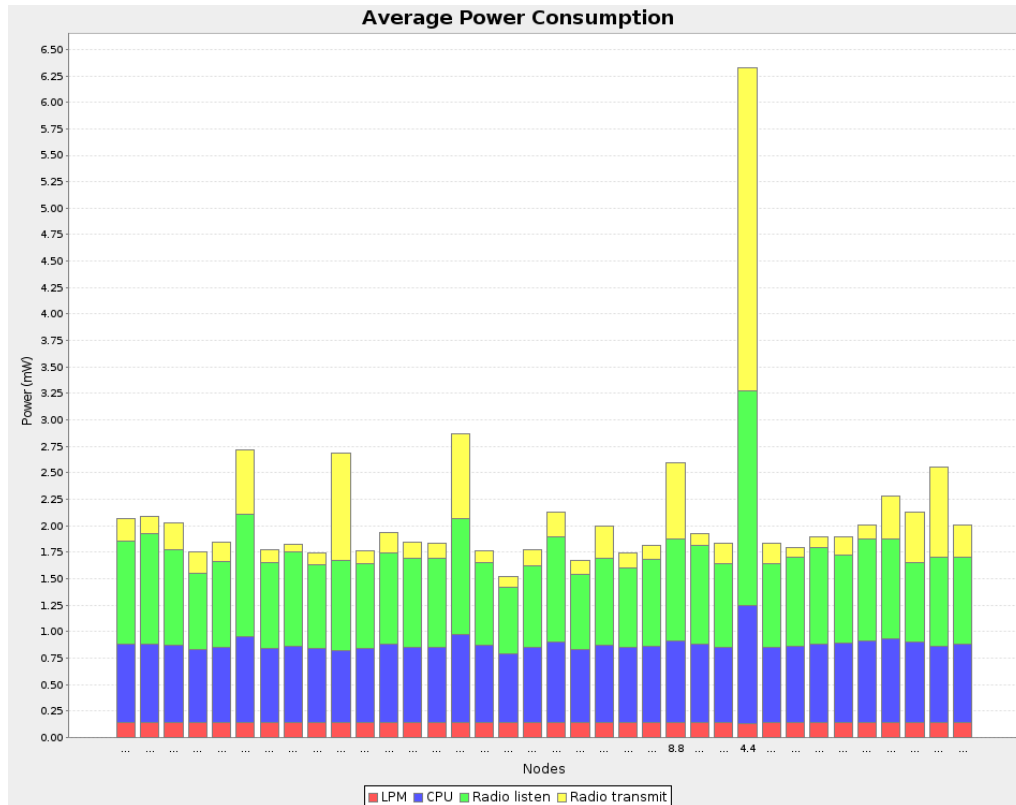


Figura 36 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 4 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor

Neste cenário devido a cada fonte possuir uma grande quantidade de nodos a serem geridos é comum observar a partir dos resultados que as métricas *duty cycle* (Figuras 33 e 35) e *average power* (Figuras 34 e 36) possuem valores discrepantes em alguns nós, fonte 1 nós 13 e 51 e fonte 2 nó 4. Essas discrepâncias se dão devido ao fato de que:

- Nó 51 (Fonte 1) : O nó 51 não está na cobertura da radio frequência da fonte 1, assim seu consumo de energia é elevado pois passa um maior tempo buscando conexão com a fonte 1.
- Nó 13 (Fonte 1) : O nó 13 está dentro da raio frequência da fonte porém a limitação da tecnologia 802.15.4 não permite conexão direta com a mesma, uma vez que cada quadrado do *grid* da topologia do cenário representa uma distância de 10m.
- Nó 4 (Fonte 2) : O nó 4, assim como o nodo 51 para a fonte 1, está fora da rádio frequência da fonte 2 elevando os valores de *duty cycle* e consumo de energia do nodo.

É perceptível também que estes nodos em questão passam um maior tempo transmitindo e recebendo mensagens se comparados aos outros nodos da rede.

Para analisar o consumo médio total de energia da rede é utilizado uma média aritmética de todos o nodos ligados as fontes do cenário 3 e 4. Em seguida é somado o valor médio de cada fonte presente em cada cenário. Ao encontrar o valor médio do consumo de energia de cada cenário e utilizando (1), tem-se que o cenário 4 gera uma redução



de energia de 27,3% se comparado ao cenário 3, o que demonstra que uma redução na quantidade de fontes implica diretamente na redução do consumo médio total da rede.

Durante o processo de simulações dos cenários propostos verificou-se que do ponto de vista do simulador (COOJA), a alta quantidade de radio mensagens geradas pelos nodos da rede não é saudável em redes muito grandes, pois o simulador possui uma memória finita e conforme a quantidade de nodos da rede sobe essas mensagens crescem exponencialmente implicando assim na interrupção da simulação devido a falta de memória. Por este fato ao simular redes grandes é necessário ajustar o tempo de simulação para que não esgote o recurso físico do simulador. Na simulação do cenário 3 e 4 foi tomado um limite de tempo de aproximadamente 15 minutos de simulação afim de evitar este fenômeno.

## 6 Considerações Finais

### 6.1 Conclusão

Com este trabalho foi possível compreender por que a tecnologia 6LowPAN/RPL pode ser uma forte aliada do *healthcare*, bem como quais são suas principais características e como se dá seu funcionamento em um possível cenário de hospitalar com multi sensores para gerenciamento de sinais fisiológicos de seus pacientes. As diferentes simulações dos cenários propostos, onde buscou-se analisar quais os impactos das diferentes configurações que essa rede de sensores poderiam apresentar, trouxe um conjunto de resultados satisfatórios onde os mesmos devem ser levados em consideração para futuras implementações em cenários reais.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstraram que uma rede de sensores sem fio que utiliza a tecnologia 6LowPAN/RPL possui um gasto energético muito reduzido, tornando esta tecnologia uma forte aliada para o problema do gasto excessivo de energia elétrica das instituições hospitalares, sendo possível empregar esta tecnologia em sensores que são alimentados por baterias. Isso se dá devido ao fato de que o tempo de funcionamento do nodo na rede é baixo (*duty cycle*) e o principal parâmetro responsável por esse desempenho é a escolha da função objetivo do algoritmo RPL.

Durante a execução dos cenários foi possível observar que conforme a topologia da rede muda, seu gasto energético e as demais métricas analisadas sofrem alterações. Destaca-se então a organização da rede como sendo o principal fator que deve ser levado em consideração ao implementar o 6LowPAN/RPL. Nós da rede que possuem um valor ETX maior tem consequentemente uma quantidade de *hops* (saltos) maior, elevando assim a métrica *duty cycle* pois o nodo necessita transmitir um volume maior de mensagens até chegar no coordenador da rede. Os nós que possuem um valor ETX elevado geralmente são os nós mais periféricos da rede, ou seja, aqueles nós que não estão dentro da radio frequência da fonte ou ainda, aqueles que estão na cobertura da fonte porém devido a limitação da tecnologia de comunicação do 802.15.4 não conseguem comunicar-se diretamente com o coordenador da rede por estarem muito próximo, necessitando assim uma comunicação entre seus vizinhos para encontrar o caminho até a fonte.

Devido a alta adaptabilidade do sistema e sua auto configuração, a partir do *network graph* dos cenários, foi possível identificar que todos os nodos da rede possuem um caminho até a fonte. Isso se deu pois o algoritmo RPL além de trazer essa característica para o sistema consegue ainda traçar a melhor rota de comunicação entre os nodos pertencentes a rede, evitando assim um maior consumo de recurso do sistema como um todo. O RPL

provou-se um algoritmo robusto altamente indicado para redes IoT de sensores sem fio de baixa potência.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de experimentos reais em um ambiente hospitalar ou unidade de saúde. Não foi possível obter dados de experimentos reais para complementar o estudo devido o atual cenário de pandemia. Além disso, seriam necessárias as aquisições de *motes* para implementação física destas redes. Uma vez que a simulação representa um cenário ideal, alguns parâmetros da rede podem sofrer alteração em um cenário real, como por exemplo a taxa de envio das mensagens de comunicação e recepção da rede pois estas dependem especificamente do ambiente que o sistema será instalado.

Outras questões precisam ser melhor investigadas tais como a latência e a frequência com que as mensagens são enviadas e recebidas. Estes parâmetros são cruciais para tomadas de decisões sensíveis ao tempo. E deverão ser analisadas com a inclusão de uma camada intermediária que poderia ser a implementação do protocolo COAP no simulador. Ou seja, o tempo gasto pelas transmissões é um fator importante na tomada de decisões na área de cuidados da saúde e deverão tratados em um estudo futuro.

Por se tratar de uma rede de sensores para IoT é comum que os dispositivos presentes nessa rede possuam pouca capacidade de processamento, não garantindo assim a integridade dos dados dos pacientes uma vez que não é possível utilizar algoritmos de criptografia complexos. Portanto, outro ponto a ser investigado é a segurança e a privacidade dos dados.

## Referências

Adam Dunkels. *Contiki 2.6*. 2012. Disponível em: <<http://contiki.sourceforge.net/docs/2.6/>>.

ALEXANDER, R. et al. *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2012. RFC 6550. (Request for Comments, 6550). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6550.txt>>.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, Elsevier B.V., v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. ISSN 13891286. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>>.

BARTHEL, D. et al. *Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks*. RFC Editor, 2012. RFC 6551. (Request for Comments, 6551). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6551.txt>>.

Benoît Thébaudeau. *An Introduction to Cooja*. 2019. Disponível em: <<https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/An-Introduction-to-Cooja>>.

BRASIL, R. F. do. *DECRETO N° 9.854, DE 25 DE JUNHO DE 2019*. 2019. D.O.U. DE 26/06/2019, P. 10. Acessado em 12 de setembro de 2019. Publicado em: Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2019/decreto/d9854.html](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/d9854.html)>.

- CATARINUCCI, L. et al. An iot-aware architecture for smart healthcare systems. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 2, n. 6, p. 515–526, 2015.
- CONSÓRCIO, M. C. N. M. *MCTIC - Relatório Final de Estudos de IOT*. [S.l.], 2018.
- CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M. Overview of sensor networks. *Computer, IEEE*, v. 37, n. 8, p. 41–49, 2004. ISSN 00189162.
- GROUP, C. *The Contiki Operating System*. 2015. Disponível em: <<https://github.com/contiki-os/contiki>>.
- GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier B.V., v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. ISSN 0167739X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>>.
- HU, J.; WU, K.; LIANG, W. An IPv6-based framework for fog-assisted healthcare monitoring. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 11, n. 1, p. 1–13, 2019. ISSN 16878140.
- HUZOOREE, G.; KHEDO, K. K.; JOONAS, N. Pervasive mobile healthcare systems for chronic disease monitoring. *Health Informatics Journal*, v. 25, n. 2, p. 267–291, 2019. PMID: 28464728. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1460458217704250>>.
- IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, p. 1–320, 2006.
- IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN). *IEEE Std 802.15.4-2003*, p. 1–680, 2003.
- JADHAO, A. R.; SOLAPURE, S. S. Analysis of routing protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) using Cooja simulator. *Proceedings of the 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2017*, v. 2018-January, p. 2364–2368, 2018.
- JARA, A. J.; ZAMORA-IZQUIERDO, M. A.; SKARMETA, A. F. Interconnection framework for mHealth and remote monitoring based on the internet of things. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 31, n. 9, p. 47–65, 2013. ISSN 15580008.
- KAMGUEU, P. O.; NATAF, E.; NDIE, T. D. Survey on RPL enhancements: A focus on topology, security and mobility. *Computer Communications*, Elsevier, v. 120, n. July 2017, p. 10–21, 2018. ISSN 01403664. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.02.011>>.
- KANG, H. W.; KIM, C. M.; KOH, S. J. ISO/IEEE 11073-based healthcare services over iot platform using 6LoWPAN and BLE: Architecture and experimentation. *Proceedings - 2016 International Conference on Networking and Network Applications, NaNA 2016*, IEEE, p. 313–318, 2016.
- KEVIN, A. That ' Internet of Things ' Thing. *RFiD Journal*, p. 4986, 2010. ISSN 00280836.

- KUMAR, N. IoT architecture and system design for healthcare systems. *Proceedings of the 2017 International Conference On Smart Technology for Smart Nation, SmartTechCon 2017*, p. 1118–1123, 2018.
- LOUREIRO, A. A. F. et al. *Redes de Sensores Sem Fio*. p. 179–226, 2015.
- MA, X.; LUO, W. The analysis of 6LowPAN technology. *Proceedings - 2008 Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA 2008*, v. 1, n. 3, p. 963–966, 2008.
- MAINETTI, L.; PATRONO, L.; VILEI, A. Evolution of wireless sensor networks towards the Internet of Things: A survey. *2011 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2011*, IEEE, p. 16–21, 2011.
- MÁRCIO LUIZ FERREIRA MIGUEL. *ARQUITETURA SDN PARA REDES DE SENSORES SEM FIO 6LOWPAN*. Tese (Doutorado) — PUC-PR, 2018.
- MIETHKE-MORAIS, A. et al. Unraveling covid-19-related hospital costs: The impact of clinical and demographic conditions. *medRxiv*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2020. Disponível em: <<https://www.medrxiv.org/content/early/2020/12/30/2020.12.24.20248633>>.
- Minh Dang, L. et al. A survey on internet of things and cloud computing for healthcare. *Electronics (Switzerland)*, v. 8, n. 7, p. 1–49, 2019. ISSN 20799292.
- MONTENEGRO, G. et al. *Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks*. RFC Editor, 2007. RFC 4944. (Request for Comments, 4944). Disponível em: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc4944.txt>>.
- MORALES, A. S.; OURIQUE, F. d. O.; CAZELLA, S. C. A comprehensive review on the challenges for intelligent systems related with internet of things for medical decision. In: \_\_\_\_\_. *Enhanced Telemedicine and e-Health: Advanced IoT Enabled Soft Computing Framework*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 221–240. ISBN 978-3-030-70111-6. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-030-70111-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70111-6_11)>.
- MULLIGAN, G. The 6LoWPAN architecture. *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, EmNets 2007*, p. 78–82, 2007.
- NAIDU, G. A. et al. 6LoWPAN Border Router Implementation for IoT Devices on RaspberryPi. *SSRN Electronic Journal*, p. 316–323, 2018. ISSN 1556-5068.
- OLIVEIRA, L. M.; De Sousa, A. F.; RODRIGUES, J. J. Routing and mobility approaches in IPv6 over LoWPAN mesh networks. *International Journal of Communication Systems*, v. 24, n. 11, p. 1445–1466, 2011. ISSN 10745351.
- Patrícia Ellen. *Internet das coisas já é realidade, porém falta regulamentá-la*. 2016. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/br/our-insights/blog-made-in-brazil/internet-das-coisas-ja-e-realidade-porem-falta-regulamenta-la#>>.
- PONGLE, P.; CHAVAN, G. A survey: Attacks on RPL and 6LoWPAN in IoT. *2015 International Conference on Pervasive Computing: Advance Communication Technology and Application for Society, ICPC 2015*, IEEE, v. 00, n. c, p. 1–6, 2015.

PRAWIRA, A. J.; ABDUROHMAN, M.; PUTRADA, A. G. An Analysis on RPL Routing over IPv6 WSN Mobility and Transmission Range. *Proceeding - 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices, ISESD 2019*, IEEE, 2019.

QADRI, Y. A. et al. The future of healthcare internet of things: A survey of emerging technologies. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 22, n. 2, p. 1121–1167, 2020.

RAHMANI, A. M. et al. Exploiting smart e-health gateways at the edge of healthcare internet-of-things: A fog computing approach. *Future Generation Computer Systems*, v. 78, p. 641–658, 2018. ISSN 0167-739X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X17302121>>.

Raquel Vieira. *E-Noé, a tecnologia que alerta sobre o risco de enchentes*. 2019. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/e-noe-a-tecnologia-que-alerta-sobre-o-risco-de-enchentes/>>.

SUELL, M.; CASTRO, S.; LEÃO, E. M. Mapeamento Sistemático do Estado-da-Arte de Aplicações de Internet das Coisas (IoT) com foco em HealthCare. *Anais da Escola Regional de Computação Aplicada à Saúde (ERCAS)*, p. 241–246, 2019. Disponível em: <<https://easii.ufpi.br/theend/>>.

TABISH, R. et al. A 3G/WiFi-enabled 6LoWPAN-based U-healthcare system for ubiquitous real-time monitoring and data logging. *Middle East Conference on Biomedical Engineering, MECBME*, IEEE, p. 277–280, 2014. ISSN 21654255.

## ANEXOS - GRÁFICOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

— ETX

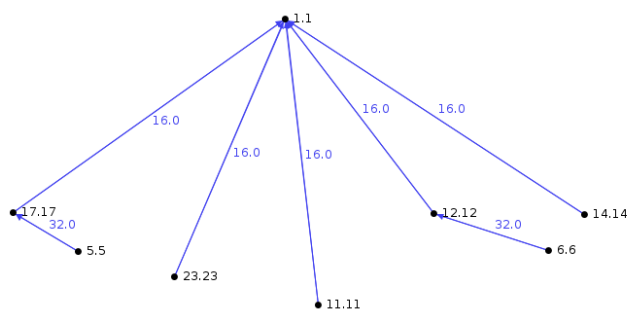


Figura 37 – *Network graph* da rede cenário 3 visão nodo (fonte) 1. Fonte: Próprio Autor

— ETX

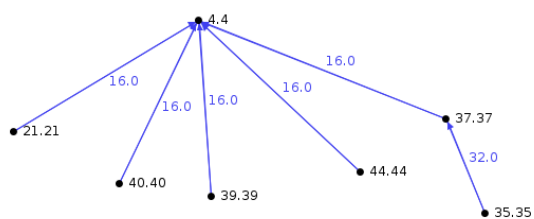


Figura 38 – *Network graph* da rede cenário 3 visão nodo (fonte) 4. Fonte: Próprio Autor

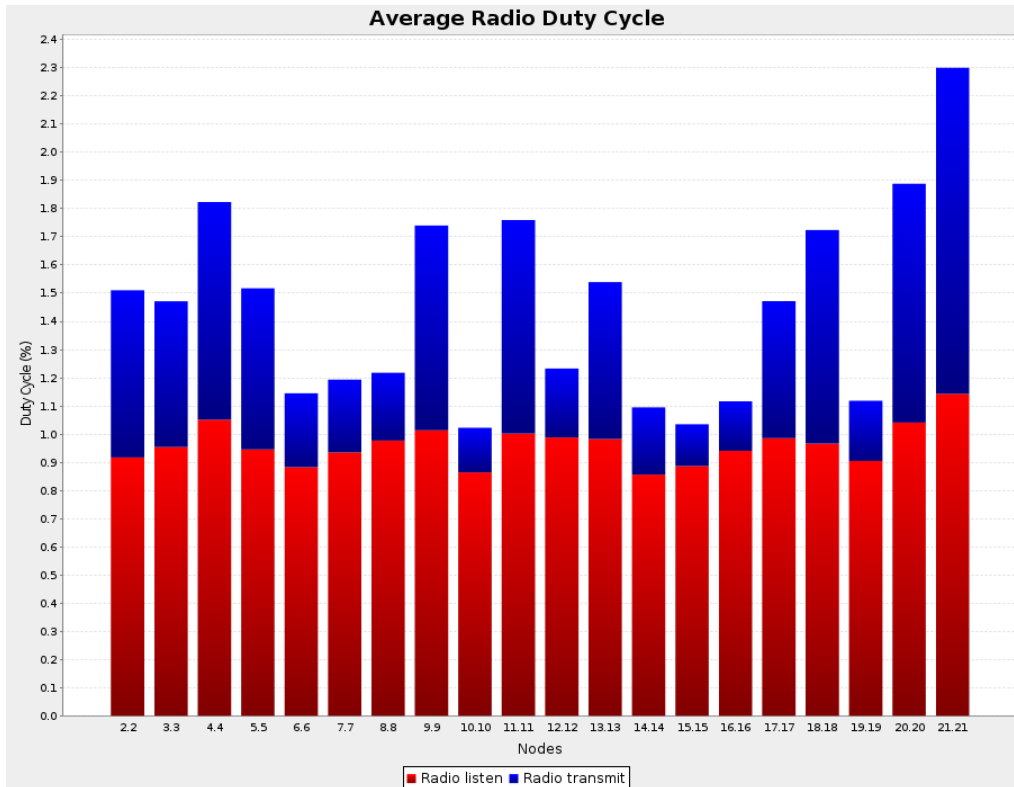


Figura 39 – *Duty Cycle* cenário 2. Fonte: Próprio Autor

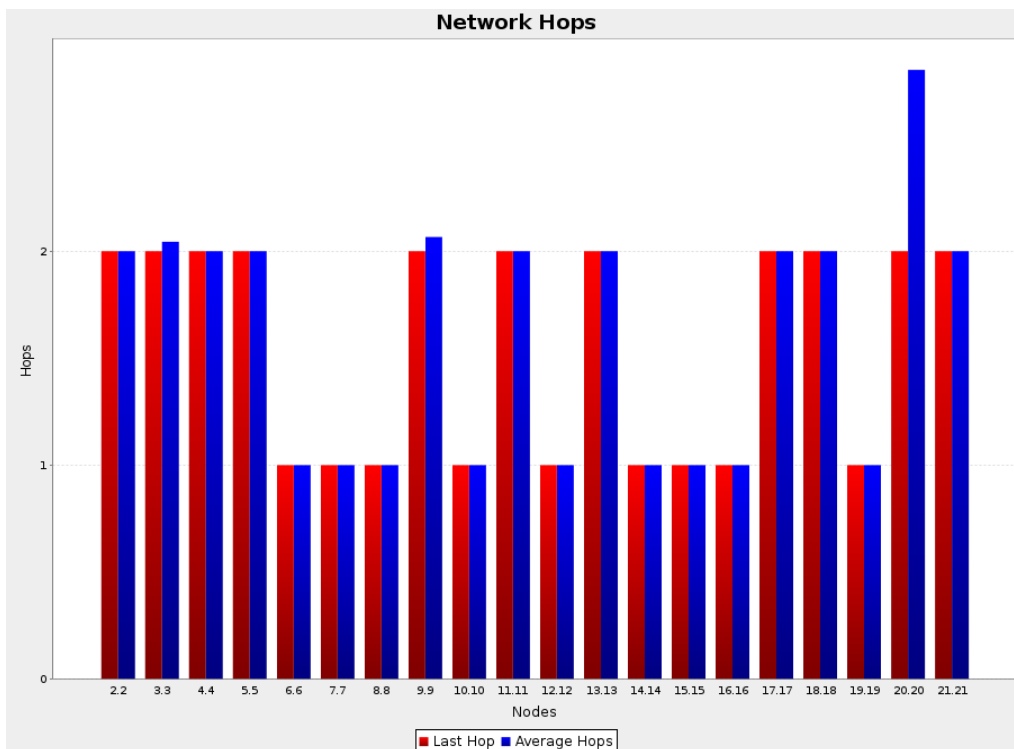


Figura 40 – Número de *hops* de cada nodo cenário 1. Fonte: Próprio Autor

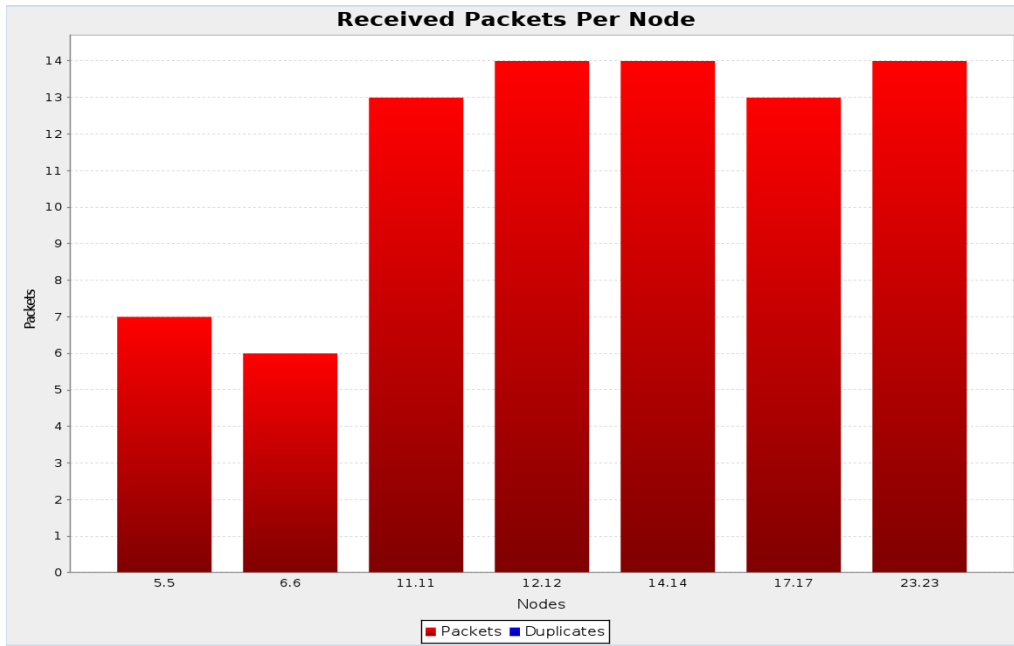


Figura 41 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo 3 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

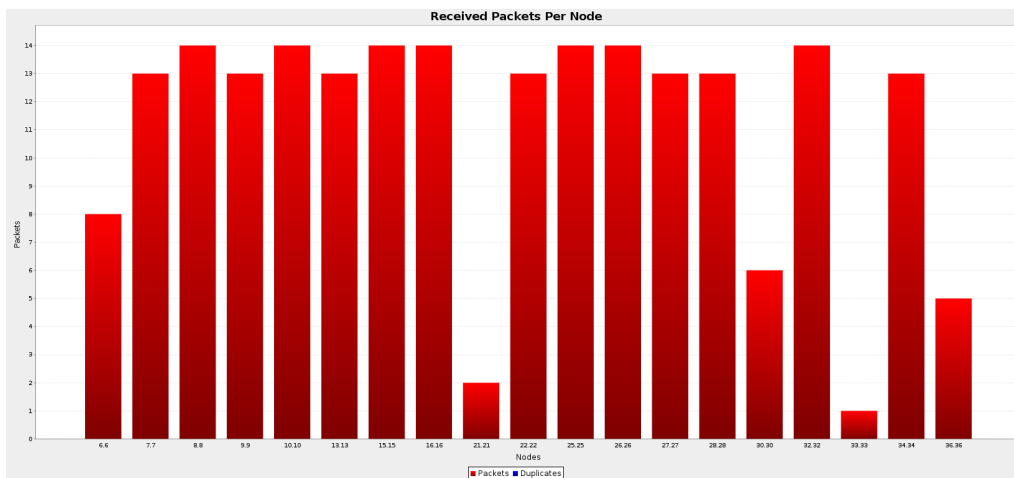


Figura 42 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo 3 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor



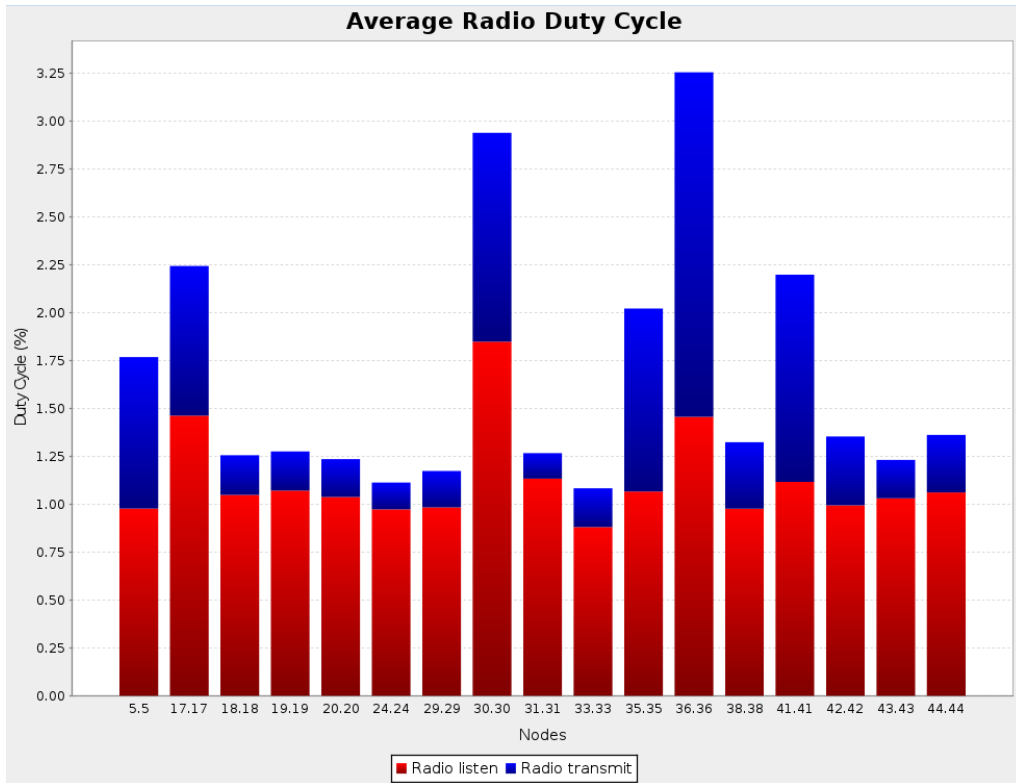


Figura 43 – *Duty Cycle* cenário 3 visão fonte 3. Fonte: Próprio Autor

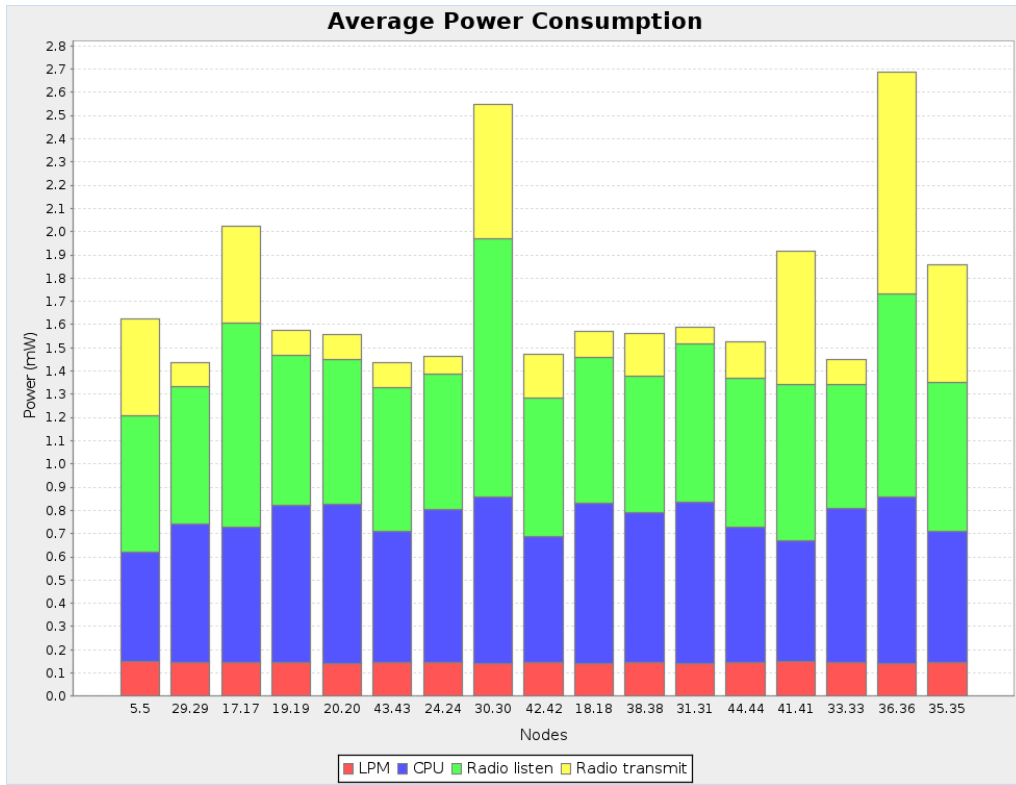


Figura 44 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 3 visão fonte 3. Fonte: Próprio Autor

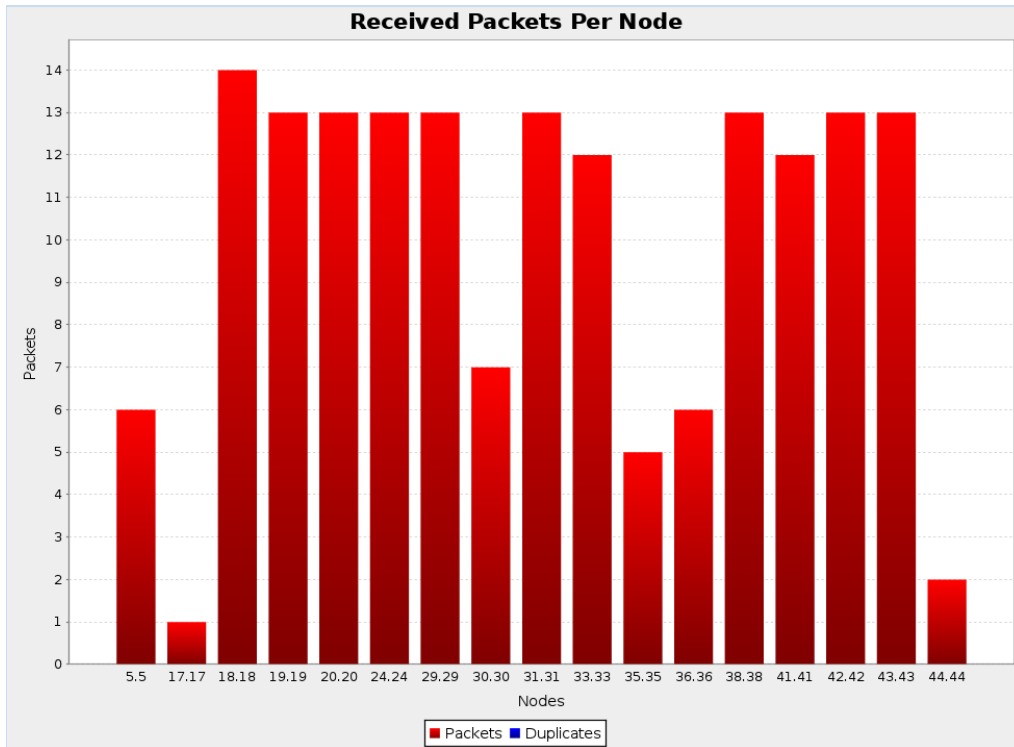


Figura 45 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo 3 visão fonte 3. Fonte: Próprio Autor

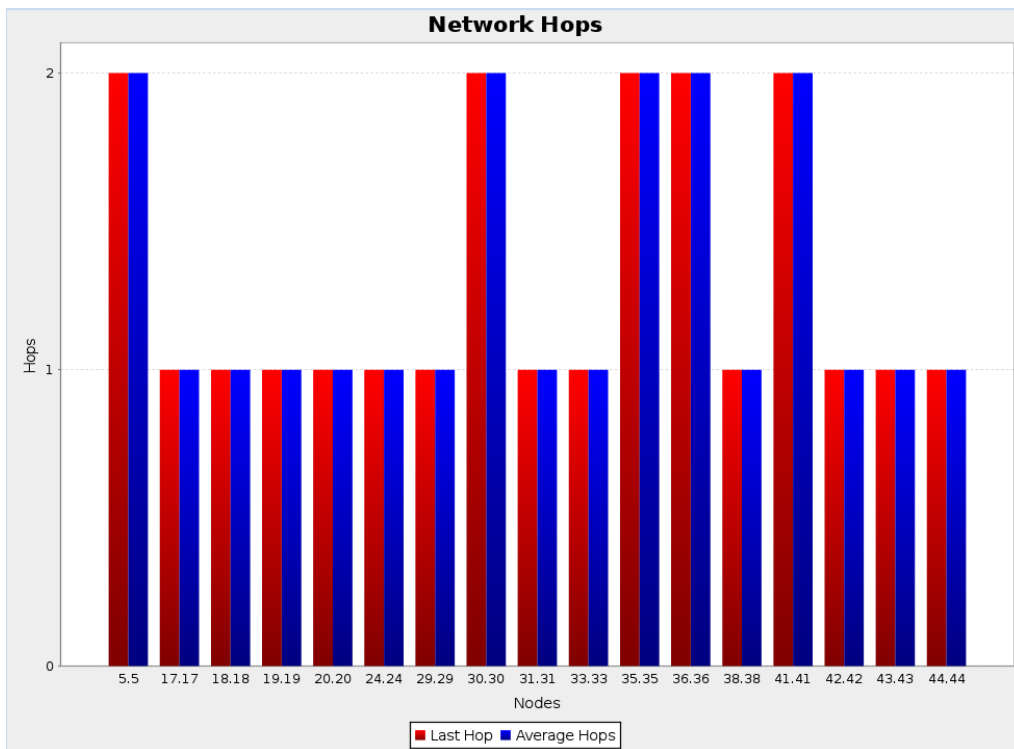


Figura 46 – Número de hops de cada nodo cenário 3 visão fonte 3. Fonte: Próprio Autor

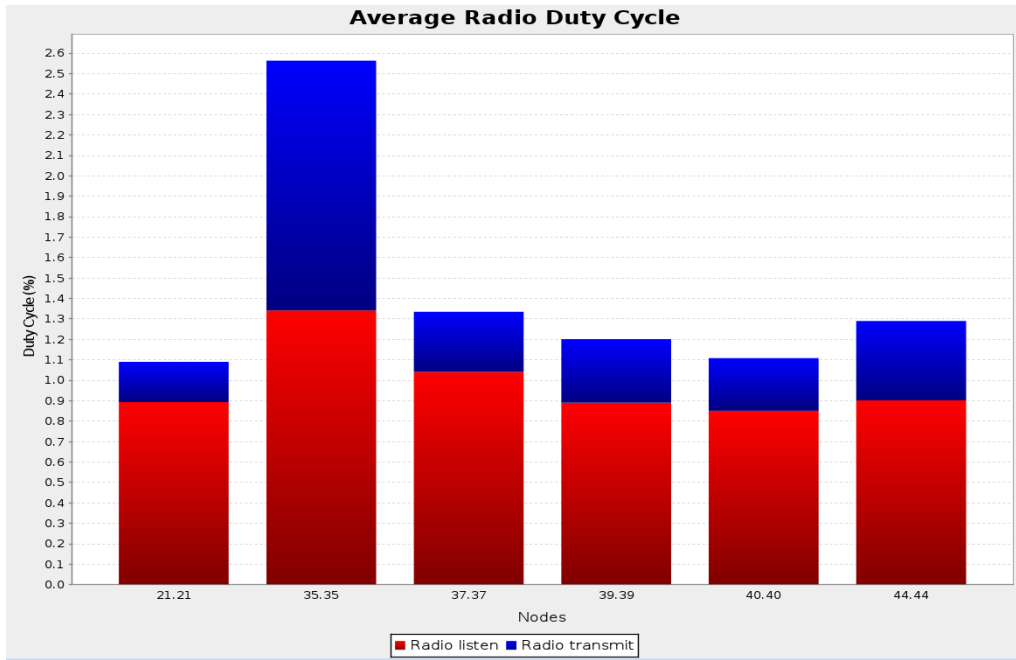


Figura 47 – *Duty Cycle* cenário 3 visão fonte 4. Fonte: Próprio Autor

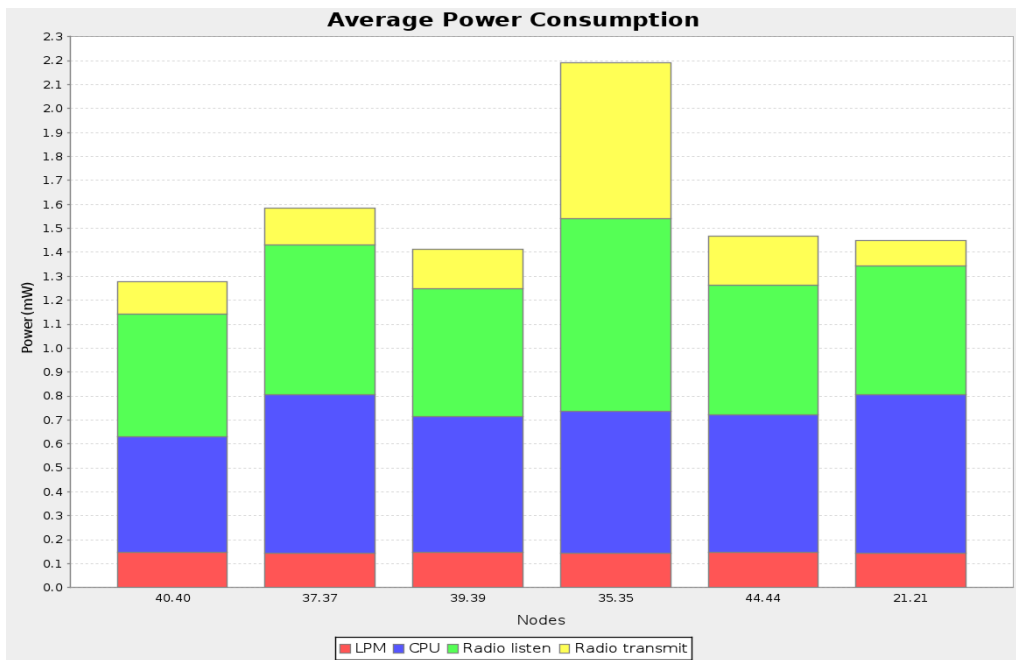


Figura 48 – Energia média gasta por cada nodo da rede cenário 3 visão fonte 4. Fonte: Próprio Autor

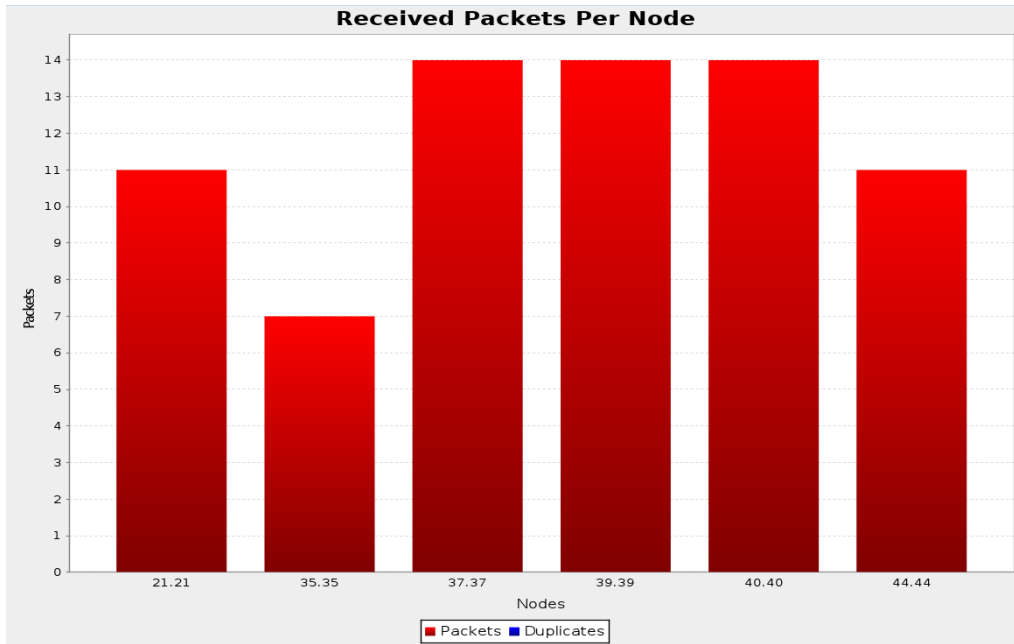


Figura 49 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo 3 visão fonte 4. Fonte: Próprio Autor

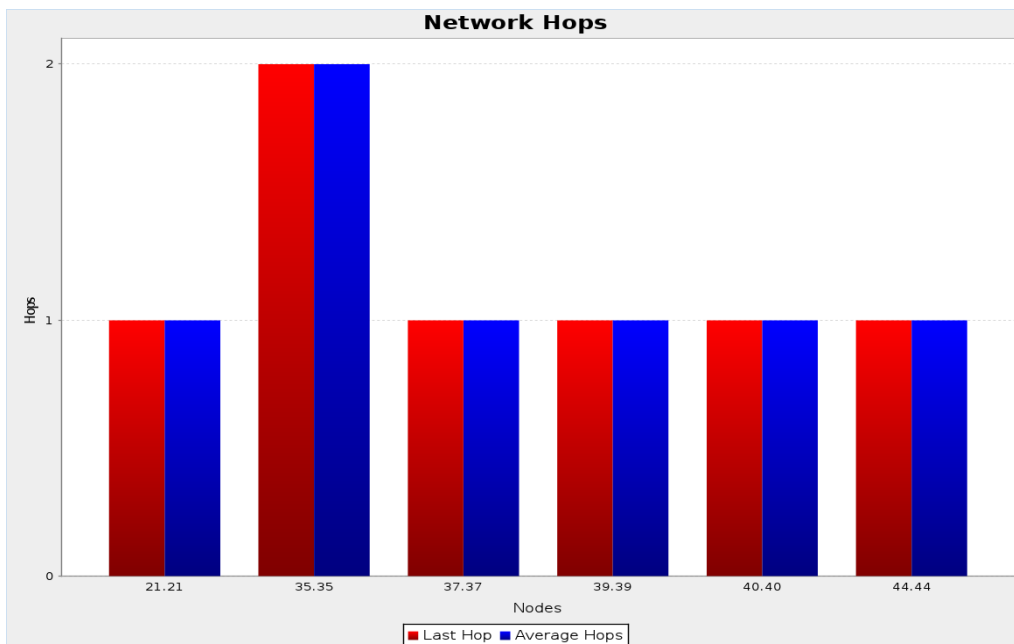


Figura 50 – Número de hops de cada nodo cenário 3 visão fonte 4. Fonte: Próprio Autor

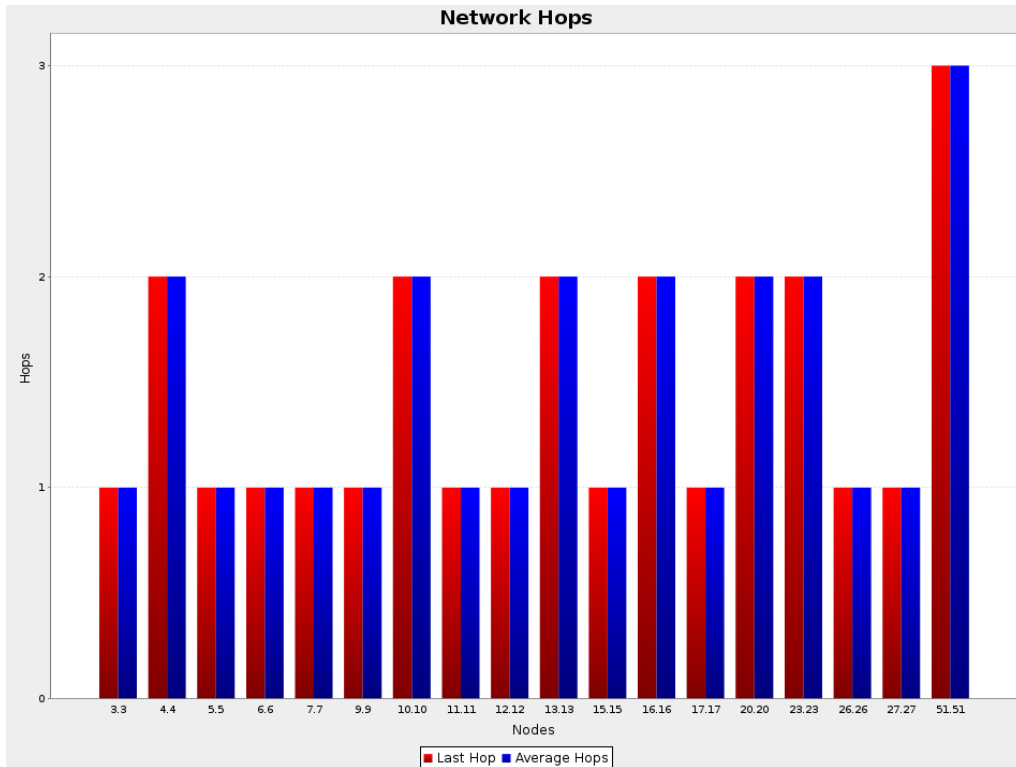


Figura 51 – Número de *hops* de cada nodo cenário 4 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

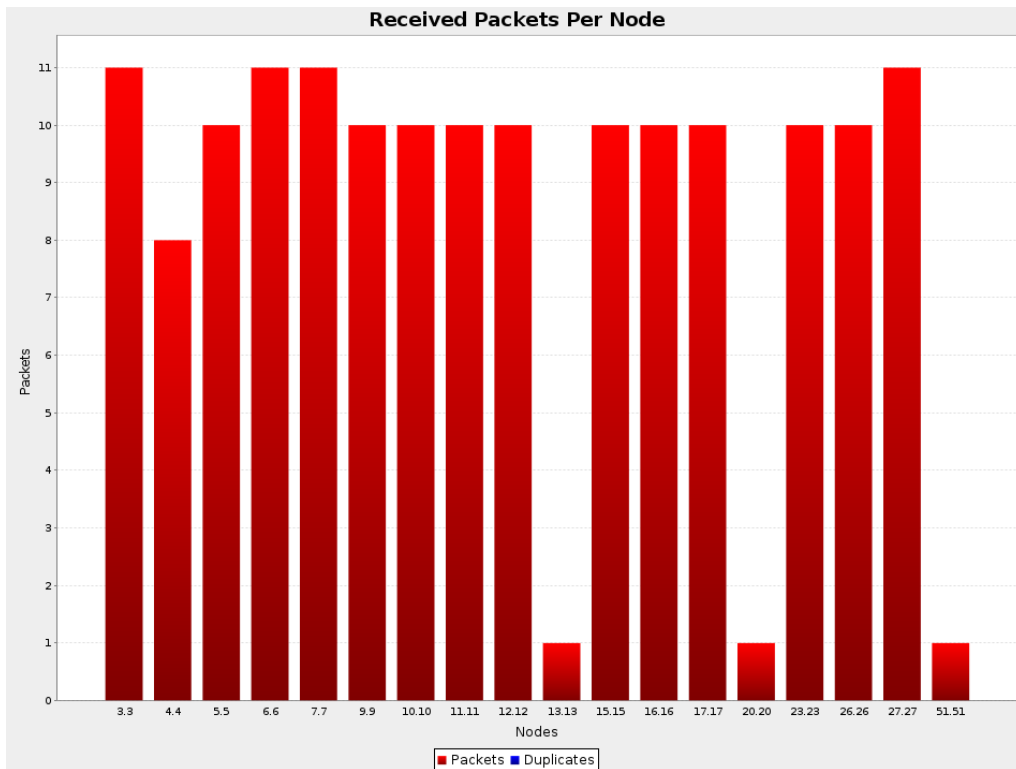


Figura 52 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo cenário 4 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

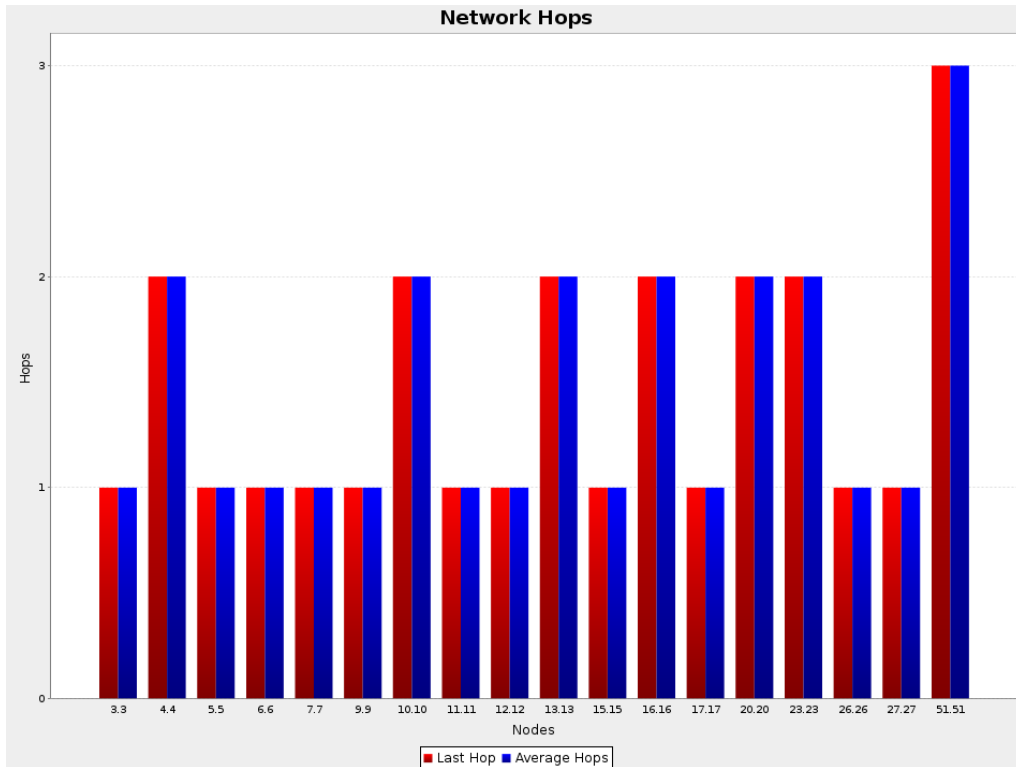


Figura 53 – Número de hops de cada nodo cenário 4 visão fonte 1. Fonte: Próprio Autor

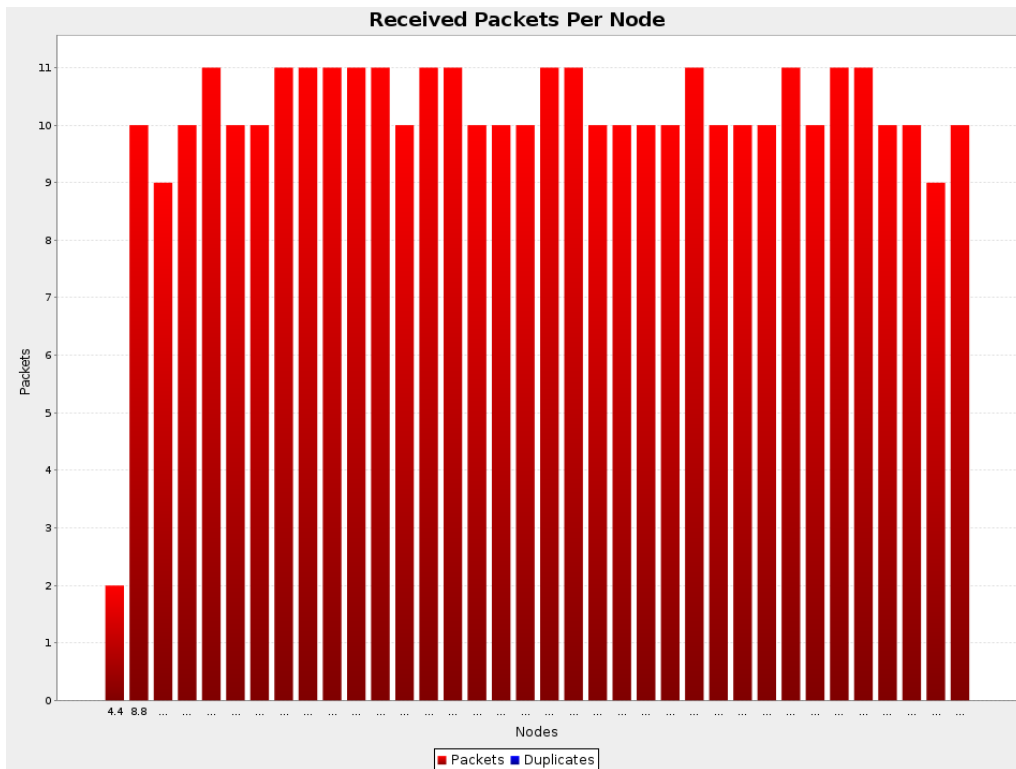


Figura 54 – Quantidade de pacotes recebidos por cada nodo cenário 4 visão fonte 2. Fonte: Próprio Autor