



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Rodolfo Borges dos Santos de Carvalho

**Uma extensão do protocolo Babel para inclusão de mecanismo de incentivo
com a proposta de custo operacional**

Florianópolis
2022

Rodolfo Borges dos Santos de Carvalho

**Uma extensão do protocolo Babel para inclusão de mecanismo de incentivo
com a proposta de custo operacional**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Ciência da Computação da Universidade Fede-
ral de Santa Catarina para a obtenção do título de mes-
tre em Ciência da Computação.

Orientadora: Prof.^a DR.^a Carla Merkle Westphall

Florianópolis
2022

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

Carvalho, Rodolfo Borges dos Santos de
Uma extensão do protocolo Babel para inclusão de
mecanismo de incentivo com a proposta de custo operacional
/ Rodolfo Borges dos Santos de Carvalho ; orientadora,
Carla Merkle Westphall, 2022.
78 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Ciência da Computação. 2. Redes mesh sem fio. 3.
Métrica de custo. 4. Incentivo operacional. I. Westphall,
Carla Merkle. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III.
Título.

Rodolfo Borges dos Santos de Carvalho

**Uma extensão do protocolo Babel para inclusão de mecanismo de incentivo
com a proposta de custo operacional**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alex Sandro Roschildt Pinto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Caciano dos Santos Machado
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.(a) Patrícia Della Méa Plentz, Dr(a).
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Ciência da Computação.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof.^a DR.^a Carla Merkle Westphall
Orientadora

Florianópolis, 2022.

Este trabalho de dissertação é dedicado a toda minha família, tanto a consanguínea quanto a construída dentro do laboratório de estudos. Em especial aos meus pais pelo exemplo, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por cada desafio que me foi concedido, trazendo a força e o aprendizado necessários em cada momento, principalmente nos mais difíceis desse período.

Agradeço imensamente aos meus pais (Izaltina e Leandro), pelo exemplo, apoio, conselhos e ensinamentos que sempre me incentivaram a ir além.

À minha querida companheira Luiza Young pela amizade, afeto, e apoio que foram fundamentais durante esse caminho.

À minha orientadora Carla Merkle Westphall pela acolhida, ensinamentos, apoio, críticas, sugestões, atenção e paciência durante a elaboração e revisão deste trabalho.

A toda nossa querida família do Laboratório de Redes e Gerência da UFSC, especialmente para Caciano Machado, Cristiano de Souza, Hugo Sampaio, Leandro Loffi, Ricardo Boing, Rômulo de Almeida, Wesley Bezerra e Prof. Carlos Westphall pelas inúmeras dicas, conselhos, campeonatos e momentos de descontração.

A todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra para a conclusão deste trabalho, muito obrigado!

"A vontade de se preparar deve ser maior que a vontade de vencer"
(Bob Knight)

RESUMO

A expansão das redes de computadores pelo mundo e seus inúmeros benefícios permitiram o surgimento e aplicação de diversas tecnologias visando a troca de informações de forma descentralizada, como a Blockchain, onde não existe a necessidade de um órgão ou terceiros para gerenciamento. Dentro deste contexto foi possível o surgimento de diversas redes sem fio distribuídas, como as redes comunitárias por exemplo, em que grandes malhas de redes compostas por centenas de nós construídos pelas comunidades buscam resolver problemas de inclusão digital. Mas infelizmente as redes de malha sem fio ainda apresentam algumas limitações que barram o seu crescimento, e mesmo tendo protocolos específicos como o Babel que otimizam seu funcionamento, alguns problemas como a confiabilidade entre integrantes da rede, e a distribuição de recursos para incentivo do seu crescimento, ainda impedem que essas redes se desenvolvam para atingir áreas de escassez tecnológica chamadas de última milha. Dessa forma, esse trabalho busca consolidar os conhecimentos já alcançados a respeito de técnicas de otimização para WMNs por meio do protocolo Babel, e busca propor o aprimoramento dos mecanismos de incentivo financeiro dentro do protocolo, com a demonstração de testes de eficiência por meio da plataforma OMNeT++ aliada à ferramenta INET Framework.

Palavras-chave: Babel. Protocolo de roteamento. Mecanismo de incentivo. Wireless mesh networks.

ABSTRACT

The expansion of networks worldwide and its benefits allowed the emergence and application of several technologies aimed at exchanging information in a decentralized manner, such as Blockchain, where there is no need for a reliable agent or third party for management. In this context, the emergence of various distributed wireless networks was possible, such as community networks, where large meshes of networks composed of hundreds of nodes built by communities seek to solve digital inclusion problems. Wireless mesh networks still present some challenges in their growth. Even with specific protocols like Babel, which optimize its operation, there are problems such as reliability among network members and the correct distribution of resources to encourage its growth. These characteristics prevent wireless mesh networks from developing to reach areas of technology scarcity called the last mile. Thus, this work uses the optimization techniques for WMNs achieved by the Babel protocol and proposes the modification of the original Babel protocol to insert financial incentive mechanisms into the protocol. The article presents the proposed modifications and demonstrates, through simulation tests, the functioning and efficiency of the protocol extensions through the OMNeT++ platform combined with the INET Framework tool.

Keywords: Babel. Routing Protocol. Incentive mechanism. Wireless mesh network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre redes de Infraestrutura e redes Ad Hoc.	19
Figura 2 – <i>Wireless Mesh Network</i>	21
Figura 3 – Custo dividido das WMNs em ambientes reais.	23
Figura 4 – Tipos de protocolos com base no roteamento.	24
Figura 5 – Cálculo da TQ(<i>Transmission Quality</i>).	27
Figura 6 – Exemplo de cálculo da tabela de roteamento.	29
Figura 7 – Métrica de custo em ambiente real.	39
Figura 8 – Cálculo da métrica de custo.	41
Figura 9 – Novo parâmetro execução do Babel.	42
Figura 10 – Formato da sub-TLV OC (<i>Operational Cost</i>).	44
Figura 11 – Início de construção da TLV IHU.	44
Figura 12 – Definição do tocost.	45
Figura 13 – Montagem da mensagem IHU.	45
Figura 14 – Dados armazenados de cada nó vizinho.	46
Figura 15 – Identificação de um novo nó na rede.	47
Figura 16 – Início do parser da sub-TLV OC.	48
Figura 17 – Reconhecimento do parser para a sub-TLV OC.	49
Figura 18 – Função de atualização da métrica.	49
Figura 19 – Ambiente de teste 1	51
Figura 20 – Ambiente de teste 2	52
Figura 21 – Modelo de Camadas proposto	53
Figura 22 – Comandos de execução - Ambiente 1	54
Figura 23 – Modelo do ambiente de teste 1	55
Figura 24 – Comparação do Babel para uma conexão estável - Ambiente 1	56
Figura 25 – Queda de conexão - Ambiente 1	56
Figura 26 – Queda de conexão - Ambiente 2	57
Figura 27 – Tempo de convergência	58
Figura 28 – Ilustração do processo de execução inicial	69
Figura 29 – Ilustração do processo de execução snowball	70
Figura 30 – Tipos de incentivo	71
Figura 31 – Protocolos utilizados	72
Figura 32 – Técnicas utilizadas pelas propostas	73
Figura 33 – Tipo de estudo realizado	74
Figura 34 – Eficiência prática das propostas	74
Figura 35 – Benefícios e melhorias identificados	75
Figura 36 – Custos e riscos identificados	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
BATMAN	Better Approach To Mobile Ad hoc Networking
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
DYMO	Dynamic MANET On-demand
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETX	Expected Transmission Cost
HLF	Hyperledger Fabric
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protocol
IHU	I Heard You
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
ISP	Internet Service Provider
MANET	Mobile Ad hoc Network
OC	Operational Cost
OGM	Originator Message
OLSR	Optimized Link State Routing
OSPF	Open Shortest Path First
PoS	Proof of Stake
PTT	Ponto de Troca de Tráfego
QoS	Quality of Service
RC	Redes Comunitárias
RFC	Request for Comments
RTT	Round-Trip Time
SDN	Software Defined Networking
TLV	Type-Length-Value
TQ	Transmission Quality
TTL	Time To Live
WMN	Wireless Mesh Network

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>rxcost</i>	Custo de recebimento dos pacotes
<i>txcost</i>	Custo de transmissão dos pacotes
<i>tocost</i>	Custo operacional do nó
<i>beta</i>	Fração de recebimentos com sucesso no histórico do Multicast Hello
<i>alpha</i>	Fração de envios com sucesso no histórico do Multicast Hello

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESCOPO	16
1.4	MÉTODO DE PESQUISA	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	REDES AD HOC	19
2.2	WIRELESS MESH NETWORK (WMN)	20
2.3	WIRELESS MESH NETWORK INCENTIVADAS	22
2.4	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM WMNS	24
2.4.1	B.A.T.M.A.N	25
2.4.2	Babel	27
3	TRABALHOS CORRELATOS	31
3.1	MECANISMOS DE INCENTIVO ASSOCIADOS A WMNS	31
3.2	DESEMPENHO PARA PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM WMNS	34
3.3	COMPARATIVO DOS ESTUDOS CORRELATOS E PROPOSTA	36
4	UMA EXTENSÃO DO PROTOCOLO BABEL	38
4.1	MÉTRICA DE ROTEAMENTO	38
4.2	TROCA DE MENSAGENS	43
4.2.1	Construção da Mensagem	44
4.2.2	Identificação da Mensagem	47
4.3	AMBIENTE DE TESTES	50
4.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	65
A.1	JUSTIFICATIVA DA NECESSIDADE	65
A.2	OBJETIVO E PERGUNTA(S) DE PESQUISA	66
A.3	STRING DE BUSCA E FONTES DE PESQUISA	66
A.4	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	67
A.5	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE	67
A.6	PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO	68
A.7	PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO	69
A.7.1	Seleção dos Estudos	69

A.7.2	Extração de Dados	69
A.7.3	Análise da Qualidade	71
A.8	ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
A.8.1	Como a utilização dos protocolos associados a mecanismos de incentivo financeiro tem sido adotados para WMNs?	71
A.8.2	Quais as técnicas mais utilizadas para implementação de mecanismos de incentivo para WMNs dentro de protocolos de roteamento?	72
A.8.3	Qual a eficiência dos modelos propostos em testes realizados para o incentivo de WMNs?	73
A.8.4	Quais os benefícios e melhorias podem ser alcançadas para as WMNs com a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro?	75
A.8.5	Quais os custos e riscos associados a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro para as WMNs?	76
A.9	CONCLUSÃO	76

1 INTRODUÇÃO

Alguns dos desafios encontrados para a universalização da Internet atualmente, se encontram na estrutura de rede feita por meio de cabamentos distribuídos por grandes operadoras, a qual se mostra incapaz de atender os locais mais remotos de habitação, seja por questões econômicas ou logísticas. Essas limitações impedem que a utilização de dispositivos conectados nas redes, sejam elas locais ou globais, ajudem diversas barreiras informacionais a serem quebradas. Diminuindo também outros benefícios diretos ou indiretos, como o desenvolvimento econômico, político e científico de inúmeras regiões do mundo que não são limitadas pelo desafio de alcance da rede (BROWN, 2017). Segundo (ITU, 2021) após 30 anos de existência da Internet, em 2021, estima-se que aproximadamente 37% da população mundial nunca teve acesso à Internet, a maior parte concentrada em países periféricos, economicamente dependentes e subdesenvolvidos (MACCARI, Leonardo; LO CIGNO, 2015).

Nesse contexto em que entram as *WMNs* (Wireless Mesh Networks), redes de comunicação sem fio em que cada cliente ou roteador se conecta de forma direta e dinâmica, sem a existência de um ponto de acesso, hierarquia ou organização prévia (AKYILDIZ; WANG, X.; WANG, W., 2005). As *WMNs* garantem mobilidade aos nós clientes e um grande alcance para áreas de difícil acesso, já que cada membro da rede estende os limites de alcance da mesma para outros possíveis membros.

Uma das aplicações das *WMNs* são as *RC* (redes comunitárias), criadas por comunidades de pessoas com o objetivo principal de reduzir a exclusão digital (Maccari; Cigno, 2015), reduzindo também o custo da “última milha” no acesso à Internet através da colaboração entre nós, compartilhando um enlace com a rede fixa e permitindo o uso mais eficiente da banda sem custos com cabeamento até o usuário final (AGUIAR *et al.*, 2007).

Tomando como exemplo o Brasil, um dos países com maior extensão territorial do planeta, e que apresenta cerca de 0,63% do território concentrando 84,3% da população brasileira segundo estudos realizados por 3 anos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (*EMBRAPA*) (A. R. FARIAS R. MINGOTI, 2017), ainda existe uma extensa área agregando comunidades que não são beneficiadas com cobertura de rede, por estarem fora das áreas urbanas, e onde as *WMNs* poderiam ser uma alternativa viável.

Apesar do potencial das *WMNs* quanto ao desenvolvimento levado para comunidades, existe ainda na literatura uma lacuna dentro das técnicas e métodos de tornar as *WMNs* auto-sustentáveis, criando um ambiente economicamente viável aos colaboradores da mesma (CARVALHO; WESTPHALL; MACHADO, 2022). O comportamento egoísta de alguns participantes pode levar ao desbalanceamento na carga de trabalho pelo mal direcionamento de rotas, mesmo utilizando dois dos principais protocolos

de roteamento para WMNs, como o Babel e o BATMAN (PIECHOWIAK *et al.*, 2016; TCHINDA *et al.*, 2017), os ambientes de conexão não ficam protegidos de participantes com comportamentos egoístas.

Um das alternativas para inibir ou pelo menos desencorajar tais comportamentos nocivos é a inclusão de mecanismos que incentivem o bom comportamento, como o oferecimento de tokens pelo trabalho na rede, ou outros benefícios, que inclusive podem estar associados com a tecnologia *blockchain* (MACHADO; SANTOS; WESTPHALL, 2021). A inclusão de tais benefícios podem inclusive ajudar no custeio do próprio custo de operação dos nós, ao mesmo tempo que desestimula os comportamentos egoístas de participantes da rede.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

As redes de malha sem fio ainda apresentam alguns desafios quando comparadas às redes tradicionais (MACCARI, Leonardo; LO CIGNO, 2015), baseadas em cabeamentos extremamente custosos e disponibilizadas apenas por meio de infraestruturas de empresas de telecomunicações (ITU, 2021).

Diversas regiões do mundo, por conta da baixa densidade populacional, não são atendidas com a infraestrutura necessária para acesso à rede, levando diversas famílias, principalmente de comunidades mais carentes, a não terem opções de custo acessível para conexão de rede. Essa realidade influencia diretamente no desenvolvimento local da comunidade, não apenas economicamente, mas também dentro da educação, saneamento básico, segurança e conscientização política que a rede trás, ao conectar as pessoas entre si.

O trabalho busca retratar alguns dos principais problemas encontrados nas WMNs, e propõe a construção e adaptação das WMNs com a utilização de mecanismos de recompensa, para a melhoria na expansão, estabilidade e sustentabilidade das mesmas, que ainda hoje dependem de trabalhos voluntários para se manterem em termos de custo material e técnico.

1.2 OBJETIVOS

O estudo realizado possui como foco de sua proposta, implementação e testes, alcançar os objetivos listados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o custo e a eficiência do protocolo de roteamento Babel em ambientes de WMNs com mecanismos de incentivo.

1.2.2 Objetivos Específicos

O trabalho aborda também alguns outros objetivos como subprodutos verificáveis do estudo final, são eles:

- Identificar os principais protocolos de roteamento mais indicados para ambientes WMNs em comparação com o Babel.
- Propor a inserção de mecanismos de incentivo dentro do protocolo Babel.
- Realizar implementações e cenários de teste para o protocolo Babel.
- Analisar o custo e benefícios do protocolo de roteamento Babel em ambientes de WMNs com mecanismos de incentivo.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

O escopo deste trabalho não tem por objetivo englobar a utilização, estudo, teste ou comparação com qualquer código atualmente disponibilizado em ferramentas online de versionamento de código.

O trabalho não engloba o estudo de mecanismos que atuam exclusivamente nas camadas OSI física e de enlace, pois o foco é no encaminhamento dos pacotes, ou seja, na camada de rede.

O trabalho não engloba o estudo de propostas de redes mesh sem incentivo ao funcionamento ou expansão da rede.

O trabalho não engloba os requisitos de segurança associados às demais camadas OSI que não sejam especificamente a camada de rede.

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

A realização deste trabalho é de natureza aplicada e foi baseada no método Hipotético-Dedutivo. Pela natureza lógica do método, levando em consideração as experimentações que são feitas durante o trabalho, é possível estabelecer de maneira quantitativa e qualitativa os efeitos vindos da relação entre WMNs e as estruturas de incentivo visando a sustentabilidade da rede. A estratégia adotada para a aplicação da pesquisa é baseada no esquema proposto por (MARCONI; LAKATOS, 2011), que mostra o método hipotético-dedutivo dividido em 4 etapas.

A etapa de conhecimento foi baseada no levantamento de artigos e também de projetos realizados por instituições sem fins lucrativos, que estão relacionados com a utilização de redes mesh e protocolos com mecanismos de incentivos. O levantamento foi baseado em uma revisão sistemática da literatura, que incluiu artigos científicos de bases de dados relacionadas ao tema de Computação, além de incluir análises e projetos aplicados por entidades particulares, como ONGs, que visam levar acesso e conectividade para regiões carentes do território que abrange.

A etapa de problema foi baseada na identificação de desafios encontrados no levantamento de artigos, que estão relacionados a implantação e desenvolvimento das WMNs. Foram elencados alguns problemas, como comportamentos egoístas, que tem origem na própria dinâmica de trabalho entre os nós, os quais podem não confiar uns nos outros, gerando assim dificuldades na sustentabilidade da rede.

A etapa de conjectura foi realizada com o planejamento e inclusão das alterações no funcionamento do protocolo de rede, buscando uma melhora na estabilidade das rotas, e retribuir o trabalho feito com incentivos que garantam a permanência dos nós. Tanto na troca de mensagens quanto no cálculo dos custos de cada rota foram adicionadas modificações a nível de código e compiladas, para serem colocadas em um ambiente de teste.

A etapa de falseamento é representada pelos testes e avaliações feitas sobre o protocolo alterado. Considerando as análises qualitativas, foram identificados os melhores caminhos em termos de segurança e distância de transmissão. Adicionalmente foram feitos experimentos quantitativos, que analisam as maiores taxas de *throughput* e também os menores tempo de convergência da rede, em momentos de entrada ou saída de participantes.

Dessa forma, a metodologia adotada baseia-se na busca pelos objetivos descritos no trabalho, utilizando para isso as 4 etapas do método hipotético-dedutivo, que estão englobadas pelos seguintes passos realizados neste estudo:

1. Levantamento bibliográfico para verificação do estado da arte em relação a protocolos de WMNs associados a mecanismos de incentivo.
2. Identificação dos padrões de incentivo estabelecidos para a área de redes mesh.
3. Proposta soluções que ajudem a associação de mecanismos de incentivo em redes WMNs.
4. Definição dos critérios de aceitação para atendimento aos padrões de rede.
5. Elaboração e execução das condições de testes a serem aplicados às redes mesh em ambiente de simulação.
6. Analisar os resultados obtidos dos ambientes de testes e as conclusões alcançadas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O documento do trabalho está organizado de forma a contextualizar o problema, analisar o estado da arte e apresentar a proposta de projeto sobre o protocolo Babel para redes mesh incentivadas. O desenvolvimento do assunto está apresentado da seguinte maneira: este capítulo introdutório que apresenta a contextualização do

problema, os objetivos e a organização do documento; o capítulo 2, que apresenta a fundamentação teórica, composta por temas como redes Ad Hoc, redes mesh e protocolos de roteamento; o capítulo 3 aborda trabalhos correlatos, diretamente ligados ao tema, fazendo referência ao protocolo de revisão sistemática adotado para seleção dos trabalhos; o capítulo 4, que aborda a proposta de projeto executada pelo autor, a metodologia utilizada para o projeto, os testes realizados, e as contribuições assim como os resultados alcançados; e por fim o capítulo 5, que apresenta as conclusões alcançadas pela realização do estudo e trabalhos futuros que são possíveis de serem realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

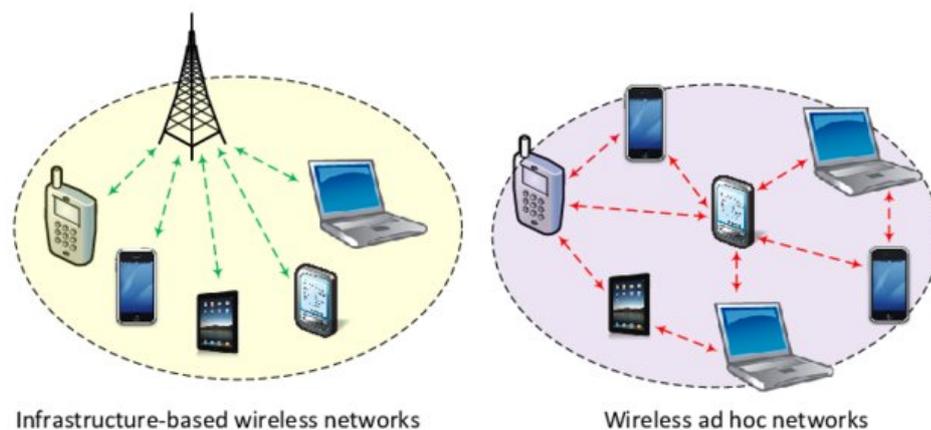
O trabalho realizado depende inicialmente de alguns conceitos e definições, que apesar de extensos e envolverem vários tópicos, foram concentrados em algumas áreas principais que serão abordadas no capítulo atual, formando assim a base essencial para o entendimento do assunto abordado.

Dentre os principais assuntos, o capítulo atual começa abordando as Redes Ad Hoc e suas características principais que as fazem tão convenientes em ambientes sem cabeados, posteriormente é apresentada uma subárea dentro das redes Ad Hoc denominada por WMNs, abordando também as suas especificidades, problemas e a inclusão de mecanismos de incentivo sobre a mesma, por fim é apresentada a definição de protocolos de roteamento e suas principais características, trazendo o foco principalmente para dois protocolos, o BABEL e BATMAN, que são considerados os principais para ambientes de WMNs, segundo estudos presentes na literatura (PIECHOWIAK *et al.*, 2016; TCHINDA *et al.*, 2017).

2.1 REDES AD HOC

A redes Ad Hoc tiveram seu início durante os anos 70, e são definidas por um conjunto de dispositivos de comunicação (nós), que para se comunicarem, não dispõem de infraestrutura cabeada associada aos mesmos (Figura 1), ou links de comunicação disponíveis de maneira organizada e pré-determinada (RAMANATHAN, 2002). Dessa forma, os dispositivos interagem entre si apenas por meio de tecnologia wireless e descobrem dinamicamente os outros nós com quem podem interagir diretamente, ou seja, quais seriam seus possíveis vizinhos.

Figura 1 – Comparação entre redes de Infraestrutura e redes Ad Hoc.



Fonte: (DINH THAI *et al.*, 2015)

Outra característica das redes Ad Hoc é a constante mudança nos links e conectividade dos nós, devido à mobilidade trazida pelas conexões wireless e os controles no consumo de energia adotados. Dessa forma, quanto maior o número de participantes da rede, mais complexa será a comunicação, para que cada pacote chegue ao seu destino. A complexidade entretanto não impede a rede de ser utilizada, principalmente em circunstâncias em que a infra-estrutura de cabeamento não está disponível ou não é confiável, além de situações de emergência, como a comunicação móvel em área remotas para busca e salvamento, quando as tecnologias sem fio como infravermelho, rádio frequência (RF), e outras, são essenciais.

2.2 WIRELESS MESH NETWORK (WMN)

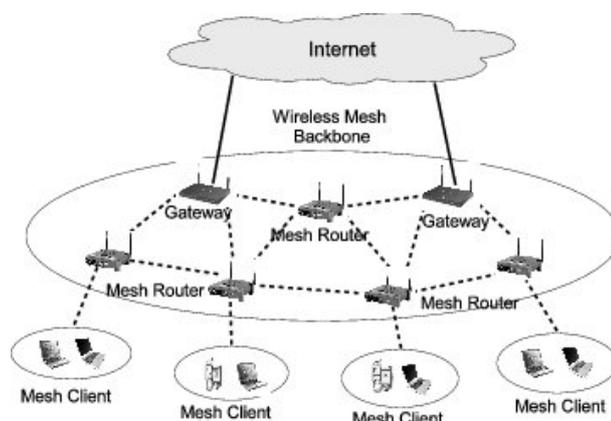
As WMNs (Wireless Mesh Networks) são consideradas redes Ad Hoc incrementadas com características voltadas para redes de topologia Mesh, permitindo uma comunicação auto-organizável e descentralizada entre os participantes da rede, favorecendo assim a comunicação em largas áreas e também a extensão dessa conectividade a participantes vizinhos, sem a necessidade de um controle centralizado ou de cabeamentos ligando cada nó.

O roteamento existente dentro da rede permite que os nós, independentemente da sua capacidade e poder de processamento, possam encaminhar pacotes de dados entre nós que não estão dentro do alcance direto um do outro. Esse comportamento serve como uma ponte dentro da rede sem fio, a qual leva conectividade até o último nó possível, desde que exista ao menos um vizinho entre ele e o restante da rede.

Essa ponte de tráfego que distribui os pacotes entre todos os membros da WMN, formada pelos próprios participantes, levam os pacotes através de inúmeros saltos até seu destino, e quanto maior for o tamanho da rede, maiores são as possibilidades de caminhos alternativos para cada salto, aumentando assim a disponibilidade da rede em caso de acidentes ou quedas. A vantagem de redes com caminhos de múltiplos saltos se torna mais evidente se comparado às redes tradicionais cabeadas, utilizada pelas grandes operadoras e através das quais todo pacote salta diretamente do usuário para a comunicação de links *backhaul*. Esses links são controlados pela operadora, e são responsáveis por realizar a comunicação entre os *backbones* e as pequenas sub-redes, muito presente em redes móveis e que acaba centralizando todas as transferências de dados (Figura 2).

Os benefícios de utilização das redes WMNs sempre estão vinculados ao ambiente em que são utilizadas, alcançando soluções para diversos desafios de implementação encontrados em redes sem fio. Dentre os pontos positivos encontrados é possível elencar alguns como principais:

- O comportamento de auto-criação e auto-gerenciamento, pois a rede se

Figura 2 – *Wireless Mesh Network*.

Fonte: (JUNMO *et al.*, 2006)

forma automaticamente assim que o nós participantes são todos configurados e ativados.

- A tolerância a falhas, permitindo que o fluxo de informações não seja interrompido dentro da rede quando um nó falha. Desde que existam rotas redundantes disponíveis na rede para o caminho desejado, a rede redireciona dinamicamente todos os pacotes pela próxima rota possível.
- O auto-reestabelecimento, permitindo que um nó retirado da rede devido a problemas técnicos, quando for restaurado e estiver novamente funcional, consiga se juntar à rede mesh perfeitamente e de maneira automática.
- O compartilhamento da responsabilidade pela rede, pois a rede é responsabilidade de todos que dela participam. Os custos de operação também são divididos entre os participantes, pois não existe um único nó ou entidade responsável pela realização do roteamento e envio das informações que trafegam pela rede.
- O baixo custo de infraestrutura, pois os componentes de uma rede mesh sem fio atualmente são mais baratos de serem construídos e implementados financeiramente, principalmente quando comparado com as redes cabeadas.
- O baixo custo de expansão, permitindo que a inclusão de um novo nó utilize toda a estrutura já implantada, sendo necessário apenas o custo relacionado à inclusão de 1 participante, que também ao final da sua devida configuração, permitirá o aumento do alcance e da estrutura que compõe a própria rede.
- A facilidade de implementação, pois com pouco treinamento os membros de uma comunidade podem construir seus próprios nós, configurando e implementando como exemplos atualmente existentes dentro das redes co-

munitárias (BAIG *et al.*, 2016). Assim como o conhecimento necessário para implantação da rede também está mais acessível, por meio de orientações fornecidas por diversas entidades e órgãos de desenvolvimento social (APC.ORG, 2021).

Quanto à estrutura da rede, são compostas por dois tipos de dispositivos, clientes mesh e roteadores mesh, dispostos em uma topologia de malha pela qual a comunicação é realizada sem fio, em um ambiente dinamicamente auto-organizável e auto-configurável, utilizando o padrão IEEE 802.11, voltado a garantir o máximo de estabilidade principalmente pelas constantes mudanças no estado dos links e conectividade da rede que podem ocorrer (AKYILDIZ, WANG, 2005).

Os clientes mesh podem ser tanto estacionários como móveis, e são capazes não apenas de formar uma rede na qual estão ligados a outros roteadores, como também possuem capacidade de formar uma rede apenas de clientes entre si, também chamada D2D (Device to device). Já os roteadores mesh possuem mobilidade mínima e restrita, e são responsáveis por formar o backbone das WMNs.

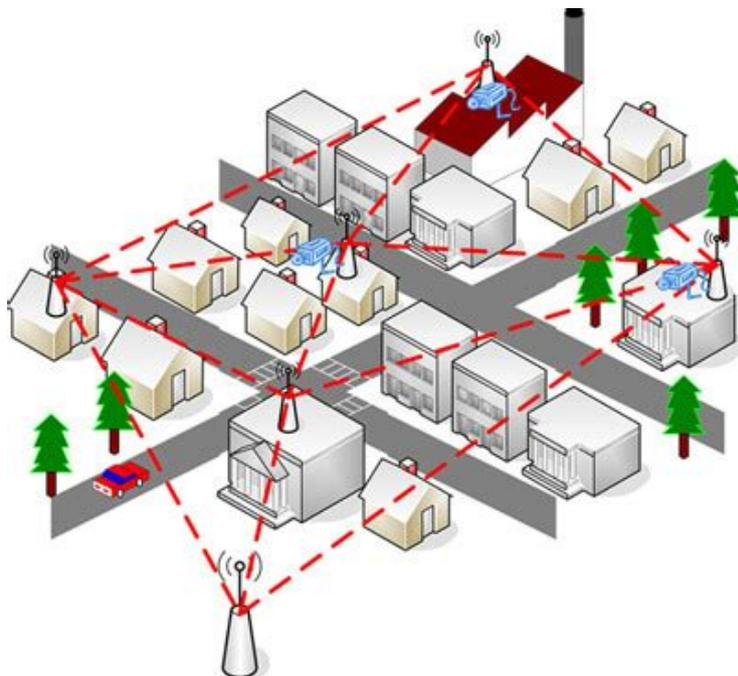
As WMNs são capazes de entregar diversos serviços sem fio para uma variedade imensa de aplicações, tanto em redes locais como também em redes metropolitanas, sendo capazes de se integrar com outros tipos de rede como móvel, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, redes de sensores, e outras, dependendo dos protocolos aplicados em seu funcionamento.

2.3 WIRELESS MESH NETWORK INCENTIVADAS

O impacto que as WMNs alcançaram no mundo, principalmente no que se refere a uma nova alternativa viável de acesso a Internet em diversas regiões, também levou ao surgimento de problemas relacionados tanto ao seu controle como também à sua viabilidade econômica. Sendo uma rede composta por domínios administrativos diferentes, na qual seus dispositivos não estão sob controle de uma mesma pessoa ou entidade (Figura 3), isso pode levar a comportamentos egoístas, como por exemplo participantes que tentam se aproveitar dos demais nós para encaminhamento de seus pacotes, ação denominada como *free-rider* pela literatura (MACHADO; SANTOS; WESTPHALL, 2021). Outros problemas de custos e viabilidade econômica também surgem, já que existe um gasto para criar, manter, desenvolver a rede, e garantir a manutenção satisfatória da qualidade de serviço aos usuários. Tais características acabam não sendo atingidas por falta de garantias na sustentabilidade do serviço, levando diversas entidades a realizar um trabalho altruísta.

Buscando minimizar as possíveis disparidades da rede e garantir o seu desenvolvimento, as WMNs buscam incorporar mecanismos e ferramentas que as incentivem em ambientes reais, a manter uma desejável estabilidade nos interesses mútuos de

Figura 3 – Custo dividido das WMNs em ambientes reais.



Fonte: (FIBER-OPTIC-EQUIPMENT.COM, 2022)

consumo e fornecimento dos serviços. Os mecanismos de incentivo são capazes de garantir, ou ao menos tornar lucrativo, que todos indivíduos colaborem e/ou sejam recompensados pela manutenção e correto desenvolvimento da rede. Além de impedir, ou ao menos tornar inconveniente, a criação de disparidades que sobrecarreguem determinados pontos da rede, seja por egoísmo durante a utilização da rede, ou por aumentar excessivamente os custos em determinada região da rede.

Alguns exemplos de disparidades são, o problema free-rider, que ocorre quando participantes buscam apenas consumir serviços sem, entre tanto, retribuir com processamento para a rede, e também quando um participante obriga outros nós a pagarem seu custo por falta de rotas alternativas, elevando os preços praticados.

Os mecanismos de incentivo, quando vinculados aos protocolos que são executados na camada de rede, podem ser divididos em duas áreas segundo (MARIAS *et al.*, 2006), os baseados em reputação e os baseados em créditos. Os modelos baseados em reputação buscam, com base no comportamento dos nós da rede, punir os elementos da rede que atuam de maneira nociva ao protocolo. Já os modelos baseados em crédito, utilizam uma forma de cobrança vinculada aos serviços prestados pelos elementos da rede, fornecendo ou retirando créditos de acordo com comportamentos nocivos ou benéficos respectivamente, que são identificados pelo protocolo.

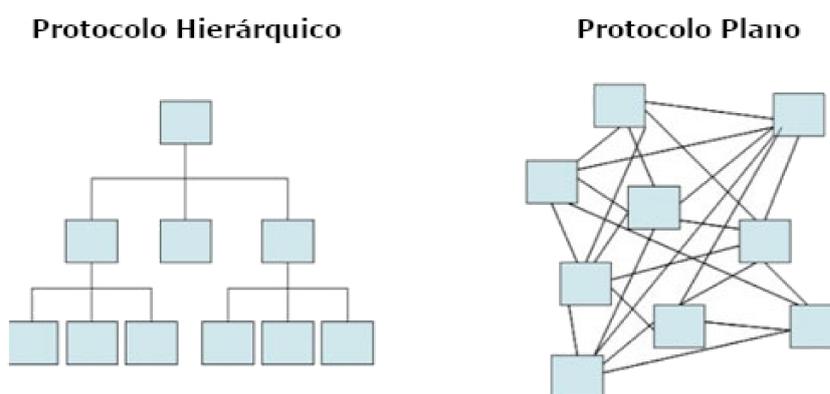
2.4 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM WMNS

As WMNs possuem diversos fatores que influenciam o seu desempenho, incluindo principalmente fatores como arquitetura da rede, topologia, densidade e mobilidade dos nós, assim como diversos outros que são gerenciados pelos respectivos protocolos aplicados às mesmas. Tais protocolos são responsáveis por identificar o melhor caminho possível para cada pacote que trafega na rede, utilizando diversos algoritmos e técnicas de otimização a fim de garantir que as tabelas de roteamento seja corretamente atualizadas com os melhores caminhos possíveis.

Os protocolos de roteamento para WMNs, quando comparados com outros protocolos convencionais (como OSPF, RIP, entre outros), adicionam novas características principalmente por estarem lidando com redes *ad hoc*, em que cada nó existente possui mobilidade parcial ou total, podendo mudar a topologia da rede com certa frequência, o que não ocorre em conexões cabeadas, necessitando portanto de um melhor gerenciamento na definição de rotas para a camada de rede (camada IP, na arquitetura TCP/IP).

Existem diversas maneiras de classificar os protocolos de roteamento, que variam em função de fatores encontrados na rede. Dentre esses fatores está a maneira como cada nó visualiza a rede e repassa as alterações que a mesma teve, separando os protocolos em 2 tipos (Figura 4), os protocolos de roteamento plano (ou simples), e os protocolos de roteamento hierárquico.

Figura 4 – Tipos de protocolos com base no roteamento.



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Os protocolos de roteamento plano consideram que cada nó é par de todos os outros, dessa forma, todos estão conectados sem nenhum tipo específico de estrutura ou organização. Cada nó consegue ver toda rede e conhece as alterações ocorridas, possuindo a capacidade de calcular todo o caminho que um pacote fará da sua origem

até o seu destino. Dessa forma, uma das grandes vantagens do roteamento simples ou plano, é que diversas alterações feitas na rede são permitidas, sem a necessidade de seguir uma hierarquia específica.

Os protocolos de roteamento hierárquico por sua vez, dividem a rede em diversas regiões denominadas domínios, podendo esta também ser dividida em subdomínios. Neste modo os nós de uma região conhecem toda estrutura interna da sua região, mas não tem informações sobre a estrutura de outras regiões, e para que cada região possa conversar entre si, elas são interconectadas através de estruturas como os backbones, que repassam os pacotes para os seus respectivos domínios. Dessa forma, através do endereço de destino, os nós em grande parte das redes, como a própria Internet, usam o nível mais alto da hierarquia para encaminhar os pacotes aos seus destinos e regiões corretas, posteriormente identificam a rede física relacionada e por fim o host que é identificado pela última parte do endereçamento. Sendo assim uma das grandes vantagens do roteamento hierárquico é que ele permite um grande crescimento, sem a necessidade de cada nó da rede obter informações sobre destinos distantes, e distribuindo o processamento realizado durante o roteamento de pacotes, já que cada nó precisa conhecer apenas os participantes da sua região.

Os protocolos de roteamento, sob o ponto de vista de manutenção das suas respectivas tabelas de roteamento, também podem ser divididos em 2 tipos: proativos e reativos.

Protocolos de roteamento proativos buscam constantemente manter suas tabelas de roteamento atualizadas, sempre com as rotas mais coerentes para se atingir cada nó presente na rede. Como sua tabela de rotas está sempre atualizada, o processo de encaminhamento dos pacotes se torna muito mais rápido, sem a existência de atrasos para escolha da melhor rota de transmissão. Entretanto, a manutenção das tabelas causa um aumento no tráfego da rede, já que todos os nós se comunicam constantemente a fim de confirmar/atualizar os caminhos de transmissão.

Protocolos de roteamento reativos, por sua vez, determinam as rotas a serem tomadas por demanda, ou seja, apenas quando existe um pacote a ser transmitido que o respectivo nó irá calcular a rota a ser realizada para o destino almejado. Isso gera um atraso entre a chegada do pacote e seu encaminhamento de fato, mas economizando consideravelmente a banda de rede, já que a troca de mensagens para definição de rota só ocorre uma única vez para cada pacote a ser transmitido.

2.4.1 B.A.T.M.A.N

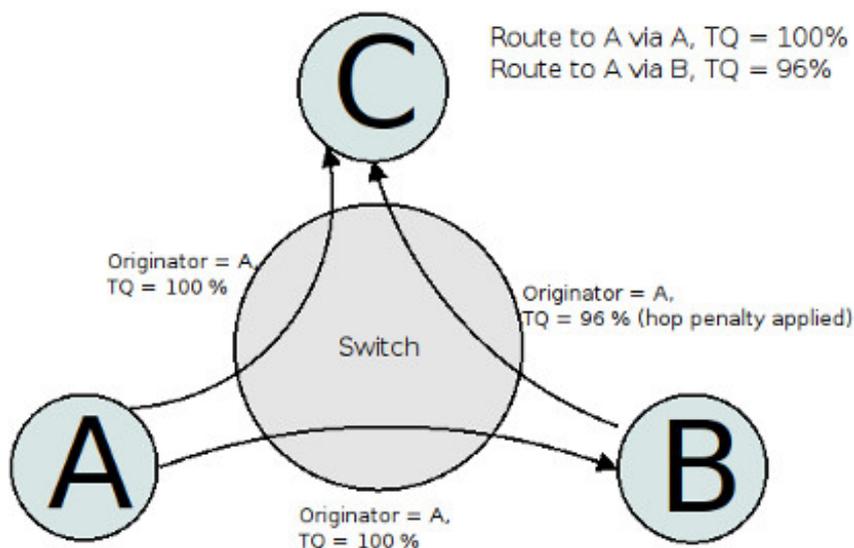
O protocolo *BATMAN* (*Better Approach To Mobile Ad hoc Networking*) é considerado um protocolo proativo, que busca otimizar o processamento e consumo de energia durante as atividades de roteamento, que são geralmente incorporadas a hardwares com recursos mínimos disponíveis, a exemplo dos dispositivos móveis que compõem

a maioria das redes *MANETs* (*Mobile Ad hoc Network*) (ABOLHASAN; HAGELSTEIN; WANG, J. C. .-, 2009). Possui como característica o conhecimento descentralizado das informações de roteamento, impedindo que um nó conheça as rotas completas para todos os destinos da rede, ao invés disso cada nó mantém atualizada uma lista dos melhores vizinhos para o próximo salto, de acordo com o destino do pacote. Dessa maneira, a necessidade de conhecer totalmente a topologia local se torna desnecessária, garantindo agilidade no roteamento de pacotes em redes com constantes mudanças de topologia.

A fim de que um nó consiga classificar os melhores vizinhos, cada nó da rede envia periodicamente mensagens de broadcast conhecidas como *OGMs* (*Originator Messages*), responsáveis por informar a todos de sua existência e mantendo atualizada a tabela de rotas para transmissão. Através das *OGMs* um nó da rede consegue identificar os links com menor utilização/congestionamento, e calcular a direção mais eficiente, entre os seus vizinhos, que cada pacote precisa percorrer, levando em conta não apenas a qualidade do link mas também a direção geral para onde o pacote precisa ser levado, para chegar ao seu destino. A qualidade de cada link é calculada por meio da *TQ* (*Transmission Quality*), baseada no tempo e número de *OGMs*, quanto menor o tempo de transmissão e maior o número de *OGMs*, melhor a qualidade do link.

O tempo e número de *OGMs* usados no cálculo da *TQ* são baseados na janela deslizante do nó, por meio da qual o emissor envia mais de uma *OGM* antes de receber a confirmação de recebimento das anteriores. A cada confirmação recebida o remetente desliza a janela e permite o envio da próxima *OGM*, considerando sempre o intervalo estabelecido entre o envio de cada mensagem. Como as *OGMs* enviadas sofrem perdas e erros durante o caminho de comunicação, o tempo de recebimento de cada mensagem e a quantidade de pacotes perdidos/recebidos acaba influenciando no cálculo final da *TQ*.

Cada *OGM* enviada/retransmitida por um nó da rede, tem tamanho típico de 52 bytes, e contém o endereço do nó de origem, o endereço do nó que está transmitindo o pacote, um *TTL* (*Time to Live*) e um número de sequência único, que identifica possíveis duplicatas nos recebimentos. Cada nó retransmite apenas uma vez cada *OGM* recebida, e portanto reenvia somente as *OGMs* recebidas pelo vizinho considerado como melhor salto para o nó de origem da *OGM*, já que os pacotes chegarão primeiro pelo melhor vizinho, e os seguintes apenas serão repetidos e descartados. Dessa maneira, um nó C aprenderá sobre a existência de um nó A através dos *OGMs* originados desse, quando as *OGMs* do nó A forem retransmitidas pelos vizinhos de salto único do nó C (Figura 5). Caso o nó C tiver mais de um vizinho, ele poderá saber pelo número de *OGMs* que recebe mais rapidamente, que vizinho ele deve optar para enviar mensagens ao nó A, origem das *OGMs*.

Figura 5 – Cálculo da TQ (*Transmission Quality*).

Fonte: (OPEN-MESH.ORG, 2013)

2.4.2 Babel

O protocolo Babel foi formalizado tecnicamente no ano de 2011, e designado para ser eficiente tanto em redes de roteamento hierárquico, quanto também em redes de roteamento plano (como são as WMNs), garantindo um roteamento eficaz não apenas em redes cabeadas, mas principalmente em redes sem fio com topologias dinâmicas, que estão em constante mudança (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021b).

O Babel é considerado um protocolo de roteamento vetor-distância, baseado inicialmente no algoritmo Bellman-Ford (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021b), mas incluindo vários refinamentos preventivos pelo foco maior em ambientes de WMNs, voltados a corrigir problemas relacionados a loops de roteamento e *black holes* (ou buracos negros) durante as convergências.

Black holes são considerados regiões em que o tráfego de pacotes é silenciosamente descartado, sem que a origem seja informada de que os dados não chegaram ao seu destino. Já os loops de roteamento são causados por mudanças na topologia da rede e conseqüentemente nas rotas a serem consideradas para transmissão. No momento em que ocorre alguma mudança na rede, o protocolo converge rapidamente para uma configuração que visa manter a conexão da rede e evitar a criação de loops nos roteamentos, e mesmo que estes ocorram, busca desfazê-los em tempo hábil e im-

pedir que se formem novamente. Inicialmente, a convergência tomada é prontamente realizada, mas sem garantias de rotas ótimas para a rede, garantindo um tempo curto e sem a necessidade de trocas de pacotes extra para que o tráfego continue a ocorrer. Já em uma segunda fase de convergência, considerada mais lenta, na escala de minutos, o protocolo realiza a configuração ideal alcançando as rotas ótimas, utilizando para isso uma técnica de roteamento denominada *DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector)*.

A realização da convergência ocorre sempre que a topologia da rede muda, devido a saída ou entrada de um nó na rede, e essa mudança é identificada através da troca de mensagens entre os nós, através de pacotes *TLVs (Type-Length-Value)*. Todo nó envia regularmente *TLVs Hello* para seus vizinhos, indicando que está operante, assim todos vizinhos usam o histórico recente de *Hello's* recebidos para computarem o valor de custo *rxcost (reception cost)*, que representa o custo da rota vindo da perspectiva do próprio nó que recebe as mensagens *Hello*, em relação ao vizinho que as enviou.

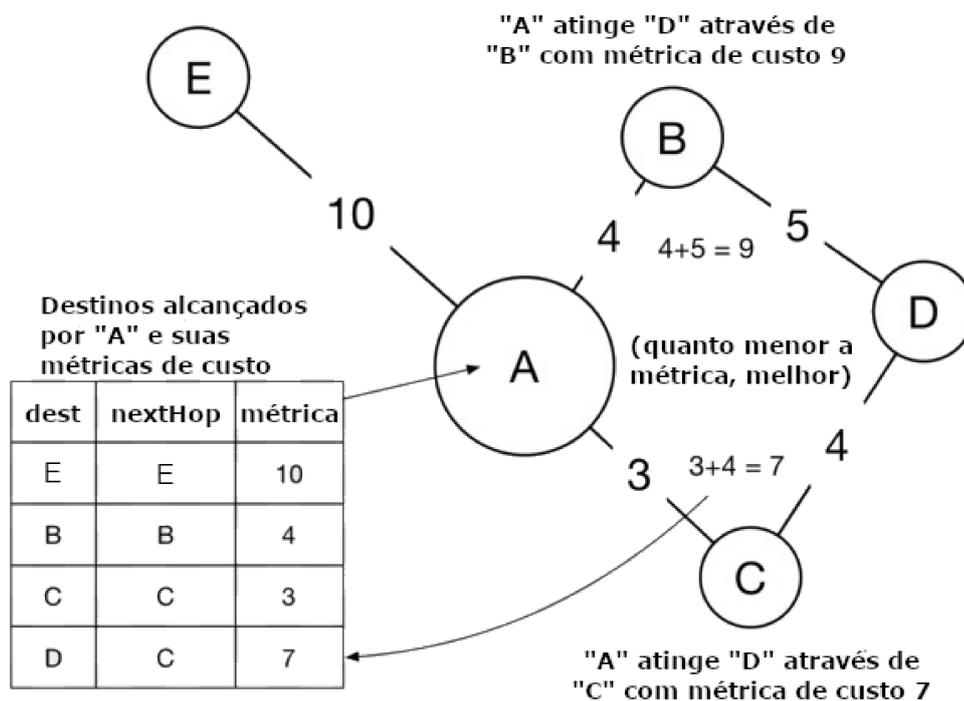
Como resposta aos pacotes *Hello's*, os nós devolvem a mensagem *IHU (I Heard You)*, garantindo que a visibilidade entre os nós da rede seja bidirecional, para que todos os participantes da rede se conheçam. Dentro de cada pacote da mensagem *IHU* é enviado dois tipos de dados, o valor *rxcost*, com o custo do respectivo link calculado pelo nó, e o intervalo usado para envio dos próprios pacotes *IHU*. No momento em que a mensagem de resposta *IHU* chega em um nó, esse atualiza o custo da rota com o respectivo vizinho, atribuindo o valor recebido na mensagem para a variável *txcost (transmission cost)*, associada ao vizinho como um custo da rota que o liga ao nó que recebeu a mensagem *IHU*.

O cálculo final para o custo do link entre um nó e cada vizinho, desde que seja alcançável, é computado através de dois fatores, o primeiro são as estatísticas do recebimento de *Hello's* vindas do vizinho, que serão usadas para compor a variável *rxcost*, e o segundo é a variável *txcost*, computada através do recebimento das mensagens *IHU* vindas do respectivo vizinho. A junção desses dois fatores, tanto o *rxcost* como o *txcost*, associados ao valor de atraso *RTT (Round-Trip Time)* no envio de pacotes, irão compor a métrica utilizada pelo protocolo Babel para compor o custo das rotas na rede.

Projetado para ser robusto e eficaz em redes sem fio instáveis, o protocolo Babel adiciona algumas outras modificações na dinâmica de funcionamento geral dos protocolos vetor-distância, trabalhando com provisões para estimar a qualidade dos links assim como métricas arbitrárias justas (Figura 6). Dessa forma, quando configurado corretamente, é capaz de gerar um roteamento por caminho mais curto, ou baseado, por exemplo, na perda de pacotes.

Os processamentos de início da comunicação ou atualização com outros nós

Figura 6 – Exemplo de cálculo da tabela de roteamento.



Fonte: (OPEN-MESH.ORG, 2013)

sempre são realizados com adaptações quanto aos intervalos de tempo de comunicação, que a depender do dispositivo executado, pode ser configurado para economia de energia/processamento ou aumento de sua eficiência. Tal processo de adaptação permite uma execução em dispositivos com diferentes características quanto à disponibilidade ou custo de energia, isso permite a construção de redes heterogêneas perfeitamente sustentáveis, contendo diversos modelos de equipamentos com as mais variadas especificações. O protocolo também apresenta características de roteamento híbrido, para permitir a geração de rotas em diferentes protocolos da camada de redes (IPv4 e IPv6).

Apesar do protocolo Babel ser voltado para WMNs, também pode ser usado para redes cabeadas comuns (CHROBOCZEK, Juliusz, 2011), mas com algumas ressalvas, já que por depender de atualizações constantes da sua tabela de roteamento, pode gerar tráfego excessivo em redes mais estáveis, sem muitas mudanças de topologia por conta de mobilidade de nós, principalmente se comparado com protocolos mais tradicionais voltados a esse tipo de rede, por existir uma confiança maior nas rotas fixas.

Dessa forma, o protocolo ainda apresenta algumas limitações, como a geração de tráfego para constante atualização das tabelas de roteamento, ao contrário de outros protocolos como *OSPF* e *IS-IS*, que apenas geram atualizações quando ocorrem mudanças na topologia. Outra limitação presente é o tempo de espera para um participante reconectado a rede, que apesar de não influenciar no tempo de convergência,

que continua sendo rápido no momento da saída de um participante, quando um nó se desconecta e reconecta rapidamente à rede, é necessário uma espera (por volta de alguns minutos) para que ele seja reconhecido novamente, podendo se tornar uma limitação em redes móveis com inclusão automática de nós.

3 TRABALHOS CORRELATOS

Os trabalhos correlatos identificados, foram todos selecionados por meio de uma pesquisa bibliográfica abrangente, realizada e documentada através de um Protocolo de Revisão Sistemática da Literatura (Apêndice A), por meio da qual foi idealizada uma string de busca ligada ao tema de estudo, a qual foi aplicada dentro de 5 bases de dados (IEEE, ACM, Wiley, Springer, Elsevier). Foram identificados um total de 426 estudos, que após a exclusão por título e abstract, leitura integral dos textos e por fim a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão definidos, foram selecionados 7 estudos, que foram somados a mais um último estudo trazido por sugestão de pesquisadores da área, sendo esse último publicado após a realização do Protocolo de Revisão Sistemática da Literatura (Apêndice A). Os artigos identificados, para maior esclarecimento, foram classificados como estudos sobre os mecanismos de incentivos, e estudos comparativos relacionados à eficiência dos protocolos. Ao final da seção é exibida uma tabela comparativa dos trabalhos correlatos em relação à proposta desenvolvida (Tabela 1).

3.1 MECANISMOS DE INCENTIVO ASSOCIADOS A WMNS

O trabalho de (BAIG *et al.*, 2016) busca explorar alternativas viáveis e sustentáveis de acesso a rede que não envolvam as tradicionais empresas privadas, e que mesmo assim, sejam capazes de criar um ambiente sustentável economicamente, que garanta a devida manutenção e crescimento necessários à rede. Dentro das possíveis alternativas que atendam a tais necessidades, o trabalho foca nas redes comunitárias, mais especificamente na maior rede comunitária do mundo denominada *Guifi.net*. O trabalho busca entender como essa *WMN* consegue atrelar incentivos econômicos à rede, aliados a uma infraestrutura, implementação e práticas, que garantem a sustentabilidade da mesma. O estudo de caso mostra muitos benefícios vindos da associação de *WMNs* a mecanismos de incentivo, associação e benefícios também aplicáveis ao presente trabalho. O autor do trabalho (BAIG *et al.*, 2016) não utiliza um protocolo alterado especificamente para rodar na camada de rede, e também não realiza testes comparativos com protocolos tradicionais para *WMNs* como o Babel.

A análise feita é tanto quantitativa quanto qualitativa da rede *Guifi.net*, mostrando a abordagem adotada no projeto e seus diferenciais como:

- A sua estrutura de rede, que estimula a cooperação dos participantes; à sua estrutura econômica, que apesar de ser realizada manualmente, cria garantias aos fornecedores do serviço e também uma dependência que alimenta a sustentabilidade da mesma;
- A sua estrutura de colaboradores, que são incentivados a trabalhar na manutenção e crescimento da rede sem que haja monopólio sobre os serviços

cobrados;

- A sua estrutura de clientes, que buscam garantir o melhor serviço possível para suas respectivas necessidades, dentro de um preço justo, regulado pela livre concorrência de mercado;
- Por fim a manutenção dos princípios básicos das redes comunitárias, sendo essas sempre abertas (quanto ao projeto de infraestrutura/implementação), livres (todos tendo acesso sem qualquer discriminação) e neutras (disponíveis para serem estendidas e usadas para qualquer princípio inclusive o comercial, que também permite sustentar a própria rede).

Os desafios encontrados para a construção, manutenção e utilização das WMNs, influenciam diretamente na garantia de cooperação entre todos os participantes, a fim de fornecerem e consumirem os serviços dispostos. A garantia está justamente relacionada, segundo o trabalho de (SAN MIGUEL *et al.*, 2019), a maneiras de precificar a rede, garantindo que os colaboradores responsáveis pela infraestrutura da rede recebam um incentivo pelo seu esforço e trabalho, assim como os usuários da rede contribuam para que a rede continue a crescer em alcance, estabilidade e qualidade. Em busca da união destes pontos, o estudo propõe um novo protocolo capaz de garantir que um sistema econômico seja sustentável dentro das redes WMNs, e os usuários da rede contribuam financeiramente para que os provedores do serviço recebam, baseado na quantidade de dispositivos e conseqüentemente no tráfego gerado pelos mesmos, uma quantia em créditos como remuneração.

O trabalho usa a MeshDapp (SAN MIGUEL *et al.*, 2019), uma plataforma local de blockchain em redes mesh, para implementação do modelo, garantindo ao sistema econômico implantado, total transparência, descentralização e confiança de dados. O protocolo proposto, chamado de *Fair* pelo autor, busca garantir o gerenciamento econômico da rede de forma automatizada, ao contrário do trabalho proposto por (SELIMI *et al.*, 2018), que aborda a utilização de acertos financeiros realizados manualmente. A idéia principal do protocolo (SAN MIGUEL *et al.*, 2019) é baseada em quanto mais dispositivos um provedor de serviços possui na rede, maior será o preço por MB destinado ao mesmo, até um certo limite estipulado para se evitar o monopólio da rede, levando um provedor a ser dono de todos os nós e criando possíveis desvantagens aos usuários. São realizadas então simulações que mostram um crescimento controlado e distribuído entre todos os provedores de serviço da rede, quando comparado ao crescimento descontrolado e possível monopólio da rede quando não se colocam limites ou métricas. Entretanto o trabalho não realiza testes diretamente implementados em um protocolo de rede, assim como nenhuma comparação é feita com protocolos tradicionais hoje existentes.

Ainda dentro dos desafios encontrados para construção, manutenção e utilização das WMNs, o trabalho de (TREMBACK, 2020) cita o problema de *Last Mile* (última

milha), mostrando as dificuldades de levar conexão de rede a pontos longínquos das grandes cidades. Locais que por motivos econômicos, de infraestrutura, e logística, as grandes operadoras e ISPs não tem interesse em levar seus serviços para a região, impossibilitando o acesso a conexões estáveis para a área ou deixando os serviços nas mãos de apenas um provedor, sem a existência de uma livre concorrência que acaba sustentando o monopólio criado. Dessa forma, a fim de criar um ambiente de conexão com baixo custo operacional, que entregue uma largura de banda satisfatória, o estudo propõe uma arquitetura de redes denominada *Althea*. A arquitetura além de estável, é capaz de eliminar os tradicionais contratos manuais, acabando com a necessidade de trocas comerciais e anúncios do serviço, por existir um incentivo relacionado ao crescimento do mesmo.

A arquitetura de rede *Althea* é baseada em protocolos de roteamento vetor-distância, mais especificamente uma extensão do protocolo Babel, com a utilização de criptomoedas do Ethereum. A fim de sustentar seu sistema de pagamento automatizado, utiliza uma blockchain baseada em *PoS (Proof of Stake)*, através da plataforma Cosmos.

A rede *Althea* é composta por 4 tipos de nós que não dependem de serviços de ISPs, sendo eles:

- Os nós usuários, consumidor dos serviços;
- Nós de retransmissão, fornecendo e estendendo o tráfego e funcionalidades da rede, também podendo se comportar como usuários do serviço;
- Nós gateway, considerados nós de retransmissão, mas que estão conectados a fontes de acesso para a rede mundial de Internet, como *PTTs* (Pontos de Troca de Tráfego), backbones, ou até mesmo conectados a ISPs tradicionais;
- Por fim os nós de saída, responsáveis por verificar a qualidade das métricas adotadas pelos nós da rede;

O trabalho abordado especifica modificações no protocolo Babel incluindo mecanismos para estimular o crescimento e manutenção da rede, mas não apresenta testes de desempenho e comparações com a forma original do protocolo Babel nem compara com outros protocolos atualmente focados em WMNs.

Outro estudo sobre os mecanismos de incentivo dentro de WMNs é citado por (SELIMI *et al.*, 2018), o trabalho discute sobre os desafios encontrados dentro das WMNs para garantir não apenas a neutralidade e acessibilidade da rede, características chaves das WMNs, como também estabelecer uma estrutura de recompensa econômica confiável aos participantes. Isso incentiva a melhora dos serviços ou ao menos paga os custos de sua utilização, atrelando a isso, a inclusão de mecanismos eficientes de identidade aos nós, que garantem aos participantes a correta identificação

e registro, para o caso de usos maliciosos da rede.

Tendo como foco garantir transações financeiras, confiança entre os participantes, imutabilidade dos dados e neutralidade no gerenciamento dos mesmos, o artigo adota a tecnologia Blockchain como solução vinculada às WMNs, usando mais especificamente a estrutura de Blockchains permissionadas, as quais aliam os benefícios já citados da Blockchain a mecanismos de identidade e confiança sobre os usuários. O framework mais popularmente adotado, e também escolhido pelo artigo para implementação e testes, é o *HLF* (Hyperledger Fabric) (ANDROULAKI *et al.*, 2018), projeto sustentado pela Linux Foundation, que é avaliado tanto em ambiente de produção quanto em ambientes de testes simulados em laboratório.

As avaliações realizadas não apenas quantificam o desempenho do framework, em termos de latência, utilização da CPU, memórias e componentes, como também identificam gargalos e limitações da implementação, propondo oportunidades de melhorias a serem consideradas para ambientes de WMNs, através do posicionamento eficiente dos componentes associados ao framework Hyperledger Fabric.

Por fim, o estudo de (SINGH; KIM, 2018) aborda dois problemas encontrados nas redes ad hoc multi-canais, quando em ambientes de produção, onde o gerenciamento dos diversos canais ortogonais torna-se mais complexo. Tanto pela dificuldade na correta atribuição de canais de rádio às suas respectivas interfaces, tentando-se alinhar a estabilidade de conectividade da rede ao máximo aproveitamento dos diferentes canais, quanto pelas diversas interferências a que estes canais estão sujeitos, que reduzem a eficiência da rede.

O artigo realiza uma análise da importância de mecanismos cognitivos relacionados ao contexto da rede associados a utilização de canais híbridos, a fim de identificar possíveis interferências externas e possibilitar a sustentabilidade da conexão. Tais mecanismos são utilizados como base para a proposta de uma rede ad hoc multi-canais associada a utilização de canais híbridos, na qual é aplicado um algoritmo de controle de taxa justo. O algoritmo é responsável por precificar cada canal de acordo com a disponibilidade do mesmo, como forma de incentivo, garantindo uma rápida convergência em simulações feitas.

3.2 DESEMPENHO PARA PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM WMNS

Um dos comparativos existentes, envolvendo protocolos de roteamento voltados para WMNs, é discutido no trabalho de (PIECHOWIAK *et al.*, 2016), sobre diversos protocolos de roteamento para redes mesh existentes, colocando em testes os 5 mais citados pela literatura (*AODV*, *DYMO*, *HWMP*, *OLSR*, *BATMAN*). O trabalho busca avaliar a eficiência dos mesmos para ambientes de WMNs.

Dentro da análise comparativa realizada pelo estudo, foram identificados inicialmente 17 protocolos de roteamento voltados para WMNs, segundo a pesquisa

realizada na literatura, e todos colocados em ordem decrescente segundo o número de citações existentes para cada um, como forma de identificar os mais fomentados pela comunidade. Dentre os 5 mais citados, para a realização de diversos testes em simuladores, a fim de analisar e comparar os protocolos dentro de 4 aspectos: taxa de perda de pacotes, tempo de atraso na entrega de pacotes, consumo médio de energia de todos os nós da rede e por fim o número de colisões ocorridos na rede.

Através da comparação feita entre protocolos proativos e reativos, é possível identificar que os protocolos proativos, apesar do alto overhead de dados e maior consumo de energia, apresentam baixa latência na entrega de pacotes e baixa taxa de perda de pacotes, o que é considerado extremamente positivo para WMNs.

O trabalho de (BANO *et al.*, 2021) busca solucionar parte dos desafios encontrados em WMNs, como escalabilidade, mobilidade dos nós, confiabilidade na operação da rede e falhas de link causadas por conta do ambiente onde os nós operam.

Através de modificações técnicas feitas na configuração e implementação da rede, o autor busca agregar funcionalidades da arquitetura *SDN* (*Software Defined Networking*), realizando uma rede híbrida e interoperável, ligada às WMNs, denominada de *Soft-Mesh*. A arquitetura *SDN*, e conseqüentemente seus nós, incrementam várias melhorias para diversas funcionalidades de rede, como roteamento, balanceamento de carga, controle de rede e engenharia de tráfego para redes híbridas *SDN* e IP.

As novas alterações feitas sobre a arquitetura *SDN*, modificam o modo como os nós conversam, não necessitando que os tradicionais protocolos façam o roteamento dos pacotes através de roteadores ou switches. Todo gerenciamento dos pacotes é feita por meio de software implementado em cada participante da rede, mas sempre possibilitando que o nó coexista na rede e funcione com outros nós de arquiteturas diferentes.

A interoperabilidade permite que os testes realizados e as comparações feitas pudessem ser executados juntamente com os protocolos tradicionais como *OLSR* e *BATMAN*, a arquitetura proposta pelo autor (*Soft-Mesh*) supera o desempenho dos protocolos já conhecidos, quanto analisada a taxa de transferência UDP média, o atraso ponto-a-ponto na entrega dos pacotes e a taxa de perda/sucesso na entrega de pacotes.

Por fim o artigo de (TCHINDA *et al.*, 2017) busca medir o desempenho de três protocolos de roteamento focados para WMNs (*HWMP*, *B.A.T.M.A.N advanced* e *Babel*), em ambientes de recuperação da rede, ocasionados por possíveis desastres naturais, aos quais os nós da rede precisam responder rapidamente e de maneira coordenada para o reestabelecimento da mesma. Para o ambiente de teste realizado em laboratório, foram considerados três cenários diferentes de rede, o primeiro para redes estáticas, o segundo para redes dinâmicas, e o terceiro para grandes redes

compostas de até cem roteadores.

O estudo mostra uma análise dos três protocolos citados quanto à qualidade do link, o gerenciamento para caminho de rota sobrecarregada, ou quando existem perdas ou entradas de roteadores na rede. Dentro do primeiro cenário ambos HWMP e B.A.T.M.A.N Advanced se destacaram com desempenho similar, enquanto que para o segundo cenário apenas o HWMP mostrou-se eficiente em lidar com os processos dinâmicos. Já para o terceiro cenário nenhum dos protocolos demonstraram eficiência para lidar com grandes redes, exceto o Babel que pela sua versatilidade, permite a mudança de diversos parâmetros para permitir a execução voltada para grandes ambientes. O trabalho então propõe uma nova arquitetura de rede voltada para grandes redes, conseguindo assim mitigar diversos problemas encontrados em grandes ambientes, com vários nós participando da rede.

3.3 COMPARATIVO DOS ESTUDOS CORRELATOS E PROPOSTA

A tabela a seguir mostra um resumo dos trabalhos correlatos, em comparação com a proposta do estudo, indicando as possíveis lacunas a serem preenchidas.

Tabela 1 – Comparativo de Trabalhos Correlatos.

Trabalho	Mecanismo de Incentivo	Protocolo Babel/BATMAN	Testes virtuais e/ou reais	Grupo de Comparação
(BAIG <i>et al.</i> , 2016)	○			
(SAN MIGUEL <i>et al.</i> , 2019)	○			
(TREMBACK, 2020)	○	○		
(SELIMI <i>et al.</i> , 2018)	○		○	
(SINGH; KIM, 2018)	○			
(PIECHOWIAK <i>et al.</i> , 2016)		○	○	○
(BANO <i>et al.</i> , 2021)		○	○	○
(TCHINDA <i>et al.</i> , 2017)		○	○	○
PROPOSTA	○	○	○	○

Fonte: Autor

A primeira coluna da tabela indica os trabalhos correlatos, com suas respectivas referências, incluindo a proposta desta dissertação na última linha da tabela, todos

eles diretamente relacionados ao tema de WMNs. A segunda coluna identifica os trabalhos que adicionaram mecanismos de incentivo financeiro aos modelos propostos, como forma de sustentabilidade da rede. A terceira coluna indica os trabalhos que incluíram/abordaram os protocolos Babel e/ou BATMAN em sua análise. A quarta coluna indica os trabalhos que realizaram testes virtuais e/ou reais sobre os modelos propostos como solução. E por fim a quinta e última coluna indica os trabalhos que após a realização de testes, mostraram comparações claras com outras soluções pertencentes ao mesmo grupo/categoria da proposta de estudo.

Através da tabela, é possível identificar que o trabalho proposto visa incluir diversos pontos que não foram abordados pelos trabalhos relacionados apresentados. A maior parte dos trabalhos incluem a aplicação de mecanismos de incentivo para WMNs ((BAIG *et al.*, 2016; SAN MIGUEL *et al.*, 2019; TREMBACK, 2020; SELIMI *et al.*, 2018; SINGH; KIM, 2018)), mas destes apenas um propõe alterações no protocolo (SAN MIGUEL *et al.*, 2019), criando para isso um novo modelo de protocolo usado a nível da camada de enlace. Mas não inclui testes com o modelo proposto, e também não mostra comparações com protocolos tradicionais hoje existentes.

Outros três trabalhos ((PIECHOWIAK *et al.*, 2016; BANO *et al.*, 2021; TCHINDA *et al.*, 2017)) mostram comparações entre protocolos voltados para WMNs e também novas arquiteturas que buscam mitigar problemas e desafios encontrados nas WMNs, o primeiro evidenciando a eficiência dos protocolos proativos no ambiente de WMNs, o segundo propondo alterações na arquitetura SDN para aliar funções da camada de redes, e por fim o terceiro que busca colocar o protocolo Babel em destaque para ambientes de grandes redes que sofreram algum tipo de desastre. Todos acabam não aliando nenhum tipo de mecanismo de incentivo aos protocolos mencionados. Dessa forma, este trabalho busca aliar mecanismos de incentivo ao protocolo Babel, propondo a utilização deste com as redes WMNs, agregando benefícios trazidos pela incorporação de incentivos à rede, demonstrados nos trabalhos correlatos.

4 UMA EXTENSÃO DO PROTOCOLO BABEL

Neste capítulo são apresentadas as alterações realizadas no protocolo Babel, associando mecanismos que adicionam um custo operacional para cada nó. As alterações foram divididas em duas etapas, a primeira define as mudanças feitas na métrica de roteamento, e a segunda etapa define as mudanças feitas na troca de mensagens do Babel. Também foi incluído no capítulo os ambientes de testes e detalhes de execução dos mesmos. Ao final é apresentada uma análise dos testes realizados, assim como comparações entre a execução do protocolo original e a execução do protocolo modificado.

A proposta de solução deste trabalho baseia-se na inclusão de métricas de custo econômico para o cálculo de seleção de rotas *ETX* (*Expected Transmission Cost*), utilizando para isso um valor de custo fixo a ser atribuído para cada nó da rede, denominado *tocost* (*transmission operational cost*), que será repassado aos vizinhos por meio de um pacote TLV, no momento em que ocorrerem as troca de mensagens *IHU*.

Dentro de cada pacote TLV usado, do tipo *IHU*, será adicionada uma nova Sub-TLV denominada *OC* (*Operational Cost*), que será responsável por transportar o valor *tocost* de seu nó de origem para todos os vizinhos, a fim de que o custo dos links esteja coerente entre todos os nós da rede.

O valor *tocost* atribuído a cada participante, como representa o custo de operação que cada nó tem para o encaminhamento dos pacotes, será determinado pelo próprio usuário ou responsável do host pertencente à rede, e podem ser representados por alguma moeda ou token a serem livremente escolhidos conforme a necessidade dos participantes. Dependendo do local onde o nó se encontra e dos custos envolvidos, considerando hardware, manutenção, energia, e outros gastos, o valor de operação do nó em uma rede real sempre irá variar, por isso o custo é estipulado através de um número do tipo *unsigned short int*, que é estipulado durante a inicialização do nó.

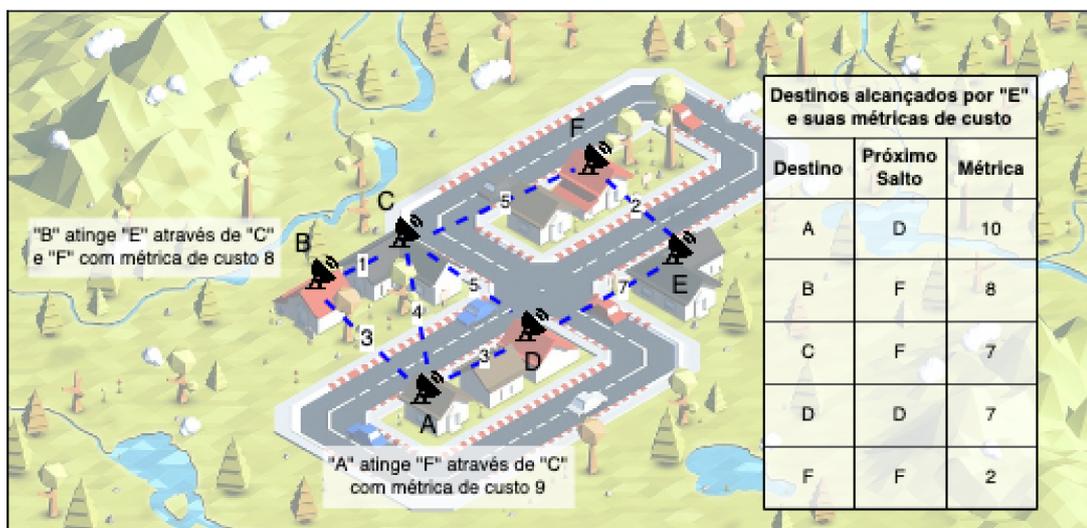
4.1 MÉTRICA DE ROTEAMENTO

Como muitos algoritmos de roteamento, o Babel calcula os custos dos links, interpretados como um valor abstrato que fica ligado às arestas entre dois nós da rede (Figura 7). Portanto, dados dois nós na rede, a métrica relacionada à comunicação dos mesmos se dá pela soma dos custos de todas as arestas que compõem o caminho entre os mesmos.

O objetivo do algoritmo é calcular, para cada nó origem da rede, a sua árvore de menor custo para chegar aos outros participantes da rede, atualizando assim a sua tabela de rotas (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021a).

Os custos associados a cada rota presente na tabela de rotas pode ser adaptado

Figura 7 – Métrica de custo em ambiente real.



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

de acordo com as necessidades do ambiente, mas sempre mantendo a estrutura base de cálculo, que utiliza os vizinhos para mensurar o custo de cada caminho. A métrica utilizada pelo protocolo baseia-se em valores mantidos na tabela de vizinhos em relação ao recebimento de *Hello*s, e o *txcost* calculado no próprio nó, a partir dos pacotes *IHU* recebidos.

Dentro das atividades feitas por cada vizinho, está a responsabilidade de calcular o valor conhecido como *rxcost*. Esse valor é gerado do histórico de *Hello*s recebidos de um nó, e combinado com outros dados, como estatísticas mantidas pelo link referentes à conexão com aquele mesmo nó. O *rxcost* depois de definido é então enviado ao nó de origem das mensagens *Hello*, usando para isso as TLVs *IHU*, um importante pacote de mensagem que também foi usado para transportar a nova variável de custo *tocost*, incluída neste trabalho.

A métrica de roteamento adotada no trabalho utiliza a base do algoritmo ETX acrescido da variável de custo denominada *tocost*, levando cada nó da rede a calcular o custo de um link baseado em quatro fatores:

1. o custo *rxcost* de recebimento de pacotes calculado pelo próprio nó;
2. o custo de transmissão *txcost* informado pelo vizinho;
3. o custo de atraso RTT (*round-trip time*) estimado para o link, inicialmente não presente no algoritmo ETX, mas adicionado pelo próprio time responsável pelo Babel para identificar as redes de melhor qualidade (JONGLEZ; CHROBOCZEK, J., 2019);
4. o custo operacional de transmissão *tocost* representando o mecanismo de incentivo proposto pelo trabalho.

A métrica utilizada baseia-se na somatória de cada variável de custo, permitindo a combinação das estratégias, sem que as regras básicas do protocolo Babel deixem de ser atendidas. A fim de evitar possíveis formações de *loops* nos caminhos de rotas e mantém assim a integridade da rede. As regras básicas do protocolo, consideradas para qualquer alteração realizada e sua métrica, baseiam-se em três requisitos imutáveis e essenciais para o funcionamento do protocolo (JONGLEZ; CHROBOCZEK, J., 2019). Partindo de uma função $M(c, m)$, que representa a métrica de custo do Babel, considerando c como o cálculo de custo local do link, ou seja, computado pelo próprio nó, e m como o custo computado e anunciado pelo vizinho para o mesmo link, pelo menos as seguintes regras obrigatoriamente precisam ser cumpridas:

- Se c é infinito, então $M(c,m)$ também é infinito.
- M é estritamente monotônico: $M(c,m) > m$.
- M Atende a propriedade distributiva à esquerda: se $m \leq m'$ então $M(c, m) \leq M(c, m')$.

A regra para manter a propriedade distributiva à esquerda é importante pois garante que o melhor caminho global será encontrado para as rotas, ou o mais próximo do que seria o caminho ótimo, pois em alguns momentos a rota perfeita pode não existir. Já a regra para ser estritamente monotônico é a principal responsável por evitar a formação de loops de roteamento, sendo necessária a sua satisfação para garantir a integridade da rede.

As condições básicas citadas podem ser facilmente atendidas utilizando métricas aditivas, recomendadas como padrão para uma grande variedade de cálculos de custos segundo a própria RFC publicada para o Babel (JONGLEZ; CHROBOCZEK, J., 2019). Todas as modificações realizadas no código buscaram atender tais condições, principalmente as alterações realizadas dentro do cálculo final do algoritmo ETX.

As modificações realizadas através das métricas aditivas, para inclusão da variável *tcost*, além de outras alterações feitas no código, foram todas implementadas utilizando a linguagem C pura sobre a versão 1.10 do *babeld*, com todos os códigos fontes publicamente disponibilizados (CARVALHO, 2021). Tanto para alteração quanto para a compilação dos arquivos, utilizando para isso os comandos disponíveis no próprio arquivo *Makefile* do projeto.

Require: Um objeto "Vizinho"

Ensure: Um inteiro não negativo, indicando o custo para enviar pacotes através do link com o "vizinho" informado.

```
if txcost ≥ infinity OR rxcost ≥ infinity then
```

```
    return infinity
```

```
end if
```

```
if txcost ≥ 256 OR rxcost ≥ 256 then
```

```
cost ← txcost
else
  cost ← 256/(alpha * beta)
  cost ← cost + rttcost
  cost ← cost + tocost
end if
```

Dentro do Babel, as variáveis utilizadas no cálculo de custo pela métrica ETX sempre buscam considerar a estimativa de qualidade do link QoS, pois em conexões sem fio a variação contínua da qualidade de cada link é um fator de grande influência na estabilidade da rede. Dessa forma a estimativa QoS feita pelo algoritmo usa o histórico de envios Multicast do tipo Hello, feitos por um vizinho, calculando assim uma estimativa *beta*, representando a probabilidade de que uma TLV Hello seja recebida com sucesso. Esse valor é então utilizado como base para o cálculo da variável *rxcost* que é atribuída pelo valor $256/beta$ (Figura 8).

Figura 8 – Cálculo da métrica de custo.

```
338 unsigned
339 neighbour_cost(struct neighbour *neigh)
340 {
341     unsigned a, b, cost;
342
343     if(!if_up(neigh->ifp))
344         return INFINITY;
345
346     a = neighbour_txcost(neigh);
347
348     if(a >= INFINITY)
349         return INFINITY;
350
351     b = neighbour_rxcost(neigh);
352     if(b >= INFINITY)
353         return INFINITY;
354
355     if(!(neigh->ifp->flags & IF_LQ) || (a < 256 && b < 256)) {
356         cost = a;
357     } else {
358         /* a = 256/alpha, b = 256/beta, where alpha and beta are the expected
359          * probabilities of a packet getting through in the direct and reverse
360          * directions. */
361         a = MAX(a, 256);
362         b = MAX(b, 256);
363         /* 1/(alpha * beta), which is just plain ETX. */
364         /* Since a and b are capped to 16 bits, overflow is impossible. */
365         cost = (a * b + 128) >> 8;
366     }
367
368     cost += neighbour_rttcost(neigh);
369
370     cost += neighbour_tocost(neigh);
371
372     return MIN(cost, INFINITY);
373 }
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

A estimativa *beta* pode ser calculada de diversas formas de acordo com o contexto da rede, como por exemplo a fração de 1 bit dentro de um pequeno número das entradas mais recentes no histórico do Multicast Hello, ou pode ser uma média exponencial ou alguma combinação de ambas as abordagens. O algoritmo então faz

o cálculo de *alpha*, considerando a estimativa vinda da probabilidade de sucesso no envio de pacotes TLV Hello. Esse valor é calculado utilizando a variável *txcost*, assim, a atribuição da variável *alpha* é dada pelo valor $MIN(1, 256/txcost)$.

Tanto a variável *txcost* quanto a variável *rxcost* são ajustadas para nunca extrapolarem o valor *infinity* delimitado pelo valor máximo que o tipo *unsigned short* é capaz de alcançar, verificando se o cálculo de qualquer um dos valores está dentro do limite estipulado, caso contrário o protocolo então retorna o próprio valor *infinity* como resultado da métrica de custo para o respectivo vizinho (Figura 8 - linha 349).

A inclusão do novo parâmetro *tocost* pode ser feita tanto pelo devido responsável pela rede, quanto pelo próprio usuário final da rede, desde que esse tenha acesso e seja responsável pela área administrativa e de configuração do(s) seu(s) respectivo(s) dispositivo(s).

O layout para inclusão e/ou mudança do custo operacional, considerando um ambiente real, pode estar vinculado a uma tela de configuração de rede do nó, que é acessível pelo respectivo administrador, mas para efeito de testes, a inclusão do parâmetro *tocost* foi realizada através da modificação do arquivo *babeld.c*, onde foi incluída a nova opção de parâmetro definido pela letra Y (Figura 9 - linha 299). O novo parâmetro é considerado como opcional, para permitir a retrocompatibilidade do protocolo com redes antigas, além de permitir que cada componente da rede tenha a liberdade de escolha, possibilitando incluir ou não o custo operacional na somatória de sua métrica.

Figura 9 – Novo parâmetro execução do Babel.

```
299     case 'Y':
300         default_router_operacional_cost = parse_nat(optarg);
301         if(default_router_operacional_cost <= 0)
302             goto usage;
303         break;
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

A variável de custo *tocost*, depois de identificada por meio do parâmetro "Y", é então armazenada como uma variável global (Figura 9 - linha 300). A fim de que o parâmetro inserido seja considerado válido, as regras básicas requeridas pelo protocolo Babel, segundo as normas definidas pela própria RFC nos cálculos da métrica de custo (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021b), estipulam a necessidade do valor informado ser um inteiro curto (de 2 bytes) e não negativo (Figura 9 - linhas 300 e 301). O valor inteiro e não negativo garante que o custo não tenha valores fracionados, e não influencie no desbalanceamento de outras variáveis incluídas, que poderiam gerar inclusive métricas negativas, situação que apesar de permitida pelo algoritmo de Bellman-Ford, dentro das WMNs poderia gerar Loops de roteamento, portanto levando a métrica ETX a não considerar valores de custo negativo.

Devido à estrutura modular do protocolo Babel, é possível utilizar diferentes técnicas ou algoritmos para a política de seleção de rotas. Independente da técnica adotada, em todas elas existe a possibilidade de se utilizar a métrica de custo operacional OC, desde que obedecidos os princípios básicos especificados para funcionamento do protocolo. Assim, evitando a criação de *loops* nos caminhos de roteamento e problemas de *starvation* associados à alteração das condições de sustentabilidade da rede.

4.2 TROCA DE MENSAGENS

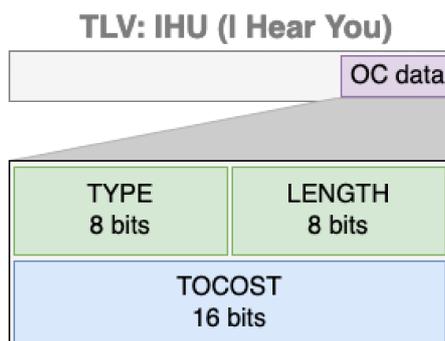
O gerenciamento realizado pelo protocolo Babel, para organização e execução das funções de roteamento dentro da camada de rede, é realizado por troca de mensagens entre os participantes da rede. Cada elemento da rede possui um único *Id*-roteador formado por uma string de 8 bytes, que o identifica unicamente dentro de um mesmo domínio, e são geralmente atribuídos por meio do processo EUI-64 utilizando endereçamento IPv6.

A transmissão de mensagens ocorre por meio de pacotes enviados utilizando datagramas UDP, compostos de um cabeçalho formado por 4 octetos e seguido de um ou mais TLVs, os quais são enviados de um endereço unicast para outro endereço unicast ou multicast (exceto mensagens de identificação e de início da comunicação Hello).

A fim de transmitir a nova variável de custo *tocost*, foi adicionada uma sub-TLV denominada OC (*Operational Cost*) ao final da já existente e padronizada TLV IHU. A estrutura modular do protocolo Babel permite a inclusão de novas sub-TLVs, desde que estejam no mesmo contexto da TLV pai. Tanto a sub-TLV OC quanto a TLV IHU são responsáveis por informar o custo e qualidade dos links aos vizinhos. Elas juntas permitem otimizar a detecção de mudanças na topologia e diminuir o overhead causado na rede, não sendo necessária a criação de uma nova TLV.

A sub-TLV OC possui o tamanho de 32 bits, que serão acrescentados ao final da mensagem IHU, dos quais os 16 bits iniciais compõem a sua estrutura de cabeçalho, já o restante dos 16 bits são usados para armazenar a variável de custo *tocost* (Figura 10). O cabeçalho de 16 bits possui valores fixos associados à estrutura da sub-TLV OC, sendo os 8 primeiros bits usados para definir seu tipo, fixado no código pelo valor 4 que é o *Id* da sub-TLV OC, e os 8 bits restantes para o tamanho, ao qual é atribuído o valor 16, referente ao tipo *unsigned short int* do *tocost* incluído no corpo da mensagem.

A sub-TLV também possui o bit mais significativo da sua tipagem definido como zero, sendo portanto considerado como um bit não mandatório. Os dados inseridos na estrutura podem ser ignorados caso um nó da rede não saiba reconhecê-los, sem interferir entretanto, na leitura do restante da TLV, mantendo assim a compatibilidade com versões anteriores do protocolo Babel.

Figura 10 – Formato da sub-TLV OC (*Operational Cost*).

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

4.2.1 Construção da Mensagem

A construção da mensagem TLV IHU, para ser enviada como resposta aos vizinhos, é iniciada por uma chamada de função (Figura 11 - linha 1749), que recebe na forma de objeto o vizinho a ser respondido e sua respectiva interface, dentro da função também são declarados todos os dados que farão parte da mensagem e que serão repassados à função buffer, responsável por montar cada pedaço da TLV, incluindo já nas declarações a nova variável de custo *tocost* no formato de inteiro (Figura 11 - linha 1751), para utilizar o respectivo custo operacional na construção da mensagem.

Figura 11 – Início de construção da TLV IHU.

```
1748 void
1749 send_ihu(struct neighbour *neigh, struct interface *ifp)
1750 {
1751     int rxcost, tocost, interval;
1752     int send_rtt_data;
1753     int unicast;
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

A atribuição de cada variável que é inserida na mensagem IHU é feita por meio de cálculos utilizando fatores da rede e do nó atual, como o intervalo de mensagens *Hello* recebidas, a latência *RTT* e o custo *rxcost* definido pelo próprio nó a respeito do link. Após cada cálculo necessário ser realizado, a variável *tocost* também é atribuída com o valor definido para o custo operacional do respectivo nó (Figura 12 - linha 1814), que foi informado nos parâmetros de chamada do Babel. Então todos os dados a serem inseridos na mensagem são repassados para a função de montagem da mensagem IHU (Figura 12 - linha 1816).

Finalizado o cálculo de todas as informações que serão inseridas na mensagem IHU, a etapa de montagem é iniciada primeiramente pela inclusão do cabeçalho, que também armazenará o tamanho total da mensagem (Figura 13 - linhas 1721 à 1724). O tamanho da mensagem IHU pode variar conforme a presença ou não de cada sub-TLV,

Figura 12 – Definição do *tocost*.

```
1814     tocost = default_router_operacional_cost;
1815
1816     buffer_ihu(unicast ? &neigh->buf : &ifp->buf,
1817               ifp, rxcost, tocost, interval, neigh->address,
1818               send_rtt_data, neigh->hello_send_us,
1819               time_us(neigh->hello_rtt_receive_time));
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

e considerando que a sub-TLV de custo operacional é opcional, pelo dígito mais significativo de sua tipagem ser definido como não mandatório, o protocolo primeiro verifica a existência do parâmetro *tocost* (Figura 13 - linha 1722), para verificar a necessidade de inclusão da sub-TLV. Caso exista, é adicionado ao tamanho da mensagem o valor 4, referente aos 2 bytes do campo responsável por indicar o tamanho e 2 bytes da área dos dados, usada para a inclusão do valor da variável *tocost* no corpo da mensagem.

Figura 13 – Montagem da mensagem IHU.

```
1714 void
1715 buffer_ihu(struct buffered *buf, struct interface *ifp, unsigned short rxcost, unsigned short tocost,
1716           unsigned short interval, const unsigned char *address,
1717           int rtt_data, unsigned int t1, unsigned int t2)
1718 {
1719     int msglen, ll;
1720
1721     ll = linklocal(address);
1722     msglen = (ll ? 14 : 22) + (rtt_data ? 10 : 0) + (tocost ? 4 : 0);
1723
1724     start_message(buf, ifp, MESSAGE_IHU, msglen);
1725     accumulate_byte(buf, ll ? 3 : 2);
1726     accumulate_byte(buf, 0);
1727     accumulate_short(buf, rxcost);
1728     accumulate_short(buf, interval);
1729     if(ll)
1730         accumulate_bytes(buf, address + 8, 8);
1731     else
1732         accumulate_bytes(buf, address, 16);
1733     if(rtt_data) {
1734         accumulate_byte(buf, SUBTLV_TIMESTAMP);
1735         accumulate_byte(buf, 8);
1736         accumulate_int(buf, t1);
1737         accumulate_int(buf, t2);
1738     }
1739     if(tocost) {
1740         accumulate_byte(buf, SUBTLV_OPERATIONAL_COST);
1741         accumulate_byte(buf, 2);
1742         accumulate_short(buf, tocost);
1743     }
1744     end_message(buf, MESSAGE_IHU, msglen);
1745 }
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Depois do cabeçalho ser definido, o restante da mensagem vai sendo composta pela diversas concatenações; primeiramente dos dados obrigatórios, que toda mensagem IHU precisa carregar como resposta aos vizinhos; logo em seguida pelo endereço do nó vizinho que receberá a mensagem; e posteriormente dos dados opcionais, que independentemente da presença dos mesmos, a mensagem será considerada válida pelo interpretador do nó receptor durante a leitura de conteúdo do pacote. Os dados obrigatórios de um pacote TLV IHU (Figura 13 - linhas 1725 à 1728) inclui a variável *rxcost*, que é essencial para o cálculo da métrica de custo pelo nó que receberá a

mensagem, e a variável *interval*, responsável por indicar o intervalo de tempo entre mensagens Hello recebidas, para que o nó vizinho seja informado e use o valor para calcular a qualidade do caminho existente.

Os dados opcionais da mensagem IHU (Figura 13 - linhas 1729 à 1743) são anexados ao corpo final da estrutura, neles são inseridos a lista de sub-TLVs necessárias, desde que tenham a mesma proposta de utilização da TLV pai. Todas as sub-TLVs precisam estar relacionadas ao propósito da TVL pai, como uma maneira de organizar a troca de mensagens, ou seja, caso uma TLV seja responsável por transportar informações de custo do nó, não é correto incluir uma sub-TLV levando informações de perdas de pacotes. Apesar de ser permitido pela estrutura do protocolo, não é aconselhável a não adoção de tais práticas segundo a documentação do próprio Babel (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021b), principalmente durante as criação de extensões feitas no protocolo.

A estrutura da mensagem IHU permite adicionar tanto a sub-TLV *TIMESTAMP* como também a sub-TLV *Operational Cost*, tendo ambas a mesma estrutura de campos a serem inseridos, similar à TLV pai (Figura 10). A estrutura é composta inicialmente pelo campo de tipagem, referente ao id da sub-TLV; o campo de tamanho, que armazena o tamanho do corpo que contém os dados da sub-TLV; e por fim o corpo da sub-TLV, usado para os dados necessários a serem transportados pela mensagem, incluindo assim a variável *tocost*.

A inclusão de cada novo vizinho na rede, quando esse é recém descoberto, passa pelo processo de criação e inicialização de diversos dados referente a ele (Figura 14), que serão associados a dois identificadores, o endereço do vizinho e também sua interface de rede, anexando o vizinho à lista de todos os nós alcançáveis.

Figura 14 – Dados armazenados de cada nó vizinho.

```
30 struct neighbour {
31     struct neighbour *next;
32     /* This is -1 when unknown, so don't make it unsigned */
33     unsigned char address[16];
34     struct hello_history hello;
35     struct hello_history uhello; /* for Unicast Hellos */
36     unsigned short tocost;
37     unsigned short txcost;
38     unsigned short hello_seqno; /* for Unicast Hellos */
39     struct timeval ihu_time;
40     unsigned short ihu_interval; /* in centiseconds */
41     /* Used for RTT estimation. */
42     /* Absolute time (modulo 2^32) at which the Hello was sent,
43     according to remote clock. */
44     unsigned int hello_send_us;
45     struct timeval hello_rtt_receive_time;
46     unsigned int rtt;
47     struct timeval rtt_time;
48     struct interface *ifp;
49     struct buffered buf;
50 };
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Os dados guardados de cada vizinho são essenciais para manutenção das qualidade dos links e atualização da tabela de rotas, acompanhando assim as mudanças ocorridas na rede. Os dados de RTT são essenciais para identificação de congestionamentos, evitando assim determinados links que estejam sobrecarregados; Os dados de tempo da mensagem IHU e o histórico das mensagens *Hello*s servem para o cálculo do *rxcost*; e por fim os dados de *txcost* e *tocost* são enviados aos vizinhos, para que estejam cientes dos custos de cada nó na rede. Assim, o armazenamento destes dados ajuda a reduzir o tempo de convergência, até que todas as mudanças sejam corretamente identificadas e as melhores rotas sejam encontradas.

Após a identificação dos novos vizinhos, as variáveis de custo *txcost* e *tocost* são inicializadas (Figura 15 - linhas 102 à 109). A primeira começa com um valor definido como infinito, considerado como o maior custo possível, não incentivando, dessa forma, a utilização do novo caminho estabelecido até que se calcule o real custo de transmissão, atualizando assim a variável *txcost*. A segunda variável *tocost* começa com o valor zero, pois o custo operacional é considerado como opcional para o cálculo da métrica, deixando de ter influência na somatória de custos, até que algum novo nó tenha, em seu ambiente de configuração, o custo de operação definido pelo respectivo administrador.

Figura 15 – Identificação de um novo nó na rede.

```
102     neigh->hello.seqno = neigh->uhello.seqno = -1;
103     memcpy(neigh->address, address, 16);
104     neigh->txcost = INFINITY;
105     neigh->tocost = 0;
106     neigh->ihu_time = now;
107     neigh->hello.time = neigh->uhello.time = zero;
108     neigh->hello_rtt_receive_time = zero;
109     neigh->rtt_time = zero;
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

4.2.2 Identificação da Mensagem

Durante o processo de troca de mensagens, utilizando pacotes TLV, todo nó pertencente à rede babel possui um interpretador responsável por ler os dados recebidos e validar a estrutura da respectiva TLV. O interpretador identifica e salva as informações que constam dentro de cada tipo de pacote, para então utilizar esses dados dentro do preenchimento da tabela de rotas. A modificação realizada dentro da TLV IHU, com a inclusão da nova sub-TLV OC, envolve primeiramente a inclusão do novo valor ao parser para que possa ser lido (Figura 16 - linhas 254 e 255), e a definição do seu valor inicial como zero (Figura 16 - linhas 258 e 259). O valor zero possibilita a utilização do protocolo em redes antigas ou já existentes, já que impede que a somatória de sua métrica de custo seja alterada pelo parâmetro *tocost*, caso o mesmo não esteja sendo usado.

Figura 16 – Início do parser da sub-TLV OC.

```
249 static int
250 parse_ihu_subtlv(const unsigned char *a, int alen,
251                 unsigned int *timestamp1_return,
252                 unsigned int *timestamp2_return,
253                 int *have_timestamp_return,
254                 unsigned short *tocost_return,
255                 int *have_tocost_return)
256 {
257     int type, len, i = 0;
258     int have_timestamp = 0;
259     int have_tocost = 0;
260     unsigned int timestamp1, timestamp2;
261     unsigned short tocost;
262
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

No decorrer do interpretador responsável pela leitura da TLV IHU, é feita inicialmente uma verificação de cada tipo de sub-TLV que existe dentro da mensagem. Este passo de verificação é executado de maneira recursiva, buscando comparar os tipos de dados encontrados na mensagem com os tipos definidos pelo Babel em sua RFC (CHROBOCZEK, Juliusz, 2021b), incluindo também o novo tipo definido para o custo operacional (Figura 17 - linha 293). Na sequência é verificado o tamanho dos dados inseridos ao final da estrutura da sub-TLV, caso o tamanho identificado seja pelo menos igual a 2 (bytes) ou maior, o protocolo entende que se encaixa com o tamanho esperado para um parâmetro *tocost*, e então permite que a mensagem seja validada e a tradução dos dados seja feita.

A tradução é necessária em todo dado recebido ou transmitido pelo Babel, pois por convenção, para trafegar na rede os dados seguem a ordem de bytes da rede. Dessa forma, o byte mais significativo sempre está na primeira posição, e para que o número, considerando sua forma binária, não chegue invertido no host, é preciso realizar uma conversão no valor que representa o parâmetro *tocost*, para que este chegue na ordem de bytes do host e seja corretamente lido (Figura 17 - linha 295). Após a leitura do parâmetro e seu reconhecimento por parte do pars, o valor *tocost* é então guardado para ser usado, e os parâmetros de indicação tanto da existência quanto da validade da sub-TLV OC são setados para a condição verdadeira (Figura 17 - linhas 315 a 324).

Durante o processamento realizado para identificar e processar a sub-TLV OC, caso o interpretador apresente algum erro em seu processamento, ele é capaz de seguir com sua execução para identificação do restante da mensagem sem interferir na validação da mesma. Pois o bit mais significativo que define o tipo da sub-TLV OC é não mandatário, ou seja, igual a zero, não acionando dessa forma a interrupção da leitura (Figura 17 - linha 305).

Figura 17 – Reconhecimento do parser para a sub-TLV OC.

```

293     } else if(type == SUBTLV_OPERATIONAL_COST) {
294         if(len >= 2) {
295             DO_NTOHS(tocost, a + i + 2);
296             have_tocost = 1;
297         } else {
298             fprintf(stderr,
299                 "Received incorrect OPERATIONAL_COST sub-TLV on IHU.\n");
300             /* But don't break. */
301         }
302     } else {
303         debugf("Received unknown%s IHU sub-TLV %d.\n",
304             (type & 0x80) != 0 ? " mandatory" : "", type);
305         if((type & 0x80) != 0)
306             return -1;
307     }
308
309     i += len + 2;
310 }
311 if(have_timestamp && timestamp1_return && timestamp2_return) {
312     *timestamp1_return = timestamp1;
313     *timestamp2_return = timestamp2;
314 }
315 if(have_timestamp_return) {
316     *have_timestamp_return = have_timestamp;
317 }
318 if(have_tocost) {
319     *tocost_return = tocost;
320 }
321 }
322 if(have_tocost_return) {
323     *have_tocost_return = have_tocost;
324 }

```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Após a validação e leitura da sub-TLV (Figura 18 - linha 616), os novos valores recebidos, que passam a ser utilizados pelo protocolo, também são comparados com os valores já armazenados anteriormente (Figura 18 - linha 621), para identificação de mudanças na topologia da rede. O resultado dessa comparação, nesse caso para os valores *txcost* e *tocost*, será informado à função responsável por realizar todo o cálculo de atualização da métrica de custo (Figura 18 - linha 626). A existência de diferenças entre os dados recebidos e os anteriormente existentes significa que o respectivo nó, de onde partiu a TLV IHU, possui mudanças de custo para sua operação ou alguma variação na qualidade da rota, que exige a atualização da tabela de rotas com os caminhos mais coerentes para a situação da rede.

Figura 18 – Função de atualização da métrica.

```

616     rc = parse_ihu_subtlv(message + 8 + rc, len - 6 - rc,
617                         &hello_send_us, &hello_rtt_receive_time,
618                         NULL, &tocost, NULL);
619     if(rc < 0)
620         goto done;
621     changed = txcost != neigh->txcost || neigh->tocost != tocost;
622     neigh->txcost = txcost;
623     neigh->tocost = tocost;
624     neigh->ihu_time = now;
625     neigh->ihu_interval = interval;
626     update_neighbour_metric(neigh, changed);

```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Sendo um protocolo pró-ativo, todas as tabelas de rotas buscam manter-se atualizadas com os melhores links em termos de QoS e seus custos operacionais, que podem ser alterados a qualquer momento. Dessa forma, através das trocas de mensagens IHU, os dados costumam ser informados aos vizinhos em um intervalo 3 vezes maior que o praticado pelos pacotes Hello Multicast. Portanto o intervalo de envio de pacotes Hello é considerado um dos mais relevantes para otimizar a detecção de mudanças na rede.

4.3 AMBIENTE DE TESTES

A fim de testar a execução do protocolo Babel, buscou-se analisar e comparar o seu comportamento tanto em sua forma originalmente idealizada, quanto na forma modificada pela inclusão do custo operacional. As análises feitas englobam a escolha dos caminhos de roteamento, níveis de throughput alcançados e o tempo de convergência para a escolha da melhor rota, tudo dentro de um ambiente de teste virtual. Foi utilizado para execução o módulo `babeld` (versão 1.10) implementado e mantido pelo próprio autor das especificações, integrado à ferramenta INET framework (versão estável 4.2.9) para execução do protocolo dentro do software Omnet++ (versão estável 5.7), um simulador de evento discreto baseado na linguagem C++, e usando para gravação e análise de pacotes o software Wireshark (versão 3.2.3) para aferição dos resultados dos testes. As ferramentas usadas para implementação dos testes foram escolhidas por causa da extensa documentação disponível para as mesmas, e também pela familiaridade existente entre as ferramentas e o laboratório onde os testes foram realizados, por já serem utilizadas em diversas outras pesquisas e testes feitos.

Todos os ambientes de testes tiveram seus testes executados em 10 repetições, com os resultados obtidos através da média das mesmas, e utilizando um mesmo hardware para medida de comparação. O computador utilizado possui um sistema Ubuntu 20.04 LTS de 64 bits, com o GNOME na versão 3.36.8. Os componentes principais de hardware são um processador Intel Core i5-3230M, placa de vídeo integrada Intel HD Graphics 4000, memória DDR3 de 6GB e um disco rígido de 500GB de armazenamento.

A configuração e inicialização do ambiente usado foi feita através da adição de um novo *namespace* de rede para cada participante, com a inclusão de um dispositivo em cada. Cada interface virtual teve o seu modo de execução setado para *Tap*, configurando assim o tráfego na camada de enlace. Por fim foi configurado um endereço IP para cada dispositivo incluído, preparando o ambiente para o protocolo Babel usado pela camada de redes. No exemplo demonstrado a seguir é possível identificar as configurações realizadas para um único host, dentro do primeiro ambiente de testes:

```
$ sudo ip netns add host0

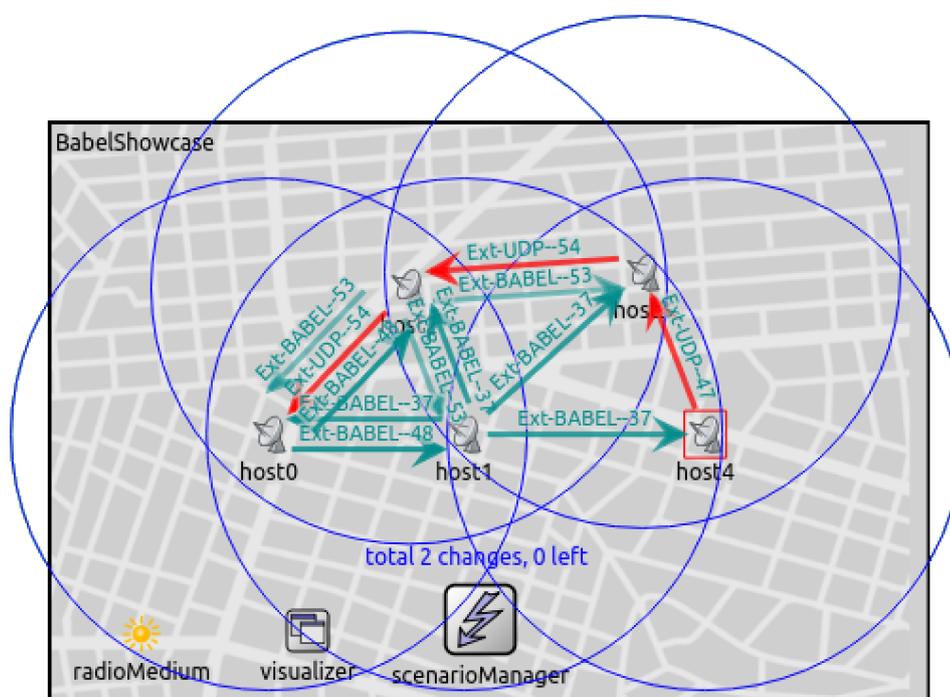
$ sudo ip netns exec host0 ip tuntap add mode tap dev tap0

$ sudo ip netns exec host0 ip link set dev tap0 up

$ sudo ip netns exec host0 ip addr add 192.168.2.1/24 dev tap0
```

O primeiro ambiente de teste foi idealizado para simular 5 nós mesh interligados por meio de uma topologia de anel (Figura 19), sempre mantendo uma distância mínima para que a rede wireless alcance pelo menos 2 outros nós.

Figura 19 – Ambiente de teste 1



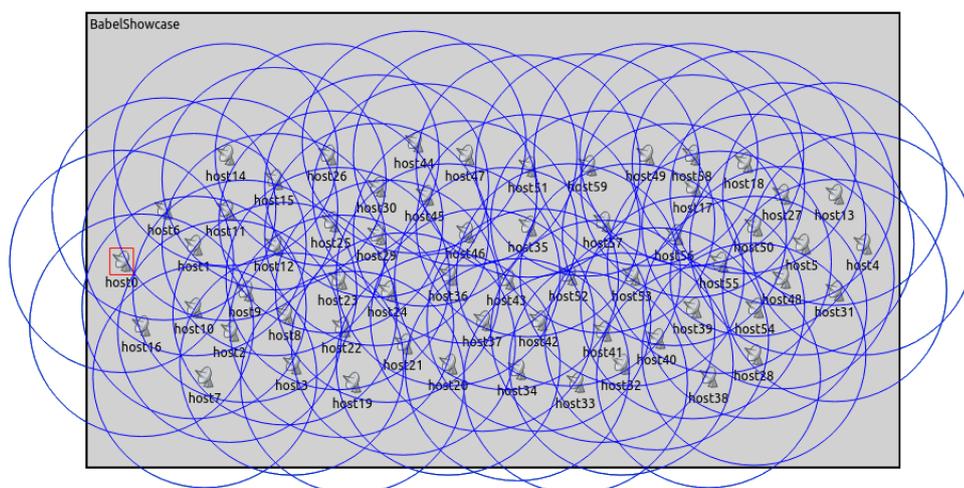
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

O ambiente de teste foi idealizado pelo próprio autor, com o objetivo de que dois caminhos sejam testados entre dois extremos da rede, da maneira mais simplificada possível para evidenciar as diferenças entre cada algoritmo. O primeiro caminho sendo mais curto e de melhor QoS, porém 50% mais custoso (linha vermelha), e um segundo caminho mais longo e de menor QoS, mas com um custo mais barato. Dessa forma é possível acompanhar as mudanças entre os dois caminhos de acordo com o peso do custo aplicado aos nós da rede, e comparando com a versão original do Babel, para identificar as influências das alterações realizadas. A escolha de uma nova rota sempre ocorre levando em consideração estes 2 fatores, a qualidade da rota QoS e o preço da

mesma, para fins de comparação os dois fatores foram considerados com o mesmo peso de influência, mas é possível privilegiar um dos fatores, caso o responsável pela rede veja essa necessidade, realizando manualmente a configuração dos custos no código do protocolo.

O segundo ambiente de teste, também idealizado pelo próprio autor, foi criado para simular 60 nós mesh dispostos aleatoriamente no ambiente virtual de testes (Figura 20), sempre mantendo uma distância mínima para que a rede wireless alcance pelo menos 2 outros nós.

Figura 20 – Ambiente de teste 2



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

O segundo ambiente de testes foi aplicado pois permite que a análise seja mais coerente com as grandes redes presentes em ambientes reais. O ambiente representa uma cidade com nós espalhados aleatoriamente, com os nós representando a casa de moradores que optaram por fazer parte da rede, formando uma topologia dinâmica, que pode ser alterada no decorrer do tempo. Os custos são atribuídos a cada nó com a mesma proporção de valores, levando alguns nós a serem 50% mais custosos mas que eventualmente podem fazer parte de um caminho de menor qualidade.

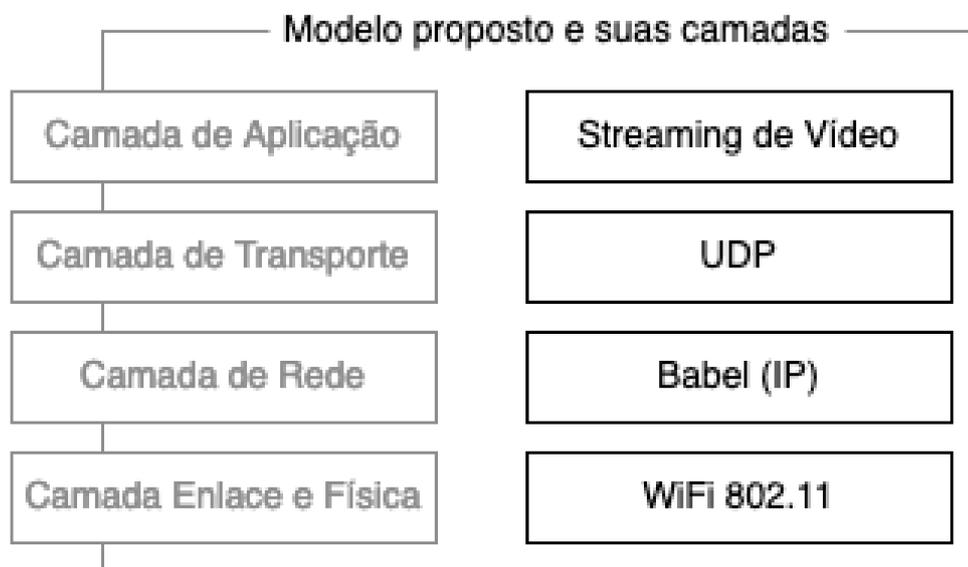
A simulação de tráfego dos pacotes em ambos os ambientes de teste sempre ocorre entre dois nós da rede (*host0* e *host4*). O *host4* faz uma requisição de pacotes ao *host0*. A simulação acontece conforme as camadas da Figura 21:

- A camada de aplicação simula um Streaming de Vídeo configurado dentro do INET através do pacote "UdpBasic".
- A camada de transporte é configurada para utilização do UDP, que não contém garantia na entrega dos pacotes, sendo feitas algumas análises de throughput e nas taxas de perdas de pacotes.
- A camada de rede é composta pelo Babel, responsável por definir as tabelas de roteamento dentro da camada IP, para que cada pacote tenha um próximo

salto em direção ao seu destino.

- Por fim a camada física que simula o tráfego de dados por meio de sinais de rádio WiFi 802.11.

Figura 21 – Modelo de Camadas proposto



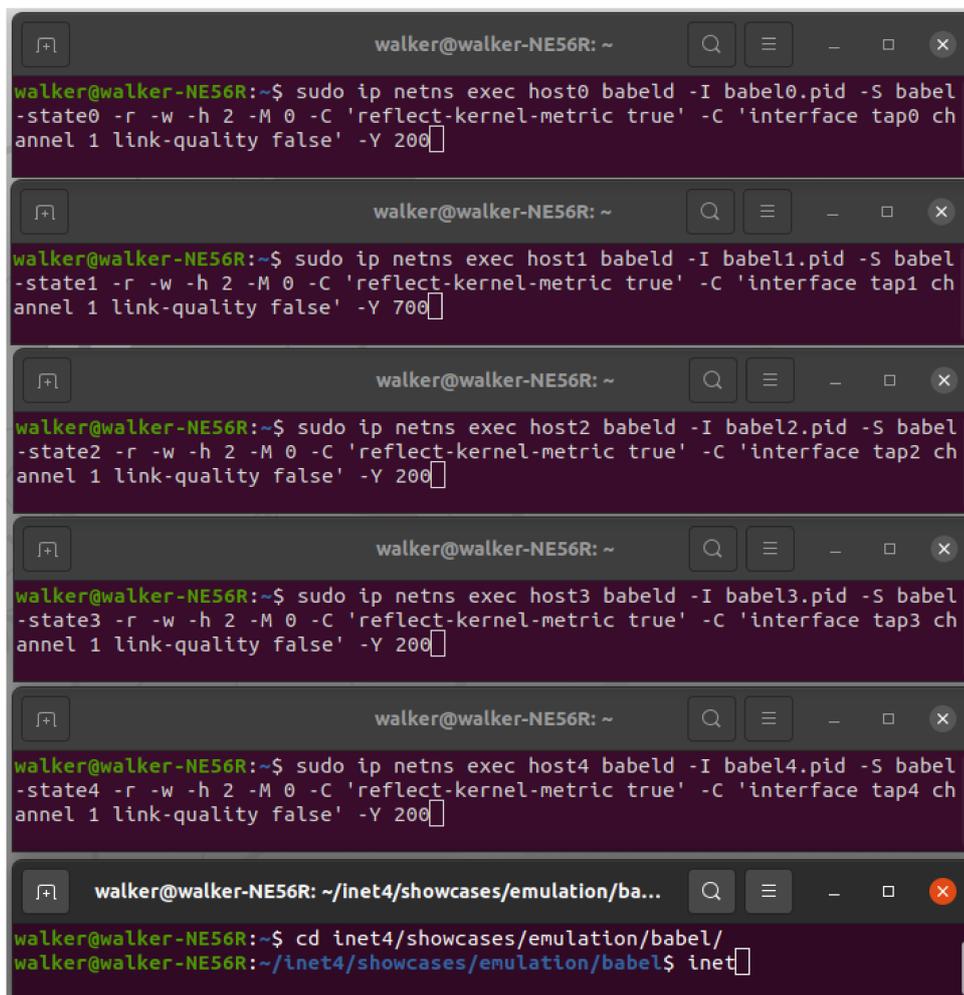
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

A execução do protocolo Babel permite diversas mudanças e adaptações dentro dos argumentos da sua chamada pelo terminal, permitindo diversos comportamentos de acordo com a rede onde o protocolo será executado. Na simulação feita dentro dos dois ambientes virtuais, os argumentos utilizados para execução do protocolo foram os mesmos, exceto pela variável de custo operacional, que foi atribuída com valores diferentes para permitir justamente a análise do roteamento a nível da camada de redes, e simulando a utilização em ambientes reais, onde os custos operacionais costumam ser diferentes. A figura 22 demonstra as chamadas realizadas no primeiro ambiente de testes, assim como os argumentos utilizados em cada um dos 5 nós presentes na rede.

As configurações adotadas na execução do Babel foram os seguintes argumentos:

- *l* especifica um arquivo para registrar o id do processo;
- *S* especifica um arquivo usado para preservar informações do babel de longo prazo entre cada execução;
- *r* habilita a seleção aleatória de id para cada roteador;
- *w* desabilita otimizações para redes cabeadas, assumindo que todos os links possuem conexão sem fio;
- *h* especifica o intervalo em segundos entre o envio de cada pacote *Hello*;

Figura 22 – Comandos de execução - Ambiente 1



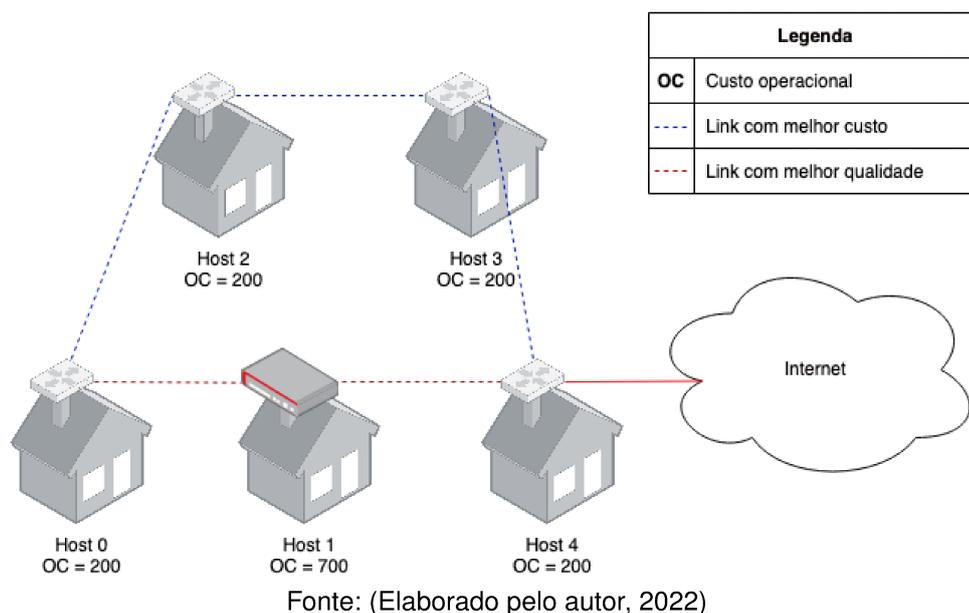
```
walker@walker-NE56R: ~  
walker@walker-NE56R:~$ sudo ip netns exec host0 babeld -I babel0.pid -S babel  
-state0 -r -w -h 2 -M 0 -C 'reflect-kernel-metric true' -C 'interface tap0 ch  
annel 1 link-quality false' -Y 200  
  
walker@walker-NE56R: ~  
walker@walker-NE56R:~$ sudo ip netns exec host1 babeld -I babel1.pid -S babel  
-state1 -r -w -h 2 -M 0 -C 'reflect-kernel-metric true' -C 'interface tap1 ch  
annel 1 link-quality false' -Y 700  
  
walker@walker-NE56R: ~  
walker@walker-NE56R:~$ sudo ip netns exec host2 babeld -I babel2.pid -S babel  
-state2 -r -w -h 2 -M 0 -C 'reflect-kernel-metric true' -C 'interface tap2 ch  
annel 1 link-quality false' -Y 200  
  
walker@walker-NE56R: ~  
walker@walker-NE56R:~$ sudo ip netns exec host3 babeld -I babel3.pid -S babel  
-state3 -r -w -h 2 -M 0 -C 'reflect-kernel-metric true' -C 'interface tap3 ch  
annel 1 link-quality false' -Y 200  
  
walker@walker-NE56R: ~  
walker@walker-NE56R:~$ sudo ip netns exec host4 babeld -I babel4.pid -S babel  
-state4 -r -w -h 2 -M 0 -C 'reflect-kernel-metric true' -C 'interface tap4 ch  
annel 1 link-quality false' -Y 200  
  
walker@walker-NE56R: ~/inet4/showcases/emulation/ba...  
walker@walker-NE56R:~$ cd inet4/showcases/emulation/babel/  
walker@walker-NE56R:~/inet4/showcases/emulation/babel$ inet
```

Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

- *M* especifica o intervalo em segundos do decaimento exponencial para suavizar as métricas durante a seleção da rota;
- *C* especifica comandos a serem inseridos diretamente na linha de comando do host;
- Por fim, como último argumento, foi adicionado o termo *Y* referente ao custo do nó, que pode ser representado por uma moeda ou qualquer tipo de incentivo a ser adotado.

Dentro dos testes realizados para o primeiro ambiente, foi adotado o valor 700 para o nó *host1* de caminho mais curto e 200 para o custo dos nós restantes (Figura 23), como forma de verificar a escolha das melhores rotas. Somando o custo de cada host ao longo da rota entre o *host0* de origem e o *host4* de destino, o caminho mais longo custará 500 e o mais curto custará 900. Levando o roteamento a escolher entre o caminho mais barato porém com mais saltos, ou o caminho mais caro porém mais curto.

Figura 23 – Modelo do ambiente de teste 1



As configurações feitas para o segundo ambiente de testes foram similares ao primeiro, mas cada nó teve seu custo operacional definido com os valores de 200, 450 e 700 de maneira aleatória. A aleatoriedade aplicada garante que a porcentagem de nós em cada faixa seja semelhante, para fins de distribuição estatística.

Os principais aspectos analisados estão relacionados a seleção de rotas para o tráfego na rede, aos mecanismos de troca de mensagens considerando possíveis overheads, além da estrutura de manutenção de estado dos canais diante de mudanças na rede. Visando permitir a correta escolha dos melhores caminhos, seja por conta do custo vinculado aos participantes ou da qualidade dos links a serem utilizados.

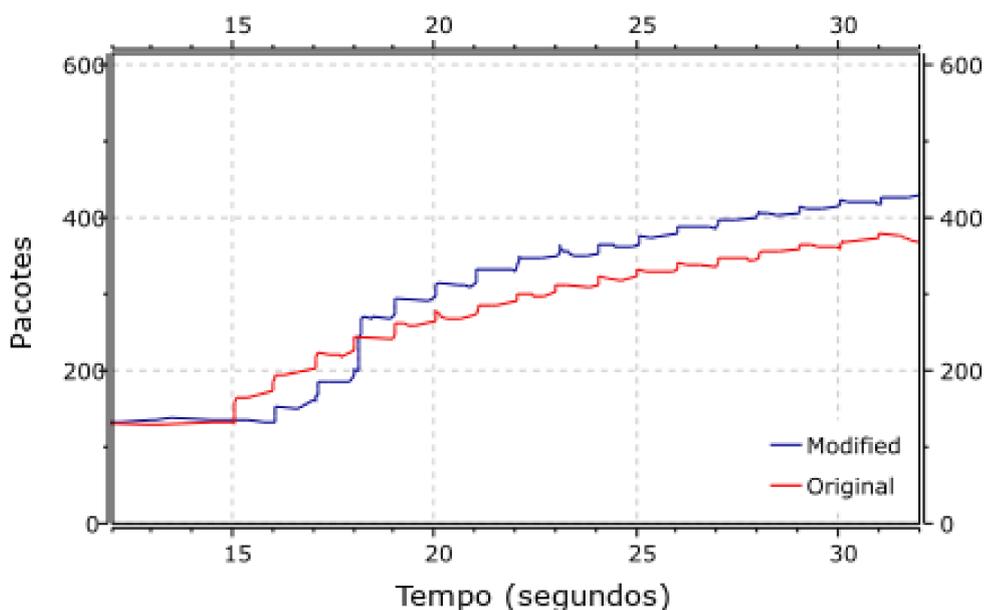
4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados da simulação foram obtidos por meio da contagem de pacotes Udp transmitidos pela rede e que foram entregues com sucesso ao host de destino, buscando identificar o número de pacotes recebidos em função do tempo.

A fim de observar a execução da rede em um cenário de redes mesh, foram realizados vários testes em dois ambientes, o primeiro simulando uma transferência *streaming* com a topologia da rede estável (Figura 24). O segundo ambiente simula a transferência com a saída de um membro, utilizando inicialmente para a rota o host1 (Figura 25), demonstrando o tempo de convergência até que uma nova rota seja definida.

Dentro da primeira análise feita (Figura 24), levando em consideração os resultados apresentados, quando o custo operacional é adicionado à métrica o protocolo alcança uma maior estabilidade na escolha das rotas. O custo adicionado deixa claro

Figura 24 – Comparação do Babel para uma conexão estável - Ambiente 1

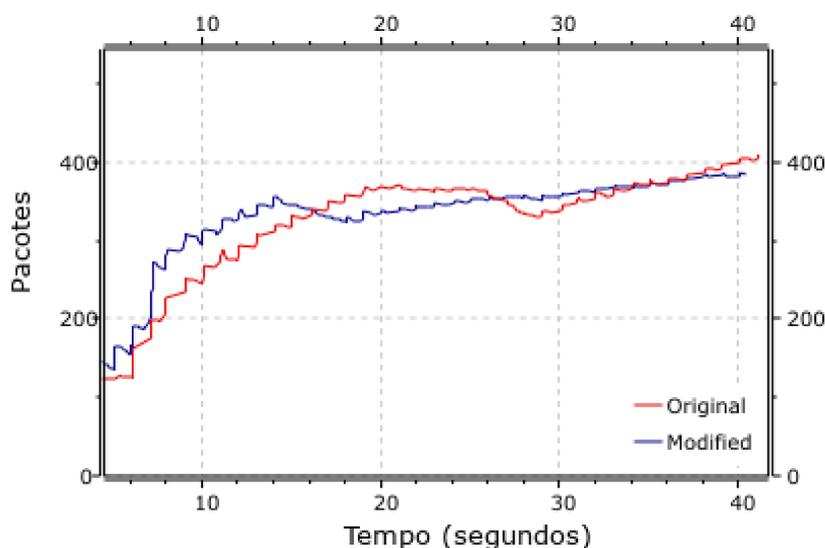


Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

que a rota mais interessante é justamente a mais longa (Ambiente 1 - Figura 23), por seu custo ser menor, isso garante que o protocolo em suas decisões mantenha sempre a mesma rota a cada verificação. Já em sua versão original, como ocorrem alguns saltos para outras rotas em momentos onde a conexão apresenta um QoS menos vantajoso, por dificuldade em se manter fixo a uma única rota, ocorrem alguns *delays* de transmissão, afetando a latência do link, e resultando em um menor throughput.

Dentro da segunda análise feita, no momento em que o nó de menor custo (host1) da rede sofre uma falha (Figura 25, aos 15 segundos).

Figura 25 – Queda de conexão - Ambiente 1

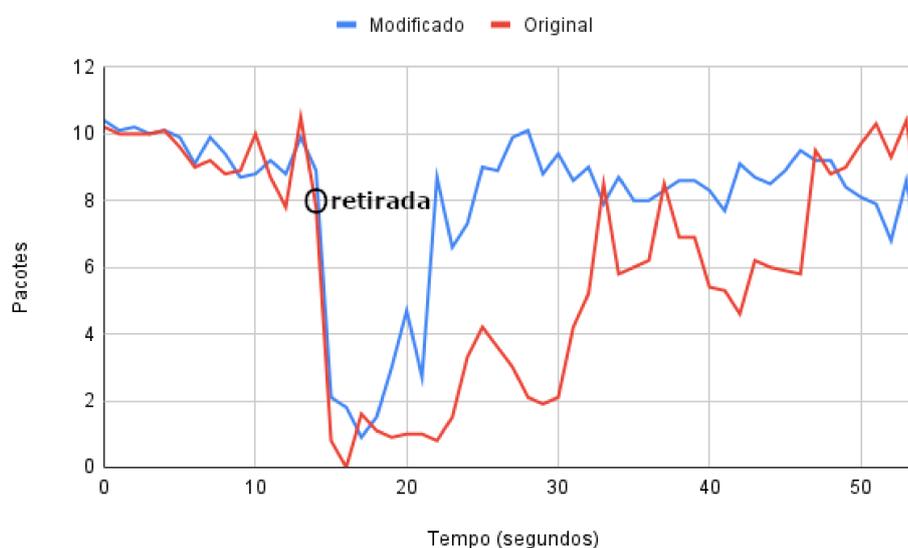


Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Surge a possibilidade de escolha não apenas do caminho com melhor custo, mas também a escolha baseada no caminho de melhor Qos (Figura 25), entretanto, ao realizar a escolha, a perda de pacotes que ocorre por conta da falha apresentada não é muito significativa a longo prazo, pois a estabilidade da rede quando adicionada a variável de custo, leva a mesma a evitar saltos desnecessários por outras rotas a cada verificação de custo.

A terceira análise realizada utiliza uma grande rede mesh de 60 nós (Figura 26), onde é realizada tanto a retirada de um participante aos 15 segundos como a sua ativação novamente na rede aos 40 segundos.

Figura 26 – Queda de conexão - Ambiente 2



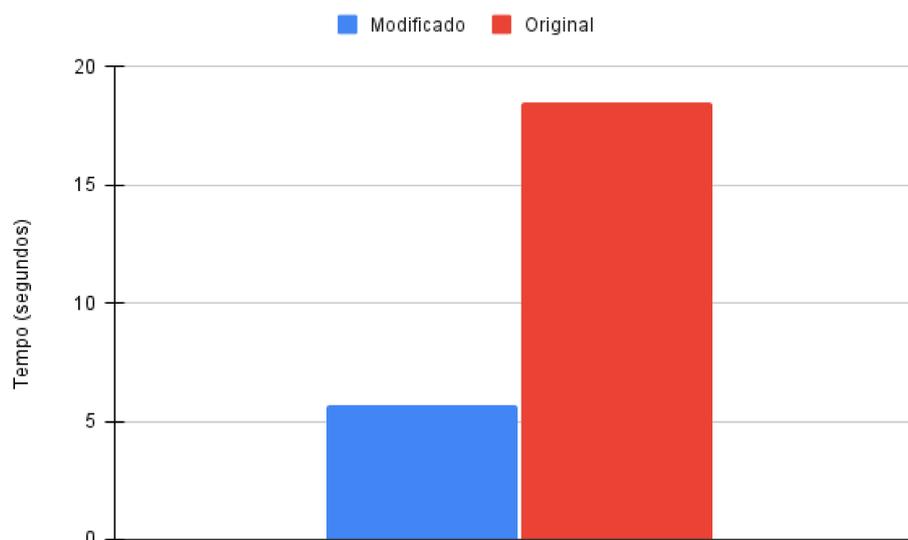
Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

Como um participante que fazia parte da rota para envio do pacote foi retirado (Figura 26), a média de pacotes transmitidos com sucesso cai rapidamente (Figura 26, aos 15 segundos). Os mecanismos de convergência da rede então buscam novos vizinhos para propagarem o pacote, e a versão modificada do Babel consegue retornar mais rapidamente ao nível de transmissão anterior à queda (Figura 26, aos 26 segundos), levando aproximadamente 10 segundos até que o tráfego de pacotes se normalize no patamar anterior à queda.

O tempo de convergência da rede também foi analisado (Figura 27), levando em consideração o tempo entre a saída do participante, quando os pacotes param de ser transmitidos, e o tempo até que eles voltem a serem transmitidos para o destino. As medições foram tomadas pelo software *Wireshark* sob o ponto de vista do destino, realizando o acompanhamento dos pacotes recebidos e também identificando os pacotes perdidos. Dentro de cada repetição de teste feita, foi tirada a média dos centésimos de segundos do início e fim da parada no tráfego de pacotes, representando o período em

que ocorreu a retirada de um participante que fazia parte da rota utilizada para envio dos pacotes. Após a realização das 10 repetições para o mesmo teste, foi realizada a média geral utilizando as médias calculadas em cada repetição, tendo assim o centésimo de segundo médio em que os pacotes foram interrompidos, e em que os pacotes voltaram a ser transmitidos para o seu destino.

Figura 27 – Tempo de convergência



Fonte: (Elaborado pelo autor, 2022)

O gráfico mostra o tempo médio de espera para a recuperação no envio dos pacotes (Figura 27), após a retirada de um participante da rede, e é possível perceber que a rede com a adição de um mecanismo de incentivo se comporta 30% mais rápida para estabelecer uma nova rota de tráfego, reduzindo assim a interferência de saídas de nós ou falhas dos mesmos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma modificação dentro do protocolo Babel, que permite a inclusão do custo operacional envolvido em cada nó, como forma de incentivo financeiro para que um pacote seja transmitido pela rede (CARVALHO; WESTPHALL; MACHADO, 2022), tal custo é representado pela variável *tocost*. Foram incluídas também modificações na TLV de resposta IHU, anexando ao final dela uma nova sub-TLV OC que carrega o valor *tocost* para seus vizinhos. Incluindo também a variável no custo final da métrica ETX, já utilizada como padrão no protocolo Babel para a comunicação em redes WMNs.

As modificações realizadas no protocolo foram colocadas sob teste e comparados com testes realizados no protocolo original (sem modificações), a fim de analisar os efeitos no cálculo de rotas para uma rede WMN. Os resultados demonstraram que apesar do incremento no tamanho das mensagens IHU, que causam um leve *overhead*, as conexões apresentaram maior estabilidade e conseqüentemente maior *throughput*, já que as conexões mais baratas são escolhidas nos cálculos, diminuindo as mudanças de rota pela leve diferença de QoS, que é gerado a cada sobrecarga de enlace ocorrido.

Dentro das alterações realizadas no protocolo, ainda existem algumas limitações encontradas. A primeira delas é o *overhead* causado pelo aumento no tamanho da TLV IHU, essa sobrecarga no tráfego poderia ser aliviada com o envio da sub-TLV OC apenas em momentos de mudança no custo, mas isso apenas aliviaria o problema. A segunda é a interoperabilidade com roteadores que usam o protocolo Babel 1.10 original e outros anteriores, que não implementaram o OC na métrica, a escolha de rotas nesse caso sempre iria privilegiar os roteadores com protocolos que não implementam o OC, pois este não sendo somado no custo de um link, reduz consideravelmente o preço do mesmo. A terceira e última limitação está no aumento do custo informado, para o caso de rotas sem alternativas, onde os participantes da rota poderiam colocar preços abusivos e mesmo assim serem escolhidos por obrigação.

A principal contribuição do trabalho está na inclusão de um mecanismo de incentivo às redes WMNs, que incentiva a sua expansão e manutenção dividindo os custos de cada operação entre os usuários da rede. Aplicando isso na forma de uma moeda ou crédito, que pode ser convertido em dinheiro ou outros benefícios, e utilizados em conjunto com a Blockchain para garantir a confiança e transparência no cálculo de custo final processado por cada nó da rede.

Como trabalhos futuros, é possível incorporar o gerenciamento dos custos entre os nós de forma descentralizada e transparente, registrando e contabilizando os recursos consumidos ou fornecidos na rede. Isso garante que os custos sejam corretamente distribuídos segundo o trabalho de cada nó, por meio de uma estrutura aliada à

Blockchain. Também seria interessante o teste em ambientes reais de WMNs, como as redes comunitárias por exemplo, como forma de analisar e aprimorar a proposta realizada. Outra possibilidade seria associar pesos nos valores de custo, permitindo que o responsável pelo nó consiga diminuir a influência do custo operacional nos cálculos, privilegiando rotas com um QoS maior mas que sejam mais caras, ou ainda aumentar a influência do custo no cálculo, buscando sempre as rotas mais baratas. Por fim, as modificações para inserção de custos operacionais também podem ser aplicadas em outros protocolos, como forma de garantir a sustentabilidade e desenvolvimento da rede.

REFERÊNCIAS

- A. R. FARIAS R. MINGOTI, L. B. VALLE. Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil. *In: COMUNICADO Técnico (SGTE)*. [S.l.: s.n.], 2017. P. 05.
- ABOLHASAN, M.; HAGELSTEIN, B.; WANG, J. C. -. Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols. *In: 2009 15th Asia-Pacific Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2009. P. 44–47.
- AGUIAR, Elisangela; BITTENCOURT, Paula; MOREIRA, Waldir; ABELÉM, A. Estudo comparativo de protocolos de roteamento para redes mesh na região amazônica. **SBRC Belém**, 2007.
- AKYILDIZ, Ian F.; WANG, Xudong; WANG, Weilin. Wireless mesh networks: a survey. **Computer Networks**, v. 47, n. 4, p. 445–487, 2005. ISSN 1389-1286.
- ANDROULAKI, Elli *et al.* Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. *In: PROCEEDINGS of the Thirteenth EuroSys Conference*. Porto, Portugal: Association for Computing Machinery, 2018. (EuroSys '18).
- APC.ORG. **Manual de redes comunitárias**. 2021. Disponível em: <https://www.apc.org/sites/default/files/manualredescomunitarias.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- BAIG, Roger; DALMAU, Lluís; ROCA, Ramon; NAVARRO, Leandro; FREITAG, Felix; SATHIASEELAN, Arjuna. Making Community Networks Economically Sustainable, the Guifi.Net Experience. *In: PROCEEDINGS of the 2016 Workshop on Global Access to the Internet for All*. Florianopolis, Brazil: Association for Computing Machinery, 2016. (GAIA '16), p. 31–36.
- BAIG, Roger; ROCA, Ramon; FREITAG, Felix; NAVARRO, Leandro. guifi.net, a crowdsourced network infrastructure held in common. **Computer Networks**, v. 90, p. 150–165, 2015. Crowdsourcing. ISSN 1389-1286.
- BANO, Mukhtiar; QAYYUM, Amir; BIN RAIS, Rao Naveed; GILANI, Syed Sherjeel A. Soft-Mesh: A Robust Routing Architecture for Hybrid SDN and Wireless Mesh Networks. **IEEE Access**, v. 9, p. 87715–87730, 2021.

BROWN, Kathy. 2017 Internet Society Global Internet Report: Paths to our Digital Future. **Retrieved June**, v. 9, p. 2018, 2017.

CARVALHO, Rodolfo B. S. **Babeld-1.10**. 2021. Disponível em: <https://github.com/rodolfoCarvalho/babeld-cost>. Acesso em: 25 abr. 2021.

CARVALHO, Rodolfo B. S.; WESTPHALL, Carla Merkle; MACHADO, Caciano. An Extension of the Babel Protocol to Include Operating Cost: Providing Sustainability in Community Networks. *In*: GERVASI, Osvaldo; MURGANTE, Beniamino; HENDRIX, Eligius M. T.; TANIAR, David; APDUHAN, Bernady O. (Ed.). **Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022**. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 265–282.

CHROBOCZEK, Juliusz. **Babeld-1.10**. 2021. Disponível em: <https://github.com/jech/babeld/releases/tag/babeld-1.10>. Acesso em: 25 abr. 2021.

CHROBOCZEK, Juliusz. **Extension Mechanism for the Babel Routing Protocol**. 2021. Disponível em: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8966>. Acesso em: 21 jul. 2022.

CHROBOCZEK, Juliusz. **The Babel Routing Protocol**. 2011. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc6126>. Acesso em: 1 jun. 2020.

DINH THAI, Hoang; LU, Xiao; NIYATO, Dusit; WANG, Ping; HAN, Zhu. Applications of Repeated Games in Wireless Networks: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, jan. 2015.

FIBER-OPTIC-EQUIPMENT.COM. **Best Way to Set Up Ethernet Switch and Mesh Network**. 2022. Disponível em: <https://www.fiber-optic-equipment.com/set-ethernet-switch-mesh-network.html>. Acesso em: 29 ago. 2022.

GHIRO, L.; MACCARI, L.; CIGNO, R. L. Proof of networking: Can blockchains boost the next generation of distributed networks? *In*: 2018 14th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). [S.l.: s.n.], fev. 2018. P. 29–32.

ITU. **2.9 billion people still offline**. 2021. Disponível em:

<https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2021-11-29-FactsFigures.aspx>.

Acesso em: 12 ago. 2022.

JONGLEZ, B.; CHROBOCZEK, J. **Delay-based Metric Extension for the Babel Routing Protocol**. 2019. Disponível em:

<https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-babel-rtt-extension-00>.

Acesso em: 24 mai. 2022.

JUNMO, Yang; SAKAI, Kazuya; KIM, Bonam; OKADA, Hiromi; SUN, Min-Te.

Cost-Aware Route Selection in Wireless Mesh Networks. *In*: v. 4325, p. 171–184.

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart *et al.* Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3. **Engineering**, v. 45, 4ve, p. 1051, 2007.

MACCARI, Leonardo; LO CIGNO, Renato. A week in the life of three large Wireless Community Networks. **Ad Hoc Networks**, v. 24, p. 175–190, 2015. Modeling and Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc Networks. ISSN 1570-8705.

MACHADO, Caciano; SANTOS, Renan R. S. dos; WESTPHALL, Carla Merkle.

Hop-by-hop Accounting and Rewards for Packet Dispatching. *In*: 2021 IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom). [S.l.: s.n.], 2021. P. 1116–1123.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados. *In*: TÉCNICAS de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados. [S.l.: s.n.], 2011. P. xiii–277.

MARIAS, G. F.; GEORGIADIS, P.; FLITZANIS, D.; MANDALAS, K. Cooperation enforcement schemes for MANETs: a survey. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 6, n. 3, p. 319–332, 2006. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcm.398>.

MOY, John T. **OSPF: anatomy of an Internet routing protocol**. [S.l.]:

Addison-Wesley Professional, 1998.

- OPEN-MESH.ORG. **B.A.T.M.A.N. IV (TQ)**. 2013. Disponível em: https://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/wiki/BATMAN_IV. Acesso em: 1 jun. 2020.
- PIECHOWIAK, M.; ZWIERZYKOWSKI, P.; OWCZAREK, P.; WASŁOWICZ, M. Comparative analysis of routing protocols for wireless mesh networks. *In: 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. [S.l.: s.n.], jul. 2016. P. 1–5.
- SAN MIGUEL, Elena; TIMMERMAN, Roxane; MOSQUERA, Sergio; DIMOGERONTAKIS, Emmanouil; FREITAG, Felix; NAVARRO, Leandro. Blockchain-Enabled Participatory Incentives for Crowdsourced Mesh Networks. *In: DJEMAME, Karim; ALTMANN, Jörn; BAÑARES, José Ángel; AGMON BEN-YEHUDA, Orna; NALDI, Maurizio (Ed.). Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services*. Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 178–187.
- SELIMI, Mennan; KABBINALE, Aniruddh Rao; ALI, Anwaar; NAVARRO, Leandro; SATHIASEELAN, Arjuna. Towards Blockchain-Enabled Wireless Mesh Networks. *In: PROCEEDINGS of the 1st Workshop on Cryptocurrencies and Blockchains for Distributed Systems*. Munich, Germany: Association for Computing Machinery, 2018. (CryBlock'18), p. 13–18.
- SINGH, M.; KIM, S. Trust Bit: Reward-based intelligent vehicle communication using blockchain paper. *In: 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. [S.l.: s.n.], 2018. P. 62–67.
- SLIWA, B.; FALTEN, S.; WIETFELD, C. Performance Evaluation and Optimization of B.A.T.M.A.N. V Routing for Aerial and Ground-Based Mobile Ad-Hoc Networks. *In: 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–7.
- TCHINDA, A. P.; FRICK, G.; TRICK, U.; LEHMANN, A.; TCHINDA, A. P.; GHITA, B. Performance analysis of WMN routing protocols for disaster networks. *In: 2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT)*. [S.l.: s.n.], 2017. P. 1–6.
- TREMBACK, Jehan. **Althea white paper**. 2020. Disponível em: <https://althea.net/whitepaper>. Acesso em: 1 jun. 2020.

APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A.1 JUSTIFICATIVA DA NECESSIDADE

As Wireless Mesh Networks (WMNs) são redes capazes não apenas de fornecer conectividade sem fio a largas áreas (como shoppings e centros urbanos), mas também levar tal conectividade a locais muito mais remotos do território (AKYILDIZ; WANG, X.; WANG, W., 2005), principalmente pela redução de preços em aparelhos e facilidade em sua implantação, levando o surgimento de diversas redes comunitárias (BAIG *et al.*, 2015), que ajudam a resolver o problema de última milha, relacionado a áreas mais remotas que não possuem acesso a rede de internet, geralmente por falta de interesse econômico das grandes operadoras de telefonia.

Os altos custos para implantação da rede cabeada, ainda no ano de 2017, justificavam a carência de acesso estável à rede de internet por mais da metade da população mundial (BROWN, 2017). Tais problemas de custos, apesar de serem contornados pela utilização das WMNs, estas ainda sofrem com a sustentação de seus serviços, buscando meios de incentivar seu uso, manutenção e possíveis expansões, sem que dependa de iniciativas altruístas.

Afim de garantir a correta sustentabilidade das WMNs, surgiram nos últimos anos alguns trabalhos, dentro da literatura, que abordam a utilização de mecanismos para incentivo financeiro associados à rede (GHIRO; MACCARI, L.; CIGNO, 2018). Como maneira de julgar o esforço e qualidade do trabalho desenvolvido pela rede, os mecanismos de incentivo buscam sempre estar associados aos protocolos de roteamento, presentes na camada de rede.

Existem diversos trabalhos que citam protocolos de roteamento associados a características especificamente voltadas para WMNs (PIECHOWIAK *et al.*, 2016)(SLIWA; FALTEN; WIETFELD, 2019), buscando otimizar o funcionamento das mesmas e contornando problemas específicos, entretanto, a aplicação de mecanismos de incentivo financeiro aos protocolos ainda não possui devida sumarização dos estudos existentes, gerando para isso a necessidade de uma análise mais profunda da literatura.

Alguns trabalhos como (GHIRO; MACCARI, L.; CIGNO, 2018) e (SELIMI *et al.*, 2018) citam a utilização de mecanismos de incentivo por meio das Blockchains associadas às WMNs, mas não se aprofundam quanto ao funcionamento dos protocolos para otimização do roteamento na rede, sendo necessário um estudo a respeito dos trabalhos na área, buscando entender o atual patamar de avanço das pesquisas, apoiando o correto caminho para desenvolvimento dos futuros esforços, e colaborando para o aprimoramento da sustentabilidade das WMNs.

A.2 OBJETIVO E PERGUNTA(S) DE PESQUISA

O objetivo desta revisão sistemática é avaliar o estado da arte sobre protocolos de roteamento voltados para WMNs, quando associados a mecanismos para incentivo financeiro que visam garantir a auto-sustentabilidade da rede, buscando identificar as melhorias e riscos associados assim como a eficiência dos mecanismos adotados dentro das redes, garantindo assim o aumento da confiabilidade na utilização de tais protocolos para roteamento de WMNs incentivadas.

Perguntas de pesquisa:

- Como a utilização dos protocolos associados a mecanismos de incentivo financeiro tem sido adotados para WMNs?
- Quais as técnicas mais utilizadas para implementação de mecanismos de incentivo para WMNs dentro de protocolos de roteamento?
- Qual a eficiência dos modelos propostos em testes realizados para o incentivo de WMNs?
- Quais os benefícios e melhorias podem ser alcançadas para as WMNs com a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro?
- Quais os custos e riscos associados a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro para as WMNs?

A.3 STRING DE BUSCA E FONTES DE PESQUISA

A fim de identificar os estudos que mais se relacionam ao assunto abordado por esta RSL, será utilizado como string de busca:

(protocol OR protocolo) AND (WMN OR "wireless mesh network" OR "redes de malha sem fio") AND (incentive OR economic OR money OR credit OR incentivo OR econômico OR dinheiro OR crédito)

O critério utilizado para a seleção de estudos baseou-se na pesquisa de trabalhos dentro de 5 bases de dados (IEEE, ACM, Wiley, Springer, Elsevier), por terem uma grande cobertura e serem extensamente utilizadas para produção científica na área de Ciência da Computação. Durante a análise preliminar dos estudos encontrados em cada base, foram identificadas as seguintes quantidades:

- IEEE: 4 estudos.
- ACM: 58 estudos.
- Wiley: 47 estudos.
- Springer: 171 estudos.
- Elsevier: 146 estudos.

Totalizando 426 estudos incluindo possíveis duplicações (busca atualizada na data de 29/10/2020).

Foram incluídos também como fonte de pesquisa trabalhos identificados através do procedimento metodológico *snowball* (bola de neve), realizados sobre os estudos iniciais, identificados nas bases de dados. Também foram considerados cinco trabalhos sugeridos por profissionais envolvidos com o tema abordado, e que fazem parte do laboratório de pesquisa utilizado durante o estudo.

A.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Critérios de Inclusão

- Trabalhos que abordem a utilização de protocolos de roteamento dentro de WMNs.
- Trabalhos que adotem mecanismos de incentivo para o correto roteamento de pacotes dentro da rede.
- Trabalhos publicados desde o ano de 2017 até a atual data de realização deste trabalho.
- Trabalhos de artigos acadêmicos publicados em anais de eventos e revistas científicas.
- Trabalhos escritos em língua Inglesa e Portuguesa.

Critérios de Exclusão

- Serão excluídos trabalhos que adotem mecanismos de reputação como critério exclusivo para roteamento de pacotes.
- Serão excluídos trabalhos que abordem apenas ambientes de redes MANETs.
- Serão excluídos trabalhos que não abordem propostas de solução para mecanismos de incentivo em redes WMNs.
- Serão excluídos trabalhos publicados como artigos curtos ou pôsteres.

A.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

A avaliação de qualidade dos estudos baseia-se na estrutura apresentada por (KITCHENHAM; CHARTERS *et al.*, 2007), nela é realizada uma pontuação que utiliza critérios estabelecidos na forma de perguntas, para cada pergunta a resposta "sim" equivale a 1 ponto, e respostas não claras mas tendendo a sim recebem 0.5 ponto. A soma de todos os itens marcados afirmativamente constituem a pontuação

total, dessa forma as pontuações no intervalo de 0-2.5 serão considerados trabalhos de qualidade pobre, de 3-5.5 como qualidade baixa, de 6-8.5 como qualidade satisfatória e de 9-11 como qualidade alta. As perguntas adotadas para análise dos trabalhos foram:

- Os objetivos das questões de pesquisa estão claramente definidos?
- As amostras tomadas para sustentação do estudo representam satisfatoriamente a generalidade presente no ambiente real?
- Existem algum grupo/categoria de comparação para os resultados apresentados?
- O trabalho apresenta uma descrição clara e adequada dos métodos de coleta de dados?
- O trabalho apresenta uma descrição clara e adequada dos métodos de análise de dados?
- As possíveis hipóteses estatísticas foram levadas em consideração?
- Todas as indagações colocadas pelo estudo foram respondidas?
- As conclusões encontradas estão claramente apresentadas e relacionadas aos objetivos de pesquisa do estudo?
- O estudo apresenta testes virtuais ou reais comparativos com outros grupos/categorias possíveis?
- Os parâmetros utilizados para configuração e realização dos testes foram claramente descritos?
- As conclusões do estudo permitem que as questões de pesquisa sejam respondidas?

A.6 PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO

O processo de seleção ocorrerá conforme descrito pelas seguintes fases:

- Serão construídas strings de busca com as palavras-chave e seus sinônimos que estejam relacionados ao objetivo deste processo de revisão sistemática.
- As strings serão submetidas aos mecanismos de busca das bases escolhidas.
- Após leitura do título, resumo e palavras-chave, serão aplicados critérios de inclusão e exclusão, retirando possíveis duplicatas e extraindo os trabalhos que tenham relevância.
- Os artigos serão então lidos na íntegra.

- O revisor fará um resumo de cada trabalho selecionado, destacando os métodos utilizados para avaliação e os parâmetros considerados, quando for o caso.

A.7 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO

A.7.1 Seleção dos Estudos

O processo de execução foi realizado conforme ilustrado abaixo (Figura 28), sendo utilizado durante a aplicação dos critérios o procedimento metodológico *snow-ball* (Figura 29). A realização do processo foi por meio de uma planilha disponibilizada neste link.

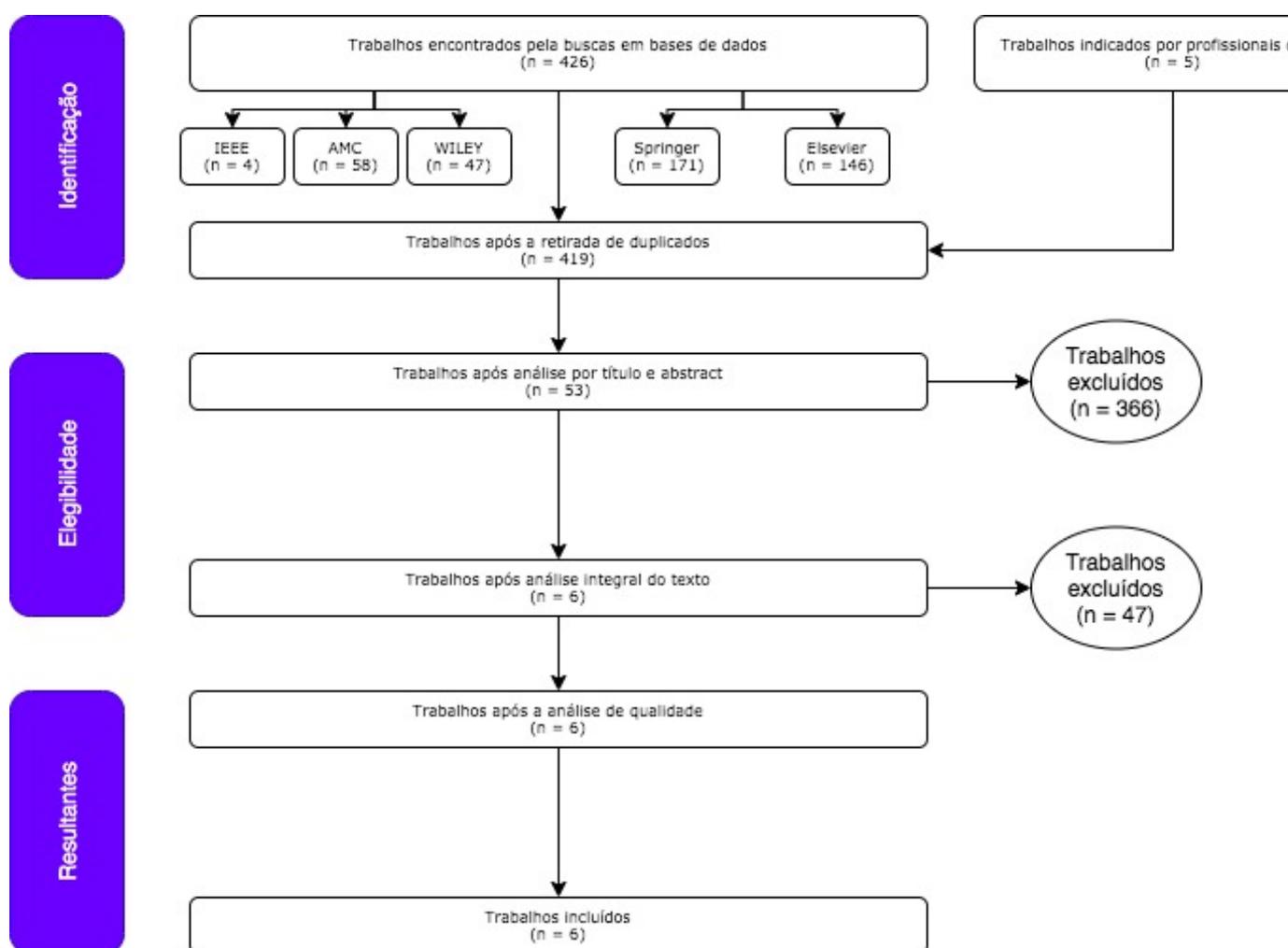


Figura 28 – Ilustração do processo de execução inicial

A.7.2 Extração de Dados

O formulário de extração de dados foi feito por meio de tabela, e seu resultado completo está disponibilizado neste link. Toda a extração de dados foi realizada

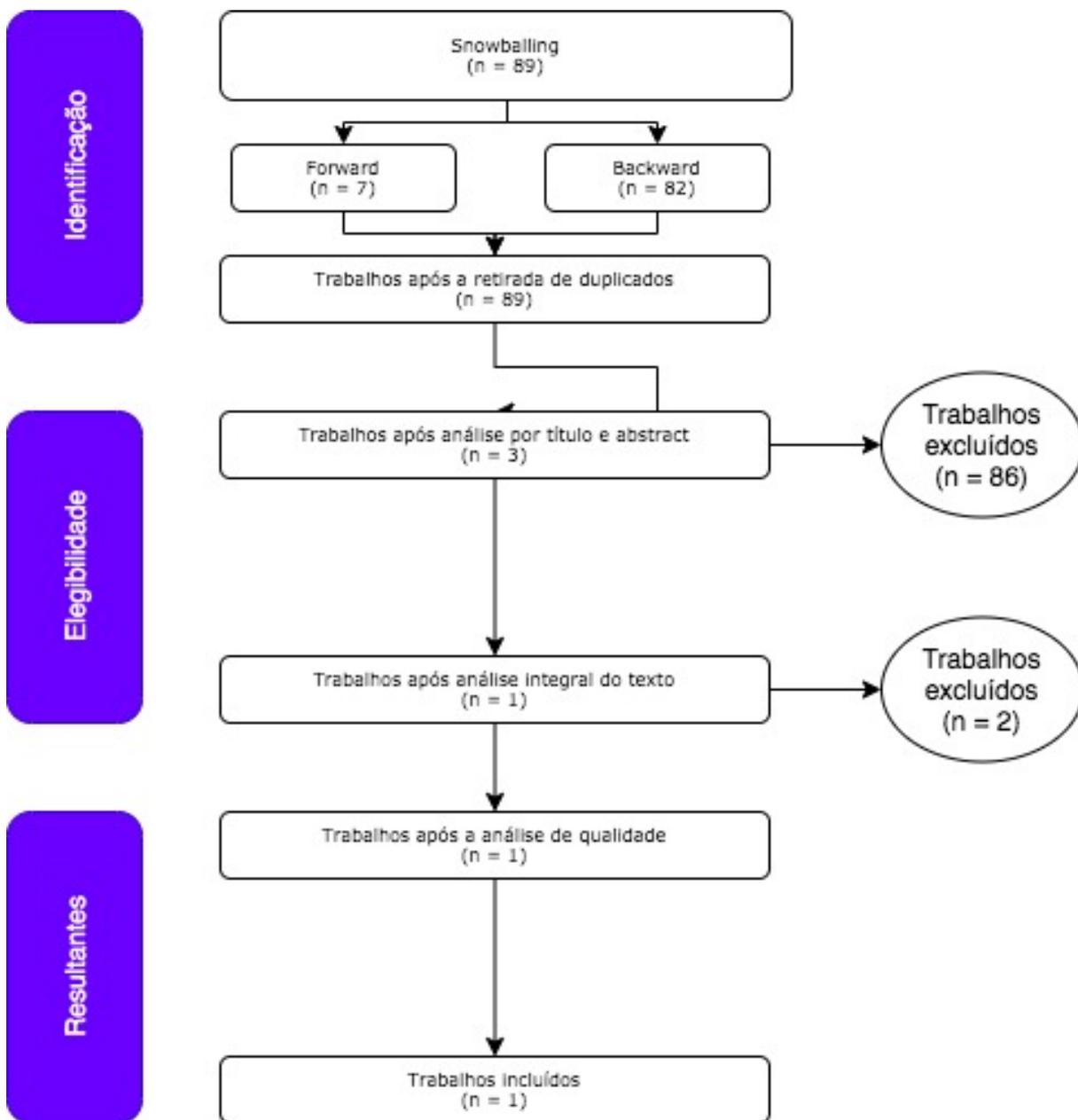


Figura 29 – Ilustração do processo de execução snowball

unicamente pelo autor, mas confirmada por um julgador externo.

A.7.3 Análise da Qualidade

A análise da qualidade foi realizada segundo o que foi proposto pelo protocolo definido neste trabalho, e baseia-se na estrutura apresentada por (KITCHENHAM; CHARTERS *et al.*, 2007). As perguntas realizadas foram então respondidas por meio de pontuações, e o resultado completo da análise está disponibilizado neste link. Dentre os trabalhos analisados, todos obtiveram níveis de qualidade satisfatório ou alto, mais especificamente metade deles tiveram nota satisfatória e a outra metade notas altas, sendo uma pontuação classificatória, ou seja, nenhum dos trabalhos analisados foi excluído, mesmo por que todos obtiveram um grau positivo de qualidade.

A.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo trabalho de Revisão Sistemática da Literatura estão dispostos segundo as perguntas de pesquisa definidas pelo protocolo, identificando de maneira gráfica, quais as principais abordagens adotadas pelos estudos identificados.

A.8.1 Como a utilização dos protocolos associados a mecanismos de incentivo financeiro tem sido adotados para WMNs?

A análise feita sobre as formas de utilização dos protocolos demonstrou não apenas os protocolos mais usados (Figura 30), como também uma outra forma de incentivo manual adotada em trabalhos.

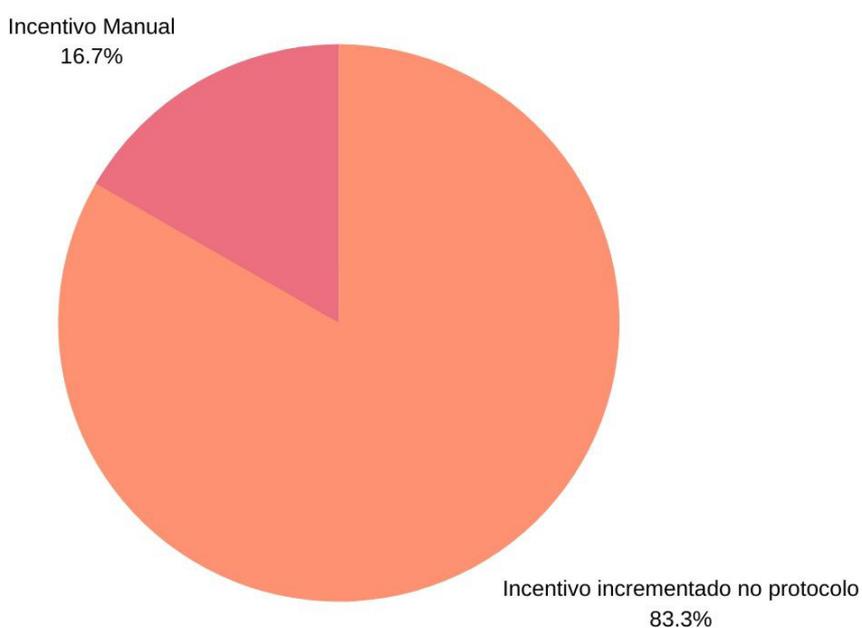


Figura 30 – Tipos de incentivo.

Apesar de grande parte das formas de incentivos, aproximadamente 83.3% (Figura 30), estarem relacionadas à modificação de protocolos para inclusão de métricas de preço, ainda existem abordagens que fazem essa precificação de maneira manual, situação em que o dinheiro é trocado fisicamente entre as pessoas, de acordo com o uso da rede.

Já quando o processo de trocas financeiras é automatizado pelos protocolos, os trabalhos analisados tendem a preferir utilizar os protocolos gRPC e POA, como pode ser visto na Figura 31. Vale também destacar o protocolo Babel, que apesar de ser utilizado em apenas 14,3% dos trabalhos, é o protocolo mais recente proposto, e o que apresenta maior eficiência em testes comparativos (PIECHOWIAK *et al.*, 2016). Outros protocolos também usados como OSPF, já muito conhecido na literatura (MOY, 1998), além de outros protocolos específicos da camada de enlace, focados nos canais de banda da rede.

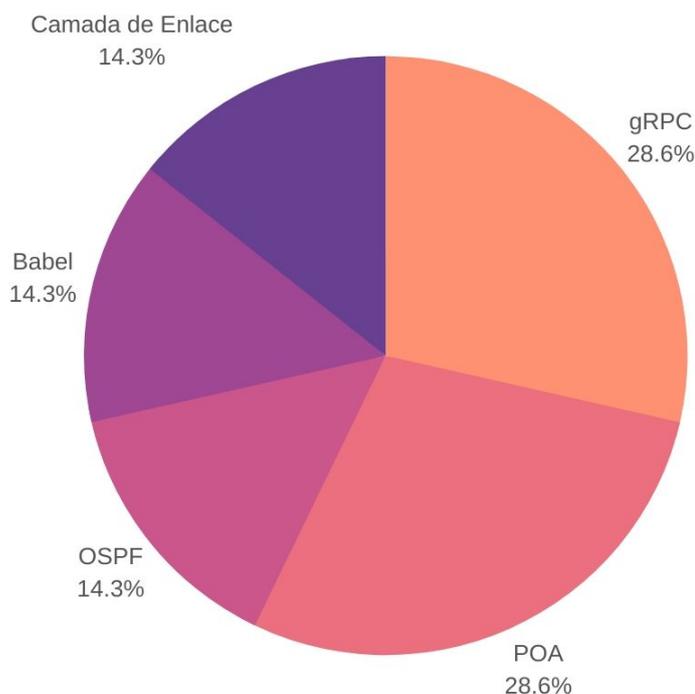


Figura 31 – Protocolos utilizados.

A.8.2 Quais as técnicas mais utilizadas para implementação de mecanismos de incentivo para WMNs dentro de protocolos de roteamento?

As técnicas mais utilizadas para inclusão de incentivos estão voltadas para utilização de Blockchains vinculadas aos protocolos de rede, os quais são modificados para incluírem métricas de preço, cobrando ou pagando pelos serviços de encaminhamento de pacotes, e utilizam a tecnologia Blockchain para legitimar e automatizar as trocas financeiras, como pode ser visto na Figura 32. Dentro dos trabalhos também foram identificadas outras técnicas, como o incentivo dentro dos canais de banda,

precificando cada canal (dentro da camada de enlace), assim quanto maior o congestionamento, mais caro o canal se torna para ser usado; além de incentivos manuais, que levam os protocolos a analisarem o tráfego de rede apenas, mas a cobrança é feita através de contas enviadas aos clientes, de forma manual, como é feita hoje pelas grandes operadoras de cabeamento telefônico.

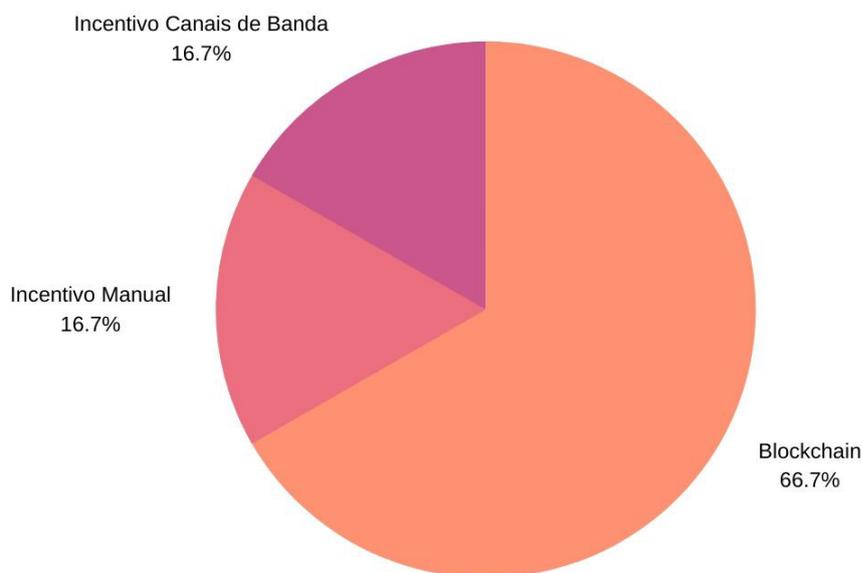


Figura 32 – Técnicas utilizadas pelas propostas.

A.8.3 Qual a eficiência dos modelos propostos em testes realizados para o incentivo de WMNs?

A eficiência dos modelos propostos está diretamente ligada a forma como tais modelos foram testados e analisados, mas como podemos ver inicialmente pela Figura 33, 16,7% dos trabalhos elencados, ou seja somente 1 trabalho, acabou não tendo sua eficiência evidenciada por meio de testes, enquanto os trabalhos restantes, aproximadamente 83,3% deles, permitiram que a eficiência dos modelos pudesse ser evidenciada através de estudos de casos reais ou experimentos realizados tanto em laboratório quanto em ambiente de produção.

Vale salientar que também foi identificado nos estudos analisados, uma ameaça a validade dos trabalhos que está diretamente relacionada a eficiência de suas propostas, que seria o viés econômico a que os autores estariam expostos, pois ao estarem ligados economicamente à proposta que apresentam, suas análises poderiam deixar de ser imparciais. Diante do exposto, separamos em nossa análise de eficiência, todos os trabalhos que não apresentaram testes práticos ou que os dados pudessem estar viesados por ligações econômicas, sendo esses uma total de 33,4% dos trabalhos aproximadamente, como podemos ver pela Figura 34. Enquanto que em todos os trabalhos restantes, aproximadamente 66,7% deles, foi possível identificar um desem-

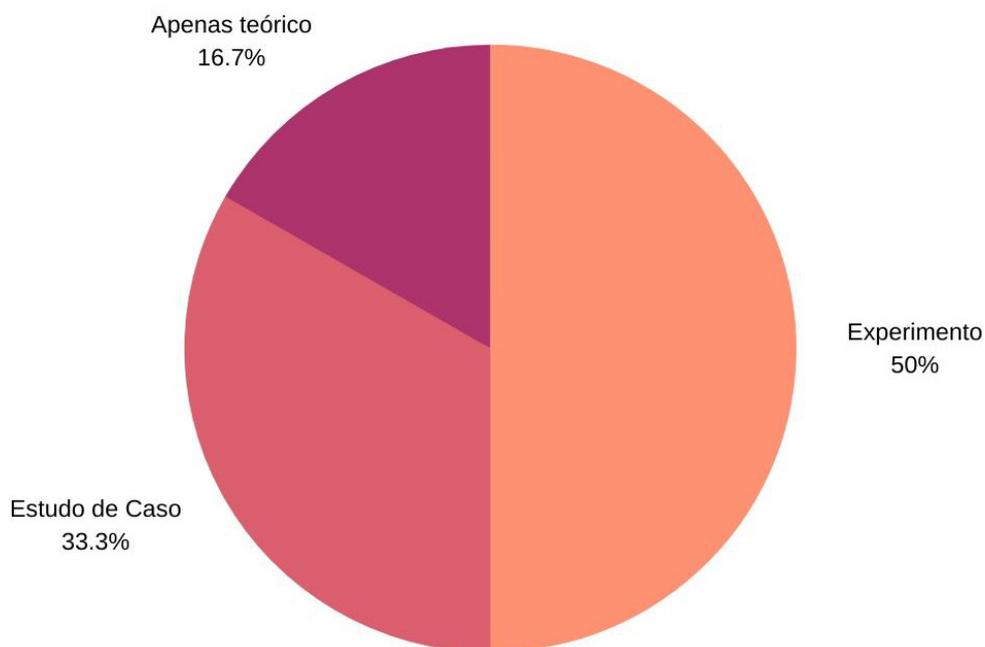


Figura 33 – Tipo de estudo realizado.

penho e eficiência satisfatórios, pois mesmo com alguns problemas de desempenho vindos da inclusão de incentivo à rede, eles ainda apresentam um ótimo nível de QoS e estabilidade em seus protocolos.

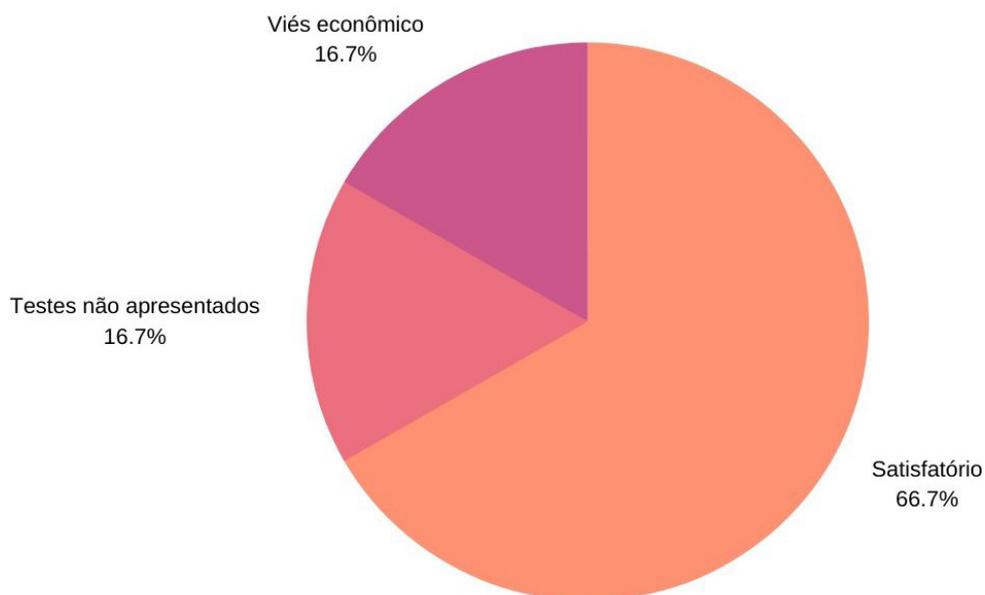


Figura 34 – Eficiência prática das propostas.

A.8.4 Quais os benefícios e melhorias podem ser alcançadas para as WMNs com a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro?

Dentro dos benefícios e melhorias elencados pelos trabalhos, destaca-se a sustentabilidade da rede, citado em 83% dos estudos (Figura 35), já que os mecanismos de incentivo tem como principal objetivo, garantir um retorno viável para quem mantém a rede e age para contribuir com o crescimento da mesma. Outros benefícios são também elencados como confiança entre os participantes, transparência das transações e imutabilidade dos dados que as guardam, garantidas pela utilização de tecnologias como a Blockchain. Também foram citados benefícios na melhora do tempo de convergência, mas tal característica ocorre apenas em propostas que lidam com protocolos a nível de enlace, pois permite atribuir métricas que incentivem a escolha dos melhores links de comunicação, de maneira mais ágil e assertiva, já em protocolos a nível de rede, como é abordado na maior parte dos estudos analisados, a convergência não costuma ter melhoras, pois as métricas adicionam processamento que costuma consumir banda de rede, levando a uma melhora de convergência de poucos trabalhos, em aproximadamente 16% deles apenas.

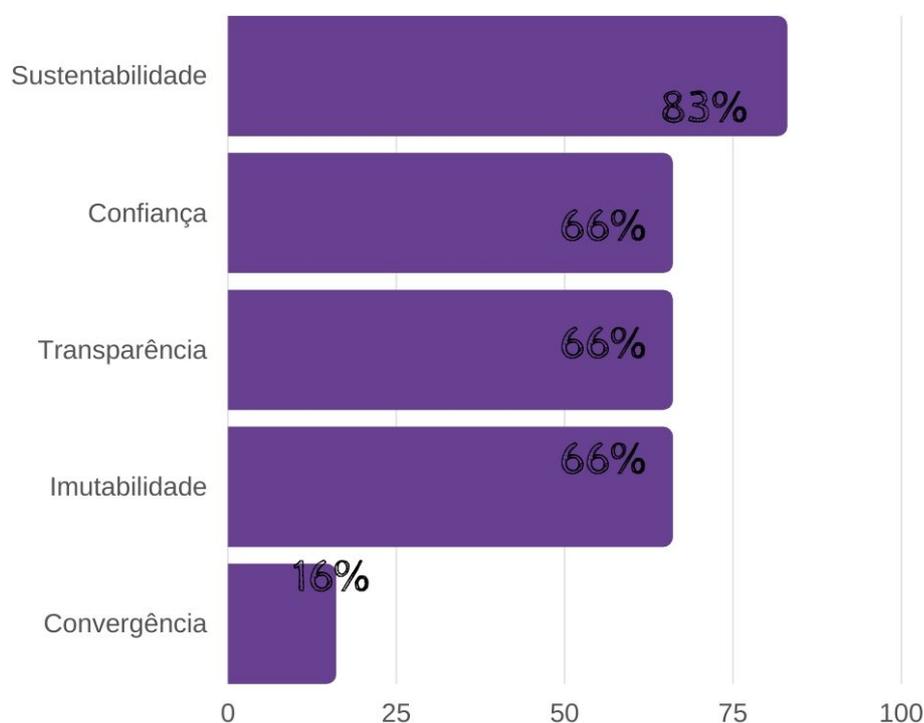


Figura 35 – Benefícios e melhorias identificados.

A.8.5 Quais os custos e riscos associados a utilização dos protocolos adaptados com mecanismos de incentivo financeiro para as WMNs?

Os trabalhos analisados apresentam como problemas, diversos desafios que costumam estar vinculados a dois aspectos, o desempenho da rede e as regras de governança da mesma (Figura 36). As redes WMNs, como costumam ser executadas em dispositivos limitados, tanto em processamento como em energia, e a inclusão de novas métricas a serem analisadas causa uma maior demanda de processamento, que pode afetar o desempenho a nível de tráfego e banda de redes. Como esse impacto no desempenho costuma ser aceitável segundo testes, e por aumentar as funcionalidades principais de incentivo e estabilidade da rede, as propostas tornam-se viáveis. A execução dos protocolos, por ser sempre vinculada ao meio físico, costuma sofrer certas interferência dos mesmos, e dependendo de aspectos como localização dos nós e forma de pagamento dos participantes, podem existir problemas caso a rede não tenha um nível de governança mínimo e eficaz, capaz de manter a ordem e qualidade da mesma.

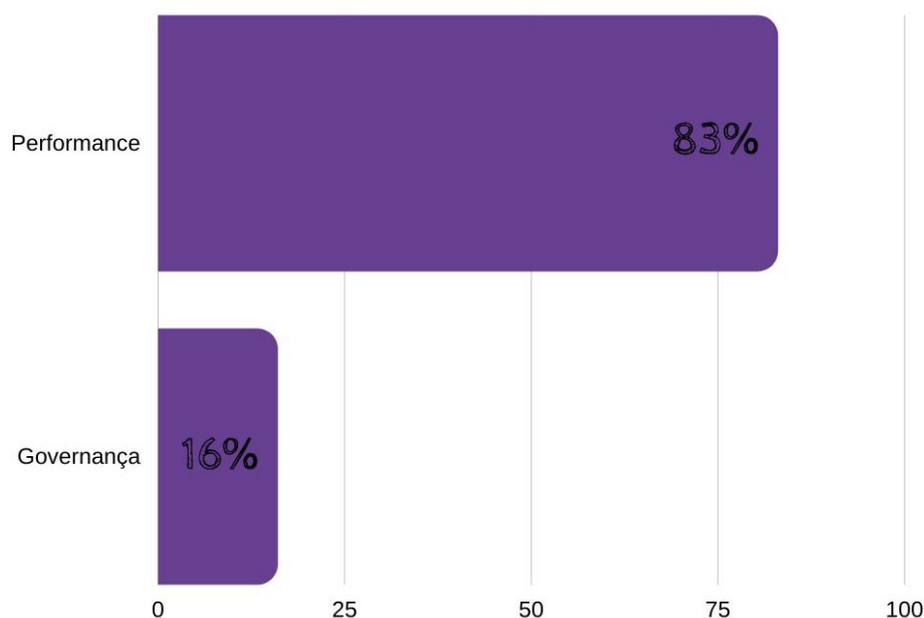


Figura 36 – Custos e riscos identificados.

A.9 CONCLUSÃO

Através da análise realizada dos estudos apresentados, é possível identificar a exploração de redes de malha sem fio como sendo uma possibilidade real e implementável, capaz de se tornar globalmente aplicável quando em conjunto com tecnologias como blockchain juntamente com políticas de recompensa por meio de criptomoedas(ou outras forma que sejam de interesse dos participantes da rede), além de ga-

rantir mecanismos básicos de segurança que permitam maior confiabilidade entre os integrantes da rede, segurança nas transações de recompensa entre os participantes da rede e diminuição dos custos de armazenamento e produção de blocos para a borda da rede. Mas ainda existem muitos desafios a serem alcançados, tanto em questões de segurança e privacidade da rede, quanto em problemas relacionados ao desempenho e governança da rede, que ainda podem ser mais explorados dentro de possíveis trabalhos futuros.