

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

NEIMAR MARCOS ASSMANN

**Uma abordagem integrada para
posicionamento e composição de medições
ativas de rede**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da
Computação

Orientador: Prof. Dr. Jéferson Campos Nobre

Porto Alegre
2023

CIP — CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Assmann, Neimar Marcos

Uma abordagem integrada para posicionamento e composição de medições ativas de rede / Neimar Marcos Assmann. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2023.

56 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR-RS, 2023. Orientador: Jéferson Campos Nobre.

1. Composição de medições. 2. Colocação de pontos de medições. 3. Pontos de medições. 4. Otimização. 5. Gerenciamento de redes. I. Nobre, Jéferson Campos. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos André Bulhões

Vice-Reitora: Prof^a. Patricia Pranke

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Celso Giannetti Loureiro Chaves

Diretora do Instituto de Informática: Prof^a. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenadora do PPGC: Prof^a. Luciana Salete Buriol

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

Dedico este trabalho a todos aqueles que tiveram a coragem de desafiar seus próprios limites, abraçando a jornada do aprendizado. Para mim, essa dissertação representa um desafio significativo, um mergulho profundo na busca pelo conhecimento e uma superação pessoal.

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa, Márcia, meu porto seguro, agradeço imensamente por estar ao meu lado, me apoiando incondicionalmente em cada etapa desse processo. Seu amor, encorajamento e compreensão foram essenciais para que eu pudesse enfrentar os desafios com confiança.

Às minhas adoráveis filhas, Lívia e Júlia, que são minha fonte de inspiração diária, agradeço por compreenderem os momentos em que precisei me dedicar a este trabalho. Seu apoio e amor incondicional me deram forças para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, à minha mãe Neusa, que sempre acreditou em mim e me incentivou a buscar meus objetivos. Ao meu amado pai, Miranda, cujo amor, sabedoria e apoio inabaláveis continuaram a me guiar mesmo após sua partida durante esse trabalho. Sua influência e presença em minha vida foram e sempre serão uma fonte de inspiração e força. Sou grato por ter tido a honra de chamá-lo de pai.

Neste período marcado pela pandemia de COVID-19, que trouxe desafios inesplorados e impactou nossa vida de diversas maneiras, expresso minha gratidão por todas as lições aprendidas. O enfrentamento desse momento difícil, tanto psicologicamente quanto emocionalmente, fortaleceu minha resiliência e determinação em concluir este trabalho. A conscientização da importância do cuidado da saúde mental durante esse período desafiador permitiu-me encontrar equilíbrio e foco, possibilitando que eu enfrentasse os obstáculos com maior clareza e bem-estar emocional.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Jéferson Campos Nobre, pela paciência, orientação e conhecimento compartilhados ao longo dessa jornada. Sua dedicação em me apoiar, sua habilidade em conduzir questionamentos essenciais foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Sou imensamente grato por ter tido a oportunidade de aprender com você e de contar com seu apoio constante.

Por fim, expresso minha gratidão a todos os amigos que me apoiaram durante essa jornada. Seja por meio de palavras de encorajamento, discussões enriquecedoras ou apoio prático, cada um de vocês desempenhou um papel importante no meu percurso acadêmico. Agradeço sinceramente a todos vocês.

Muito obrigado!

RESUMO

A evolução incessante da Internet originou uma vasta variedade de aplicações e serviços, elevando a importância de assegurar sua performance e segurança. Neste cenário, o monitoramento de redes é primordial para a detecção e prevenção de falhas e vulnerabilidades. Todavia, assegurar um monitoramento eficiente e otimizar o uso dos recursos de rede demandam uma estratégia coordenada e integrada em relação ao posicionamento e à composição das medições. O posicionamento adequado das medições implica escolher pontos de medição de forma estratégica, levando em conta fatores como a distribuição de carga e as características da rede. Já a composição refere-se à combinação das medições coletadas com o objetivo de estimar a medição ao longo de todo o percurso. Frequentemente, o posicionamento e a composição das medições são tratados de maneira isolada, acarretando subutilização dos recursos disponíveis. Para contornar esta questão, o presente estudo sugere uma abordagem integrada para o posicionamento e composição de medições ativas. Este estudo fundamenta-se em uma revisão da literatura, incluindo pesquisas anteriores sobre a alocação de pontos de medição e composição de medições. A partir deste embasamento, um modelo matemático do problema foi desenvolvido, e uma solução eficiente foi alcançada através da programação linear, utilizando a biblioteca PULP e o solver CPLEX. As principais contribuições e resultados deste estudo incluem: a formalização do problema de alocação de pontos de medição e composição de medições, levando em consideração as restrições e particularidades da rede; a introdução de uma metodologia de resolução fundamentada em programação linear, demonstrando sua eficácia na obtenção de soluções ótimas; e a realização de uma avaliação experimental para analisar a eficiência e eficácia do método proposto.

Palavras-chave: Composição de medições. colocação de pontos de medições. pontos de medições. otimização. gerenciamento de redes.

An Integrated Approach for Positioning and Composition of Active Network Measurements

ABSTRACT

The unceasing evolution of the Internet has given rise to a wide variety of applications and services, elevating the importance of ensuring their performance and security. In this scenario, network monitoring is paramount, as it is essential for detecting and preventing faults and vulnerabilities. However, ensuring efficient monitoring and optimizing network resource use requires a coordinated and integrated strategy concerning the positioning and composition of measurements. Proper measurement positioning implies strategically choosing measurement points, considering factors such as load distribution and network characteristics. Conversely, composition refers to combining the collected measurements to estimate the measurement across the entire path. Frequently, the positioning and composition of measurements are treated in isolation, resulting in the underutilization of available resources. Based on that, the present study suggests an integrated approach to the positioning and composition of active measurements. We present a study of relevant literature, including previous research on the allocation of measurement points and the composition of measurements. A mathematical model of the problem developed from this foundation and an efficient solution was achieved through linear programming using the PULP library and the CPLEX solver. The main contributions and results of this study include the formalization of the problem of allocating measurement points and composing measurements, taking into consideration the constraints and peculiarities of the network; the introduction of a resolution methodology based on linear programming, demonstrating its efficacy in obtaining optimal solutions; and conduct an experimental evaluation to analyze the efficiency and efficacy of the proposed method.

Keywords: measurement composition, placement of measurement points, measurement points, optimization, network management.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	- Autonomous System
FCAPS	- Fault, Configuration, Accounting, Performance and Security
GPS	- Global Positioning System
IEFT	- Internet Engineering Task Force
ILP	- Integer Linear Programming
IP	- Internet Protocol
IPFIX	- IP Flow Information eXport
IPPM	- IP Performance Measurement
IPSLA	- Internet protocol service level agreement
ISP	- Internet Service Provider
ITU	- International Telecommunication Union
ITU-T	- International Telecommunication Union
LEISURE	- Load-Equalized meaSUREment
MILP	- Mixed Integer Linear Programming
MP	- Measurements Point
NFV	- Network Function Virtualization
ONLP	- Optimal NetFlow Location Problem
ONLP	- Optimum Node Location Problem
OWAMP	- One-Way Active Measurement Protocol
PDM	- Performance and Diagnostic Measurements
QoS	- Quality of Service
RFC	- Request for Comments
RFM	- Realtime Traffic Flow Measurement
RNP	- Rede Nacional de Ensino e Pesquisa

RPM	- Real-time performance monitoring
RTFM	- Realtime Traffic Flow Measurement
RTT	- Round Trip Time
SCTP	- Stream Control Transport Protocol
SLA	- Service Level Agreement
SLO	- Service Level Objective
TAP	- Test Access Points
TCP	- Transmission Control Protocol
ToS	- Type of Service
TWAMP	- Two-Way Active Measurement Protocol
UDP	- User Datagram Protocol
VNFs	- Virtual Network Functions
VNS	- Variable Neighbourhood Search

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo lógico do OWAMP e TWAMP (SHALUNOV et al., 2006; BAIARZ et al., 2008)	19
Figura 2.2 Visão geral dos padrões relevantes	23
Figura 4.1 Rede de exemplo para colocação e composição de medições	36
Figura 5.1 Redes utilizadas nos Experimentos: GÉANT 2012/RNP	45
Figura 5.2 Rede RNP - Total médio de medições realizadas	47
Figura 5.3 Rede GÉANT - Total médio de medições realizadas	48
Figura 5.4 Resultados do CPLEX: GÉANT 2012/RNP	49
Figura 5.5 Rede RNP - Tempo total e de CPU/CPLEX em segundos	50
Figura 5.6 Rede GÉANT - Tempo total e de CPU/CPLEX em segundos	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Análise resumida dos trabalhos relacionados	26
Tabela 4.1	Lista de símbolos e formulações relacionadas ao modelo de otimização	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Mecanismos de Medição.....	14
2.1.1 Mecanismos de Medições Passivas.....	15
2.1.2 Mecanismos de Medições Ativas.....	17
2.1.3 Mecanismos de Medições Híbridos	20
2.2 Controle de Mecanismos de Medições	21
2.3 Métricas de Medições	22
2.4 Composição de Métricas.....	23
2.4.1 Agregação Temporal	23
2.4.2 Agregação Espacial.....	24
2.4.3 Composição Espacial	24
3 TRABALHOS RELACIONADOS	26
3.1 Colocação de Medições e Pontos de Medições.....	27
3.2 Problemas Correlatos	30
4 UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA POSICIONAMENTO E COM- POSIÇÃO DE MEDIÇÕES ATIVAS DE REDE	33
4.1 Visão geral do problema.....	33
4.1.1 Colocação.....	34
4.1.2 Atribuição	34
4.1.3 Composição.....	35
4.2 Representação Gráfica do Problema.....	35
4.3 Descrição do modelo e notação	37
4.4 Formulação do modelo	38
5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	43
5.1 Ferramentas de Desenvolvimento.....	43
5.2 Dados de Entrada e Preparação	44
5.3 Resultados e Discussões	46
5.3.1 Eficácia na resolução.....	46
5.3.2 Eficiência em relação ao tempo de execução.....	49
6 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Internet tem evoluído consideravelmente em relação ao seu tamanho, heterogeneidade e complexidade, o que permite uma maior diversidade de aplicações e serviços para os usuários. No entanto, problemas de desempenho nessas aplicações e serviços podem impactar negativamente o sucesso dos negócios a longo prazo, resultando em perdas financeiras significativas para as organizações e seus usuários.

Para identificar e resolver problemas de desempenho de rede antes mesmo que eles causem danos, é fundamental realizar um monitoramento constante da Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) da rede. Esse monitoramento permite avaliar o comportamento da rede e identificar problemas antes que os usuários os relatem. Além disso, o monitoramento também é importante para a engenharia de tráfego, contabilidade de tráfego e segurança da rede.

Existem duas abordagens principais para o monitoramento de redes: mecanismos ativos e passivos, bem como uma combinação de ambos, conhecida como mecanismos híbridos (MORTON, 2016). Os mecanismos ativos envolvem a geração de tráfego sintético para obter resultados de métricas de desempenho, enquanto os mecanismos passivos observam os fluxos de pacotes de interesse dentro dos dispositivos de rede.

As medições ativas tendem a oferecer maior acurácia e privacidade em comparação às medições passivas. No entanto, ativar sessões de medição consome recursos nos dispositivos, uma vez que é necessário iniciar uma nova sessão para cada destino monitorado. Portanto, a quantidade de recursos consumidos é diretamente proporcional ao número de destinos monitorados.

Os mecanismos híbridos surgem como uma alternativa para combinar os benefícios dos mecanismos ativos e passivos, minimizando suas desvantagens. Essa abordagem pode reduzir a necessidade de medições ativas intrusivas, sem comprometer a precisão dos resultados da medição (ZANGRILLI; LOWEKAMP, 2003).

No entanto, a prática atualmente utilizada na colocação e composição de sondas de medição de rede é baseada no conhecimento e experiência do administrador de rede. Embora essa abordagem possa evitar sobrecargas e perda de eficiência nos dispositivos de rede, ela apresenta limitações significativas. Em primeiro lugar, é um processo trabalhoso para o administrador, exigindo tempo e esforço consideráveis. Além disso, essa prática demonstra ineficiência em infraestruturas de rede altamente dinâmicas, onde é necessário que o administrador reaja e reconfigure manualmente as sessões de medição, o que pode

resultar em atrasos e interrupções no monitoramento.

A colocação e a composição de sondas de medição de rede são partes essenciais do ciclo de vida das medições e devem ser realizadas mesmo durante mudanças na infraestrutura de rede. Embora estudos anteriores tenham abordado separadamente os problemas de colocação ((HUANG et al., 2012)) e composição ((CHANG et al., 2013)) de sondas, é possível enxergá-los como etapas interdependentes de um mesmo processo, que precisam ser otimizadas em conjunto. Essa abordagem integrada aumenta consideravelmente a complexidade do problema.

Neste trabalho, propomos uma otimização integrada da colocação e composição de sondas para medições ativas em uma infraestrutura de rede, como um provedor de serviços de Internet (ISP). Ao adotar uma abordagem integrada, evitamos decisões subótimas ou até conflitantes, que podem surgir de análises individuais do problema. Nosso objetivo é aumentar a eficiência das medições ativas de rede, ao mesmo tempo em que reduzimos os recursos computacionais e de rede necessários para essas medições.

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes: (i) a definição integrada do problema de colocação e composição de sondas para medições ativas em toda a rede; (ii) a proposta de uma solução heurística para esse problema; e (iii) a avaliação e discussão dos resultados obtidos por meio da aplicação da solução proposta.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. No Capítulo 2, são apresentados os principais conceitos relacionados às medições de redes. No Capítulo 3, são abordados os trabalhos relacionados e os problemas correlatos. No Capítulo 4, é descrito o problema e formulado o modelo. No Capítulo 5, são apresentados os experimentos realizados e os seus resultados. A dissertação é concluída no Capítulo 6, onde são apresentadas as conclusões obtidas e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados conceitos essenciais relacionados a medições de redes. O conteúdo é baseado em uma análise de RFCs (Request for Comments), incluindo a RFC 2330 (ALMES et al., 1998), RFC 4656 (SHALUNOV et al., 2006), RFC 5357 (BABIARZ et al., 2008), RFC 5835 (BERGHE; MORTON, 2010), RFC 6812 (CHIBA et al., 2013), RFC 7312 (FABINI; MORTON, 2014) e RFC 7799 (MORTON, 2016), bem como em artigos acadêmicos, como (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018) e (CHAUDET et al., 2005). Recomenda-se consultar essas referências para obter uma fundamentação mais completa e exaustiva.

Ao discutir medições de redes, é importante mencionar o Grupo de Trabalho da IETF chamado *IP Performance Measurement (IPPM)*. Esse grupo é responsável pelo desenvolvimento e manutenção de métricas padrão que podem ser aplicadas à qualidade, desempenho e confiabilidade de serviços e aplicativos executados em protocolos de camada de transporte, como TCP e UDP, sobre IP. Além das métricas, o grupo também desenvolve metodologias e protocolos para a medição dessas métricas. Os documentos produzidos pelo grupo são publicados em RFCs, que são publicações que documentam padrões, serviços e protocolos da Internet e são mantidos pelo IETF.

Existem diversos mecanismos que podem ser utilizados para realizar medições de rede. Em geral, esses mecanismos são divididos com base na abordagem adotada para a injeção de tráfego de medição.

2.1 Mecanismos de Medição

Os mecanismos de medição de rede são uma técnica efetiva para a monitoração dos níveis de serviço, fornecendo aos administradores de redes medidas que podem ser usadas em diferentes contextos, como validação pré-implantação, detecção de intrusões, interceptação legal, monitoramento de desempenho, suporte de manutenção, engenharia de rede e relatórios de desempenho para os clientes. Essas medições podem ser realizadas considerando caminhos de ponta a ponta, segmentos individuais ou até mesmo domínios em uma infraestrutura de rede (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018; BERGHE; MORTON, 2010).

No entanto, como mencionado na RFC 5835 (BERGHE; MORTON, 2010), é inviável realizar medições de cada nó para todos os demais em redes de grande porte, como

as de grandes provedores de serviços de Internet (ISPs). Cada medição possui um custo computacional associado, e o número de medições aumenta de forma quadrática em relação ao número de nós na rede. Além disso, a operação desses mecanismos requer recursos humanos, uma vez que sua configuração é baseada na experiência e conhecimento dos administradores de rede.

Para lidar com o problema do custo operacional, (CHAUDET et al., 2005) destaca a importância de utilizar mecanismos de medição que minimizem os efeitos na rede, como o tráfego adicional, o aumento da carga do hardware e das aplicações, e os custos extras de manutenção dos ambientes de medição.

Existem diversos mecanismos que podem ser empregados para permitir medições de rede. De forma geral, esses mecanismos são classificados com base na abordagem utilizada para a injeção de tráfego de medição, resultando em três tipos: mecanismos de medição passivos, ativos e híbridos. As medições passivas são realizadas dentro dos dispositivos de rede para coletar parâmetros por meio do uso de *sniffers* de pacotes. As medições ativas são implantadas por meio de sondas de medição hospedadas na rede, que injetam tráfego sintético e calculam o desempenho atual da rede. Além disso, existem as medições híbridas, que combinam a medição ativa para gerar o tráfego desejado com a medição passiva para monitorar os pacotes gerados (MORTON, 2016).

2.1.1 Mecanismos de Medições Passivas

Os mecanismos de medição passivos coletam dados de forma não intrusiva, ouvindo o tráfego de rede e verificando as condições da rede. Essas medições não geram tráfego adicional, o que as torna adequadas para análises precisas sem impacto no desempenho da rede. A coleta de dados é realizada configurando dispositivos de medição em locais estratégicos da rede (MORTON, 2016).

As medições passivas de rede podem ser usadas em várias aplicações, como gerenciamento de falhas (por exemplo, sistemas de detecção de intrusões baseados em fluxo). Essa abordagem é implementada dentro dos dispositivos de rede, que observam os fluxos de tráfego passantes (NOBRE, 2016).

Os fluxos de tráfego podem ser definidos como sequências unidirecionais de pacotes que passam por um dispositivo de rede e são agrupados com base em propriedades comuns. Essas propriedades podem incluir campos dos pacotes, como endereços IP de origem/destino, números de porta, tipo de protocolo da camada três, tipo de serviço (ToS)

e tamanho (número agregado de bytes). Além disso, informações como Sistema Autônomo (AS) de origem/destino e interfaces de entrada/saída também podem ser usadas para definir os fluxos. É importante garantir a uniformidade na representação dos dados de fluxo e na comunicação desses dados entre os elementos da rede e os pontos de coleta correspondentes (CLAISE, 2008).

Existem vários protocolos usados para a produção e troca de dados de fluxo. Um exemplo é o sFlow (PANCHEN; MCKEE; PHAAL, 2001), que fornece monitoramento contínuo de tráfego para redes de alta velocidade através de fluxos de tráfego. O sFlow utiliza técnicas de amostragem para abordar problemas associados ao monitoramento preciso do tráfego de rede. O sistema de monitoramento sFlow consiste em agentes sFlow e um analisador sFlow central, que captura estatísticas de tráfego dos dispositivos monitorados e encaminha os dados para processamento.

O grupo de trabalho *Real-time Traffic Flow Measurement* (RTFM) do IETF publicou vários documentos que descrevem um método para a especificação de fluxos de tráfego em tempo real dentro de uma rede (RUTH; BROWNLEE; MILLS, 1999). Esse método envolve uma hierarquia de dispositivos, como medidores, leitores de medidores e gerenciadores, para medir os fluxos especificados, bem como mecanismos de configuração e coleta. O RTFM fornece alta resolução de tempo para os tempos do primeiro e último pacote de cada fluxo. Os contadores para fluxos de longa duração podem ser lidos em intervalos determinados por um gerente. O medidor RTFM foi projetado para reduzir ao máximo a quantidade de dados coletados, minimizando assim o processamento necessário para ler os dados de tráfego e gerar relatórios. Pelo menos um leitor de medidores é necessário para coletar os dados medidos dos medidores, e um gerenciador é necessário para controlar os medidores e leitores de medidores (BROWNLEE, 1999).

Outro protocolo amplamente utilizado para fornecer acesso a informações de fluxo IP em redes de dados é o Cisco NetFlow (CLAISE, 2004). A arquitetura NetFlow envolve dois tipos de componentes: exportadores medidores, que coletam e transmitem fluxos, e coletores, que recebem e armazenam esses fluxos para processamento posterior. No NetFlow, cada exportador envia periodicamente mensagens para os coletores configurados, sem interação direta com o coletor. Embora o protocolo NetFlow seja uma solução proprietária desenvolvida pela Cisco, a versão 9 do NetFlow é descrita na RFC 3954 (CLAISE, 2004).

O grupo de trabalho *IP Flow Information eXport* (IPFIX) do IETF também publicou vários documentos descrevendo um protocolo baseado na versão 9 do NetFlow

(CLAISE, 2008). O IPFIX incorpora aprimoramentos em diferentes domínios, como transporte com reconhecimento de congestionamento e segurança integrada. Além disso, o IPFIX utiliza o *Stream Control Transport Protocol* (SCTP) como protocolo de transporte para os dados. O uso do SCTP garante um transporte confiável e evita congestionamentos. Nesse modelo, os exportadores de medição, que são hospedados em elementos de rede (como roteadores e switches), coletam os dados de fluxo e exportam os registros IPFIX para os coletores configurados.

No contexto das medições passivas, é essencial que os mecanismos minimizem tanto a quantidade de dispositivos de medição quanto a quantidade de dados coletados, ao mesmo tempo em que garantem a precisão das medições (CHAUDET et al., 2005). Isso requer equipamentos de alto desempenho, especialmente em termos de velocidade da memória principal, o que pode se tornar caro. Os dados de tráfego podem ser selecionados para coleta por meio de filtragem, classificação e amostragem.

2.1.2 Mecanismos de Medições Ativas

As medições ativas de redes são intrusivas, pois injetam tráfego na infraestrutura de rede com o objetivo de fornecer resultados para métricas de desempenho (MORTON, 2016). Um dos principais objetivos das medições ativas é encontrar o número mínimo de pacotes de teste capazes de medir todos os links na rede (CHAUDET et al., 2005).

Os mecanismos de medição ativa geram fluxos de pacotes, nos quais os pacotes do fluxo de interesse possuem campos ou valores de campo dedicados à medição. Geralmente, a informação mais comum dedicada à medição é um número de sequência, que é combinado com um carimbo de data/hora para determinar os pacotes correspondentes em vários pontos de medição (MORTON, 2016).

A medição ativa desempenha um papel importante no monitoramento dos Objetivos de Nível de Serviço (SLO) e na integridade da rede como um todo. Os mecanismos ativos injetam tráfego sintético em caminhos de rede específicos para medir o desempenho da rede em termos de atraso, perda, *jitter* e perda de pacotes/quadros. Essas medições são úteis para a validação do serviço antes da implantação e o monitoramento dos Acordos de Nível de Serviço (SLA) em toda a rede (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018).

As medições ativas podem ser unidirecionais (ida ou volta) ou bidirecionais (ida e volta). As medições unidirecionais são mais informativas, pois é mais fácil isolar efeitos

assimétricos em partes específicas da rede. No entanto, medições unidirecionais de alta precisão exigem boas fontes de tempo, como o Sistema de Posicionamento Global (GPS) (ALMES et al., 1998). As medições bidirecionais são comumente usadas em redes IP e utilizam carimbos de hora aplicados no destino do eco para obter maior precisão. Dessa forma, não é necessário sincronizar os relógios locais e remotos. No entanto, é mais difícil isolar a direção em que os problemas de desempenho são experimentados usando medições de ida e volta (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018).

A geração de tráfego sintético geralmente é realizada por uma arquitetura composta por dois *hosts* com funções específicas: um emissor e um receptor, também conhecidos coletivamente como sondas de medição (ativos). Dois protocolos inter-relacionados geralmente definem a troca de pacotes entre as sondas: um protocolo de controle, usado para iniciar e controlar sessões de medição e buscar seus resultados, e um protocolo de teste, usado para enviar pacotes de medição únicos ao longo do caminho da rede em teste. O suporte de medição na extremidade do receptor pode ser limitado a uma simples função de eco. Existem vários protocolos usados para habilitar a medição ativa.

Por exemplo, o monitoramento de desempenho em tempo real (*RPM - Real-Time Performance Monitoring*) oferecido pela Juniper Networks¹ permite a configuração de sondas ativas para rastrear e monitorar o tráfego na rede, a fim de investigar problemas de desempenho. O RPM é um serviço executado como um processo do sistema operacional Junos e é usado nos dispositivos de roteamento da Juniper. O RPM envolve um cliente (origem) que envia consultas de sondagem e um servidor (destino) que responde. Durante a sessão de medição, o dispositivo cliente envia um pacote para um servidor remoto, que por sua vez o devolve com uma confirmação ao remetente. O RPM é amplamente usado para monitorar o desempenho nas camadas de rede e transporte, e também pode gerar alertas nos limites configurados.

Outro protocolo amplamente implantado é o *Service Level Assurance (SLA)* (também conhecido como *IPSLA*), definido pela Cisco Systems, que é descrito em um RFC informativo da IETF (CHIBA et al., 2013). Esse protocolo mede os níveis de serviço relacionados ao link de dados e às camadas de rede, além de emular características de diferentes aplicativos, considerando métricas unidirecionais e bidirecionais. O modelo lógico IPSLA consiste essencialmente em um emissor e um respondente, ou seja, sondas de medição. O protocolo consiste em duas fases distintas: a fase de controle e a fase de medição. A fase de controle forma o protocolo base, que estabelece a identidade do emis-

¹<<https://www.juniper.net/us/en.html>>

sor e fornece informações para a fase de medição. A fase de medição é composta por uma sequência de mensagens de solicitação de medição e de resposta à medição (mensagens de teste).

Além disso, foram propostos mecanismos abertos de medição ativa pelo Grupo de Trabalho de Métricas de Desempenho IP da IETF (IPPM), que permitem a troca de pacotes para produzir métricas unidirecionais e bidirecionais. Esses mecanismos são chamados, respectivamente, de *One-way Active Measurement Protocol* (OWAMP) (SHALUNOV et al., 2006) e *Two-Way Active Measurement Protocol* (TWAMP) (BABIARZ et al., 2008).

Os mecanismos OWAMP e TWAMP consistem em dois protocolos inter-relacionados: um protocolo de controle (TCP), usado para iniciar e controlar as sessões de medição e buscar seus resultados, e um protocolo de teste (UDP), usado para enviar pacotes de medição únicos ao longo do caminho da Internet em teste. O protocolo de controle é executado pelo cliente de controle (solicita, inicia e encerra as sessões de teste) e pelo servidor de controle (gerencia as sessões de teste), enquanto o protocolo de teste é executado pelo emissor e pelo receptor/refletor de sessão.

O TWAMP possui um modo especial chamado *TWAMP-light*, que elimina a necessidade do protocolo TWAMP-Control e pressupõe que o *Session-Reflector* esteja configurado para refletir os pacotes recebidos de volta ao controlador, copiando as informações necessárias e gerando valores de número de sequência e carimbo de data/hora. A Figura 2.1 ilustra o modelo lógico usado no OWAMP e TWAMP, mostrando os diferentes *hosts* e seus papéis lógicos.

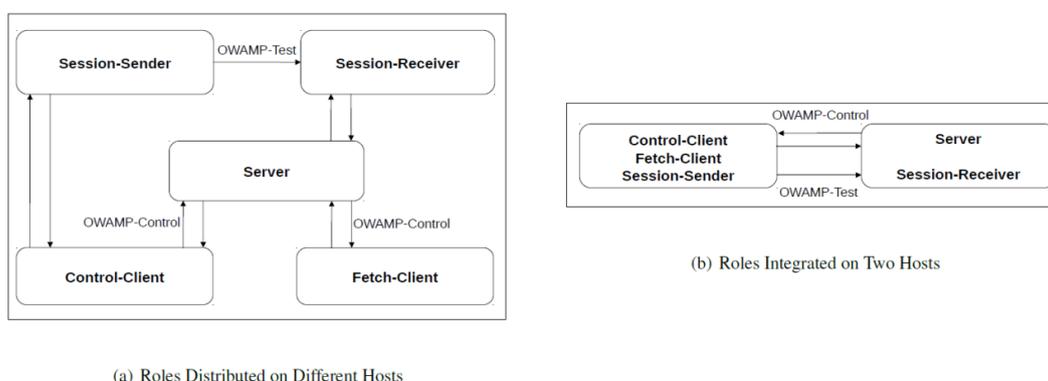


Figura 2.1 – Modelo lógico do OWAMP e TWAMP (SHALUNOV et al., 2006; BABIARZ et al., 2008)

Fonte: (NOBRE, 2016)

Esses mecanismos ativos oferecem uma maneira eficaz de realizar medições de desempenho em redes, permitindo a injeção controlada de tráfego de teste e a coleta de

métricas relevantes. Cada protocolo tem suas próprias características e requisitos específicos, e a escolha do mecanismo adequado depende das necessidades e do contexto da medição.

2.1.3 Mecanismos de Medições Híbridos

A combinação de medições ativas e passivas é conhecida como medição híbrida. Embora os mecanismos de medição ativa e passiva sejam bem estabelecidos, os mecanismos de medição híbridos são mais variáveis em termos de definição, dependendo dos órgãos de padronização. Os padrões existentes, como a Recomendação ITU-T Y.1540 (RECOMMENDATION, 2019), já consideram métricas que se aplicam à medição híbrida (SEITZ, 2003). Essas métricas podem ser derivadas de campos ou valores de campo dedicados à medição em um fluxo de interesse (MORTON, 2016).

Os mecanismos de medição híbridos visam oferecer alguns dos benefícios dos mecanismos ativos e passivos sem incorrer em suas desvantagens. As métricas geradas pela medição híbrida geralmente possuem propriedades distintas e consomem diferentes recursos para a entrega dos resultados. Por exemplo, em termos de atraso, os métodos híbridos podem fornecer resultados mais precisos do que os métodos passivos, mas sem o custo de rede dos métodos ativos. Os mecanismos ativos fornecem medições de atraso mais precisas, enquanto os mecanismos passivos não interferem nos fluxos de rede.

Uma categorização para os mecanismos de medição híbridos foi proposta pelo IETF IPPM (MORTON, 2016) como Híbrido Tipo I e Híbrido Tipo II. O Híbrido Tipo I baseia-se no aumento ou modificação do fluxo de interesse ou no uso de métodos que alteram o tratamento desse fluxo. Por exemplo, o rascunho do *IPv6 Option Header for Performance and Diagnostic Measurements* (PDM) (ELKINS; HAMILTON; ACKERMANN, 2016) propõe a adição de "campos dedicados à medição" em fluxos de tráfego de usuários. O fluxo medido possui características desconhecidas até que seja processado para adicionar o cabeçalho PDM Option. O uso do PDM pretende ter um impacto mínimo no fluxo medido e nos demais fluxos da rede quando adicionado a interfaces estratégicas.

Pacotes de coloração também foram propostos (CAPELLO et al., 2014) ao reescrever um campo do fluxo em interfaces estratégicas para suportar medições de desempenho. O termo "coloração" é geralmente usado para descrever o método Híbrido Tipo I. O fluxo medido possui características desconhecidas até que seja processado para adicionar a coloração ao cabeçalho. A coloração não deve ter efeitos no fluxo medido, mas pode

haver condições em que essa intenção não seja totalmente realizada.

Um método semelhante é o IP Flow Performance Measurement (IPFPM) (CHEN et al., 2016), que também é um método híbrido Tipo I. Nesse método, o fluxo é medido e marcado com data e hora durante o processo para fornecer métricas de rede. Os pacotes de dados são marcados em diferentes blocos de marcadores, alterando um ou mais bits dos pacotes, sem modificar o processamento normal na rede. A medição pode ser realizada em serviço sem a inserção de tráfego adicional, e nenhum pacote delimitador adicional é necessário.

2.2 Controle de Mecanismos de Medições

A implantação e operação contínua dos mecanismos de medição exigem recursos humanos e computacionais. É necessário configurar e gerenciar as medições, além de lidar com mudanças na rede. Também é importante otimizar o uso dos recursos de equipamentos de rede, que são necessários para funções de roteamento e comutação. Portanto, o controle dos mecanismos de medição é essencial para garantir sua eficiência (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018).

Do ponto de vista dos recursos computacionais, os mecanismos de medição podem ser custosos. Por exemplo, em mecanismos de medição passiva que utilizam tabelas de fluxo, as sondas precisam calcular o valor de hash de cada pacote recebido para atualizar a tabela de fluxo. Isso requer processamento em tempo real e o uso de memória de alta velocidade, o que pode ser caro (KAMIYAMA; MORI; KAWAHARA, 2013). Da mesma forma, os mecanismos de medição ativa também consomem recursos nos dispositivos que os hospedam. Protocolos de medição ativa geralmente incluem diretrizes para limitar o uso de recursos computacionais (SHALUNOV et al., 2006).

O custo dos mecanismos de medição está relacionado ao tamanho e complexidade da infraestrutura de rede. É impraticável monitorar todos os fluxos da rede, e em algumas configurações, são implantados roteadores dedicados exclusivamente para lidar com mecanismos de medição (NOBRE, 2016).

Existem diferentes abordagens para controlar os mecanismos de medição. Uma abordagem simples envolve o controle de um único dispositivo, como o controle da amostragem de fluxo em um único dispositivo. No entanto, quando se considera uma rede inteira, várias sondas de medição podem ser posicionadas em dispositivos diferentes da infraestrutura de rede. É importante ressaltar que o controle "em toda a rede" não signi-

fica que todos os dispositivos de rede estejam sob controle, mas sim que uma abordagem integrada pode controlar vários dispositivos (NOBRE, 2016).

O controle dos mecanismos de medição permite compreender melhor o comportamento global da infraestrutura de rede. As sondas podem ser colocadas em diferentes locais da rede para coletar informações de várias partes da infraestrutura simultaneamente. Isso permite que as sondas distribuídas produzam informações de gerenciamento distribuídas, que podem ser usadas para melhorar as tarefas de gerenciamento. O controle de medições em toda a rede, envolvendo várias sondas distribuídas, pode aprimorar ainda mais as tarefas de medição (NOBRE, 2016).

2.3 Métricas de Medições

A necessidade de definir métricas de desempenho da rede e metodologias de medição decorre da necessidade de comparar diferentes medições e medir o desempenho com uma metodologia reprodutível e inegável, independente da tecnologia de transmissão e detalhes de implementação.

Tanto o ITU quanto o IETF produziram tais definições, conforme observado na Figura 2.2, embora cada um com uma ênfase diferente intimamente ligada ao histórico de ambas as organizações. A ITU tem suas origens na telefonia, enquanto o IETF tem um histórico de rede de dados. Enquanto a ITU enfatiza a avaliação de um serviço e sua qualidade, o IETF mede a rede e deseja fornecer à comunidade de TI uma compreensão e medição precisa e comum do desempenho e confiabilidade da Internet (ALMES et al., 1998).

O *Framework for IP Performance Metrics* (ALMES et al., 1998), RFC 2330, estabelece os conceitos fundamentais de métricas e metodologias de medição. Para facilitar o entendimento, também são definidas algumas terminologias dos componentes da Internet. O objetivo é garantir que usuários, provedores de Internet e serviços de transporte tenham um entendimento comum e preciso do desempenho e confiabilidade da Internet que eles usam/fornecem.

A Estrutura de Métricas de Desempenho IP foi atualizada pela RFC *Advanced Stream and Sampling Framework for IP Performance Metrics (IPPM)* (FABINI; MORTON, 2014), com o objetivo de permitir a obtenção de resultados repetíveis em redes modernas e adicionar considerações para metodologias de medição ativas.

A seguir, apresentamos as diferentes definições de métricas, que são em sua mai-

Figura 2.2 – Visão geral dos padrões relevantes

	IETF RFCs	ITU-T Recommendations
Framework	RFC 2330 [i.3]	Y.1540 [i.1], sections 1 through 5
Loss	RFC 2680 [i.6]	Y.1540 [i.1], section 5.5.6 G.1020 [i.23]
Delay	RFC 2679 [i.5] (One-way) RFC 2681 [i.7] (Round Trip)	Y.1540 [i.1], section 6.2 G.1020 [i.23] G.114 [i.22] (One-way)
Delay Variation	RFC 3393 [i.10]	Y.1540 [i.1], section 6.2.2 G.1020 [i.23]
Connectivity / Availability	RFC 2678 [i.4]	Y.1540 [i.1], section 7
Loss Patterns	RFC 3357 [i.9]	G.1020 [i.23]
Packet Reordering Packet Duplication	RFC 4737 [i.15]	Y.1540 [i.1], sections 5.5.8.1 and 6.6 Y.1540 [i.1], sections 5.5.8.3, 5.5.8.4, 6.8, and 6.9
Link/Path Bandwidth Capacity, Link Utilization, Available Capacity	RFC 5136 [i.31]	
Bulk Transport Capacity	RFC 3148 [i.8], RFC 5136 [i.31]	

Fonte: (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2009)

oria compatíveis, ou seja, são semanticamente equivalentes ou facilmente conversíveis umas nas outras.

2.4 Composição de Métricas

As técnicas de composição de acordo com a RFC 5835 (BERGHE; MORTON, 2010), são divididas em três classes: Agregação Temporal, Agregação Espacial e Composição Espacial. Essas classes descrevem diferentes abordagens para combinar e resumir dados de métricas em intervalos de tempo ou regiões espaciais.

As classes Agregação Temporal e Agregação Espacial, nesta seção, são descritas de forma mais objetiva e a Composição Espacial dado o presente estudo será dedicado maior detalhamento das características desta modalidade de composição.

Nas subseções a seguir, serão abordados os principais conceitos Composição de Métricas, além das discussões sobre o tema registradas na RFC 6049 intitulada “Composição Espacial de Métricas” (MORTON; STEPHAN, 2011).

2.4.1 Agregação Temporal

A agregação Temporal consiste na composição de métricas de mesmo tipo e escopo, obtidas em diferentes instantes ou janelas de tempo. De acordo com a RFC 5835 (BERGHE; MORTON, 2010), a metodologia utilizada consiste em agrupar os resultados de forma a identificar padrões, tendências ou anomalias no desempenho da rede. Um exemplo de seu uso é a realização de testes de atraso em intervalos de cinco minutos,

durante uma hora, de forma a obter uma análise cronológica do comportamento da rede neste período.

2.4.2 Agregação Espacial

A RFC 5835 (BERGHE; MORTON, 2010), menciona que a Agregação Espacial é realizada a partir de medições do mesmo tipo e diferentes escopos, independente do instante ou janela de tempo em que foi obtida, com o objetivo de estimar o desempenho geral de uma rede extensa. Neste modelo, é possível aplicar os efeitos da matriz de tráfego associada a cada trecho, de forma a ponderar os resultados obtidos de acordo com o tráfego observado. Assim esta técnica é útil principalmente para obter uma visão geral da rede, ou identificar gargalos em determinada rota, como o atraso máximo observado nos trechos que compõem um caminho fim a fim.

De acordo com a RFC 5835, a principal diferença entre a Agregação Espacial e Composição Espacial, a qual será detalhada na próxima seção, é que na Agregação Espacial cada trecho pode receber diferentes ponderações, de acordo com fatores como a matriz de tráfego da rede. Já na Composição Espacial valores de cada trecho devem ter o mesmo peso na formação da métrica.

2.4.3 Composição Espacial

A RFC 2330 (ALMES et al., 1998) é a primeira a apresentar definição para métricas de composição espacial, essas métricas se caracterizam por poderem ser aplicadas a um caminho (completo) e também pode ser definida pela soma de seus para vários subcaminhos. Conforme destacado por (NOBRE; MOZZAQUATRO; GRANVILLE, 2018) as medições podem ser realizadas considerando o caminho fim a fim (caminho completo), por segmentos individuais (subcaminhos) ou ainda em um domínio dentro da infraestrutura de rede. O objetivo é concatenar medições de vários trechos da rede, de forma a estimar o resultado.

Realizar medições ativas entre cada par Origem/destino às vezes pode ser impraticável, a malha completa de N pontos de medição cresce como $N \times N$, fato que pode limitar o escopo da medição por restrições de recursos(MORTON; STEPHAN, 2011). Por exemplo, pode ser impossível coletar o tamanho de amostra desejadas em cada inter-

valo de teste, devido a limitação no velocidade do link de acesso.

Ainda que não apresente a mesma precisão de outras classes de composição, em virtude de suas aplicabilidades práticas, a Composição Espacial merece especial atenção. Prova disto são as discussões do IETF a seu respeito, o que levou à produção da RFC 6049 (MORTON; STEPHAN, 2011).

A Composição Espacial consiste na geração de métricas relativas a um caminho completo de rede, a partir de medições obtidas nos diversos trechos que compõem este caminho. Isso pode ser aplicado em situações como o cálculo do atraso fim a fim, que pode ser realizado por meio da soma dos atrasos de todos os trechos que compõem o caminho. Contudo, o resultado desta composição, não se deva esperar que seja extremamente preciso, a utilização de estatísticas baseadas em uma quantidade razoável de amostras pode gerar algo próximo do que seria obtido em um teste fim a fim (DOURADO et al., 2011).

A Composição Espacial, ainda com relação à perda de precisão, torna-se relevante na medida em que existem situações onde não é possível realizar a medição desejada fim a fim. Por exemplo, o caminho em questão pode ultrapassar dois ou mais domínios de rede com políticas ou serviços conflitantes e, neste caso, a Composição Espacial pode ser utilizada para obter o resultado desejado por meio de dados elementares dos trechos que formam o caminho completo (DOURADO et al., 2011).

A RFC 6049 (MORTON; STEPHAN, 2011) estabelece regras para esta modalidade de composição com base nas três métricas primárias definidas pelo IPPM são elas: atraso, perda e variação do atraso. A composição do atraso pode ser realizada pela soma do atraso mínimo ou médio. Já a composição da perda pode ser obtida pela combinação das probabilidades empíricas (Empirical Probability – E_p) de cada trecho do caminho. O cálculo de E_p é realizado de forma compatível com a “Perda Média” definida na RFC 2680 (KALIDINDI; ZEKAUSKAS; ALMES, 1999). Maiores detalhamentos a respeito desta e das demais relações válidas para Composição Espacial relatadas nesta seção podem ser encontradas na RFC 6049.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta uma revisão da literatura sobre as partes que compõem esse problema, ou seja, colocação e composição de medições. Além disso, alguns trabalhos que investigam problemas correlatos são descritos. Um resumo da revisão é apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Análise resumida dos trabalhos relacionados

<i>Autor</i>	<i>Problema</i>	<i>Técnicas Utilizadas</i>	<i>Classificação</i>
(NGUYEN; THIRAN, 2004)	Definição das medições e colocação dos monitores para localização de falhas	Algoritmo de aproximação	\mathcal{NP} -difícil
(CHAUDET et al., 2005)	Colocação de medições e monitores passivos	Solução gulosa e Programação linear inteira mista - MILP	\mathcal{NP} -Difícil
(CANTIENI et al., 2006)	Colocação de monitores passivos e a configuração das taxas de amostragem	Algoritmo ótimo (projeção de gradiente)	\mathcal{NP} -Difícil
(ZANG; NUCCI, 2009)	Colocação de monitores passivos	Programa linear inteiro - ILP e soluções gulosas	\mathcal{NP} -Difícil
(SUH et al., 2006)	Colocação e controle de monitores	Heurística gulosa e Programação não-linear inteira mista (MINLP)	\mathcal{NP} -Difícil
(HUANG et al., 2012)	Posicionamento de monitores e roteamento dinâmico	Programação linear inteira mista (MILP) e algoritmos heurísticos	\mathcal{NP} -Difícil
(CHANG et al., 2013)	Colocação de monitores com balanceamento de carga	Programação linear inteira mista - MILP e algoritmos heurísticos	-
(PATIL; KINGER; PATHAK, 2013)	Colocação e seleção de conjuntos de medições	Algoritmo guloso	-
(COHEN et al., 2015)	Colocação de VNFs	Modelo de otimização e algoritmo de aproximação	\mathcal{NP} -Difícil
(LUKOVSKI; ROST; SCHMID, 2016)	Colocação de middleboxes ou NFV	Algoritmo de aproximação determinístico e gulosa programação inteira - IP	\mathcal{NP} -Completo
(LUIZELLI et al., 2017)	Colocação e encadeamento de NFVs	Algoritmo heurístico matemático fix-and-optimize e Variable Neighborhood Search (VNS)	\mathcal{NP} -Completo
(GONTARA; BOUFAIED; KORBAA, 2019)	Deteção e localização de nós defeituosos	Método de seleção de estações de medições e algoritmo guloso de pesquisa aditiva	-
(QI et al., 2021)	Seleção probabilística de medições e localização de falhas	Método de seleção probabilístico e busca mínima	- NP-difícil
(HUBBALLI, 2021)	Seleção de medições baseada em estatísticas de RTT	Utilização de estatísticas de tempo de ida e volta (RTT) e método de seleção	-
(CASTRO et al., 2021)	Planejamento de medições para Telemetria de Rede em Banda	Heurística baseada em programação matemática e Variable Neighborhood Search (VNS)	\mathcal{NP} -difícil

Fonte: O Autor

3.1 Colocação de Medições e Pontos de Medições

No estudo realizado por (CANTIENI et al., 2006), eles apresentaram uma reformulação do problema de colocação de medições, adaptando-o à realidade da operação e gerenciamento da Internet. O objetivo era determinar quais monitores deveriam ser ativados em uma rede em que todos os links pudessem ser monitorados, bem como definir a taxa de amostragem desses monitores, a fim de realizar uma tarefa de medição específica com alta precisão e baixo consumo de recursos. Os autores afirmaram que o problema de colocação de monitores é \mathcal{NP} -difícil. Eles implementaram um algoritmo ótimo usando o método de projeção de gradiente para otimização restrita, a fim de resolver o problema, e validaram o algoritmo através da análise de desempenho em uma rede de backbone real, utilizando dados coletados da rede backbone do GÉANT.

Uma abordagem que combina o posicionamento dos monitores com a estratégia de roteamento dinâmico, visando a utilização máxima das medições, é proposta por (HUANG et al., 2012). O problema é formulado como um Programa Linear Inteiro Misto (MILP) e são desenvolvidos algoritmos heurísticos para aproximar a solução ótima, reduzindo a complexidade computacional. Entre os quatro algoritmos heurísticos propostos, o "K-Best" é considerado a melhor escolha, uma vez que os experimentos demonstraram que ele alcança ganhos de medição próximos à solução ótima e reduz o tempo computacional em até 246 vezes.

O problema da otimização do custo e da cobertura na implantação de monitores passivos de tráfego de redes IP é investigado por (ZANG; NUCCI, 2009). Duas abordagens de monitoramento foram investigadas, a primeira com a habilitação de monitoramento NetFlow nas interfaces do roteador, enquanto a segunda é a implantação de estações de monitoramento, com CMON, nos links entre os roteadores. Um modelo é formulado com programa linear inteiro (ILP) e duas heurísticas gulosas a fim de lidar com o problema \mathcal{NP} -difícil e resolver o problema de localização ideal do NetFlow (ONLP) e também na metodologia para implantação CMON. Os resultados apresentados demonstram que é possível obter economias de custo significativas com a adoção de uma estratégia de implantação de monitor de rede parcial, com cobertura da maior parte do tráfego da rede em vez de todo o tráfego. Uma boa taxa de cobertura para NetFlow é sugerida como 95%, com redução de custo de 55% (ZANG; NUCCI, 2009).

O monitoramento passivo de fluxos de IP de forma distribuída enfrenta problemas como a colocação econômica dos monitores na rede e a definição de suas taxas de amos-

tragem para maximizar a fração de fluxos IP sendo amostrados. Para lidar com a relação entre o custo de monitoramento e sua cobertura, (SUH et al., 2006) estudam o problema sob a perspectiva do custo mínimo e cobertura máxima. Os autores encontraram soluções próximas das ótimas com heurísticas gulosas, através de uma abordagem de duas fases em que primeiro encontram os links que devem ser monitorados e, em seguida, executam um segundo algoritmo de otimização para definir as taxas de amostragem. Os experimentos com topologias de redes reais e sintéticas comprovam a eficiência da solução proposta. Em seu trabalho, (SUH et al., 2006) mostram que vários problemas de posicionamento são \mathcal{NP} -difíceis.

Em seu trabalho, (CHAUDET et al., 2005) estudaram o problema de colocação de dispositivos do tipo TAPs (*test access points*) para monitoramento passivo e a colocação de pontos de medição ativos, com o objetivo de minimizar a sobrecarga em termos de recursos humanos e computacionais. Os autores apresentaram uma abordagem combinatorial para esse problema, a partir da qual foram derivados resultados de complexidade e aproximação. No monitoramento ativo, propuseram e avaliaram duas soluções: uma solução gulosa e outra baseada em Programação Linear Inteira Mista (MILP), utilizando a ferramenta de otimização CPLEX. Ambas as soluções propostas apresentaram desempenho superior ao trabalho de (NGUYEN; THIRAN, 2004). Os autores afirmam ainda que o caso estudado por eles é equivalente ao problema de otimização da cobertura mínima por conjuntos, ou seja, \mathcal{NP} -difícil.

A utilização de medições ativas de rede para a localização de múltiplas falhas em ISPs ou redes corporativas é proposta por (NGUYEN; THIRAN, 2004). A técnica proposta consiste em duas fases. Na primeira fase, é buscado o conjunto ótimo de medições, utilizando elementos da teoria álgebra max-plus, com o objetivo de reduzir o tráfego adicional gerado pelas medições. Na segunda fase, é calculada a localização de um conjunto mínimo de pontos de medição responsáveis pela geração das medições. Os autores demonstraram que não é possível encontrar uma solução ótima para a colocação dos pontos de medição, e o problema de otimizar a quantidade de medições para o diagnóstico de múltiplas falhas é \mathcal{NP} -difícil. No entanto, eles mostram que é possível obter uma grande redução no número de medições e pontos de medição, e comprovam a utilidade da técnica para o diagnóstico de falhas múltiplas.

Conforme mencionado por (CHANG et al., 2013), a medição detalhada por fluxo é um processo custoso e um único medidor não é capaz de realizar medições em toda a rede. O tráfego medido por um único monitor fornece apenas uma visão parcial e pode

não ser suficiente ou preciso para entender o comportamento da rede como um todo. Portanto, é necessário coordenar as medições entre vários monitores distribuídos. Nesse contexto, os autores propõem uma estrutura de otimização centralizada chamada LEISURE (*Load-Equalized meaSUREment*), que aborda problemas de balanceamento de carga com diferentes objetivos para a implantação de monitores fixos e flexíveis. Para resolver o problema de implantação de monitores flexíveis, é utilizado o *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) juntamente com vários algoritmos heurísticos. Em simulações realizadas pelos autores, o LEISURE demonstrou um desempenho de balanceamento de carga significativamente melhor em comparação com uma solução ingênua, quando aplicado em todos os monitores coordenados.

A localização de falhas em redes pode ser realizada por meio de medições, como abordado por (PATIL; KINGER; PATHAK, 2013). A eficiência das medições, a capacidade de monitoramento e o custo de implantação são afetados pela localização dos pontos de medição. Nesse contexto, os autores propõem uma abordagem para a seleção mínima de pontos de medição com o objetivo de reduzir o tamanho do conjunto de medições que será usado para a localização de falhas, reduzindo também o custo operacional geral. O algoritmo proposto utiliza uma estratégia de busca gulosa para integrar pontos de medição e algoritmos de seleção de conjuntos de medições, visando otimizar o processo de localização de falhas de maneira eficiente e econômica.

A localização de falhas em redes pode ser realizada por meio de medições, como abordado por Patil et al. (PATIL; KINGER; PATHAK, 2013). A eficiência das medições, a capacidade de monitoramento e o custo de implantação são afetados pela localização dos pontos de medição. Nesse contexto, os autores propõem uma abordagem inovadora para a seleção mínima de pontos de medição com o objetivo de reduzir o tamanho do conjunto de medições que será usado para a localização de falhas, reduzindo também o custo operacional geral.

Os autores propõem um método unificado para detecção e localização de nós defeituosos em redes, conforme apresentado por (GONTARA; BOUFAIED; KORBAA, 2019). O objetivo desse método é utilizar um conjunto mínimo de estações de medições e um conjunto mínimo de medições para identificar e localizar nós defeituosos na rede. A abordagem se baseia em um método de seleção de estações de medições e utiliza o algoritmo guloso de pesquisa aditiva para selecionar as medições necessárias. Vale ressaltar que essa solução é escalável, mas não tem como objetivo otimizar o tráfego de medições ou o tempo de localização. Além disso, é importante mencionar que a abordagem de lo-

calização proposta é capaz de identificar apenas falhas persistentes na rede, ou seja, falhas que ocorrem de forma contínua ou recorrente.

O estudo de (QI et al., 2021) apresenta uma abordagem para a seleção de medições com o objetivo de realizar o diagnóstico de falhas. O algoritmo proposto utiliza um método de seleção probabilístico, levando em consideração a natureza incerta e aleatória do ambiente de rede não determinístico. Quando uma ou mais falhas são detectadas, a abordagem de seleção probabilística de medições de pesquisa mínima é ativada para localizar as falhas. Essa abordagem utiliza o método de busca mínima para selecionar medições que percorram o menor número de nós suspeitos e garantam a máxima cobertura de nós suspeitos.

A abordagem proposta por (HUBBALLI, 2021) visa selecionar um conjunto de medições que evite rotas congestionadas e seja capaz de identificar todas as falhas nos nós de estação que não possuem medições na rede. Essa seleção é baseada em estatísticas históricas de tempo de ida e volta (RTT). A proposta busca reduzir a frequência de sondagem à medida que o RTT aumenta e vice-versa, além de minimizar a seleção de novas sondagens apenas em casos raros, como mudanças na topologia da rede e falhas completas de links/nós. O traceroute é utilizado para gerar a topologia da rede e realizar as medições de RTT.

Em resumo, a colocação de medições e pontos de medições em redes é um desafio complexo que envolve considerações como eficiência, capacidade, custo e otimização do tráfego de medições. Diversas abordagens têm sido propostas, incluindo algoritmos ótimos, heurísticas gulosas, técnicas probabilísticas e balanceamento de carga. O objetivo é encontrar um conjunto mínimo de medições e pontos de medição que sejam eficazes, ao mesmo tempo em que reduzem os custos operacionais. O problema de colocação de medições é frequentemente classificado como \mathcal{NP} -difícil. A pesquisa nessa área continua em constante evolução, impulsionada pela necessidade de garantir a confiabilidade e o desempenho das redes de comunicação.

3.2 Problemas Correlatos

Alguns trabalhos abordam problemas semelhantes que compartilham desafios comuns em termos de complexidade, otimização necessária e abordagens para encontrar soluções viáveis. A experiência e as técnicas desenvolvidas em um domínio podem frequentemente ser aplicadas ou adaptadas para outro.

A colocação de Funções Virtuais de Rede (*Virtual Network Functions* - VNFs) é um novo paradigma que representa uma mudança significativa na evolução das redes, pois oferece altas expectativas de economia nos serviços de rede, mas também traz grandes desafios técnicos. No artigo de Cohen et al. (COHEN et al., 2015), é abordado o desafio da colocação efetiva das funções virtuais na rede física. Esse desafio técnico tem um impacto significativo no desempenho, confiabilidade e custo operacional da rede. Os autores propõem um modelo de otimização e algoritmos de aproximação para resolver o problema. Eles demonstram que o problema é \mathcal{NP} -Difícil.

No artigo de Lukovszki et al. (LUKOVSZKI; ROST; SCHMID, 2016), é estudado o problema da colocação inicial de um número mínimo de *middleboxes* ou funções de rede, bem como seu incremento, levando em consideração restrições como capacidade dos nós e distâncias de comunicação entre eles. O artigo apresenta uma comparação entre uma solução gulosa e outra baseada em programação inteira para esse problema, que é \mathcal{NP} -Completo.

No trabalho de Luizelli et al. (LUIZELLI et al., 2017), é proposta uma abordagem eficiente e escalável para a correção e otimização na colocação e composição de funções de rede virtual, um problema que também é \mathcal{NP} -Completo. Essa abordagem trata a colocação e a composição como um problema de otimização, utilizando um algoritmo heurístico para correção e otimização da colocação, enquanto uma meta-heurística chamada *Variable Neighbourhood Search* (VNS) é utilizada para explorar eficientemente o espaço de solução da colocação e composição. O objetivo dessa abordagem é minimizar a alocação de recursos necessários, atendendo aos requisitos e restrições da rede em grande escala.

O estudo de (CASTRO et al., 2021) propõe o planejamento de medições para Telemetria de Rede em Banda, a fim de garantir a cobertura de todos os links e a coleta eficiente de dados de telemetria. O problema é formulado como um modelo de Programação Linear Inteira, que generaliza os problemas *Capacitated Arc Routing* e *Bin Packing*, ambos com complexidade \mathcal{NP} -difícil. Os autores apresentam uma heurística eficiente baseada em programação matemática, utilizando o método de busca em vizinhança variável (*Variable Neighborhood Search* - VNS) para priorizar as vizinhanças exploradas. Essa abordagem permite obter soluções aproximadas de alta qualidade, reduzindo significativamente o tempo de computação necessário para resolver o problema.

Além disso, a colocação de Funções Virtuais de Rede - VNFs é frequentemente um problema \mathcal{NP} -difícil, como mencionado por Cohen et al. (COHEN et al., 2015).

Dada a complexidade desses problemas, é comum o uso de heurísticas e meta-heurísticas, como o Variable Neighbourhood Search (VNS) usado por Luizelli et al. (LUIZELLI et al., 2017) e Castro et al. (CASTRO et al., 2021), para encontrar soluções de boa qualidade em tempo razoável.

No que diz respeito às restrições de capacidade e escalabilidade, Lukovszki et al. (LUKOVSZKI; ROST; SCHMID, 2016) enfatizam a importância de considerar essas restrições na colocação de VNFs. Isso também é relevante na colocação de medições, onde é importante garantir que elas estejam posicionadas de forma a capturar dados relevantes sem exceder suas capacidades.

Como pode ser observado na Tabela 3.1, a maioria dos trabalhos abordam os problemas de colocação de pontos de medição, seleção de medições e problemas correlatos como \mathcal{NP} -difícil. Diante dessa complexidade, as abordagens baseadas em heurísticas se mostram essenciais para se aproximar de soluções ótimas. Muitas vezes, essas heurísticas são combinadas com técnicas de Programação Linear para obter resultados eficientes.

4 UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA POSICIONAMENTO E COMPOSIÇÃO DE MEDIÇÕES ATIVAS DE REDE

Nos capítulos anteriores, apresentamos os conceitos fundamentais de posicionamento de pontos de medição e composição de medições de redes, e discutimos trabalhos relacionados ao posicionamento de pontos de medição e composição de medições ativas. Agora, neste capítulo, vamos formalizar o problema de posicionamento e composição de medições ativas de redes de forma integrada e apresentar um modelo de otimização para resolver esse problema. O objetivo deste capítulo é fornecer uma abordagem sistemática e rigorosa para determinar a melhor configuração para medições de rede, levando em consideração as limitações e restrições específicas do ambiente de rede em questão.

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar a distribuição do orçamento destinado às medições de redes nos caminhos da rede por unidade de tempo, antes do agendamento das medições. É relevante ressaltar que, neste estudo, o mecanismo de medição é considerado uma "caixa-preta", ou seja, não é abordada a maneira como as medições são distribuídas ao longo do tempo em cada caminho, seja de forma Poisson ou Uniforme.

O restante deste capítulo é organizado da seguinte forma. Na Seção 4.1, apresentamos uma visão geral do problema, discutindo os componentes topológicos do posicionamento e composição de medições. Em seguida, na Seção 4.2, fornecemos uma representação gráfica do problema, permitindo uma visualização clara dos elementos envolvidos na colocação e composição de medições de rede. Na Seção 4.3, descrevemos o modelo e a notação utilizados, incluindo a formulação matemática do problema na Subseção 4.4, onde definimos as variáveis e restrições necessárias para o modelo de otimização.

4.1 Visão geral do problema

O posicionamento consiste em definir os pontos de medição ao longo de um caminho, como em um sistema autônomo (AS) de uma rede. Já a composição espacial é a utilização de medições entre pontos de interesse para estimar a medição ao longo de todo o caminho entre dois pontos quaisquer da rede (BERGHE; MORTON, 2010). O problema de posicionamento e composição de medições pode ser decomposto em três fases: colocação, atribuição e composição. A fase de colocação se concentra na escolha dos

locais mais adequados para posicionar os pontos de medição (MPs). A fase de atribuição envolve a seleção de quais medições serão atribuídas a cada caminho entre os pontos de interesse. Já a fase de composição se preocupa em combinar as medições atribuídas para estimar a medição ao longo do caminho. Nesta seção, apresentaremos uma visão geral dessas três fases, destacando seus principais desafios e as soluções existentes na literatura.

4.1.1 Colocação

Nesta fase, é necessário determinar a quantidade e a localização dos MPs na infraestrutura, levando em consideração as exigências mínimas de medição e as capacidades dos elementos de rede. Os MPs devem ser alocados em pontos estratégicos conhecidos como pontos de interesse (STEPHAN; LIANG; MORTON, 2009), a fim de maximizar a composição espacial das medições por meio da sobreposição de subcaminhos entre os diferentes caminhos de medição. É importante ressaltar que nem todos os elementos da rede podem ser MPs, pois é necessário que possuam a capacidade e os recursos computacionais adequados para executar as medições. Portanto, a fase de colocação requer uma abordagem cuidadosa para garantir a representatividade e eficiência das medições.

Além disso, a cobertura da rede e os custos são fatores cruciais a serem considerados na colocação dos MPs. A cobertura da rede deve ser analisada minuciosamente para garantir a representação adequada de todas as áreas importantes da rede por meio dos MPs. Ao mesmo tempo, é essencial levar em consideração os custos associados à colocação dos MPs, evitando uma alocação excessiva que possa resultar em custos desnecessários. Portanto, a fase de colocação requer uma avaliação equilibrada da cobertura da rede e dos custos envolvidos.

4.1.2 Atribuição

A fase de atribuição desempenha um papel fundamental no processo de medição de redes, nela é determinado quais pontos de medição serão encarregados de executar qual medição. Isso é crucial para permitir medições eficientes, levando em consideração as restrições computacionais adequadas.

Nessa fase é necessário considerar diversos fatores, como a origem e o destino do caminho a ser medido, a capacidade dos pontos de medição disponíveis e as restrições

impostas pelos recursos da rede. Além disso, é importante selecionar estrategicamente os pontos de interesse, maximizando assim a composição espacial das medições e garantindo a qualidade dos dados coletados.

A escolha dos pontos de interesse para métricas espaciais pode ter um impacto significativo na eficiência das atribuições, especialmente considerando que os *hosts* envolvidos na entrega dos pacotes de origem ao destino desempenham um papel fundamental nas medições de rede.

Em suma, a atribuição é valiosa para o sucesso do processo de medição de redes, exigindo uma análise cuidadosa dos pontos de medição disponíveis, dos recursos da rede e dos pontos de interesse para as métricas espaciais. Somente por meio de uma atribuição bem planejada e executada é possível garantir a qualidade dos dados coletados e a eficiência global do processo.

4.1.3 Composição

A fase de composição desempenha um papel crítico no processo, pois é nessa etapa que as informações coletadas são combinadas e processadas para gerar as métricas de interesse. É importante ressaltar que a qualidade das medições atribuídas na fase anterior tem um impacto direto na qualidade das composições.

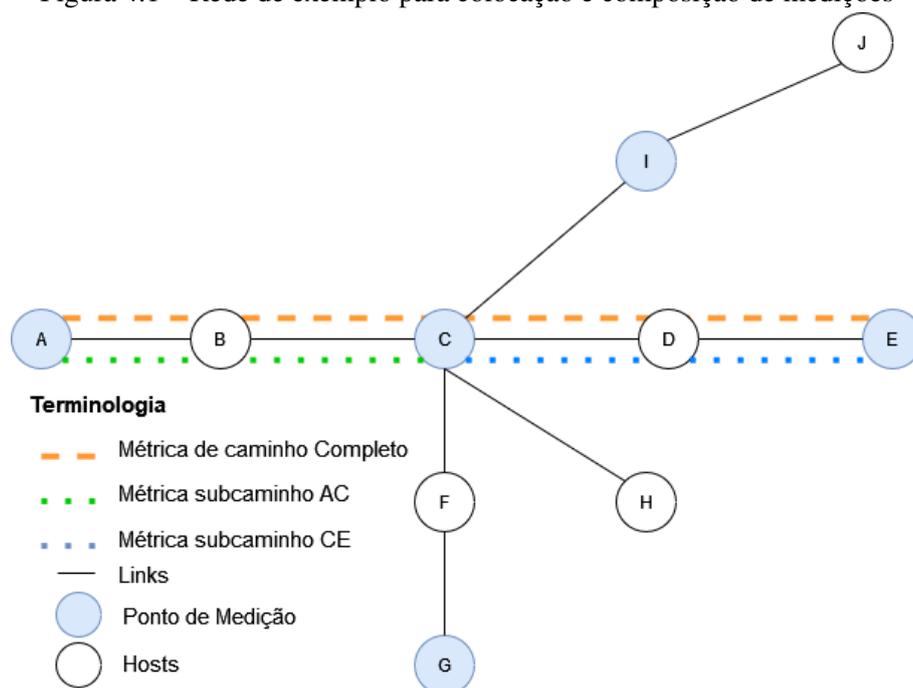
Uma técnica comumente utilizada na composição é o método dos mínimos quadrados ponderados, que leva em consideração as incertezas das medições para determinar a melhor estimativa para a métrica ao longo do caminho. Além disso, técnicas de interpolação e suavização podem ser aplicadas para reduzir a influência de ruídos e anomalias nas medições. É importante destacar que técnicas de ajuste de curvas, como os mínimos quadrados, e técnicas de interpolação não estão incluídas no escopo deste estudo.

É fundamental enfatizar a importância da escolha adequada dos pontos de medição e da qualidade das medições coletadas para garantir a precisão e confiabilidade das métricas calculadas na fase de composição.

4.2 Representação Gráfica do Problema

A Figura 4.1 ilustra de forma clara e objetiva os principais elementos envolvidos na colocação, atribuição e composição de medições em medições ativas de redes. Na

Figura 4.1 – Rede de exemplo para colocação e composição de medições



Fonte: O Autor

representação gráfica, os *hosts* são representados por círculos, enquanto os caminhos são identificados por traços entre eles. Os círculos azuis representam os *hosts* com capacidade técnica para realizar funções de medição. A rede é composta por esses *hosts*, que estão ligados logicamente através de *links*, identificados por traços.

Os caminhos de rede fazem parte do objeto de estudo deste trabalho. Eles podem ser visualizados como uma sequência de *links* interconectando dois *hosts* finais, o que chamamos de caminhos completos.

As medições de caminho completo são representadas na Figura 4.1 por traços contínuos, sendo que o traço laranja representa uma medição entre os *hosts* identificados pelas letras AE. Já as linhas pontilhadas representam medições de subcaminhos, sendo que a linha verde ilustra uma medição de subcaminho entre AC, enquanto as linhas azuis representam o subcaminho CE.

Portanto, se as métricas AC e CE forem passíveis de composição, a composição AC e CE das medições de subcaminhos será uma estimativa de uma métrica real que descreve o desempenho de um caminho em algum intervalo de tempo. É necessário destacar que a composição de AC e CE somente é possível se a medição AC for atribuída ao ponto de medição A ou C, e a medição CE for atribuída ao ponto de medição C ou E.

As medições realizadas nesse contexto são medições de ida e volta, que podem ocorrer por meio de protocolos, como por exemplo o TWAMP. Portanto, a medição AC é

equivalente a CA, e CE igualmente é análogo a EC.

Nesta seção, apresentamos uma visão geral do problema de colocação e composição de medições ativas de redes, abordando as três fases envolvidas no processo: colocação, atribuição e composição de medições.

4.3 Descrição do modelo e notação

O grafo não direcionado $G = (V, E)$ é utilizado para modelar a rede. O conjunto finito de vértices $V = v_1, v_2, v_3, \dots, v_k$ representa os nós da rede, também conhecidos como *hosts*. As arestas $E = e_1, e_2, e_3, \dots, e_k$ representam os enlaces de comunicação entre os nós, que são conhecidos como *links*. Cada aresta é definida por um par de vértices que ela conecta. Por exemplo, se houver uma aresta entre os vértices v_1 e v_2 , ela pode ser representada como $e_1 = (v_1, v_2)$.

Um caminho em um grafo é uma sequência de nós conectados por arestas, onde cada par de nós consecutivos possui uma aresta que os liga. O caminho é representado pela sequência ordenada de nós: $P(v_1, v_k) = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_k)$. Para que um caminho seja válido, é necessário que todas as arestas correspondentes à sequência de nós estejam presentes no grafo. Em outras palavras, as arestas $(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{k-1}, v_k)$ pertencem ao conjunto de arestas E .

O algoritmo SPF (Shortest Path First) é utilizado para encontrar todos os caminhos possíveis entre os vértices de um grafo não direcionado. A estrutura de retorno desse algoritmo pode ser representada matematicamente usando a notação de conjuntos de pares ordenados. Denotamos por $P(v_1, v_k)$ o caminho mais curto encontrado pelo algoritmo SPF entre os vértices de origem (*source*) e destino (*target*), seguindo as arestas de menor peso (ou custo) no grafo G . Assim, para cada par de vértices na rede, haverá um caminho mais curto associado a ele no conjunto de pares ordenados retornado pelo algoritmo SPF. Podemos formalizar a estrutura de retorno do SPF da seguinte forma:

$$SPF(G) = \{(v_1, v_k, P) \mid v_1, v_k \in V, P(v_1, v_k)\}$$

O conjunto de caminhos possíveis entre todos os vértices em V de um grafo não direcionado, após a execução do algoritmo SPF, pode ser representado como $C = \{P(v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V, i \neq j\}$. Cada caminho $P(v_i, v_j)$ é uma sequência ordenada de vértices conectados por arestas, que vai de um vértice v_i a outro vértice v_j , onde i e j são índices distintos. Dessa forma, todos os caminhos possíveis entre os vértices em V de um grafo não direcionado, após a execução do algoritmo SPF, podem ser representados por

$$C = c_1, c_2, c_3, \dots, c_K.$$

O conjunto $CC = \{cc_1, cc_2, cc_3, \dots, cc_n\}$ representa as composições de medições, onde c_i é uma composição de medições específica e n é o número total de composições de medições encontradas. Cada composição de medições c_i é uma lista de subcaminhos que foram combinados para formar um caminho completo.

Após obter os conjuntos C e CC , o próximo passo é unir esses conjuntos em um novo conjunto M , que conterà todas as possíveis medições. Podemos definir M como $M = C \cup CC$. Dessa forma, o conjunto M incluirá todas as medições, sejam elas compostas ou não.

Os *hosts* V possuem limitações na quantidade de medições executadas a cada ciclo, devido às suas capacidades computacionais, tais como a capacidade de processamento da CPU e a capacidade de memória. Não consideramos neste modelo a forma como as sondagens são distribuídas no tempo em cada caminho, como, por exemplo, distribuição de Poisson ou distribuição uniforme. Para simplificar, consideramos uma única restrição de recurso para a capacidade computacional, representada por CV_i , para determinar se o *host* V_i pode realizar medições em um intervalo de tempo específico.

Para obter uma distribuição equilibrada da carga e contribuir para o desempenho eficiente do sistema, bem como evitar sobrecargas ou ociosidades em determinados *hosts*, é importante utilizarmos o parâmetro denominado d_i , que define um limite para a disparidade de carga entre os *hosts*. Ele desempenha um papel fundamental no balanceamento de carga, garantindo que nenhum *host* fique sobrecarregado enquanto outros permaneçam ociosos. Ao definir um valor adequado para d_i , é possível estabelecer uma distribuição equilibrada da carga, de forma que cada *host* contribua proporcionalmente à sua capacidade. A tabela 4.1 apresenta um resumo das notações utilizadas no modelo proposto.

4.4 Formulação do modelo

Nesta seção, apresentaremos a formulação matemática do problema, que visa otimizar a alocação das medições nos *hosts* da rede, levando em consideração as capacidades computacionais, a distribuição equilibrada da carga e a possibilidade de composição de medições.

O objetivo principal da formulação do modelo é encontrar uma solução que maximize a eficiência no uso dos recursos disponíveis, ao mesmo tempo em que atenda aos requisitos de medição. Para alcançar esse objetivo, utilizamos uma abordagem estratégica

Tabela 4.1 – Lista de símbolos e formulações relacionadas ao modelo de otimização

Notação	Descrição
$G = (V, E)$	Grafo não direcionado representando a rede com um conjunto de vértices V e um conjunto de arestas E
$V = v_1, v_2, v_3, \dots, v_k$	Conjunto de vértices (<i>hosts</i>) da rede
$E = e_1, e_2, e_3, \dots, e_k$	Conjunto de arestas que representam os enlaces de comunicação (links) entre os nós
$P(v_1, v_k)$	Caminho em G entre os vértices v_1 e v_k
$(v_1, v_2, v_3, \dots, v_k)$	Representa os vértices que compõem o caminho entre v_1 e v_k em ordem, ou seja, $(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{k-1}, v_k) \in E$
$C = c_1, c_2, c_3, \dots, c_k$	Conjunto composto por todos os caminhos $P(v_i, v_j)$ que vão de qualquer vértice v_i a qualquer outro vértice v_j em V
$CC = cc_1, cc_2, cc_3, \dots, cc_k$	Conjunto composto por todas as possíveis composições de caminhos que foram encontradas ao combinar todos os subcaminhos possíveis
$M = m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$	Representa todas as possíveis medições, conjunto formado pela união dos conjuntos C e CC , ou seja, $M = C \cup CC$
VC_i	Capacidade do <i>host</i> V_i realizar medições em um determinado intervalo de tempo
d_i	Diferença de carga entre os <i>hosts</i>
RD	Conjunto de <i>hosts</i> com medições, ou seja, <i>hosts</i> que possuem alguma medição associada

Fonte: O autor

baseada em programação linear, onde a função objetivo é configurada para minimizar a quantidade total de pontos de medição na rede e reduzir a soma das diferenças de carga entre os *hosts* com medições.

Ao longo desta seção, apresentaremos as equações que compõem a função objetivo e as restrições que garantem a coerência e a viabilidade da alocação de medições nos *hosts*. Também destacaremos o papel de cada termo e a importância das restrições para assegurar que as medições sejam alocadas corretamente, levando em conta as capacidades computacionais de cada *host* e a necessidade de equilibrar a carga entre eles.

Por meio dessa formulação matemática do problema, buscamos oferecer uma abordagem precisa e eficiente para a minimização da quantidade de pontos de medição na rede, contribuindo para o desempenho otimizado do sistema, evitando sobrecargas ou ociosidades em determinados *hosts*. A seguir, apresentaremos em detalhes as equações e restrições que compõem o modelo de otimização.

A função objetivo é configurada para otimizar dois aspectos principais: minimizar o número total de pontos de medição na rede e reduzir a soma das diferenças de carga entre os *hosts* com medições. Essa abordagem estratégica nos permite encontrar uma solução que maximize a eficiência no uso dos recursos disponíveis, ao mesmo tempo em que atende aos requisitos de medição. Essa formulação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\min \sum_{\substack{M[0] \in VC \\ M_i \in C}} M_i + \sum_{i \in RD} d_i \quad (4.1)$$

Na equação 4.1, a primeira parte, representada por $\sum_{i=1}^{M_i \in C} M_i$, refere-se à soma das medições no conjunto C , que consiste apenas nas medições não compostas. Percorremos cada medição M_i pertencente a C e somamos todas elas, representando assim a quantidade total de pontos de medição na rede.

A segunda parte da equação, representada por $\sum_{i \in RD} d_i$, refere-se à soma das diferenças de carga entre os *hosts* com medições. Percorremos cada *host* i que possui medição e somamos as diferenças de carga d_i . Essa soma representa o esforço necessário para equilibrar a carga entre os *hosts*.

A restrição $M[0] \in VC$ indica que o ponto de medição inicial deve estar incluído no conjunto de *hosts* elegíveis para medições, VC . Essa restrição garante que medições não sejam alocadas a *hosts* sem capacidade computacional.

Uma restrição fundamental é a restrição 4.2, que garante a viabilidade da composição de medições no problema. Essa restrição assegura que existam medições iguais ou inversas disponíveis para a formação de composições, contribuindo para a eficácia e eficiência da alocação de medições nos *hosts* da rede.

Ao impor a 4.2, estamos assegurando que pelo menos uma medição do conjunto de medições deve estar presente para que haja a possibilidade de formação de composições. Isso significa que existem medições que podem ser combinadas para formar medições compostas, permitindo uma redução no número total de pontos de medição na rede. Essa abordagem estratégica é essencial para otimizar o uso dos recursos disponíveis e maximizar a eficiência do sistema. A seguir, apresentaremos em detalhes essa restrição, destacando sua importância no contexto do modelo de otimização proposto.

$$\sum_{M_i \in M_{\text{iguais ou inversa}}} M_i \geq 1 \quad (4.2)$$

A restrição de composição de medições, representada pela restrição 4.3, estabelece que, se todas as medições compostas de uma medição estão sendo realizadas, essa medição será considerada como atendida. A restrição 4.3 pode ser expressa da seguinte forma:

$$\forall M_i \in M, \text{ se } M_i \in CC, \quad \forall MC \in M_i, \quad M_i \leq MC \quad (4.3)$$

Essa restrição assegura a coerência das medições compostas, garantindo que a medição composta seja limitada pelas medições individuais que a compõem. Dessa forma, se todas as medições individuais estiverem sendo realizadas, a medição composta também estará sendo realizada.

As restrições de alocação em nós com capacidade de medição, representadas pelas restrições 4.4, 4.5 e 4.6, garantem que as medições sejam alocadas corretamente levando em consideração as capacidades computacionais dos *hosts* e a necessidade de equilibrar a carga entre eles.

A restrição 4.4 estabelece que, para cada nó de rede V_i pertencente ao conjunto de nós V , a soma de todas as medições M_i em que o ponto de medição é igual a V_i e que V_i não está no conjunto de nós com capacidade de medição VC , deve ser igual a zero.

$$\forall V_i \in V, \quad \sum_{\substack{M_i[0]=V_i \\ V_i \notin VC}} M_i = 0 \quad (4.4)$$

Essa restrição garante que não serão alocadas medições em nós de rede que não possuem capacidade de medição. Ou seja, se um nó não estiver presente no conjunto de nós com capacidade de medição, a soma de todas as medições associadas a esse nó deve ser igual a zero, indicando que nenhuma medição será alocada a ele.

A restrição 4.5 estabelece que, para cada nó de rede V_i pertencente ao conjunto de nós V , a soma de todas as medições M_i em que o ponto de medição inicial é igual a V_i e V_i está no conjunto de nós com capacidade de medição VC , deve ser menor ou igual à soma da carga média DC_M e da diferença de carga DCV_i desse nó.

$$\forall V_i \in V, \quad \sum_{\substack{M_i[0]=V_i \\ V_i \in VC}} M_i \leq DC_M + DCV_i \quad (4.5)$$

Essa restrição garante que a soma das medições associadas a cada nó de rede esteja dentro dos limites de carga estabelecidos pela carga média e a diferença de carga de cada

nó. Isso assegura que a carga de medições seja distribuída de forma mais homogênea possível entre os nós com função de ponto de medição.

A restrição 4.6 é semelhante à restrição 4.5, porém, estabelece que a soma das medições associadas a cada nó de rede V_i pertencente ao conjunto de nós V e ao conjunto de nós com capacidade de medição VC deve ser maior ou igual à diferença entre a carga média DC_M e a diferença de carga DCV_i desse nó.

$$\forall V_i \in V, \quad \sum_{\substack{M_i[0]=V_i \\ V_i \in VC}} M_i \geq DC_M - DCV_i \quad (4.6)$$

Essa restrição também contribui para garantir que a carga de medições seja distribuída de forma mais homogênea possível entre os nós com função de ponto de medição, evitando sobrecarga ou subutilização excessiva de nós específicos.

Em resumo, a formulação matemática do problema de alocação de medições nos *hosts* da rede é composta pela função objetivo, que busca minimizar o número total de pontos de medição na rede e reduzir a soma das diferenças de carga entre os *hosts*, e pelas restrições que garantem a coerência e a viabilidade da alocação de medições. Essas restrições garantem a existência de medições iguais ou inversas disponíveis para a composição, restrições de composição de medições, alocação em nós com capacidade de medição e distribuição equilibrada da carga. A correta aplicação dessas equações e restrições contribui para o desempenho otimizado do sistema, maximizando a eficiência no uso dos recursos disponíveis.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo, os experimentos conduzidos com o objetivo de validar a metodologia proposta neste trabalho são apresentados. Inicialmente, o conjunto de ferramentas de desenvolvimento é apresentado. Em seguida, a parametrização adotada para a execução dos algoritmos que compõem a fase de desenvolvimento é detalhada.

5.1 Ferramentas de Desenvolvimento

Os experimentos foram executados em um ambiente controlado, utilizando um sistema com as seguintes especificações:

- Processador: AMD Ryzen 5 3550H
- Frequência: 2100 MHz
- Placa de vídeo: Radeon Vega Mobile Gfx
- Núcleos físicos: 4
- Threads: 8
- Memória RAM: 32GB DDR4
- Sistema Operacional: Windows 11 PRO 64 bits

A implementação dos algoritmos foi realizada em linguagem Python (ROSSUM; DRAKE, 2009), versão 3.10 ¹, utilizando um conjunto de bibliotecas especializadas que serão descritas a seguir:

- NetworkX ²: para trabalhar com grafos e redes. Ele fornece ferramentas para criar, manipular e analisar grafos e redes, bem como algoritmos para resolver problemas nelas (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008). O NetworkX é uma biblioteca de código aberto que é amplamente utilizada na academia.
- NumPy ³ (abreviação de Numerical Python): para computação científica que fornece suporte para matrizes e vetores multidimensionais, bem como funções matemáticas para operações em arrays numéricos (HARRIS et al., 2020). A biblioteca de código aberto é amplamente utilizada em áreas como ciência de dados, aprendizado de máquina, engenharia, física e outras áreas científicas e de computação.

¹<https://www.python.org/>

²<https://networkx.org/>

³<https://numpy.org/>

- Pulp⁴: é uma biblioteca de Python que oferece um conjunto robusto de ferramentas para programação linear (MITCHELL et al., 2011). Permite aos usuários modelar e resolver problemas de otimização por meio de programação linear, programação inteira mista (MIP) e programação não linear (NLP). A biblioteca facilita a definição de variáveis, a imposição de restrições, e a especificação de objetivos matemáticos para otimização. Além disso, Pulp destaca-se por sua interface intuitiva, que simplifica o processo de modelagem de problemas de otimização. Outra característica notável é sua compatibilidade com diversos solucionadores, tanto comerciais quanto de código aberto, incluindo GLPK, CBC, CPLEX e Gurobi. Para os testes realizados neste trabalho, foi utilizado o solucionador CPLEX v22.11⁵.
- matplotlib.pyplot: fornece recursos para a criação de gráficos e visualizações de alta qualidade (CASWELL et al., 2023). O módulo pyplot atua como uma interface para a biblioteca matplotlib, permitindo a criação de gráficos e visualizações personalizadas de maneira simples e eficaz. É amplamente utilizado em ciência de dados e outras áreas para visualização de dados.

5.2 Dados de Entrada e Preparação

O Internet Topology Zoo (ITZ) (KNIGHT et al., 2011) é um repositório público de topologias de rede da Internet, mantido pela Universidade de Oregon. Ele contém dados coletados de diversas fontes, tanto públicas quanto privadas, incluindo trabalhos acadêmicos, projetos de pesquisa, medições de trânsito, rastreamento de roteadores e informações fornecidas por provedores de serviços de Internet. O objetivo do ITZ é fornecer uma base de dados confiável e ampla de topologias da Internet, que pode ser utilizada em pesquisas, simulações e experimentos de rede (KNIGHT et al., 2011).

As topologias disponíveis no ITZ incluem informações detalhadas sobre roteadores, enlaces e fluxos de tráfego. Além disso, os dados estão disponíveis em vários formatos, como GraphML, GEXF e GML, facilitando a utilização em diferentes aplicações e ferramentas.

No contexto dos experimentos conduzidos neste trabalho, foram utilizadas duas topologias de rede práticas, obtidas do Internet Topology Zoo. As redes selecionadas foram a GÉANT (versão de 2012) e a RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa). Essas

⁴<https://coin-or.github.io/pulp/>

⁵<https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer>

belecidas.

Como parte da avaliação, realizamos uma análise comparativa. Primeiramente, executamos um modelo com restrições relaxadas, buscando minimizar o número de medições enquanto mantemos uma distribuição de carga equilibrada entre os pontos de medição (MPs).

Em seguida, aplicamos a abordagem proposta, considerando a composição de sondas, sem impor limites ao número de MPs disponíveis na rede.

A fim de avaliar a eficácia da nossa abordagem, conduzimos experimentos variando a proporção de *hosts* na rede que poderiam servir como MPs (95%, 90%, e 85%). A escolha de quais *hosts* não seriam MPs foi feita aleatoriamente para assegurar a imparcialidade e representatividade dos resultados.

A alocação e a composição das medições são realizadas pelo solver, levando em consideração apenas os MPs possíveis de acordo com a função objetivo e as restrições estabelecidas.

Realizamos 10 execuções para cada configuração, com o intuito de obter um panorama abrangente e consistente dos resultados, levando em conta diferentes seleções aleatórias.

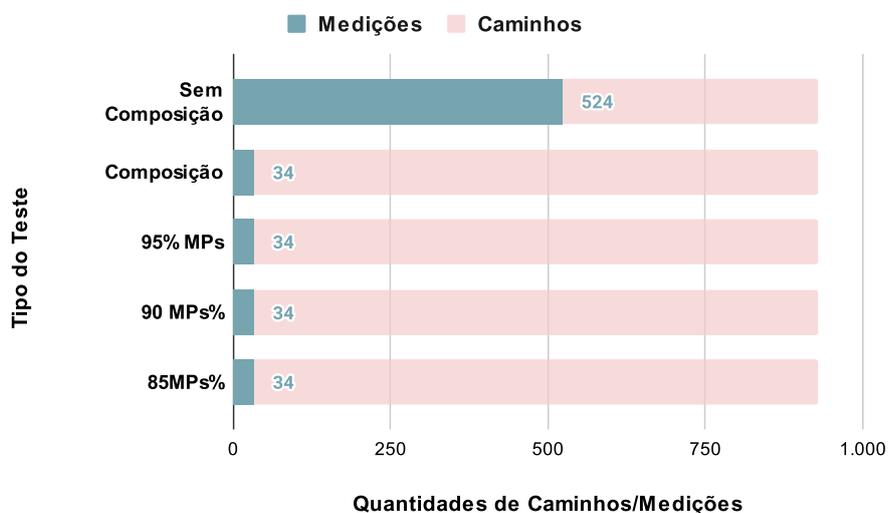
5.3 Resultados e Discussões

A seção 5.3 apresenta uma análise dos principais achados do estudo, abordando tanto a eficácia na resolução quanto a eficiência em relação ao tempo de execução. Serão apresentados os resultados referentes à eficácia e eficiência na resolução do problema proposto, discutindo os acertos, erros e limitações identificados, bem como as possíveis causas e implicações desses resultados. Além disso, destacamos os exemplos de casos em que a abordagem apresentou alto desempenho e outros em que houve desafios e dificuldades para obter soluções ótimas.

5.3.1 Eficácia na resolução

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam uma visão geral dos resultados alcançados com 10 experimentos para cada configuração nas redes da RNP e GÉANT, focando no comprometimento mínimo e uniforme dos recursos de rede para solucionar o problema proposto.

Figura 5.2 – Rede RNP - Total médio de medições realizadas



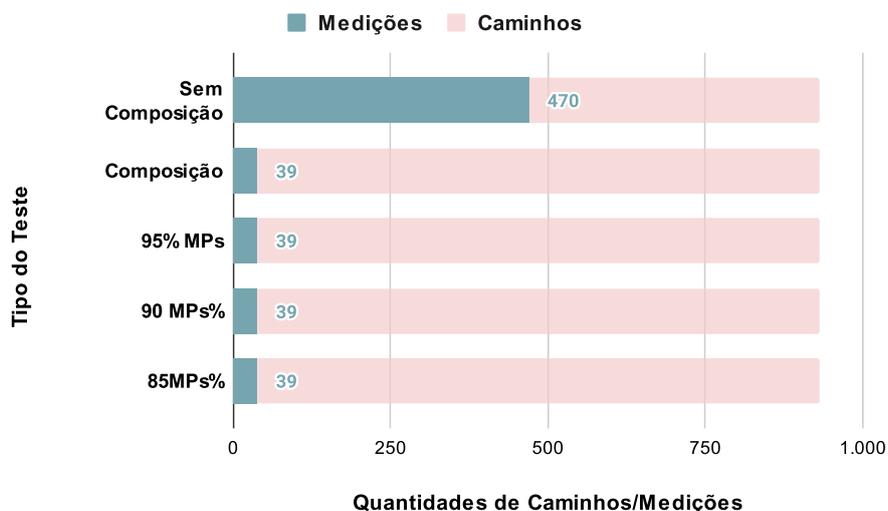
Ao analisar essas informações, é possível observar que a quantidade média de sondas necessárias não se altera, mesmo com a redução de MPs, quando há uma alocação viável que atende às restrições. Com base nas Figuras 5.2 e 5.3, podemos observar ainda o seguinte:

- A utilização da composição de medições em conjunto com o posicionamento de MPs mantém a eficiência da solução, mesmo quando alguns *hosts* não suportam ser pontos de medição.
- Ao utilizar composições considerando medições bidirecionais, a quantidade de medições não é necessariamente igual à metade dos caminhos completos da rede. Isso ocorre possivelmente porque o OSPF gera caminhos diferentes para ida e volta entre alguns *hosts*.
- A quantidade de medições utilizadas nas estratégias com composições é de aproximadamente 6,5% e 8,3% em relação às necessidades de medições sem composição, nas redes RNP e GÉANT, respectivamente.

A Figura 5.4 apresenta a efetividade do CPLEX na resolução do problema proposto durante a execução dos experimentos.

Observa-se que, à medida que o número de opções de pontos de medição é reduzido, a taxa de sucesso na resolução também diminui. Isso indica que a presença de *hosts* consecutivos sem a capacidade de realizar medições de rede representa um desafio para obter uma solução viável.

Figura 5.3 – Rede GÉANT - Total médio de medições realizadas

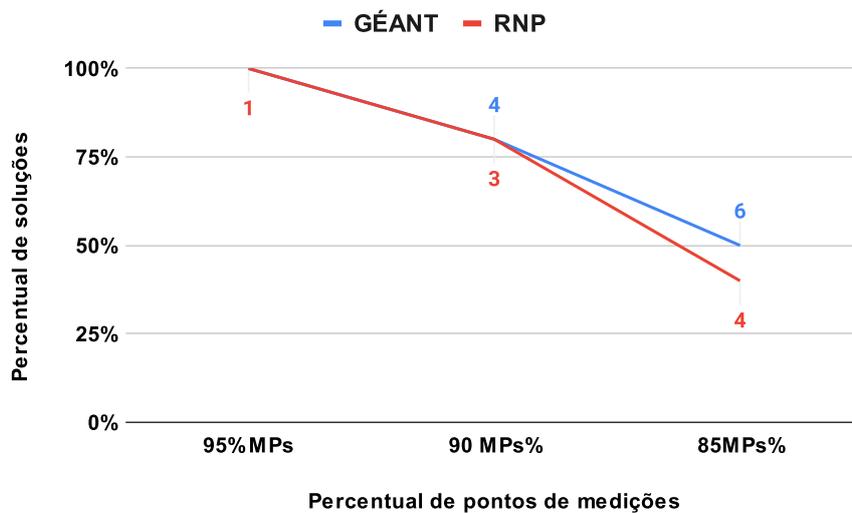


Ao analisar os resultados específicos nas redes GÉANT e RNP, constatou-se que o CPLEX obteve sucesso em encontrar solução em todos os casos quando 95% dos *hosts* possuíam características e capacidade para ser um MP. Essa taxa de sucesso diminuiu para 80% quando a porcentagem de *hosts* com características de MP foi reduzida para 90%. Para a rede RNP, os resultados foram semelhantes, com sucesso em todos os testes quando 95% dos *hosts* possuíam características de MP e uma taxa de sucesso de 80% quando a porcentagem foi reduzida para 90%. No entanto, com 85% dos *hosts* com características de MP, a taxa de sucesso caiu para 50% ou menos.

A relação entre a porcentagem de *hosts* com características de MP e a taxa de sucesso na resolução do problema é evidente. Quanto maior a porcentagem de *hosts* com características de MP, maior é a probabilidade de encontrar uma solução viável.

Ao analisar os experimentos que não obtiveram solução, identificou-se que isso ocorre quando há pelo menos dois *hosts* consecutivos no caminho que não podem realizar medições de rede. Nesses casos, uma possível abordagem a ser considerada seria permitir que a composição de medições "pule" *hosts* do caminho. Por exemplo, se o caminho for representado pela sequência ABCDE e os *hosts* BCD não possuírem a capacidade ou características de MPs, a medição poderia ser realizada diretamente entre os *hosts* A e E, contornando os *hosts* BCD.

Figura 5.4 – Resultados do CPLEX: GÉANT 2012/RNP



5.3.2 Eficiência em relação ao tempo de execução

Nesta subseção, serão explorados os resultados relacionados à eficiência em termos de tempo de execução. Será avaliado o desempenho da abordagem proposta em relação ao tempo necessário para a resolução do problema. Serão apresentados os tempos de execução registrados para cada configuração de teste, bem como as correlações identificadas entre as variáveis analisadas. Será discutida a capacidade da abordagem em lidar com diferentes restrições e a influência dessas restrições no tempo de execução. Também serão abordados exemplos de configurações em que a abordagem se mostrou mais eficiente e outros em que foi identificada a necessidade de otimização.

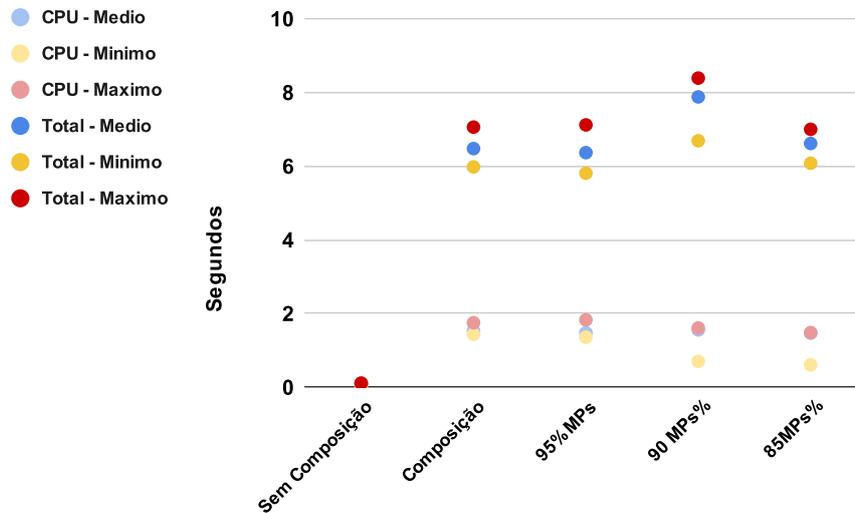
Para avaliar a eficiência da abordagem proposta em termos de tempo de execução, monitoramos os tempos totais gastos em segundos para cada configuração de teste, desde a leitura dos dados da rede até a obtenção da resposta do CPLEX. As Figuras 5.5 e 5.6 resumem os tempos de execução, medidos em segundos, associados a cada configuração.

Além disso, foram registrados os tempos de uso da CPU atribuídos ao CPLEX, o que permite uma avaliação mais consistente e objetiva do esforço computacional necessário para resolver o problema, independentemente de fatores externos, como carga de trabalho do sistema ou interrupções.

Pode-se notar que a abordagem proposta é capaz de gerar soluções ótimas em até 2 segundos para todas as configurações executadas. Ao analisar os dados, pode-se observar as seguintes correlações:

- Existe uma diferença significativa tanto no tempo total quanto no tempo de CPU ao

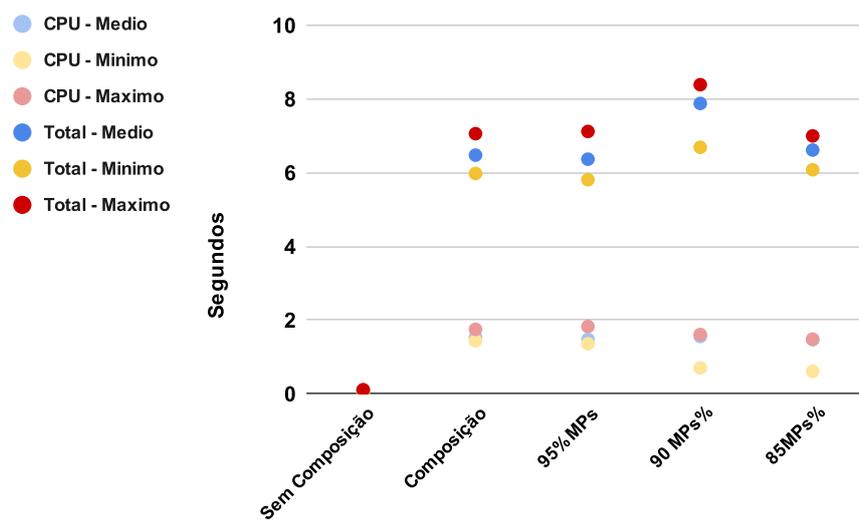
Figura 5.5 – Rede RNP - Tempo total e de CPU/CPLEX em segundos



comparar a solução sem composição com as demais. Isso ocorre porque, na solução sem composição, não é necessário realizar o processo de análise das composições possíveis, e a quantidade de restrições é menor.

- O tempo total para encontrar as soluções com restrições não apresenta alterações significativas.
- Quando não é possível encontrar uma solução ótima para o problema formulado, o tempo de CPU gasto pelo CPLEX é menor do que quando há soluções possíveis.
- Ao comparar as Figuras 5.5 e 5.6, observa-se que o comportamento no uso de recursos (tempo em segundos) é semelhante nas redes testadas.

Figura 5.6 – Rede GÉANT - Tempo total e de CPU/CPLEX em segundos



6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos uma abordagem integrada para resolver o desafiador problema de alocação de pontos de medição e composição de medições em redes de comunicação. Discutimos os principais desafios relacionados à otimização da alocação de MPs e composição de medições, levando em consideração as restrições e características específicas das redes.

Os principais resultados e contribuições deste trabalho são os seguintes: (1) desenvolvemos um modelo matemático para o problema de alocação de MPs, considerando a composição de medições e as restrições específicas da rede; (2) propusemos uma abordagem de resolução baseada no CPLEX, demonstrando sua eficácia na obtenção de soluções ótimas; (3) realizamos uma avaliação abrangente da abordagem proposta por meio de experimentos em diferentes configurações, demonstrando sua capacidade de encontrar soluções eficientes.

Certamente, os resultados apresentam uma importância e relevância desses resultados são evidentes, uma vez que a alocação eficiente de pontos de medição é fundamental para garantir o desempenho, segurança e qualidade das redes de comunicação. Nossos resultados experimentais mostraram que a abordagem proposta é capaz de lidar com diferentes cenários de rede, mantendo uma quantidade média de medições similar às soluções sem restrições, ao mesmo tempo em que otimiza o custo computacional do monitoramento de rede.

Quanto ao uso prático, os resultados dos experimentos podem auxiliar na tomada de decisões sobre a alocação de MPs e composição de medições em redes de comunicação. Eles fornecem percepções valiosas sobre a eficiência da abordagem proposta, permitindo que os profissionais da área considerem essa solução em seus projetos e otimizem o desempenho de suas redes.

Como trabalhos futuros, sugerimos explorar possíveis melhorias na abordagem proposta. Por exemplo, a possibilidade de realizar composições parciais do caminho, sem a necessidade de medir todos os saltos, e a implementação de novas restrições, como limitação de medições por ponto de medição e/ou link. Além disso, seria interessante investigar estratégias adaptativas de alocação de MPs. Acreditamos que essas pesquisas adicionais contribuirão para avançar ainda mais no campo da alocação eficiente de pontos de medição em redes de comunicação.

REFERÊNCIAS

- ALMES, D. G. T. et al. **Framework for IP Performance Metrics**. RFC Editor, 1998. RFC 2330. (Request for Comments, 2330). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2330>>.
- BABIARZ, J. et al. **A Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP)**. [S.l.], 2008. (Request for Comments, 5357). Available from Internet: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc5357.txt>>.
- BERGHE, S. V. den; MORTON, A. **Framework for Metric Composition**. RFC Editor, 2010. RFC 5835. (Request for Comments, 5835). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5835>>.
- BROWNLEE, N. **RTFM: Applicability Statement**. RFC Editor, 1999. RFC 2721. (Request for Comments, 2721). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2721>>.
- CANTIENI, G. R. et al. Reformulating the monitor placement problem: Optimal network-wide sampling. **2006 IEEE Conference on Information Sciences and Systems, CISS 2006 - Proceedings**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 1725–1731, 2006. Available from Internet: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4068080>>.
- CAPELLO, A. et al. A packet based method for passive performance monitoring. **Work in progress as an Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Marina del Rey, CA, USA**, 2014.
- CASTRO, A. G. et al. Near-optimal probing planning for in-band network telemetry. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 5, p. 1630–1634, 2021.
- CASWELL, T. A. et al. **matplotlib/matplotlib: REL: v3.7.1**. Zenodo, 2023. Available from Internet: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.7697899>>.
- CHANG, C.-W. et al. LEISURE: Load-balanced network-wide traffic measurement and monitor placement. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, IEEE, v. 26, n. 4, p. 1059–1070, 2013.
- CHAUDET, C. et al. Optimal Positioning of Active and Passive Monitoring Devices. In: **Proceedings of the 2005 ACM Conference on Emerging Network Experiment and Technology**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005. (CoNEXT '05), p. 71–82. ISBN 159593197X. Available from Internet: <<https://doi.org/10.1145/1095921.1095932>>.
- CHEN, M. et al. IP flow performance measurement framework. **draft-chen-ippm-coloring-basedipfm-framework, work in progress, IETF**, 2016.
- CHIBA, M. et al. **Cisco Service-Level Assurance Protocol**. [S.l.], 2013. (Request for Comments, 6812). Available from Internet: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc6812.txt>>.
- CLAISE, B. **Cisco Systems NetFlow Services Export Version 9**. RFC Editor, 2004. RFC 3954. (Request for Comments, 3954). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc3954>>.

CLAISE, B. **Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of IP Traffic Flow Information**. RFC Editor, 2008. RFC 5101. (Request for Comments, 5101). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5101>>.

COHEN, R. et al. Near optimal placement of virtual network functions. In: **2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1346–1354.

DOURADO, R. A. et al. Um modelo para composição de métricas de desempenho de redes. In: . SBC, 2011. p. 877–890. ISSN 2177-496X. Available from Internet: <http://sbrc2011.facom.ufms.br/files/anais/files/main/ST18_3.pdf>.

ELKINS, N.; HAMILTON, R.; ACKERMANN, M. IPv6 option header for performance and diagnostic measurements (PDM). **Work in progress as an Internet-Draft, Internet Engineering Task Force, Marina del Rey, CA, USA**, 2016.

European Telecommunications Standards Institute (ETSI). **EG 202 765-3 Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS and network performance metrics and measurement methods; Part 3: Network performance metrics and measurement methods in IP networks**. [S.l.], 2009. Available from Internet: <http://portal.etsi.org/chaircor/ETSI_support.asp>.

FABINI, J.; MORTON, A. **Advanced Stream and Sampling Framework for IP Performance Metrics (IPPM)**. RFC Editor, 2014. RFC 7312. (Request for Comments, 7312). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7312>>.

GONTARA, S.; BOUFAIED, A.; KORBAA, O. A unified approach for selecting probes and probing stations for fault detection and localization in computer networks. In: **2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2071–2076.

HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. In: VAROQUAUX, G.; VAUGHT, T.; MILLMAN, J. (Ed.). **Proceedings of the 7th Python in Science Conference**. Pasadena, CA USA: [s.n.], 2008. p. 11 – 15.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 585, n. 7825, p. 357–362, sep. 2020. Available from Internet: <<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>>.

HUANG, G. et al. Measurement-aware monitor placement and routing: A joint optimization approach for network-wide measurements. **IEEE Transactions on Network and Service Management**, v. 9, n. 1, p. 48–59, 3 2012.

HUBBALLI, N. Controlling probe frequency with network traffic dynamics: An experience report. In: **2021 International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 171–176.

KALIDINDI, S.; ZEKAUSKAS, M. J.; ALMES, D. G. T. **A One-way Packet Loss Metric for IPPM**. RFC Editor, 1999. RFC 2680. (Request for Comments, 2680). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2680>>.

- KAMIYAMA, N.; MORI, T.; KAWAHARA, R. Autonomic load balancing of flow monitors. **Computer Networks**, v. 57, n. 3, p. 741–761, 2013. ISSN 1389-1286. Available from Internet: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612003726>>.
- KNIGHT, S. et al. The internet topology zoo. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 29, n. 9, p. 1765–1775, october 2011. ISSN 0733-8716.
- LUIZELLI, M. C. et al. A fix-and-optimize approach for efficient and large scale virtual network function placement and chaining. **Computer Communications**, Elsevier, v. 102, p. 67–77, 2017.
- LUKOVSKI, T.; ROST, M.; SCHMID, S. It's a match! near-optimal and incremental middlebox deployment. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM New York, NY, USA, v. 46, n. 1, p. 30–36, 2016.
- MITCHELL, S. et al. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. 2011. Available from Internet: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.416.4985>>.
- MORTON, A. **Active and Passive Metrics and Methods (with Hybrid Types In-Between)**. RFC Editor, 2016. RFC 7799. (Request for Comments, 7799). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7799>>.
- MORTON, A.; STEPHAN, E. **Spatial Composition of Metrics**. RFC Editor, 2011. RFC 6049. (Request for Comments, 6049). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6049>>.
- NGUYEN, H. X.; THIRAN, P. Active measurement for multiple link failures diagnosis in ip networks. In: SPRINGER. **Passive and Active Network Measurement: 5th International Workshop, PAM 2004, Antibes Juan-les-Pins, France, April 19-20, 2004. Proceedings 5**. [S.l.], 2004. p. 185–194.
- NOBRE, J. C. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL INSTITUTO DE INFORMÁTICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO Decentralized Detection of Violations of Service Level Agreements using Peer-to-Peer Technology**. Thesis (PhD) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 7 2016.
- NOBRE, J. C.; MOZZAQUATRO, B. A.; GRANVILLE, L. Z. Network-Wide Initiatives to Control Measurement Mechanisms: A Survey. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 2, p. 1475–1491, 2018. ISSN 1553877X. Available from Internet: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8267235>>.
- PANCHEN, S.; MCKEE, N.; PHAAL, P. **InMon Corporation's sFlow: A Method for Monitoring Traffic in Switched and Routed Networks**. RFC Editor, 2001. RFC 3176. (Request for Comments, 3176). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc3176>>.
- PATIL, B.; KINGER, S.; PATHAK, V. K. Probe station placement algorithm for probe set reduction in network fault detection and localization. In: **IEEE International Conference on Networks, ICON**. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2013. ISBN 9781479920846. ISSN 15566463.

QI, X. et al. Probabilistic probe selection algorithm for fault diagnosis in communication networks. **Computer Networks**, v. 198, p. 108365, 2021. ISSN 1389-1286. Available from Internet: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621003522>>.

RECOMMENDATION, Y. **1540. Internet protocol data communication service-IP packet transfer and availability performance parameters/ITU-T**. Geneva: International Telecommunication Union (ITU), 2019.

ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual**. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697.

RUTH, D. G. R.; BROWNLEE, N.; MILLS, C. G. **Traffic Flow Measurement: Architecture**. RFC Editor, 1999. RFC 2722. (Request for Comments, 2722). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2722>>.

SEITZ, N. ITU-T QoS standards for IP-based networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 41, n. 6, p. 82–89, 2003.

SHALUNOV, S. et al. **A one-way active measurement protocol (OWAMP)**. [S.l.], 2006. Available from Internet: <<https://rfc-editor.org/rfc/rfc4656.txt>>.

STEPHAN, E.; LIANG, L.; MORTON, A. **IP Performance Metrics (IPPM): Spatial and Multicast**. RFC Editor, 2009. RFC 5644. (Request for Comments, 5644). Available from Internet: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5644>>.

SUH, K. et al. Locating network monitors: Complexity, heuristics, and coverage. **Computer Communications**, Elsevier, v. 29, n. 10, p. 1564–1577, 6 2006. ISSN 0140-3664.

ZANG, H.; NUCCI, A. Traffic monitor deployment in IP networks. **Computer Networks**, Elsevier, v. 53, n. 14, p. 2491–2501, 9 2009. ISSN 1389-1286.

ZANGRILLI, M.; LOWEKAMP, B. B. Comparing passive network monitoring of grid application traffic with active probes. In: **Proceedings. First Latin American Web Congress**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 84–91.