



Educação, Pesquisa  
e Inovação em Rede

Relatório de Visão do Futuro

Comitê Técnico de Monitoramento de Redes

## Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	<b>2</b>
1.1. <i>Escopo e limitações</i> .....	2
<b>2. Metodologia</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Revisão (“Key findings”) - Estado da Arte</b> .....	<b>4</b>
3.1. <i>Panorama e contexto</i> .....	4
3.2. <i>Problemas, Desafios, Tendências e Oportunidades identificadas</i> .....	5
3.3. <i>Tendências tecnológicas e aplicações emergentes</i> .....	8
3.4. <i>Tendências de curto ou médio prazo com o potencial de estender os serviços da RNP</i> .....	9
<b>3.3.2. Tendências disruptivas de médio ou longo prazo, com o potencial de criar novos produtos/serviços ou modelos de negócio</b> .....	9
<b>4. Recomendações - Visão de futuro do CT (Foresight)</b> .....	<b>10</b>
4.1. <i>Curto prazo (1 a 2 anos)</i> .....	10
4.2. <i>Médio prazo (2 - 5 anos)</i> .....	11
4.3. <i>Longo prazo (6 - 10 anos)</i> .....	12
<b>Referências</b> .....	<b>14</b>

**Coordenador do CT-MON**

Antonio Augusto de Aragão Rocha (UFF)

**Coordenador Adjunto do CT-MON**

Daniel Cota (UFF)

**Coordenador da RNP para o CT-MON**

Gustavo Hermínio de Araújo (RNP)

**Assessor Acadêmico Científico**

José Ferreira de Rezende (RNP/UFRJ)

Diretora de Pesquisa e Desenvolvimento

Iara Machado (RNP)

**Autores**

Antonio Augusto de Aragão Rocha (UFF)

Daniel Cota (UFF)

Gustavo Hermínio de Araújo (RNP)

José Ferreira de Rezende (RNP/UFRJ)



## 1. Introdução

CT-MON (Comitê Técnico de Monitoramento e Medições da RNP) tem como objetivo acompanhar os principais avanços técnico-científicos na área de monitoramento de tráfego em redes, através de prospecção tecnológica. Participam do CT-MON pesquisadores da área de monitoramento de redes, membros das áreas de Engenharia e Operação de Redes, Internet Avançada e Serviços da RNP, além de representantes das instituições que operam e desenvolvem o serviço MonIPÉ.

Em 2024, o comitê técnico passou por uma mudança na coordenação, assumindo o cargo de coordenador o professor Antonio Augusto de Aragão Rocha (UFF), tendo como coordenador adjunto o professor Giovanni Comarella (UFES) e, na coordenação da RNP, Gustavo Araújo. Anteriormente, na sua criação, em 2011, o comitê foi coordenado pelo professor José Augusto Suruagy. Em seguida, entre 2014 e 2020, o comitê passou a ser coordenado pelo prof. Artur Ziviani (LNCC), tendo como adjunto o professor Leobino Sampaio (UFBA) e, na coordenação da RNP, o Alex S. Moura. De 2021 a 2023, a coordenação passou a ser exercida pelo professor Leobino Sampaio (UFBA), tendo como adjunto o professor Alex Borges Vieira (UFJF) e, na coordenação da RNP, Alex S. Moura.

O documento de Visão de Futuro do CT-Mon de 2018, em sua prospecção, já indicava como tendência a combinação de técnicas de aprendizado de máquina (machine learning) e inteligência artificial para buscar, classificar e qualificar dados de medições e apresentar deduções ou recomendações sobre o comportamento da rede ao operador e a pesquisadores. É incontestável que, de lá para cá, essa tendência se transformou na realidade da área. Diante disso, em 2024 a Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação propôs o ajuste de foco do CT-Mon, com um olhar mais aguçado sobre o uso de Inteligência Artificial e suas derivadas, para a área de Medições e Monitoramento de Redes de Computadores.

Em 2024, o CT-Mon organizou suas atividades de modo a prospectar e discutir sobre os avanços técnico-científicos em monitoramento de redes, em especial com o uso de IA e suas aplicações para a área. A ideia foi fomentar a troca de conhecimento entre seus membros e a pesquisa da comunidade científica diante deste tema. Para saber mais sobre o Comitê, o que foi discutido e apresentado, e as demais iniciativas, segue a página web do comitê técnico: <https://plataforma.rnp.br/ct-mon>

### 1.1. Escopo e limitações

O relatório de Visão de Futuro do CT-Mon 2024, apresentado neste documento, abrange a percepção da coordenação do comitê, diante do que foi discutido nas reuniões, e considera as contribuições e discussões dos membros do comitê nas reuniões de plenária. O CT-Mon teve oito (8) reuniões ao longo do ano de 2024, sendo que em três delas foram convidados pesquisadores renomados internacionais para palestra e discussão sobre o tema. As demais reuniões foram pautadas por discussões gerais dos membros do comitê, diante de pontos propostos pela coordenação e/ou pelos demais membros do comitê. Lembrando que o comitê é formado por membros representantes da comunidade de pesquisa nas áreas de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, bem como colaboradores da RNP envolvidos em atividades e projetos com relação ou interesse no tema de Medições e Monitoramento de Redes.

Não é objetivo deste relatório apresentar uma prospecção completa de todos os assuntos da área, mas sim identificar possíveis temas de interesse da RNP e dos clientes que abrangem o sistema RNP. Portanto, a prospecção apresentada neste relatório foi realizada com esta visão e para isso foram realizados também levantamentos bibliográficos científicos e de mercado, com o objetivo de apresentar um panorama com desafios, oportunidades e tendências tecnológicas.

## 2. Metodologia

Ao longo do ano de 2024, a nova coordenação do comitê liderou iniciativas do comitê, que entendemos serem importantes, tanto para a prospecção tecnológica quanto para o engajamento da comunidade junto ao comitê e ações deste. Algumas dessas iniciativas incluem: (i) a realização de reuniões mensais da plenária do comitê,

onde se discutem pontos de pauta relacionados à área de Monitoramento e Medições em Redes, tais como a soluções existentes no mercado, iniciativas da RNP para a disseminação e suporte de dados de monitoramento de redes, e iniciativas da indústria /academia alinhadas com o comitê técnico (a citar, o projeto Measurement Lab - MLab); (ii) a realização de palestras internacionais sobre temas relacionados (ou correlacionados) a Medições e Monitoramento de redes. Para isso, cientistas de renome internacional foram convidados para apresentarem alguns dos seus principais resultados científicos e ajudar ao comitê na prospecção tecnológica do tema. Em 2025, os palestrantes convidados foram Mark Crovella (Boston University - EUA), Marco Fiore (IMDEA Networks - Espanha) e Ramin Khalilil (Huawei Research Lab - Alemanha); (iii) a realização do primeiro DataChallenge de dados de monitoramento de redes da RNP/CT-Mon, onde uma chamada de ampla divulgação junto à comunidade científica e o CT-Mon foram convidados a participar<sup>1</sup>. Os vencedores<sup>2</sup> foram fomentados por três meses por projetos de pesquisa para avançarem com suas soluções por mais alguns meses e os resultados serem submetidos na forma de artigos científicos a conferências relevantes.

As gravações das reuniões do CT-Mon em 2024 estão disponíveis no site do comitê<sup>3</sup>. Dentre os pontos abordados nas pautas das reuniões do comitê neste ano, podemos citar os avanços do projeto Catálogo de Dados de Redes da RNP, o projeto de integração da RNP ao consórcio do projeto Measurement Lab, os interesses de temas associados aos objetivos do projeto pelos membros, discussões sobre os avanços de ferramentas e soluções tecnológicas da área. Foram ainda partes das reuniões, a apresentação do DataChallenge, a divulgação da chamada, as parciais e finais dos resultados, com as equipes vencedoras. Neste sentido, cada equipe contemplada com o fomento de projeto apresentou sua solução na reunião do mês de agosto de 2024. A partir daí, mensalmente foram feitas reuniões de acompanhamento com as equipes e elas apresentavam avanços parciais dos seus respectivos projetos. Por fim, em dezembro, todas as equipes apresentaram seus resultados das entregas do projeto.

Assim como as reuniões plenárias, as reuniões com palestrantes internacionais também encontram-se disponíveis no site do comitê. Os temas discutidos demonstram um pouco sobre uma visão de futuro da área.

A primeira palestra, realizada em abril de 2024, foi proferida pelo professor Marco Fiore, do IMDEA-Network da Espanha, a palestra discorre sobre a questão que tem se colocado muito relevante para a área de Medições e Monitoramento de Redes de Computadores, se a IA atual satisfaz os requisitos atuais de Redes de Computadores. Marco Fiore é professor pesquisador no IMDEA Networks Institute, onde lidera o grupo de Ciência de Dados em Redes. Sua pesquisa aborda em especial temas relacionados a medições e monitoramento de redes, com a aplicação de soluções de IA. Nesta palestra em especial, ele reforça que a inteligência artificial (IA) permeou a pesquisa em diversos domínios científicos, e as redes não são exceção: o aprendizado de máquina é amplamente considerado instrumental na automação de operações de rede, e uma vasta literatura sobre o tema surgiu nos últimos anos. No entanto, as redes representam uma exceção no que diz respeito aos requisitos específicos que impõem à IA. Atender a esses requisitos é crucial para a viabilidade e o desempenho de uma rede orientada por IA e requer um design cuidadoso e dedicado de modelos de aprendizado de máquina. Assim, a palestra levantou os desafios relacionados à latência e ao desempenho destas soluções de operação de redes, baseadas em IA, fornecendo exemplos de como a integração de IA em sistemas de rede frequentemente exige o avanço do estado da arte em aprendizado de máquina.

A segunda palestra foi realizada por Ramin Khalili, pesquisador principal no Centro de Pesquisa da Huawei em Munique. Seus interesses de pesquisa concentram-se em "gerenciamento de recursos e otimização de serviços" no contexto de Inteligência Artificial (IA) em Grande Escala e Sistemas Distribuídos. Em sua palestra, ele apresentou os dados também coletados de forma distribuída pelo sistema, incluindo e a partir de dispositivos finais (veículos, celulares, etc.), em estações de trabalho, em roteadores, em instâncias de rede sem fio (NF) e em servidores de aplicação, vêm sendo utilizados por operadoras para soluções inteligentes. Em especial, em soluções distribuídas, através de aprendizado federado, onde as computações são transferidas

---

<sup>1</sup> [https://drive.google.com/file/d/1EQm\\_2uubv6H1QxpNis8rYSrRCWaVkJ4E/view](https://drive.google.com/file/d/1EQm_2uubv6H1QxpNis8rYSrRCWaVkJ4E/view)

<sup>2</sup> <https://www.rnp.br/ct-mon-divulga-os-vencedores-do-data-challenge/>

<sup>3</sup> <https://plataforma.rnp.br/ct-mon>

para os locais em que os dados estão, reduzindo a sobrecarga de transmissão e atendendo às restrições de privacidade dos usuários. Na palestra foram discutidas algumas das técnicas propostas para o aprendizado distribuído, os desafios de aplicá-las e os avanços feitos nos últimos anos para lidar com essas questões.

Por fim, em 2024, tivemos ainda a palestra do Mark Crovella, Professor de Computação e Ciências de Dados na Universidade de Boston. Seu trabalho abrange análises orientadas por dados de redes de computadores e sistemas de aprendizado de máquina. Um dos pioneiros e maiores renomes da área de Medições e Monitoramento de Redes de Computadores, o professor é coautor do livro intitulado "Internet Measurement" (Wiley Press, 2006), maior referência bibliográfica da área, e de artigos importantes de área, tais como: (i) "Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes" que recebeu o ACM SIGMETRICS Test of Time Award de 2010 e, (ii) "Routing State Distance: A Path-Based Metric for Network Analysis", que foi premiado em 2013 com o IETF/IRTF Applied Networking Research Prize.

A palestra de Mark Crovella, intitulada "Visualizações Múltiplas de Provedores de Nuvem", apresentou uma visão de como soluções de nuvens de empresas, tais como da Google, Microsoft e Amazon, desempenham um papel cada vez mais importante na Internet atual. Eles também são capazes de manipular pacotes de medições que atravessam seus backbones privados e operados por eles. Como resultado, as técnicas padrão de medição baseadas em traceroute não são mais um meio confiável para avaliar a conectividade de rede nessas infraestruturas de provedores de nuvem em escala global. Em resposta a esses desenvolvimentos, a palestra apresenta novas abordagens empíricas que permitem elucidar a descoberta de conectividade nessas redes de backbone privadas. A abordagem proposta por ele se baseia no uso apenas de medições "leves" (ou seja, simples, facilmente interpretáveis e prontamente disponíveis), mas requer a aplicação de técnicas matemáticas "complexas" para analisar essas medições. Em particular, é apresentado um novo método que utiliza medições de latência de rede e se baseia em conceitos da geometria Riemanniana (ou seja, curvatura de Ricci) para avaliar as características da malha de conectividade de uma determinada infraestrutura de rede. É, por fim, ainda complementar a esse método a apresentação de uma ferramenta de visualização que gera uma nova visão múltipla do espaço de atraso de uma rede. Ele demonstra como a abordagem utilizando medições de latência de pontos de vista disponíveis e máquinas virtuais em execução em datacenters de três grandes provedores de nuvem para estudar diferentes aspectos da conectividade em seus backbones privados foram usados para mostrar como nossas as visualizações geradas nos permitem expor e visualizar aspectos críticos dessa conectividade.

### **3. Revisão ("Key findings") - Estado da Arte**

#### **3.1. Panorama e contexto**

A área de medições em redes de computadores constitui um pilar essencial para a compreensão, operação, otimização e evolução da Internet e de serviços e aplicações que dela dependem. Em um mundo cada vez mais interconectado, onde atividades econômicas, sociais, educacionais e de entretenimento são mediadas por infraestruturas de rede, a capacidade de medir e analisar o seu comportamento é mais crítica do que nunca. A medição em redes abrange um vasto leque de atividades, incluindo a caracterização do desempenho da rede (latência, vazão, perdas de pacotes), a avaliação da qualidade da experiência do utilizador (QoE) para diversas aplicações, a detecção de anomalias e incidentes de segurança, a análise da topologia e da dinâmica de roteamento, a verificação da disponibilidade e resiliência dos serviços, e o estudo do impacto de novas tecnologias e protocolos.

Este relatório de visão de futuro apresenta uma revisão do estado da arte na área de medições em redes de computadores, com foco nos trabalhos relacionados publicados em importantes veículos, tais como Internet Measurement Conference (IMC), Passive and Active Measurement conference (PAM), Sigmetrics e Sigcomm. A análise preliminar, baseada nos artigos publicados em 2024, indica um campo dinâmico, impulsionado pela crescente complexidade das redes, a diversidade de aplicações emergentes, a necessidade de segurança em infraestruturas críticas, as preocupações com privacidade e a contínua evolução de

protocolos fundamentais como o IPv6. Os principais desafios residem na escalabilidade da medição, na garantia da Qualidade de Experiência (QoE) para serviços sensíveis à latência, na segurança de sistemas ciberfísicos e na privacidade dos dados coletados. As tendências apontam para o uso crescente de inteligência artificial e aprendizado de máquina na análise de dados de rede, o desenvolvimento de ferramentas de medição mais especializadas e adaptativas, e uma maior conscientização sobre a sustentabilidade e o impacto ambiental das infraestruturas de comunicação.

### 3.2. Problemas, Desafios, Tendências e Oportunidades identificadas

A análise aprofundada de artigos publicados em algumas das principais conferências em 2024 permite identificar um conjunto de problemas persistentes, desafios emergentes, tendências consolidadas e novas oportunidades na área de medições e monitoramento em redes de computadores. Esta seção se dedica a delinear esses aspectos, fundamentando-se nas temáticas e conclusões dos estudos recentes.

Alguns dos principais problemas Identificados nos artigos publicados em 2024 incluem:

1. **Segurança e Resiliência de Infraestruturas Críticas:** A crescente interconexão de sistemas SCADA em setores como energia, gás e água (conforme visto em [1]) expõe vulnerabilidades significativas. O principal problema reside na heterogeneidade dessas redes e na falta de mecanismos de segurança padronizados e eficazes, adaptados às suas características operacionais específicas. O desafio é desenvolver técnicas de medição que permitam não apenas caracterizar o tráfego e a topologia dessas redes, mas também detectar anomalias e ataques em tempo real, considerando as severas consequências de falhas ou comprometimentos. Outro problema em aberto é a medição e mitigação eficazes de novas formas de ataques e abusos na rede. Embora a conferência tenha abordado a detecção de anomalias em BGP e a eficácia da mitigação de DDoS, o panorama de ameaças está em constante evolução, com o surgimento de ataques mais sofisticados e distribuídos, incluindo aqueles que exploram vulnerabilidades em dispositivos IoT ou que visam novas infraestruturas como constelações de satélites. Por fim, a compreensão e modelagem precisas da resiliência da Internet a eventos disruptivos em larga escala, sejam eles falhas técnicas ou desastres naturais (como o impacto de radiações solares em satélites, estudado por Basak et al. em [2]) ou eventos geopolíticos que afetam o roteamento, também se configura como um problema complexo e em aberto. Garantir a conectividade global requer um entendimento mais profundo das interdependências e dos pontos únicos de falha no ecossistema da Internet.
2. **Escalabilidade e Eficiência na Entrega de Conteúdo Massivo:** A explosão no volume de dados, exemplificada por jogos com mais de 100GB, impõe um problema de escalabilidade para as CDNs e a infraestrutura de rede subjacente [3]. O desafio consiste em otimizar as estratégias de cache, roteamento e distribuição de conteúdo para lidar com picos de demanda e garantir baixa latência e alta taxa de transferência para milhões de usuários simultâneos. A medição precisa do desempenho dessas plataformas em diferentes condições de carga e localizações geográficas é fundamental para identificar gargalos e validar novas soluções.
3. **Garantia de Qualidade de Experiência (QoE) para Aplicações Sensíveis à Latência:** Aplicações emergentes como cloud gaming são extremamente sensíveis a variações de latência, jitter e perda de pacotes. O problema central é a dificuldade de manter uma QoE consistente em ambientes de rede heterogêneos e dinâmicos (redes domésticas, móveis, etc.). Os desafios incluem o desenvolvimento de métricas de QoE que reflitam com precisão a percepção do usuário, a criação de ferramentas de medição em tempo real que possam identificar rapidamente a origem dos problemas de desempenho (seja no cliente, na rede de acesso, no backbone da Internet ou nos servidores de jogos), e a proposição de mecanismos de mitigação proativos, conforme descreve [4]. Um outro problema relacionado é a lacuna entre a capacidade nominal da infraestrutura e a qualidade da experiência realmente percebida pelo usuário final. Como demonstrado por Sharma et al.[5] no estudo sobre gargalos em redes WiFi domésticas, mesmo com links de banda larga de alta velocidade, o desempenho efetivo pode ser severamente limitado por componentes da rede local. Identificar e quantificar todos os fatores que contribuem para esta lacuna, desde o hardware

do utilizador, configurações de software, até a complexidade da rede doméstica e a interação com a rede do provedor, continua a ser um desafio.

4. **Visibilidade e Segurança no Ecossistema IPv6:** A transição para o IPv6, embora gradual, continua a apresentar problemas relacionados à visibilidade da rede e à segurança. O vasto espaço de endereçamento do IPv6 dificulta a varredura completa e a identificação de dispositivos ativos, como explorado em [6]. O desafio é desenvolver técnicas de descoberta de hosts e prefixos IPv6 que sejam eficientes, precisas e capazes de distinguir atividades legítimas de reconhecimento de varreduras maliciosas. Além disso, a segurança do próprio protocolo IPv6 e a adaptação das ferramentas de segurança existentes para este novo ambiente continuam sendo áreas de intensa pesquisa e desenvolvimento.
5. **Privacidade em Medições de Rede:** Embora não explicitamente detalhado nos resumos fornecidos até o momento, a coleta e análise de dados de tráfego de rede invariavelmente levantam preocupações com relação à privacidade dos usuários. Um desafio constante é equilibrar a necessidade de dados detalhados para pesquisa e otimização de rede com a proteção da privacidade individual. Isso envolve o desenvolvimento de técnicas de anonimização de dados, a criação de políticas claras de uso de dados e a exploração de abordagens de medição que minimizem a coleta de informações sensíveis. Outra questão da privacidade nas medições permanece desafiador é como coletar dados detalhados e úteis sobre o comportamento da rede e dos utilizadores sem comprometer a sua privacidade, especialmente face a um ecossistema de rastreamento cada vez mais invasivo [7] e à necessidade de avaliar o impacto de regulações de privacidade.

A realização de medições de rede robustas e significativas enfrenta uma série de desafios metodológicos e práticos, muitos dos quais foram abordados nos trabalhos. Um desafio proeminente é a obtenção de dados representativos e em larga escala. Como visto no estudo de Nabi et al. [8] sobre o Mapa Nacional de Banda Larga dos EUA, a dependência de dados auto-reportados por provedores pode levar a imprecisões significativas. A combinação de dados regulatórios com abordagens de crowdsourcing e medições ativas representa uma tentativa de superar essa limitação, mas cada fonte de dados tem os seus próprios vieses e desafios de coleta e validação.

Similarmente, o estudo de Kalntis et al.[9] sobre handovers celulares beneficiou-se do acesso a dados de uma grande operadora, um privilégio nem sempre disponível para a comunidade de pesquisa em geral. A generalização de resultados obtidos em contextos específicos (e.g., uma única rede de ISP, um país) para outros ambientes continua a ser um desafio metodológico.

Outro desafio prático reside na complexidade e dinamismo das redes modernas. A Internet não é uma entidade estática; novas tecnologias, protocolos e aplicações são constantemente introduzidos, e o comportamento da rede pode mudar rapidamente. Manter as ferramentas e metodologias de medição atualizadas para refletir esta evolução é um esforço contínuo. O trabalho de Sundberg et al. [10] com eBPF para medição de latência é um exemplo de adaptação a novas capacidades do kernel para medições mais eficientes, mas a curva de aprendizado e a portabilidade de tais soluções podem ser desafios. A medição em ambientes de difícil acesso ou com recursos limitados, como em algumas regiões da África, apresenta desafios logísticos e técnicos únicos, desde a falta de infraestrutura de medição até a necessidade de desenvolver ferramentas leves e de baixo custo[11].

A reprodutibilidade dos estudos de medição é outro desafio metodológico crucial. Embora a comunidade científica valorize a partilha de dados e código, a complexidade das configurações experimentais e a natureza dinâmica da Internet podem dificultar a replicação exata dos resultados. Esse desafio, por exemplo, encontra-se muito bem alinhado com temas de discussões levantados nas reuniões do CT-Mon em 2024 e, inclusive, com o projeto fomentado pela RNP, o Catálogo de Dados de Redes de Computadores.

Finalmente, os custos associados à realização de medições em larga escala e longitudinais (como no estudo de Sharma et al. [5] sobre gargalos WiFi) podem ser proibitivos para muitos grupos de pesquisa,

limitando o escopo e a duração das investigações. Portanto, a criação/disponibilização de testbeds de larga escala, como o Measurement Lab, por exemplo, é um desafio para a área de medições e monitoramento.

As pesquisas levantadas também sinalizam tendências importantes, tais como:

**Medições Específicas de Aplicações:** Há uma tendência clara de afastar-se de medições genéricas de rede para estudos focados no desempenho e comportamento de aplicações específicas, como jogos online, streaming de vídeo e sistemas SCADA. Isso reflete a importância crescente dessas aplicações e a necessidade de entender seus requisitos de rede únicos.

**Utilização de Múltiplas Fontes de Dados e Técnicas de Medição:** Os estudos frequentemente combinam medições ativas (injeção de tráfego de teste) e passivas (análise de tráfego existente), além de dados de fontes diversas (darknets, honeynets, logs de servidores) para obter uma visão mais completa dos fenômenos de rede.

**Análise Comparativa, Longitudinal e em Larga escala:** Observa-se um interesse em análises comparativas entre diferentes plataformas ou tecnologias (ex: diferentes redes SCADA) e estudos longitudinais que acompanham a evolução de sistemas e comportamentos ao longo do tempo. Os estudos permitem capturar a dinâmica temporal e a heterogeneidade da Internet. Os estudos de Sharma et al. [5] sobre gargalos WiFi e de Solomos et al. [7] sobre o ecossistema de rastreamento ilustram a importância de observar fenômenos ao longo do tempo para compreender a sua evolução.

**Aprendizado de Máquina (AM) e Inteligência Artificial (IA):** Verifica-se a demanda por analisar grandes volumes de dados de medição, identificar padrões complexos, detectar anomalias e prever o comportamento da rede. O trabalho de Nabi et al. [12] na identificação de alegações de baixa qualidade em mapas de banda larga e a menção à detecção de anomalias em BGP utilizando AM são exemplos disso. Espera-se que esta tendência se intensifique, com o desenvolvimento de modelos de AM mais sofisticados e explicáveis para diversas tarefas de medição.

**Combinação de múltiplas fontes de dados e metodologias de medição:** O uso de técnicas variadas de medição, passivas e ativas, com modelos de crowdsourcing e dados regulatórios também é uma tendência forte que objetiva obter uma visão mais completa e robusta dos fenômenos em estudo, como demonstrado por Nabi et al. [12] e Kalntis et al [9].

**Medição de novas fronteiras da Internet:** Há um interesse crescente na medição dessas novas tecnologias, que incluem constelações de satélites LEO (Basak et al. [2]), redes 5G/6G (implícito na análise de handovers celulares) e o vasto ecossistema de dispositivos IoT. Medição da Qualidade da Experiência (QoE) do usuário: A obtenção de medidas para além das métricas puramente técnicas de rede (QoS) continua a ser uma tendência importante, embora muitas vezes implícita na motivação dos estudos de desempenho.

**Segurança e Privacidade:** A investigação sobre esses tópicos da própria infraestrutura da Internet e dos seus usuários permanece uma linha de pesquisa central, com foco em DNSSEC, RPKI, mitigação de DDoS, e o impacto de tecnologias emergentes.

As lacunas e desafios identificados abrem diversas oportunidades para futuras pesquisas e investigações por parte da comunidade do CT-Mon.

Uma oportunidade clara reside no desenvolvimento de metodologias de medição mais proativas e preditivas, alavancando os avanços em IA/AM. Em vez de apenas reagir a problemas de desempenho ou segurança, futuras ferramentas poderiam antecipar falhas, congestionamentos ou ataques com base na análise contínua de dados de medição em tempo real. Para isso, o avanço nos métodos para aplicação de Aprendizado de Máquina para Análise de Dados de Medição e Monitoramento de Redes de Computadores se

faz necessário. O volume e a complexidade dos dados de medição de rede oferecem um campo fértil para a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para detecção de anomalias, classificação de tráfego, previsão de desempenho e otimização de QoE. Porém, problemas como resposta em tempo de ação e algoritmos destinados ou ajustados para resolução dos problemas de redes ainda precisam ser mais estudados.

Ainda na linha do uso de IA/AM a dados de redes, pode-se afirmar que uma oportunidade é o desenvolvimento de Ferramentas de Medição mais inteligentes e adaptativas. Nesta linha, há uma lacuna na oferta de ferramentas que possam se adaptar dinamicamente às condições da rede, focar em eventos de interesse e fornecer insights mais acionáveis para operadores de rede e desenvolvedores de aplicações.

A implementação de plataformas de medição federadas, capazes de preservar a privacidade, configura uma oportunidade de grande relevância. Tais plataformas poderiam permitir a partilha de dados de medição entre diferentes entidades (ISPs, pesquisadores, reguladores) de forma segura e controlada, possibilitando análises mais abrangentes e a criação de benchmarks mais representativos, sem comprometer dados sensíveis. Nesta linha, há ainda o que tem sido chamado de Colaboração Interdisciplinar, onde a medição de redes em contextos específicos, como infraestruturas críticas ou plataformas de jogos, pode se beneficiar enormemente da colaboração com especialistas dessas áreas, permitindo uma compreensão mais profunda dos problemas e o desenvolvimento de soluções mais eficazes.

Há também uma grande oportunidade na medição e otimização de redes para aplicações emergentes e exigentes, como realidade virtual/aumentada (VR/AR), metaverso, veículos autônomos conectados e aplicações de telemedicina avançada. Estas aplicações impõem requisitos rigorosos de latência, jitter, largura de banda e fiabilidade, exigindo novas métricas e técnicas de medição para garantir a QoE.

A exploração de novas fontes de dados para medição de rede, como dados de telemetria de dispositivos de rede programáveis (e.g., P4 switches) ou sensores IoT distribuídos, pode oferecer granularidade e visibilidade sem precedentes sobre o comportamento da rede. Outra área promissora é o desenvolvimento de ferramentas de visualização de dados de medição mais intuitivas e interativas, que permitam a operadores de rede, pesquisadores e até mesmo utilizadores finais compreenderem facilmente informações complexas sobre o desempenho e a saúde da rede.

A investigação sobre o impacto ambiental da infraestrutura da Internet e o desenvolvimento de métricas para "green networking" é uma oportunidade emergente e de crescente importância, alinhada com as preocupações globais de sustentabilidade. Com a crescente preocupação com o consumo de energia, surge a oportunidade de desenvolver métricas e metodologias para medir e otimizar a eficiência energética de redes e data centers.

Finalmente, existe uma oportunidade contínua para fortalecer a colaboração entre a academia, a indústria e os órgãos reguladores para traduzir os resultados da investigação em medição em padrões, melhores práticas e políticas públicas que beneficiem todo o ecossistema da Internet, como exemplificado em [13]. O desenvolvimento de "sandboxes" ou ambientes de teste realistas para validar novas tecnologias de medição e protocolos de rede também se apresenta como uma necessidade e oportunidade para a comunidade.

### **3.3. Tendências tecnológicas e aplicações emergentes**

As tendências tecnológicas estão intrinsecamente ligadas ao surgimento ou à maturação de novas aplicações que demandam abordagens inovadoras. Podemos afirmar que, no curto, médio e longo prazos, diversas tendências tecnológicas e aplicações emergentes já estão sendo moldadas no campo de medição e monitoramento de redes de computador exatamente para atender as demandas das aplicações e serviços que virão no futuro. Algumas dessas tendências estão refletidas e/ou vêm sendo apontadas pelos mais recentes

trabalhos da literatura. Aqui nesta seção trazemos exatamente uma visão das tendências tecnológicas, em especial aquelas que em nossas prospecções identificamos potencial de afetar ou oferecer utilidade aos serviços da RNP.

### 3.4. Tendências de curto ou médio prazo com o potencial de estender os serviços da RNP

No curto e médio prazo, diversas tendências tecnológicas e aplicações emergentes moldadas no campo de medição e monitoramento de redes de computadores. Algumas dessas tendências estão refletidas e/ou vêm sendo apontadas pelos mais recentes trabalhos da literatura.

- **Adoção Generalizada de eBPF e Programabilidade no Plano de Dados:** A utilização de eBPF para medições de rede finas e de baixo overhead, como demonstrado por Sundberg et al. para latência, é uma tendência que deverá ganhar tração significativa. A capacidade de programar o plano de dados (e.g., com P4) também oferece oportunidades sem precedentes para telemetria em tempo real (In-band Network Telemetry - INT) e monitorização granular do estado da rede. A medição e análise do desempenho e segurança destas novas capacidades de programabilidade serão cruciais.
- **Medição em Redes 5G/6G e Edge Computing:** Com a expansão das redes 5G e o desenvolvimento incipiente do 6G, surgem novos desafios de medição relacionados com a latência ultra-baixa, alta densidade de dispositivos, network slicing e a integração com a computação em borda (Edge Computing). O estudo de Kalntis et al. sobre handovers celulares já toca na complexidade das redes móveis modernas. A medição do desempenho de aplicações na borda, a QoE para serviços sensíveis à latência (e.g., AR/VR móvel) e a segurança das interfaces de rede definidas por software (SDN/NFV) que sustentam estas arquiteturas serão focos importantes.
- **Avanços em IA/AM para Operações de Rede Autônomas (AIOps):** A tendência de utilizar IA/AM para análise de dados de medição (Nabi et al., detecção de anomalias BGP) evoluirá para sistemas de AIOps mais autônomos, capazes de não apenas detectar e diagnosticar problemas, mas também de orquestrar respostas automáticas para otimizar o desempenho e mitigar ameaças. A medição da eficácia, robustez e explicabilidade destes sistemas de AIOps será um campo de investigação vital.
- **Medição da Sustentabilidade e Eficiência Energética de Redes:** A crescente preocupação com o impacto ambiental da infraestrutura digital impulsionará a investigação em métricas e metodologias para medir o consumo energético de redes e centros de dados. O desenvolvimento de técnicas de "green networking" e a avaliação do seu impacto através de medições rigorosas serão cada vez mais importantes.
- **Otimização da Entrega de Conteúdo em Larga Escala e Evolução das CDNs:** As melhorias nas estratégias de cache e roteamento em CDNs para lidar com o crescimento contínuo do tráfego de vídeo e downloads de grande porte (jogos, software). exerce um papel fundamental na QoE dos usuários. Medição mais granular do desempenho de CDNs em diferentes regiões e provedores de acesso, então se fazem necessárias. E, com isso, definir estratégias de (i) adoção de arquiteturas multi-CDN e CDNs baseadas em edge computing para aproximar o conteúdo dos usuários, (ii) técnicas de predição de popularidade de conteúdo para otimizar o posicionamento de cache, e (iii) medição do impacto de novas tecnologias de codificação de vídeo na eficiência da entrega.
- **Avanços na Medição e Segurança do Ecossistema IPv6:** A continuação dos esforços para mapear a adoção do IPv6 é, sem dúvida, uma tendência de curto prazo em todas as operadoras, e na RNP não deve ser diferente. Porém, além disso, a melhoria das ferramentas de varredura para descoberta de vulnerabilidades de hosts IPv6, com foco em eficiência e minimização de impacto, assim como o desenvolvimento de contramedidas são atividades indicadas em [6].

#### 3.3.2. Tendências disruptivas de médio ou longo prazo, com o potencial de criar novos produtos/serviços ou modelos de negócio

Olhando para o longo prazo, a medição e o monitoramento de redes de computadores enfrentarão e contribuirão para transformações ainda mais profundas, impulsionadas por avanços tecnológicos disruptivos e por novas formas de interação digital. As tendências de longo prazo são mais especulativas,

mas refletem desafios fundamentais e oportunidades transformadoras. Algumas delas, mais alinhadas com os potenciais transformadores de criação de novos produtos/serviços ou modelos de negócio da RNP estão descritos abaixo.

- **Redes Autônomas e Auto-Otimizáveis Baseadas em IA:** Medições e monitoramento serão a parte do núcleo dessas redes, fornecendo dados em tempo real para algoritmos de IA que tomarão decisões autônomas sobre roteamento, alocação de recursos, segurança e reparo de falhas. O desafio será garantir a confiabilidade, explicabilidade e segurança desses sistemas de controle baseados em IA.
- **Medição para a Internet Quântica e Novas Arquiteturas de Rede:** Ainda pouco explorada na área de medições, por razões óbvias, o eventual surgimento da computação e comunicação quântica fará necessárias novas primitivas e ferramentas de medição para caracterizar o desempenho e a segurança dessas redes fundamentalmente diferentes. Da mesma forma, propostas de novas arquiteturas para a Internet (além do TCP/IP) exigirão abordagens de medição radicalmente novas.
- **Medição da Sustentabilidade e Impacto Ambiental da Internet:** A crescente preocupação com a crise climática levará a uma maior demanda por medição e otimização da eficiência energética de toda a infraestrutura da Internet, desde data centers até dispositivos de usuário e redes de acesso. Métricas como "bits por Watt" e o impacto ambiental do ciclo de vida dos equipamentos de rede se tornarão cruciais.
- **Ética e Governança da Medição de Redes em Larga Escala:** A capacidade de medir e analisar o tráfego de rede em grande detalhe levantará questões éticas e de governança cada vez mais complexas. Serão necessários debates contínuos e o estabelecimento de normas e regulações para garantir que as tecnologias de medição sejam usadas de forma responsável, justa e que respeite os direitos fundamentais.
- **Medição da Consciência e Agência em Sistemas de IA Avançados em Rede:** Se os sistemas de Inteligência Artificial se tornarem uma realidade e operarem de forma distribuída em rede, surgirão questões filosóficas e técnicas profundas sobre como medir a sua "compreensão", agência, e o impacto das suas interações em rede. Embora especulativo, a medição de sistemas com este nível de autonomia e complexidade transcenderá as abordagens atuais.

#### 4. Recomendações - Visão de futuro do CT (Foresight)

Toda a prospecção realizada para a redação desse relatório através da revisão do estado da arte em medições e monitoramento de redes de computadores, através das publicações científicas realizadas em 2024, dos temas e discussões geradas nas palestras e reuniões do CT-Mon, também em 2024, nos permitiu chegar a um conjunto de recomendações para a visão de futuro da área. Sendo assim, recomendamos que haja atividades de investigação nas seguintes tendências identificadas na área de medições e monitoramento de desempenho de redes, considerando o curto, médio e longo prazos. Além disso, a visão de futuro expressa neste documento vislumbra também possibilidades de alianças com diferentes iniciativas, com reflexões sobre como mediar as relações.

##### 4.1. Curto prazo (1 a 2 anos)

No horizonte de 1 a 2 anos, a RNP, através do CT-Mon, deve focar em iniciativas que capitalizem as tendências tecnológicas emergentes e abordem os desafios imediatos identificados na área de medições e monitoramento de redes.

Uma das sugestões é a **adoção de eBPF e a programabilidade no plano de dados** [10]. A RNP deve investir na capacitação de suas equipes para o uso avançado de eBPF, permitindo a coleta de métricas de rede com granularidade sem precedentes e baixo *overhead*. Isso inclui o desenvolvimento de *probes* e *scripts* eBPF personalizados para monitorar aspectos críticos da infraestrutura da RNP, como latência em *links* específicos, *throughput* de aplicações sensíveis e detecção de anomalias em tempo real. A programabilidade com P4, embora mais complexa, deve ser explorada em ambientes de laboratório para entender seu potencial em telemetria *in-band*(INT), que pode fornecer visibilidade granular do estado da rede, essencial para o diagnóstico

proativo de problemas. A RNP pode liderar a criação de um repositório de *scripts* eBPF e P4 otimizados para redes acadêmicas, incentivando a colaboração com as instituições parceiras.

Outro ponto crucial é a **medição em redes 5G/6G e Edge Computing**. Com a expansão das redes 5G e o desenvolvimento do 6G, a RNP precisa adaptar suas ferramentas e metodologias de medição para lidar com os novos desafios impostos por essas arquiteturas. A RNP deve olhar para o desenvolvimento de capacidades para monitorar o desempenho de aplicações em *edge computing*, especialmente aquelas sensíveis à latência, como AR/VR móvel, que podem vir a ser relevantes para o ambiente acadêmico. A segurança das interfaces de rede definidas por *software* (SDN/NFV), que sustentam essas arquiteturas, também deve ser um foco, com o desenvolvimento de métricas e ferramentas para avaliar a resiliência e a segurança dessas infraestruturas [9].

A **otimização da entrega de conteúdo em larga escala e a evolução das CDNs** são igualmente importantes. A RNP, como provedora de infraestrutura para pesquisa e educação, lida com um volume crescente de dados, incluindo *datasets* científicos massivos e conteúdo multimídia. É fundamental aprimorar as estratégias de *cache* e roteamento em suas CDNs para garantir a Qualidade de Experiência (QoE) dos usuários. Isso implica em uma medição mais granular do desempenho das CDNs em diferentes regiões e provedores de acesso, identificando gargalos e otimizando a distribuição de conteúdo. A RNP pode explorar a adoção de arquiteturas multi-CDN e CDNs baseadas em *edge computing* para aproximar o conteúdo dos usuários, além de investigar técnicas de predição de popularidade de conteúdo para otimizar o posicionamento de *cache* [3].

No que tange à **segurança e privacidade**, a RNP deve continuar os esforços para mapear a adoção do IPv6 e aprimorar as ferramentas de varredura para descoberta de vulnerabilidades em *hosts* IPv6, com foco em eficiência e minimização de impacto [6]. Além disso, é imperativo desenvolver contramedidas proativas para novas formas de ataques e abusos na rede, utilizando a inteligência artificial para detecção de anomalias em tempo real. A privacidade dos dados coletados em medições de rede deve ser uma preocupação central, com a implementação de técnicas de anonimização e políticas claras de uso de dados, garantindo a conformidade com as regulamentações de privacidade.

Finalmente, a RNP deve fortalecer a **colaboração interdisciplinar** e a **partilha de dados**. A criação de plataformas de medição federadas e que preservem a privacidade, como o projeto Catálogo de Dados de Redes da RNP, é uma oportunidade significativa. Tais plataformas permitiriam a partilha segura e controlada de dados de medição entre ISPs, pesquisadores e órgãos reguladores, possibilitando análises mais abrangentes e a criação de *benchmarks* representativos [12]. A RNP pode fomentar a criação de *sandboxes* ou ambientes de teste realistas para validar novas tecnologias de medição e protocolos de rede, promovendo a reprodutibilidade dos estudos e a inovação na área. A colaboração com especialistas de áreas específicas, como infraestruturas críticas ou plataformas de jogos, pode enriquecer a compreensão dos problemas e o desenvolvimento de soluções mais eficazes.

## 4.2. Médio prazo (2 - 5 anos)

No horizonte de 2 a 5 anos, a RNP, por meio do CT-Mon, deve se posicionar como um *hub* de inovação e conhecimento em medições e monitoramento de redes, explorando as tendências que prometem transformar a paisagem da Internet. Este período exige um foco na **integração de inteligência artificial em larga escala, na expansão da visibilidade para novas fronteiras da rede e na criação de plataformas colaborativas que impulsionem a pesquisa e o desenvolvimento**.

Um dos pilares para o médio prazo é o avanço em **IA/AM para Operações de Rede Autônomas (AIOps)**. A RNP deve ir além da detecção de anomalias e diagnóstico de problemas, investindo no desenvolvimento de sistemas de AIOps capazes de orquestrar respostas automáticas para otimizar o desempenho e mitigar ameaças. Isso implica em pesquisa e desenvolvimento de algoritmos de IA que possam tomar decisões autônomas sobre roteamento, alocação de recursos e segurança, com base em dados de medição em tempo real. A RNP pode liderar projetos de pesquisa que explorem a explicabilidade e a robustez desses sistemas de IA garantindo que as decisões autônomas sejam transparentes e confiáveis. A criação de *testbeds* para validação de soluções AIOps em ambientes controlados, mas realistas, será fundamental [12].

A **medição de novas fronteiras da Internet** representa outra área estratégica. A RNP deve expandir suas capacidades de medição para incluir tecnologias emergentes como constelações de satélites LEO (Low Earth Orbit), redes 5G/6G e o vasto ecossistema de dispositivos IoT. Isso envolve o desenvolvimento de novas métricas e ferramentas para caracterizar o desempenho e a segurança dessas redes, que apresentam desafios únicos em termos de latência, mobilidade e escalabilidade. A RNP pode estabelecer parcerias com operadoras de satélites e provedores de serviços 5G/6G para obter acesso a dados e infraestrutura, permitindo a realização de estudos empíricos e o desenvolvimento de soluções de medição adaptadas a esses ambientes [2].

A **combinação de múltiplas fontes de dados e metodologias de medição** deve ser aprimorada. A RNP deve consolidar a coleta de dados de medição de diversas fontes, incluindo medições ativas e passivas, dados de telemetria de dispositivos de rede programáveis (e.g., P4 switches), sensores IoT distribuídos e até mesmo dados de *crowdsourcing*. A integração e correlação desses dados, utilizando técnicas avançadas de *data fusion* e *machine learning*, permitirão obter uma visão mais completa e robusta dos fenômenos de rede. A RNP pode desenvolver plataformas unificadas para ingestão, processamento e análise desses dados heterogêneos, fornecendo *insights* valiosos para a operação da rede e para a comunidade de pesquisa [8, 9].

No que diz respeito à **privacidade em medições de rede**, a RNP deve se aprofundar no desenvolvimento de técnicas avançadas de anonimização e privacidade diferencial, garantindo que a coleta e análise de dados de tráfego de rede não comprometam a privacidade dos usuários. Isso é especialmente relevante em um cenário de crescente preocupação com a proteção de dados e regulamentações como a LGPD. A RNP pode explorar abordagens de aprendizado federado, onde as computações são realizadas localmente nos dados, minimizando a necessidade de transferir informações sensíveis [7].

Finalmente, a RNP deve investir na **criação de plataformas de medição federadas e que preservem a privacidade**. Tais plataformas permitiriam a partilha segura e controlada de dados de medição entre diferentes entidades (ISPs, pesquisadores, órgãos reguladores), possibilitando análises mais abrangentes e a criação de *benchmarks* representativos, sem comprometer dados sensíveis. A RNP pode liderar a criação de um consórcio nacional para a partilha de dados de medição, estabelecendo padrões e protocolos para a interoperabilidade e a segurança dos dados. Isso fomentaria a colaboração entre a academia, a indústria e os órgãos reguladores, traduzindo os resultados da pesquisa em medição em padrões, melhores práticas e políticas públicas que beneficiem todo o ecossistema da Internet [13].

### 4.3. Longo prazo (6 - 10 anos)

No horizonte de 6 a 10 anos, a RNP, por meio do CT-Mon, deve se posicionar na vanguarda da pesquisa e desenvolvimento em medições e monitoramento de redes, antecipando e moldando o futuro da infraestrutura digital. Este período é caracterizado pela **emergência de redes autônomas, a necessidade de medição em novas arquiteturas de rede (incluindo a Internet Quântica) e uma crescente preocupação com a sustentabilidade e a ética na governança da Internet**.

O principal direcionamento para o longo prazo é a **consolidação de Redes Autônomas e Auto-Otimizáveis Baseadas em IA**. As medições e o monitoramento deixarão de ser apenas ferramentas de diagnóstico para se tornarem o núcleo dessas redes, fornecendo dados em tempo real para algoritmos de IA que tomarão decisões autônomas sobre roteamento, alocação de recursos, segurança e reparo de falhas. A RNP deve investir pesadamente em pesquisa fundamental para garantir a confiabilidade, explicabilidade e segurança desses sistemas de controle baseados em IA. Isso inclui o desenvolvimento de mecanismos de validação e verificação para algoritmos de IA em ambientes de rede, bem como a criação de *frameworks* para auditoria e *accountability* de decisões autônomas. A RNP pode se tornar um centro de excelência na pesquisa de IA para redes, atraindo talentos e fomentando a colaboração internacional [1].

A **medição para a Internet Quântica e Novas Arquiteturas de Rede** será um campo de pesquisa disruptivo. Embora ainda em estágios iniciais, o eventual surgimento da computação e comunicação quântica exigirá novas primitivas e ferramentas de medição para caracterizar o desempenho e a segurança dessas redes fundamentalmente diferentes. A RNP deve iniciar estudos exploratórios sobre os requisitos de medição para redes quânticas, identificando as métricas relevantes e as abordagens tecnológicas necessárias. Da mesma forma, propostas de novas arquiteturas para a Internet (além do TCP/IP) exigirão abordagens de medição

radicalmente novas, e a RNP deve estar preparada para liderar a pesquisa nesse domínio, desenvolvendo ferramentas e metodologias que permitam a avaliação e otimização dessas futuras infraestruturas [2].

A **medição da sustentabilidade e impacto ambiental da Internet** ganhará proeminência. A crescente preocupação com a crise climática levará a uma maior demanda por medição e otimização da eficiência energética de toda a infraestrutura da Internet, desde *data centers* até dispositivos de usuário e redes de acesso. A RNP deve desenvolver métricas e metodologias para "*green networking*", avaliando o consumo energético de suas próprias operações e incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis em toda a comunidade acadêmica. Métricas como "*bits por Watt*" e o impacto ambiental do ciclo de vida dos equipamentos de rede se tornarão cruciais, e a RNP pode liderar a pesquisa e o desenvolvimento de padrões nesse campo [11].

A **ética e governança da medição de redes em larga escala** se tornarão temas de debate central. A capacidade de medir e analisar o tráfego de rede em grande detalhe levantará questões éticas e de governança cada vez mais complexas, especialmente com o avanço da IA e a coleta massiva de dados. A RNP deve promover debates contínuos e contribuir para o estabelecimento de normas e regulações que garantam que as tecnologias de medição sejam usadas de forma responsável, justa e que respeitem os direitos fundamentais dos usuários. Isso inclui a definição de políticas de privacidade robustas, a implementação de mecanismos de consentimento transparente e a exploração de abordagens de medição que minimizem a coleta de informações sensíveis [7, 13].

Finalmente, a RNP deve estar atenta à **medição da consciência e agência em sistemas de IA avançados em rede**. Embora especulativo, se os sistemas de Inteligência Artificial se tornarem uma realidade e operarem de forma distribuída em rede, surgirão questões filosóficas e técnicas profundas sobre como medir a sua "compreensão", agência, e o impacto das suas interações em rede. A medição de sistemas com este nível de autonomia e complexidade transcenderá as abordagens atuais, exigindo uma redefinição fundamental do que significa medir e monitorar sistemas complexos e inteligentes. A RNP pode fomentar a pesquisa interdisciplinar que combine ciência da computação, filosofia, ética e direito para abordar essas questões emergentes, garantindo que o desenvolvimento tecnológico seja acompanhado por uma reflexão profunda sobre suas implicações sociais e éticas.

## Referências

- [1] Ortiz, N., Rosso, M., Zambon, E., den Hartog, J., & Cardenas, A. A. (2024). From Power to Water: Dissecting SCADA Networks Across Different Critical Infrastructures. Passive and Active Measurement (PAM 2024).
- [2] Basak, S., Pal, A., & Bhattacharjee, D. (2024). CosmicDance: Measuring Low Earth Orbital Shifts due to Solar Radiations. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [3] Visser, C., & Fontugne, R. (2024). Inside the Engine Room: Investigating Steam's Content Delivery Platform Infrastructure in the Era of 100GB Games. Passive and Active Measurement (PAM 2024).
- [4] Lyu, M., Madanapalli, S. C., Vishwanath, A., & Sivaraman, V. (2024). Network Anatomy and Real-Time Measurement of Nvidia GeForce NOW Cloud Gaming. Passive and Active Measurement (PAM 2024).
- [5] Sharma, R., Feamster, N., & Richardson, M. (2024). A Longitudinal Study of the Prevalence of WiFi Bottlenecks in Home Access Networks. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [6] Zhao, L., Kobayashi, S., & Fukuda, K. (2024). Exploring the Discovery Process of Fresh IPv6 Prefixes: An Analysis of Scanning Behavior in Darknet and HoneyNet. Passive and Active Measurement (PAM 2024).
- [7] Solomos, K., Ilia, P., & Smaragdakis, G. (2024). Tracking the Trackers: A Longitudinal Study of the Ad and Tracking Ecosystem. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [8] Nabi, S. T., Wen, Z., Ritter, B., & Hasan, S. (2024). Red is Sus: Automated Identification of Low-Quality Service Availability Claims in the US National Broadband Map. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [9] Kalntis, M., Suárez-Varela, J., Omaña Iglesias, J., Bhattacharjee, A. K., Iosifidis, G., Kuipers, F. A., & Lutu, A. (2024). Through the Telco Lens: A Countrywide Empirical Study of Cellular Handovers. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [10] Sundberg, S., Brunstrom, A., Ferlin-Reiter, S., Høiland-Jørgensen, T., & Chacón, R. (2024). Measuring Network Latency from a Wireless ISP: Variations Within and Across Subnets. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [11] Phokeer, A., & Chavula, J. (2024). Poster: Measuring Broadband Performance in Africa. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [12] Nabi, S. T., Wen, Z., Ritter, B., & Hasan, S. (2024). Red is Sus: Automated Identification of Low-Quality Service Availability Claims in the US National Broadband Map. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).
- [13] Mislove, A. (2024). What I Learned at the White House, or, the Importance of Measurement Researchers Engaging with Policy. ACM Internet Measurement Conference (IMC '24).

