Mapeamento Eficiente da Internet: Da Sondagem Clássica Por Prefixo /24 à Análise Adaptativa por Diversidade Topológica

Francisco Teixeira Rocha Aragão
Departamento de Ciência da Computação
franciscoaragao@dcc.ufmg.br
Universidade Federal De Minas Gerais - Brasil

Ítalo Fernando Scota Cunha
Departamento de Ciência da Computação
cunha@dcc.ufmg.br
Universidade Federal De Minas Gerais - Brasil

***Abstract*—Active Internet topology mapping depends on carefully selecting traceroute targets, since exhaustive probing is costly in IPv4 and infeasible in IPv6. This work implements and evaluates two target-selection strategies: a classical baseline that probes one representative per IPv4 /24 prefix, and an adaptive hierarchical strategy inspired by Subnet-Centric Probing. The hierarchical method recursively partitions BGP prefixes and continues probing only subprefixes that reveal AS-level diversity. For IPv6, the method is adapted with hitlist-based representatives, priority-queue exploration, and explicit probing budgets to handle address-space sparsity. Experiments using BGP inputs ranging from 10,000 to 200,000 prefixes show that the adaptive strategy substantially reduces measurement effort in both protocols. In IPv4, the 200k-prefix experiment reduced the probing load from 8.1 million to 299.7 thousand probes and the execution time from more than 60 hours to about 9.5 hours, while still observing 1,081 of the 1,216 ASes found by the classical method. In IPv6, the largest experiment reduced more than 4 million probes to 239 thousand and execution time from nearly 29 hours to 44 minutes. These gains, however, come with reduced prefix-level observability: audits show omitted IPv6 /48 blocks and specific IPv4 outliers where broad prefixes were pruned too early. The results therefore characterize hierarchical probing not as a complete replacement for exhaustive baselines, but as a scalable cost-coverage trade-off for AS-level topology discovery.**

***Index Terms*—Active probing; Adaptive sampling; Internet topology; Network measurement.**

I. Introdução

A internet é uma das maiores infraestruturas existentes, sendo constituída de um número extremamente grande de dispositivos e redes conectadas em escala global. Assim, sua utilização, desempenho e segurança estão diretamente ligados à sua estrutura, ou seja, sua topologia. Portanto, tarefas de mapeamento e descoberta da organização da rede são de fundamental importância para a sociedade atual e vêm motivando diversas pesquisas na área ao longo dos anos.

Há diferentes abordagens para esse problema. Uma linha clássica em endereços IPv4 realiza sondagens em cada uma das divisões de redes /24 de modo a economizar recursos ao se evitar medir toda a internet, ainda que com possível perda de cobertura de novos dispositivos. Outra abordagem mais complexa diz respeito a métodos hierárquicos, utilizando informações adicionais como a estrutura do protocolo BGP (Border Gateway Protocol) [8] para guiar a sondagem de forma mais eficiente. Tais métodos evidenciam o compromisso entre complexidade, cobertura e desempenho, que constitui o foco central deste trabalho.

Este trabalho busca reproduzir e revalidar o método proposto em [5] em que são apresentadas "primitivas" para topologia de rede, como técnicas de análise em grandes estruturas sendo feitas com medições em suas sub-redes, de modo a direcionar as sondagens apenas nos pontos mais promissores, ou seja, que apresentam maior diversidade. Assim, o foco da análise é verificar em que medida essa abordagem consegue reduzir o custo de medição sem comprometer excessivamente a cobertura topológica quando comparada à estratégia clássica.

Durante a etapa inicial do projeto (POC1), foram implementados ambos os métodos, sendo possível coletar resultados iniciais com sondagens que alcançaram até pouco mais de 40 mil prefixos em IPv4. Nesse contexto, os dois algoritmos apresentaram o comportamento esperado, com as análises mostrando os compromissos de cada abordagem, sendo o método clássico mais simples de implementar, porém com desempenho inferior ao método adaptativo. Este por sua vez conseguiu resultados comparáveis ou superiores, mesmo com menor esforço, seja pelo número de pacotes enviados durante as sondagens ou pelo menor tempo de execução. Entretanto, os resultados também indicaram limitações importantes no método hierárquico, como possíveis perdas na diversidade de Sistemas Autônomos e a dependência da granularidade adotada nas sondagens, que podem levar a podas excessivas e pouco aprofundamento de sondagens em regiões promissoras.

Diante disso, na segunda etapa do projeto (POC2), a análise foi expandida para medições em maior escala e para o contexto de IPv6, em que o enorme espaço de endereçamento (2^{128} endereços) impõe desafios adicionais de esparsidade e seleção de alvos. Nessa etapa, foram feitas melhorias de implementação, auditoria e interpretação dos resultados, permitindo comparar ambas as abordagens não apenas em termos de número de sondagens e tempo de execução, mas também quanto à cobertura de prefixos e de Sistemas Autônomos. Os resultados finais mostraram que, em IPv4, o método hierárquico preserva boa parte da cobertura topológica com

reduções substanciais de custo. Em IPv6 a abordagem também se mostrou viável e eficiente em cobertura de ASes sob custo baixo, mas com perdas relevantes de cobertura de /48, evidenciando um compromisso mais forte entre observabilidade e economia de sondagens.

A. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar a análise comparativa entre a abordagem clássica de sondagem e a abordagem hierárquica adaptativa, considerando tanto medições em IPv4 quanto o ajuste desses métodos para IPv6. Serão avaliados os compromissos entre cobertura, diversidade topológica e esforço computacional, verificando em que condições a estratégia hierárquica mantém as vantagens de eficiência observadas na primeira etapa do projeto e quais limitações adicionais surgem no cenário IPv6.

B. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo desejado, o projeto foi dividido em duas etapas:

Projeto Orientado em Computação I (POC1): Foi realizada a implementação de ambos os métodos de sondagem, o método clássico e o método hierárquico. Além disso, foi feita a coleta de dados de prefixos públicos de IPv4 e a análise dos resultados obtidos, que mostraram os ganhos de desempenho do método hierárquico em relação ao método clássico, porém com o compromisso associado à cobertura topológica.

Projeto Orientado em Computação II (POC2): Já na segunda etapa, as seguintes tarefas foram realizadas:

- Revisão da metodologia e resultados obtidos durante a POC1.
- Extensão dos métodos de sondagem para atuar em IPv6.
- Execução dos algoritmos em larga escala, aumentando o número de prefixos sondados.
- Análise aprofundada dos resultados obtidos, comparando ambas as abordagens em termos de cobertura, diversidade e esforço computacional.
- Escrita do relatório final sobre todo o trabalho executado.

O restante deste relatório está organizado de modo que: a Seção II apresenta o referencial teórico e os trabalhos relacionados; a Seção III descreve a metodologia empregada nas duas abordagens e suas adaptações; a Seção IV discute os resultados experimentais obtidos; e, por fim, a Seção V apresenta as conclusões do trabalho.

II. Referencial Teórico

A crescente expansão e complexidade da Internet tornaram a descoberta e o mapeamento de sua topologia uma tarefa desafiadora e fundamental. Mapas precisos da infraestrutura de rede são importantes para aplicações [13], [14] como otimização de desempenho, planejamento de capacidade e detecção de falhas até a análise de ameaças à segurança cibernética. Sabendo da dificuldade de realizar uma sondagem exaustiva de todos os endereços IPv4 disponíveis as pesquisas na área têm focado em desenvolver estratégias que equilibrem a maximização da descoberta de informações com a redução de custos.

Projetos como o Ark [4] adotaram uma metodologia de sondagem simples e constante, visando um único alvo por prefixo de rede /24, tentando evitar muitas medições com prefixos redundantes. Embora essa abordagem tenha se tornado uma *baseline* importante e seja bem estudada na literatura como uma abordagem clássica, ela pode falhar em capturar a diversidade interna das redes e se mostra menos eficiente diante da complexidade atual da Internet. Esse cenário mostra o dilema da área que é o compromisso entre precisão e custo. As estratégias que reduzem o número de medições podem resultar em baixa cobertura, enquanto a busca por alcance total implica altos custos computacionais.

Para evitar esse problema, muitas abordagens foram propostas, como é o caso do método Rocketfuel [1] que introduziu o uso de tabelas de roteamento BGP para guiar a seleção de alvos. Ao aplicar heurísticas para podar rotas redundantes e focar em caminhos de interesse, essa técnica conseguiu reduzir em até três ordens de magnitude o número de sondagens em comparação com os métodos de força bruta. Seguindo uma lógica similar de eficiência, o algoritmo Doubletree [2] explorou a estrutura em árvore das rotas para evitar sondar caminhos já conhecidos (próximos à fonte ou ao destino), conseguindo diminuir cerca de 70% da carga de medições.

A limitação das estratégias estáticas motivou novos caminhos, mudando o foco do problema para "como medir de forma mais inteligente". Ferramentas como o Yarrp [6] revolucionaram a área ao introduzir uma arquitetura de sondagem *stateless*. Por não manter o registro de estado de cada medição (codificando informações nos próprios pacotes), o Yarrp permite reconstruir a topologia com uma velocidade muito superior aos métodos tradicionais *stateful* utilizando análises de pacotes TTL (time-to-live) para esse fim.

Seguindo a mesma lógica, [5] propõem o *Subnet-Centric Probing*, que utiliza o *Least Common Prefix* para particionar redes em subestruturas menores e focar a sondagem nas regiões mais promissoras (regiões que apresentam ASes que não foram vistos anteriormente). Ao refinar a seleção de alvos dentro de um mesmo prefixo, o método busca superar a falta de diversidade da abordagem /24 além de melhorar os custos de uma sondagem exaustiva. Portanto, este trabalho busca reproduzir e comparar essa técnica com o *baseline* clássico da metodologia /24, avaliando o impacto na cobertura topológica e no custo das medições, a fim de quantificar os benefícios práticos das estratégias adaptativas no cenário atual da Internet.

No caso do IPv6, a complexidade nesse cenário se altera, pois em IPv4 podemos até trabalhar com estratégias exaustivas, visto que temos 2^{32} endereços, mas em IPv6 temos 2^{128} possibilidades (8 blocos de 16 bits cada), o que torna praticamente impossível realizar uma sondagem de força bruta. Além da massiva quantidade de endereços, os blocos alocados às empresas/organizações não são completamente utilizados, resultando em alocações pouco aproveitadas e com baixa densidade de dispositivos. Para contornar essa esparsidade, pesquisas recentes substituíram varreduras simples pelo uso

de *Hitlists*, que são catálogos de endereços ativos coletados a partir de diferentes medições [18]. Com isso, as sondagens ficam mais direcionadas a prefixos previamente verificados e evitam esforços com endereços que ainda não foram alocados. Diante disso as estratégias adaptativas se mostram muito importantes já que abordagens exaustivas são inviáveis em IPv6, com este trabalho buscando também investigar como métodos hierárquicos se comportam nesse ambiente, avaliando seu impacto na eficiência das medições e na descoberta de diversidade topológica.

III. Metodologia

Esta seção descreve as etapas metodológicas adotadas ao longo do projeto, cobrindo tanto a abordagem clássica quanto a hierárquica adaptativa para IPv4 e IPv6. Na primeira etapa do trabalho (POC1), foram implementados ambos os métodos e coletados resultados iniciais em IPv4. Nessa segunda etapa (POC2), a metodologia foi revisada, corrigida e estendida para maior escala e para o protocolo IPv6, cujo espaço de endereçamento esparso (2^{128} endereços) impõe desafios específicos na seleção de alvos.

A. Coleta e Conversão dos Dados BGP

O primeiro passo consiste na obtenção de dados de roteamento reais, extraídos de coletores públicos BGP. Foram utilizados arquivos contendo RIBs (Routing Information Bases), que representam o estado da tabela global de rotas em um dado instante disponíveis na plataforma RouteViews. Esses arquivos foram convertidos para uma representação tabular contendo, para cada rota observada, alguns atributos relevantes, como o prefixo anunciado, o caminho AS associado, o AS vizinho que propagou a rota, entre outras informações relevantes. Essa conversão facilita a leitura e obtenção dos campos nos arquivos, que serão usados como base para as sondagens. Desse modo, essa etapa foi feita tanto para IPv4 quanto para IPv6 agora na POC2, garantindo o mesmo padrão de entrada para ambos os protocolos.

B. Esparsidade do IPv6 e a Utilização de Hitlists

Diferentemente do IPv4, a expansão exaustiva de prefixos não é viável no protocolo IPv6. O espaço de endereçamento com 2^{128} possibilidades é enorme e extremamente esparso, já que a alocação de prefixos é muito baixa. Se um prefixo IPv6 fosse subdividido e sondado de forma exaustiva, a grande maioria dos pacotes seria enviada para endereços inativos, resultando em perdas e atrasos nas medições (*timeouts*) [18].

Foi então necessário utilizar uma *hitlist* pública de endereços IPv6 responsivos, obtida do IPv6 Hitlist Service [19][1]. Essa base de dados contém endereços que responderam a sondagens recentes, garantindo que o explorador foque em alvos reais e válidos. Como pré-processamento, foram removidos da *hitlist* os IPs pertencentes a prefixos *aliased* (prefixos nos quais qualquer endereço responde de forma idêntica independentemente do IP sondado), pois nesses casos a resposta não carrega informação topológica útil para descoberta de rotas dentro do AS [18]. Desse modo, o uso da *hitlist* permite que o espaço seja explorado sem desperdiçar sondagens em regiões não alocadas.

[1]Disponível em https://ipv6hitlist.github.io/.

C. Abordagem Clássica

Como visto em [4], a abordagem de verificação de redes /24 no protocolo IPv4 [16] é bastante aceita e estudada na área de redes. Essa prática diz respeito a medições da Internet com base na divisão dos endereços IP de blocos /24, ou seja, redes compostas por 256 dispositivos (32 bits do IPv4 $- 24 = 8$ bits $\Rightarrow 2^8 = 256$). Tal ideia é uma métrica clássica para análises em redes, visto a simplicidade dessa versão do protocolo e a ampla utilização ao redor do mundo. Dessa forma, ao fazer a leitura dos arquivos de rotas, todas as sub-redes maiores que blocos /24 (como /23, /20, /18...) foram subdivididas em seus subprefixos /24, enquanto prefixos que já eram /24 foram mantidos, e menores foram ignorados. Para cada rede resultante, foi selecionado um endereço IPv4 válido que a representasse, no caso, o primeiro endereço da rede. Essa etapa garante a medição em cada sub-rede sendo feita de maneira uniforme, permitindo uma base para comparação com a abordagem adaptativa.

Em contraste com o IPv4, onde o bloco base adotado é o /24, no IPv6 o tamanho base de exploração adotado pelo método clássico foi o /48, que é o bloco tipicamente alocado pelos provedores a clientes finais. Assim, o processo de divisão exaustiva feito no IPv4 se mantém, em que cada prefixo anunciado na tabela BGP é dividido em suas sub-redes /48, porém agora um representante de cada uma dessas sub-redes /48 é buscado exclusivamente na *hitlist* para ser sondado. Quando o representante principal falha, endereços alternativos do mesmo /48, se presentes na hitlist, são tentados. Prefixos /48 inteiros que não possuam nenhum representante na hitlist são ignorados.

D. Abordagem Hierárquica

Já a estratégia guiada por BGP parte de prefixos agregados (ex.: /16) e, de forma recursiva, mede sub-redes mais específicas (ex.: /18) para identificar as promissoras. Seguindo [5], chamamos de promissoras as sub-redes que introduzem diversidade topológica em relação ao prefixo pai, por exemplo, apresentando novos ASes em suas rotas. Um Sistema Autônomo (AS) é um conjunto de redes/prefixos sob a mesma administração, identificado por um número (ASN) e por uma política de roteamento comum.

Essa verificação de ASes (granularidade mais grossa) foi adotada no trabalho como critério de diversidade por ser mais "previsível" no sentido de estabilidade e reprodutibilidade, dado o problema comentado no artigo referenciado além de outros trabalhos anteriores [7] sobre a dificuldade de verificações em granularidades mais finas (como IPs). Isso se explica pela grande presença de balanceadores de carga que contribuem para medições não estáticas na rede.

Sobre o funcionamento do algoritmo, no método hierárquico as redes foram definidas como promissoras quando suas sondagens revelam ASes que ainda não foram observados no prefixo

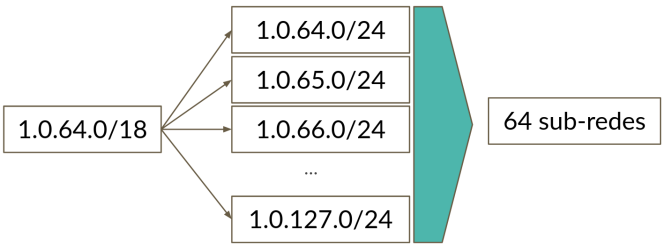

Fig. 1. Esquema de divisão de rede IPv4 /18 em suas sub-redes /24.

pai ou que apresentam caminhos distintos, sendo considerado o seguinte funcionamento neste projeto:

- Dado um prefixo /X, ele é dividido em sub-redes /(X+2) e um representante de cada sub-rede é sondado junto ao prefixo pai.
- Sub-redes com caminho de ASes distinto do pai são marcadas como promissoras e exploradas recursivamente; as demais são podadas por redundância.
- O processo repete até atingir a granularidade mínima (/28) ou até que não haja diversidade restante.

Esse método concentra sondagens apenas onde há indício de variação topológica, reduzindo significativamente o custo total em comparação à abordagem clássica. Vale comentar que a divisão ocorre no formato de redes /X gerando sub-redes /X+2, com esse critério de divisão sendo escolhido por experimentação. A seleção dos representantes escolhidos segue o mesmo formato utilizado no método clássico, com o primeiro endereço da rede sendo sondado por ser uma estratégia simples e eficiente.

Apenas para exemplificar uma dessas situações, a Fig. 1 mostra uma rede /18 em IPv4 que poderia ser dividida em 64 sub-redes /24. Nos experimentos, a rede `1.0.64.0/18` foi classificada pelo método hierárquico como redundante porque os representantes sondados não revelaram novos ASes em relação ao prefixo pai. Com isso, o algoritmo evitou sondar exaustivamente todos os seus /24 filhos, ao contrário do método clássico, que mede cada /24 individualmente. O ganho entre as abordagens está na redução de sondagens quando os filhos parecem repetir a mesma informação topológica já observada. A limitação é que essa decisão depende da representatividade dos poucos alvos sondados, em que se algum /24 não visitado tiver uma rota diferente, essa diversidade pode ser perdida pelo método hierárquico.

1) Adaptação do método hierárquico para IPv6: A mesma abordagem hierárquica foi inicialmente aplicada ao IPv6, seguindo o mesmo critério de diversidade de ASes para decidir quais sub-redes seriam exploradas. Entretanto, a aplicação direta dessa estratégia apresentou limitações práticas, discutidas na Seção de Resultados, indicando que a estratégia não se adaptava bem ao espaço de endereçamento IPv6. O problema central é que o universo de endereços é maior e muito esparso, por isso, mesmo que a *hitlist* contenha representantes para alguns /48 dentro dos prefixos BGP, esses endereços são distribuídos de forma muito esparsa no espaço IPv6. Assim, ao tentar navegar pela árvore, muitos subprefixos candidatos não continham nenhum endereço responsivo conhecido, enquanto os poucos /48 ativos ficavam concentrados em ramos específicos. Com isso, a versão original frequentemente gastava esforço explorando regiões sem representantes úteis antes de alcançar os /48 efetivamente sondáveis pelo método clássico.

Então a estratégia hierárquica para IPv6 foi adaptada para, em vez de explorar a árvore de prefixos de forma ampla em busca de diversidade e explorando cada filho promissor, agora é utilizada uma fila de prioridade seguindo uma lógica de exploração do caminho mais promissor. Cada sub-rede candidata recebe uma pontuação de diversidade, calculada com base na quantidade de novos Sistemas Autônomos que ela revelou em relação ao seu prefixo pai. O algoritmo sempre seleciona a sub-rede mais promissora da fila, isto é, aquela que apresentou maior diversidade de ASes nas sondagens anteriores. Sub-redes que não acrescentam novos ASes em relação ao prefixo pai, ou que não possuem representantes responsivos na *hitlist*, deixam de ser priorizadas na exploração.

Além do critério de diversidade, essa estratégia em profundidade também possui um controle do número de sondagens realizadas nos ramos, fazendo com que a exploração de um dado prefixo BGP se encerre imediatamente quando o número máximo permitido de sondagens é atingido, quando nenhum AS novo é encontrado após um limite de tentativas consecutivas, ou quando a granularidade mínima configurada é alcançada. Assim o esforço de sondagem fica concentrado nos trechos de maior diversidade observada, impedindo que o algoritmo fique mapeando exaustivamente prefixos BGP com muitos alvos na *hitlist* em IPv6.

Dessa forma, o funcionamento da versão adaptada para IPv6 pode ser descrito como:

- Dado um prefixo BGP de entrada, o algoritmo consulta a *hitlist* e seleciona endereços responsivos pertencentes aos /48 contidos nesse prefixo, respeitando o limite de até 450 alvos por prefixo BGP nos experimentos finais. Esses alvos não são distribuídos uniformemente, eles aparecem apenas nos /48 que possuem endereços previamente responsivos na *hitlist*.
- Cada IP selecionado é sondado e o caminho obtido é convertido para uma sequência de Sistemas Autônomos. A partir disso, o algoritmo verifica se a sondagem revelou novos ASes, um novo AS final observado, ou se conseguiu alcançar o AS de destino BGP.
- Em seguida, o algoritmo procura subprefixos mais específicos dentro do prefixo original e só considera aqueles que possuem algum representante disponível na *hitlist*. Quando um subprefixo não possui IP responsivo conhecido, ele é ignorado naquele momento da exploração.
- Os subprefixos que revelam nova informação topológica são colocados em uma lista ordenada de candidatos. O algoritmo então continua a exploração a partir dos candidatos mais promissores, isto é, aqueles que encontraram mais diversidade de ASes.
- A exploração de um prefixo termina quando o orçamento máximo de sondagens é atingido, quando várias tentativas

consecutivas não revelam novos ASes, quando não há mais representantes disponíveis na *hitlist*, ou quando o limite máximo de profundidade configurado é alcançado (/50).

E. Execução das Sondagens com Scamper

As medições da topologia foram realizadas utilizando traceroutes ativos executados pela ferramenta Scamper [12]. Para cada alvo selecionado, foram realizadas sondagens para registrar o caminho percorrido pelos pacotes na rede. Os resultados das sondagens são armazenados de maneira estruturada, de modo a permitir posterior extração dos Sistemas Autônomos envolvidos, bem como análise dos caminhos de roteamento alcançados por cada método.

Os experimentos foram executados sobre prefixos anunciados no dia 25 de setembro de 2025, às 22 horas no Reino Unido, em uma máquina Debian com processador Intel i5 de 11ª geração e 16 GB de RAM. Nos experimentos IPv4, as execuções finais utilizaram 55 processos paralelos de medição, três tentativas por salto, interrupção após seis saltos consecutivos sem resposta e espera de dois segundos entre chamadas. O tempo máximo por medição ficou em 65 segundos. No método hierárquico IPv4, a exploração foi limitada até /28 e com divisão dos prefixos em passos de dois bits (um prefixo /X era expandido para sub-redes /X+2). Vale comentar que muitas dessas escolhas foram empíricas baseada nos testes realizados e na infraestrutura disponível.

Nos experimentos IPv6, os parâmetros foram ajustados para lidar com a esparsidade do espaço de endereçamento e com a dependência da *hitlist*. As execuções finais utilizaram 55 processos paralelos, três tentativas por salto, interrupção após seis saltos sem resposta e espera operacional de dois segundos entre chamadas. O tempo máximo por medição foi de 60 segundos. Na versão hierárquica adaptada, cada prefixo BGP teve no máximo 450 alvos responsivos considerados a partir da *hitlist*, evitando que prefixos BGP com muitos endereços na *hitlist* mas com pouca diversidade dominassem o orçamento das sondagens. A busca manteve até seis filhos com diversidade topológica por etapa e usou cinco representantes de sondagem por prefixo. A exploração ampla em árvore (como em IPv4) foi limitada até redes /44 e a exploração em caminho único pôde avançar até /50, sempre respeitando o orçamento máximo de sondagens e a disponibilidade de representantes responsivos. Novamente, esses valores foram escolhidos através de experimentação ao longo das sondagens realizadas.

F. Mapeamento IP → ASN

Para analisar os traceroutes considerando a topologia inter-AS, foi necessário mapear cada endereço IP observado para o seu respectivo Sistema Autônomo. Para isso, foi utilizado uma tabela BGP consistente com o período das medições, permitindo associar cada hop retornado a um ASN. Durante esse processo, algumas limitações surgiram, como endereços privados e IPs não anunciados globalmente que foram marcados como nulos. Ainda assim, o mapeamento resultante fornece informação suficiente para comparar caminhos, identificar diversidade e aplicar os critérios hierárquicos. Essa etapa foi feita utilizando a ferramenta Pyasn [9] que permite esse mapeamento.

G. Avaliação e Auditoria

Ambos os métodos foram comparados quanto a métricas de interesse para avaliar o compromisso entre custo e cobertura topológica:

- Número total de sondagens executadas e tempo de execução;
- Quantidade de prefixos efetivamente alcançados;
- Diversidade de Sistemas Autônomos observados, tanto em qualquer hop do traceroute quanto no salto final (AS final observado);
- Cobertura de prefixos medidos por cada abordagem.

A partir dessas métricas é possível avaliar a relação de custo e benefício de cada abordagem, evidenciando o impacto da estratégia hierárquica frente ao método clássico em IPv4 e IPv6.

Para isolar o efeito de erros de medição da comparação principal, foi aplicado um filtro sobre os resultados: consideraram-se apenas os prefixos BGP em que ambos os métodos produziram ao menos um traceroute com chegada ao AS de Destino BGP. Prefixos excluídos por timeout ou bloqueio ICMP não são contabilizados como perda de cobertura de nenhum dos métodos. Os resultados com e sem esse filtro são apresentados na seção seguinte.

Para verificar se as podas realizadas pelo método hierárquico foram coerentes com a metodologia, foi desenvolvido um processo de auditoria . Ele identifica os prefixos presentes no clássico mas ausentes no hierárquico e verifica se cada ausência corresponde a uma sub-rede descartada intencionalmente durante a execução (seja por redundância, timeout do bloco pai, ou ausência de representante responsivo na hitlist no caso do IPv6). O comportamento esperado é que a grande maioria das ausências seja justificável, confirmando que a redução de sondagens foi motivada pelo critério de poda e não por perdas acidentais de cobertura.

Além da auditoria de justificativa das podas, foi realizada uma segunda análise voltada a caracterizar o impacto das sub-redes omitidas pelo método hierárquico. Nessa etapa, os prefixos presentes no método clássico e ausentes no hierárquico foram comparados dentro de seus respectivos blocos BGP pai, verificando se a exploração exaustiva do método clássico revelou ASes finais observados que não apareceram nas sub-redes efetivamente sondadas pelo hierárquico. Essa caracterização permite avaliar a diversidade topológica que deixou de ser observada em consequência da redução de sondagens, o que complementa a verificação anterior para saber se a metodologia de poda foi seguida corretamente.

Essa etapa incorpora a análise em granularidade de prefixo para avaliar onde a poda ocorre. Em vez de observar apenas métricas globais de ASes, os /24 em IPv4 e /48 em IPv6 omitidos pelo método hierárquico são agrupados pelo prefixo BGP pai mais específico disponível na entrada. É possível então

verificar se a perda causada pela poda aparece como poucos subprefixos isolados, como muitos subprefixos redundantes, ou como diversidade espalhada dentro de blocos específicos. Essa análise também permite identificar *outliers*, que são prefixos BGP amplos nos quais a decisão de parada do hierárquico deixou de observar ASes finais adicionais que apareceram no método clássico.

As omissões foram classificadas em três categorias:

- **Omissão Justificada (Redundância)**: quando a sub-rede omitida não revela, no método clássico, nenhum AS final observado adicional em relação ao que já foi medido pelo método hierárquico dentro do mesmo prefixo BGP pai.
- **Omissão com Perda de Diversidade (AS final novo)**: quando a sub-rede omitida revela, no método clássico, um AS final observado que não apareceu nas sub-redes efetivamente exploradas pelo método hierárquico naquele mesmo prefixo BGP pai.
- **Sem informação**: quando o método clássico não produz evidência suficiente para classificar a sub-rede omitida, isto é, quando não foi possível observar um AS final utilizável na comparação.

IV. Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos durante todo o trabalho (POC1 e POC2). No início do projeto, a tarefa era implementar os algoritmos de ambas as abordagens, sendo esperado encontrar diferentes compromissos, com o método clássico mais simples e direto, porém com maior desperdício de sondagens, enquanto o método hierárquico é mais elaborado e entrega maior eficiência nas medições. Esse comportamento já foi observado na POC1 e foi estendido para IPv6 na POC2, conforme será demonstrado a seguir.

A. Resultados em IPv4

Na primeira etapa deste projeto (POC1), os experimentos em IPv4 já indicavam que a abordagem hierárquica poderia reduzir substancialmente o custo de medição em relação ao método clássico baseado em uma sondagem por sub-rede /24. Na POC2, essa análise foi retomada com uma implementação revisada do algoritmo hierárquico, incluindo correções no critério de diversidade e na interpretação de medições incompletas, além de novas execuções em maior escala. O objetivo passou a ser não apenas confirmar a economia de sondagens, mas verificar em que medida essa economia ainda preserva cobertura topológica útil em nível de Sistemas Autônomos.

Os resultados consolidados confirmam esse comportamento com o método hierárquico reduzindo o número de *probes* em 94,3% no experimento 50k e em 95,3% no experimento 100k. Em tempo de execução, a redução foi de 94,2% no 50k e de 79,6% no 100k. Mesmo com essa redução agressiva de custo, a cobertura bruta de ASes observados em qualquer hop permaneceu relevante: 98 dos 135 ASes do clássico no 50k (72,6%) e 468 dos 624 ASes do clássico no 100k (75,0%). No experimento 200k o método hierárquico encontrou 1.081 dos 1.216 ASes observados pelo clássico, cerca de 88,9%, utilizando apenas 299.658 *probes* contra 8.100.894 do método

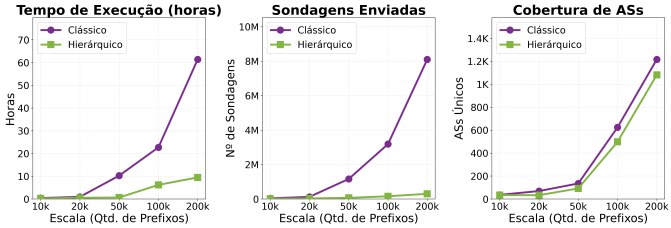

Fig. 2. Comparação de métricas (Tempo, Sondagens e ASes Únicos) entre os métodos Clássico e Hierárquico para IPv4.

TABLE I
Número absoluto de Sistemas Autônomos Descobertos (IPv4)

Método	10k	30k	50k	100k	200k
Clássico	36	84	135	624	1.216
Hierárquico	34	76	98	468	1.081

clássico. A Figura 2 resume essa tendência ao longo das escalas avaliadas, em que à medida que o espaço de busca aumenta, é possível perceber a diferença entre o crescimento do custo do método clássico e o crescimento mais controlado da abordagem hierárquica, pois enquanto o método clássico visita exaustivamente todas as sub-redes /24 alcançadas a partir dos prefixos anunciados, o método hierárquico concentra as sondagens nos ramos com diversidade de ASes e interrompe a exploração quando os caminhos observados deixam de acrescentar informação topológica relevante.

Quando se considera apenas o número absoluto de ASes encontrados, conforme mostrado na Tabela I, o método clássico de fato observa mais Sistemas Autônomos, porém, a análise detalhada mostrou que parte dessa vantagem do clássico está ligada a medições incompletas com *traceroutes* interrompidos no trânsito por *timeouts*, bloqueio ICMP ou limitação operacional antes de alcançar o AS de Destino BGP pretendido. Por esse motivo, além da comparação bruta, foi aplicada uma comparação filtrada, considerando apenas os prefixos BGP em que ambos os métodos produziram ao menos um *traceroute* com chegada ao AS de Destino BGP. Esse filtro remove da comparação os casos em que a medição falhou por motivos operacionais e permite avaliar de forma mais justa a capacidade dos métodos de preservarem a topologia observável ao alcançarem o AS final.

Ao aplicar esse filtro, a diferença entre os métodos diminui substancialmente. No experimento 50k, a cobertura de ASes do hierárquico sobe para 90,4% dos ASes válidos observados pelo clássico. Já no experimento 100k, esse valor sobe para 91,9% e em 200k o ganho é ainda maior. Nos resultados brutos o método hierárquico mede muito menos mas também observa menos ASes totais, porém no resultado filtrado, ele preserva a maior parte da diversidade de ASes efetivamente alcançada pelo clássico, mas com uma fração muito menor do custo, o que evidencia os ganhos da abordagem. A Figura 3 ilustra esse comportamento.

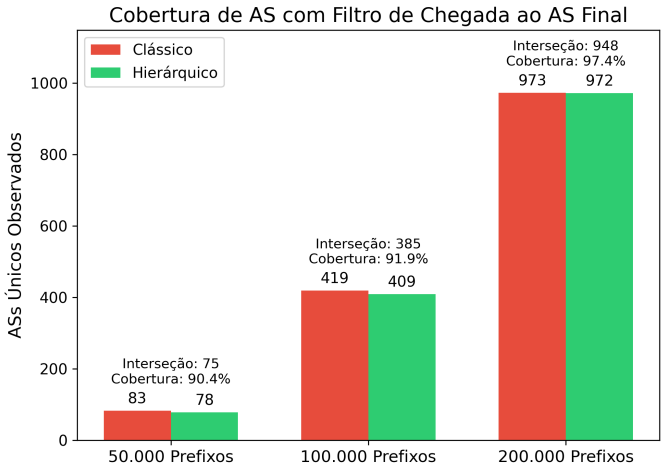

Fig. 3. Comparação da cobertura de ASes após filtrar apenas prefixos em que ambos os métodos alcançaram o AS de Destino BGP em IPv4.

TABLE II
JUSTIFICATIVAS DE AUDITORIA DAS PODAS EM IPV4

Auditoria de /24	**10k**	**30k**	**50k**	**100k**	**200k**
Total de /24 Clássico	**1.283**	**7.810**	**43.073**	**107.474**	**280.564**
/24 Visitados (Hierárquico)	**439**	**2.822**	**2.364**	**4.779**	**8.673**
/24 ausentes (bruto)	**844**	**4.988**	**40.709**	**102.695**	**271.891**
Redundância / Diversidade Registrada	844	4.585	37.484	49.141	215.900
Evidência Insuficiente	0	292	2.684	46.864	44.976
Sem Justificativa Registrada	0	111	541	6.690	11.015

Sobre o processo de auditoria de prefixos, isso permitiu verificar se as redes ignoradas pelo método hierárquico possuem justificativas operacionais registradas durante a execução. A Tabela II resume esse diagnóstico para os cenários de 10.000 a 200.000 prefixos. A primeira categoria agrupa omissões associadas a redundância topológica ou a decisões registradas de diversidade já tratada pelo algoritmo. As demais linhas separam casos em que a execução parou por evidência insuficiente e casos sem justificativa conclusiva nos registros. Como é possível perceber, o volume de sub-redes /24 omitidas cresce fortemente com a escala, chegando a 271.891 no teste de 200k, mas a tabela mostra que boa parte dessas ausências possuem registro operacional associado, como cerca de 79% das podas sendo feitas por critérios de redundância. Do restante, 16% das podas foram por falta de evidência durante a execução (ex: prefixos que não responderam), com o restante, uma pequena fração de 11 mil prefixos representando podas sem justificativa registrada. Vemos que o experimento com 200 mil entradas teve o método clássico gastando mais de 60 horas de execução e mais de 8,1 milhões de *probes*, enquanto o hierárquico concluiu a medição em cerca de 9 horas com 299.658 *probes* e ainda mantendo a justificativa teórica preservada durante as podas.

Também é possível analisar ambos os algoritmos em relação à cobertura de prefixos, em que como esperado, o método clássico alcança maior cobertura pois varre exaustivamente todos os blocos /24, ao contrário do método hierárquico que busca realizar podas que acabam diminuindo a cobertura por prefixo. Para a análise ficar mais aprofundada nesse cenário, é interessante entender a relação de sondagens em maior profundidade, como redes /25 ou /26 que podem ser sondadas pelo método hierárquico caso diversidade seja encontrada durante as medições. Desse modo, a Tabela III exemplifica esse ganho nos maiores testes realizados, sendo um ganho de informação relevante caso a aplicação de interesse necessite da descoberta de prefixos mais específicos. Nesse tipo de problema, o método é ainda mais relevante pois as sondagens podem ser ainda mais aprofundadas em prefixos específicos, visto que a abordagem hierárquica consegue economizar muitas medições ao longo do seu funcionamento.

TABLE III
APROFUNDAMENTO DO MÉTODO HIERÁRQUICO EM PREFIXOS MAIS ESPECÍFICOS QUE /24 EM IPV4

Escala	**/25**	**/26**	**/27**	**/28**	**Total** $> /24$
50.000	342	33	24	6	405
100.000	720	312	351	554	1.937
200.000	1.155	636	210	895	2.896

Para complementar a auditoria e entender o impacto real das podas realizadas pelo método hierárquico, foi feita uma caracterização dos prefixos BGP pai onde o algoritmo optou por interromper a sondagem prematuramente. O objetivo dessa análise é verificar se as sub-redes /24 ignoradas pelo método hierárquico continham algum AS final observado diferente dentro desse mesmo prefixo BGP pai e que foi medido pelo método clássico. Com isso a ideia é identificar se um prefixo pai podado pelo método hierárquico ainda continha, em seus /24 filhos, ASes finais observados adicionais que seriam revelados pela exploração exaustiva do método clássico, caracterizando uma perda associada ao critério de decisão do algoritmo. A análise mede então a perda de diversidade de AS final observado causada pela poda do hierárquico, e não apenas se a execução foi metodologicamente coerente conforme mostrado na Tabela II.

A Tabela IV detalha a distribuição das sub-redes /24 omitidas em todos os experimentos IPv4, seguindo a classificação metodológica descrita na Seção III-G. Esses dados mostram que uma parcela relevante das sub-redes omitidas prematuramente não trazia novidade de AS final observado sob esse critério, mas também indicam que a perda não é desprezível em todas as escalas. Nos experimentos em menor escala, a maior parte das podas foi coerente com a economia de sondagens e trouxe pouca penalização em ASes observados. No experimento de 100k, 56,5% dos /24 omitidos eram redundantes, enquanto 32,9% revelavam um AS final observado novo não medido pelo hierárquico, com a tendência se repetindo para 200k que também apresentou valores menores de omissão justificada.

Vale ressaltar que o total de sub-redes omitidas considerado nesta caracterização pode ser menor que o volume bruto

TABLE IV
CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS PODAS (NÍVEL DE /24) NOS EXPERIMENTOS IPV4

Categoria da Poda (/24)	10k	30k	50k	100k	200k
Omissão Justificada (Redundante)	91,3%	76,0%	46,0%	56,5%	46,5%
Omissão com Perda de Diversidade (AS novo)	3,5%	21,6%	42,7%	32,9%	33,2%
Sem informação (Inconclusivo)	5,2%	2,4%	11,2%	10,5%	20,3%
Total de /24 omitidos caracterizados	**424**	**4.988**	**40.709**	**102.695**	**271.891**

reportado na auditoria anterior. Isso ocorre porque a auditoria considera o conjunto bruto de sub-redes /24 presentes no método clássico e ausentes no método hierárquico, enquanto a caracterização exige que cada omissão possa ser associada a um prefixo BGP pai presente na tabela de roteamento de referência e que exista informação suficiente para comparar o AS final observado. Assim, sub-redes omitidas que não puderam ser associadas de forma confiável ao bloco BGP pai, ou que não forneceram evidência utilizável na comparação, são filtradas antes da análise. Dessa forma, a Tabela IV mede o subconjunto de omissões caracterizáveis, e não necessariamente todo o volume bruto de /24 ausentes reportado na auditoria.

Contudo, analisar apenas o percentual de /24s afetadas pode passar uma impressão exagerada sobre a gravidade dessa perda, sendo avaliado aqui também quantos ASes distintos deixaram de ser vistos por prefixo BGP pai e no agregado global. A Figura 4 ilustra essa distribuição no experimento de 100k, com as barras azuis indicando quantos prefixos BGP pai, definidos pelo prefixo mais específico disponível na entrada, perderam 1, 2, 3 a 5 ou 11+ ASes finais observados novos. Já as barras laranja mostram quantas sub-redes /24 omitidas estão associadas a cada uma dessas faixas de perda. A tendência observada por esse gráfico é que mesmo quando o número de /24 omitidos é grande, a diversidade adicional recuperada pelo clássico tende a ser pequena por prefixo pai e ainda demanda uma alta cobertura de prefixos sondados no método clássico. No experimento de 100k, por exemplo, 2.978 prefixos BGP pai perderam apenas 1 AS final observado novo, e outros 367 perderam 2. Em termos de sub-redes afetadas, 18.004 /24 omitidos estavam associados a perda de apenas 1 AS e 12.408 a 2 ASes, o que significa que o clássico teve que fazer um grande esforço de sondagem, para descobrir um pequeno número de ASes em sua maioria. Vale reforçar que esses números se referem a novos ASes em relação ao pai que foi podado, não necessariamente a ASes novos globalmente vistos em todo o arquivo de entrada.

Mesmo assim, alguns casos de perda mais relevante merecem ser comentados, como no experimento de 100k em que um *outlier* relevante foi o prefixo `2.176.0.0/12`. Nesse bloco, o método clássico sondou 3.274 sub-redes /24 e observou 19 ASes finais observados novos em relação ao que havia sido medido pelo hierárquico. O método hierárquico, por outro lado, explorou apenas 3 sub-redes /24 e observou dois ASes finais nesse bloco. Ainda assim, 1.346 /24 omitidos revelaram ASes finais adicionais no método clássico, enquanto 1.909 /24 omitidos foram redundantes sob esse critério e 16 ficaram

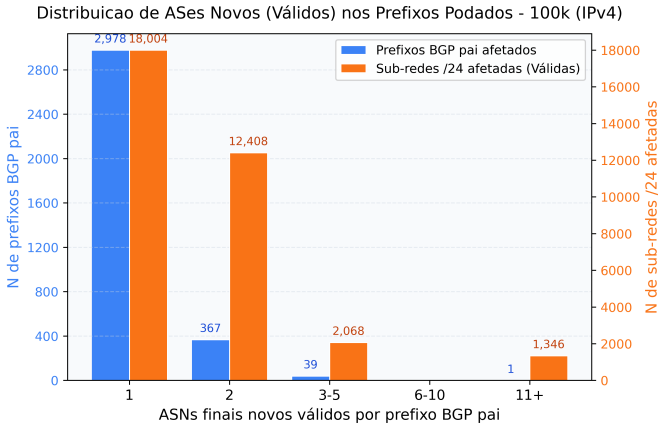

Fig. 4. Distribuição da quantidade de ASes perdidos pelo método hierárquico associados à quantidade de prefixos específicos que foram podados no experimento de 100.000 prefixos IPv4.

inconclusivos. Os *logs* desse experimento indicam que o bloco foi encerrado por redundância com uma amostra pequena: foram registradas 4 tentativas, 1 chegada ao destino, 4 rastros com saltos e apenas 1 caminho de AS válido. O método clássico, ao sondar exaustivamente as redes /24, mostrou que havia diversidade adicional de ASes finais observados nessa região. Isso sugere que, nesse caso, a poda foi baseada em evidência limitada e que a amostra inicial não representava bem a diversidade interna de um prefixo BGP muito amplo.

Esse padrão também ocorre no experimento de 200k, em que há casos semelhantes. O prefixo `3.128.0.0/10` apresenta 7.279 sub-redes /24s medidas no clássico contra apenas 2 no hierárquico, resultando em 7 ASes finais observados novos perdidos. Nesse caso, o hierárquico encontrou apenas um AS nos dois /24 sondados e interrompeu a exploração, sem perceber a diversidade distribuída pelos 7.277 blocos omitidos, dos quais 7.228 revelaram ASes novos no clássico, em uma situação muito similar ao que aconteceu no experimento de 100k discutido acima. Já o prefixo `4.0.0.0/9` representa o maior *outlier* em número absoluto, com o clássico sondando 32.467 sub-redes /24 e encontrando 9 ASes finais observados novos em 4.315 delas, enquanto o hierárquico explorou apenas 4 /24s sem registrar nenhum AS final observado. Com 28.148 sub-redes inconclusivas, o caso sugere que o bloco possuía uma taxa de resposta muito baixa, levando o algoritmo a encerrar a exploração por ausência de evidência e não por redundância observada. Nesse caso, a perda representa de forma mais clara o compromisso do método, em que diversidade foi perdida ao mesmo tempo em que milhares de sondagens foram economizadas.

O ponto comum nesses *outliers* é que todos são prefixos BGP de escopo muito amplo (de /9 a /13) nos quais o hierárquico tomou decisões a partir de uma amostra inicial muito pequena em relação à heterogeneidade interna do bloco. Em alguns casos, essa limitação aparece como baixa taxa de resposta ou ausência de AS final observado, enquanto em outros, como no prefixo `2.176.0.0/12`, aparece como uma

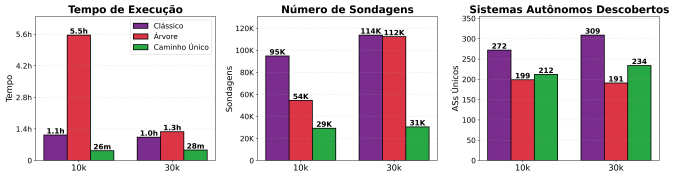

Fig. 5. Comparação de métricas (Tempo, Sondagens e ASes Únicos) entre a abordagem clássica, a abordagem hierárquica em árvore e a versão otimizada para IPv6 em entradas de 10.000 prefixos e 30.000 prefixos BGP.

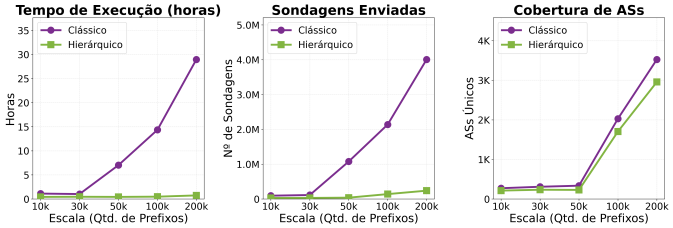

Fig. 6. Comparação de métricas (Tempo, Sondagens e ASes Únicos) entre os métodos Clássico e Hierárquico para IPv6.

decisão de redundância baseada em poucos caminhos válidos. Esses casos revelam uma limitação do algoritmo quando a amostra inicial não é representativa, com o método podendo abandonar regiões que na realidade ainda contêm diversidade adicional. Ainda assim, esses *outliers* são pontuais, e no experimento de 200k, apenas 4 prefixos BGP pai concentraram perdas na faixa de 6 a 10 ASes novos, enquanto a grande maioria das perdas (mais de 5.600 prefixos BGP pai) correspondeu a apenas 1 AS novo em relação ao pai que não foi capturado.

B. Resultados em IPv6

Conforme explicado na Metodologia, a tentativa inicial de importar diretamente a lógica de expansão em árvore do IPv4 não foi bem-sucedida. Em um enorme espaço de endereços como o do IPv6, a exploração forçava o algoritmo a buscar diversidade topológica em sub-redes vazias, que não tinham representantes na *hitlist*, sendo necessário aprofundar a exploração na árvore até buscar evidências de redundância, o que gerava excesso de processamento e muitas sondagens pouco produtivas. Dessa maneira, foi implementada uma nova versão, com a Figura 5 ilustrando o resultado dessas modificações a partir de experimentos com entradas de 10k e 30k prefixos. O gráfico compara o comportamento da versão antiga, baseada em expansão em árvore, com a versão adaptada usando uma fila de prioridades, que aprofunda a análise focando apenas nos ramos mais promissores.

Com isso, os gráficos apresentados indicam que a versão original em árvore não apresentava bons resultados e parecia não escalar bem. No experimento de 10k, a mudança para a nova abordagem reduziu o número de *probes* de 54.483 para 29.304 e o tempo de execução de 19.866 s para 1.551 s, além de elevar a cobertura de ASes de 199 para 212. Em 30k, o contraste foi ainda maior, com a versão em árvore executando 112.398 *probes*, sendo praticamente o mesmo custo do clássico, enquanto a versão modificada caiu para 30.513 e ainda aumentou a cobertura de 191 para 234 ASes. Esse resultado indica a eficácia da reformulação metodológica no método hierárquico como base necessária para a viabilidade dos testes em larga escala apresentados a seguir.

Com as alterações no método hierárquico justificadas, a Figura 6 ilustra as métricas de tempo, sondagens executadas e ASes descobertos para os experimentos em IPv6 variando de 10.000 a 200.000 prefixos da tabela BGP. É possível notar que, à medida que a escala aumenta, o custo da abordagem clássica cresce de forma acentuada, refletindo o esforço repetitivo de mapear todos os blocos /48 ativos devolvidos pela *hitlist*, em contraste com a abordagem hierárquica que mantém um crescimento controlado. Com isso, o mesmo compromisso visto em IPv4 se manteve agora em IPv6, tanto no tempo, no número de sondagens e na cobertura de ASes.

No resultado do experimento de 200.000 prefixos a estratégia clássica enviou mais de 4 milhões de *probes* e levou quase 29 horas para ser concluída. Já a abordagem hierárquica atingiu o teto de orçamento rapidamente nos ramos irrelevantes e completou o mesmo teste enviando apenas 239 mil sondagens, finalizando a execução em 44 minutos. Esse ganho representa uma redução de aproximadamente 94% no número de pacotes enviados e 97,4% no tempo total de operação, mostrando que o controle de orçamento da execução e a busca por caminho único foram eficientes no ambiente esparso de IPv6.

Assim como comentado em IPv4, o mesmo filtro das sondagens considerando a chegada no AS de Destino BGP pode ser aplicado para IPv6. A Figura 7 apresenta esse resultado. Novamente, não basta considerar apenas o resultado absoluto dos ASes encontrados, mas analisar a qualidade das medições, com o método hierárquico mantendo uma boa cobertura de ASes em relação ao clássico. Nos experimentos maiores os resultados de cobertura ficaram próximos, com a semelhança entre a quantidade de ASes encontrados, e novamente, com o método hierárquico ainda conseguindo encontrar novos Sistemas Autônomos, mesmo com apenas uma fração das sondagens. Sobre o resultado de 50.000 prefixos que apresentou uma baixa cobertura de ASes para ambos os métodos, vale destacar que isso foi motivado por características da entrada. Ao analisar as entradas de 50k e 100k, o arquivo menor continha apenas 438 ASes de origem distintos (último AS do caminho BGP), enquanto o arquivo maior possui mais de 2.000. Com isso, os resultados da sondagem também refletem as características dos dados de entrada.

Vale destacar aqui uma diferença de escala em relação ao protocolo IPv4. Ao observar os resultados da Figura 6 e da Figura 2, é possível perceber que o tempo de sondagem do método clássico em IPv4 chega a 60 horas, enquanto em IPv6 o máximo foi de 29 horas no método clássico para 200 mil entradas da tabela BGP. O mesmo vale para o número de sondagens, pois no ambiente IPv6 os valores ficaram aproximadamente na metade do que foi observado em IPv4. Mesmo ao considerar o método hierárquico, os valores

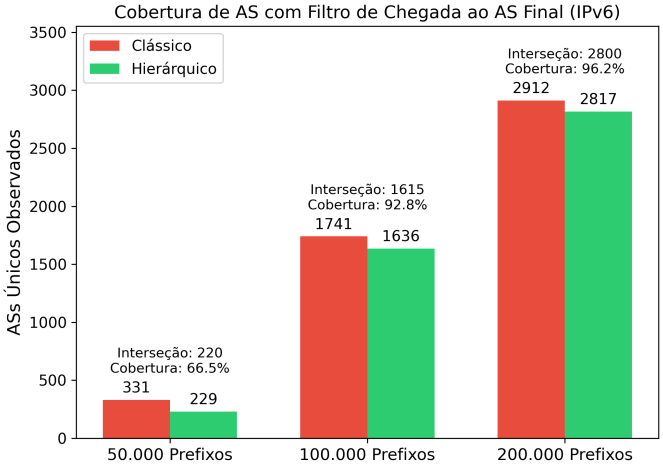

Fig. 7. Cobertura de ASes após filtrar apenas prefixos em que ambos os métodos alcançaram o AS de Destino BGP em IPv6.

absolutos de tempo e sondagens também foram menores. Tal fato se justifica tendo em vista a diferença entre os espaços de endereçamento em cada versão do protocolo. Na versão 4, temos menos endereços e mais alocações feitas; consequentemente, o ambiente é mais densamente povoado, com medições mais demoradas, pois há mais possibilidades sendo consideradas ao explorar as sub-redes. Já em IPv6, como o espaço é pouco alocado, as *hitlists* são uma ferramenta eficaz para guiar a busca apenas para prefixos responsivos. Assim, timeouts e falta de respostas tendem a ser menos comuns.

Para exemplificar essa ideia, a Tabela V apresenta uma análise comparativa da proporção de sondagens incompletas, isto é, medições que resultaram em *timeout* absoluto ou foram interrompidas por filtros na rede antes de alcançar o AS de Destino BGP. Esses percentuais ajudam a interpretar a produtividade real dos dois ambientes de medição. Em IPv4, o método clássico manteve uma taxa média de falhas próxima de 79%, o que é válido ao se pensar que o método explora de maneira exaustiva muitas sub-redes cegamente. Em IPv6, por outro lado, a adoção da *hitlist* já reduz essa média para aproximadamente 37%, mostrando que a seleção prévia de alvos muda substancialmente a qualidade das sondagens. O resultado mais interessante aparece no método hierárquico em IPv6 em que sua taxa de falhas ficou estável entre 16,8% e 19,2% em todas as escalas finais, sugerindo que a combinação entre *hitlist*, exploração guiada e controles de orçamento faz o algoritmo concentrar o esforço em regiões topologicamente mais produtivas. Assim, a tabela não indica apenas que IPv6 teve menos *timeouts*, mas também que o processo de busca se tornou operacionalmente mais eficiente, com menor desperdício de sondagens em alvos pouco informativos.

O processo de auditoria foi aplicado também aos experimentos em IPv6, verificando se os prefixos /48 ausentes no método hierárquico possuíam alguma justificativa operacional registrada durante a execução. A Tabela VI apresenta esse diagnóstico para os experimentos em IPv6. É possível observar

TABLE V
PROPORÇÃO DE SONDAGENS INCOMPLETAS (TIMEOUTS / FALHAS) POR # DE PREFIXOS DE ENTRADA BGP

# Entradas	IPv4 (Sem Hitlist)		IPv6 (Com Hitlist)	
	Clássico	Hierárquico	Clássico	Hierárquico
10.000	70,8%	63,2%	28,7%	18,1%
30.000	77,7%	83,5%	22,1%	18,2%
50.000	84,5%	88,8%	49,5%	19,2%
100.000	78,0%	68,2%	42,3%	16,8%
200.000	83,8%	63,9%	44,3%	17,0%

TABLE VI
JUSTIFICATIVAS DE AUDITORIA DAS PODAS EM IPV6

Auditoria de /48	**10k**	**30k**	**50k**	**100k**	**200k**
Total de /48 Clássico	**5.192**	**5.692**	**11.250**	**38.462**	**57.355**
/48 Visitados (Hierárquico)	**1.164**	**1.248**	**1.530**	**5.802**	**9.753**
/48 ausentes (bruto)	**4.028**	**4.444**	**9.720**	**32.660**	**47.602**
Redundância Topológica	2.472	2.732	5.833	15.341	20.767
Evidência Insuficiente (Falha no Pai)	989	1.145	2.357	12.485	16.453
Limite de Orçamento Atingido	302	25	555	1.692	2.022
Sem Justificativa Registrada	265	542	975	3.142	8.360

que uma parcela relevante das redes /48 omitidas foi associada a critérios de redundância, mas também há um volume expressivo de omissões relacionadas à falta de evidência no prefixo pai, principalmente nos testes maiores. Esse comportamento é compatível com a natureza esparsa do IPv6, em que muitos casos o algoritmo tenta explorar regiões com poucos representantes na *hitlist* ou com representantes que não produzem medições conclusivas, levando a interrupções por baixa evidência. O mesmo se aplica a categoria "Limite de Orçamento" que representa uma estratégia específica adotada em IPv6 para evitar aprofundamento excessivo em regiões pouco produtivas, indicando interrupções operacionais da exploração quando o custo de continuar sondando deixa de ser justificável. Esses números reforçam a dificuldade do mapeamento em IPv6, em que mesmo com o uso de *hitlists*, a navegação pelo espaço de endereços ainda não é totalmente confiável.

Para complementar a auditoria e entender o impacto real das decisões do algoritmo em IPv6, foi aplicada a mesma metodologia de caracterização de podas utilizada no cenário IPv4, mas adaptada para blocos base /48 com a Tabela VII detalhando a distribuição dessas omissões nas cinco escalas analisadas. Da mesma forma que no protocolo anterior, os casos foram classificados verificando se a sub-rede /48 omitida pelo método hierárquico revelou algum Sistema Autônomo final novo durante a exploração exaustiva do clássico. Quando isso acontece, a poda implica perda de diversidade e a exploração não deveria ter sido interrompida naquele ponto.

É importante destacar que a presença da *hitlist* não elimina completamente os casos inconclusivos. A *hitlist* indica que existe ao menos um endereço previamente responsivo dentro de um /48, mas isso não garante que a sondagem produza uma rota completa, nem que o último salto observado possa ser mapeado para um AS final observado utilizável. Assim,

TABLE VII
CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DAS PODAS EM NÍVEL DE /48 (IPV6)

Categoria da Poda (/48)	10k	30k	50k	100k	200k
Omissão Justificada (Redundante)	68,8%	74,8%	41,0%	58,9%	48,4%
Omissão com Perda de Diversidade (AS novo)	4,2%	8,1%	36,4%	24,6%	31,5%
Sem informação (Inconclusivo)	27,0%	17,1%	22,6%	16,6%	20,1%
Total de /48 Caracterizados	**4.028**	**4.385**	**9.406**	**23.617**	**33.647**

um /48 pode possuir representante na *hitlist* e ainda resultar em timeout parcial, salto sem mapeamento ASN ou resposta insuficiente para a comparação com o método hierárquico. Ao focar nas sub-redes /48, a perda absoluta foi considerável, com os experimentos de 50k, 100k e 200k apresentando, respectivamente, 36,4%, 24,6% e 31,5% dos /48 omitidos revelando um AS final observado adicional quando observados pelo método clássico. Isso mostra que a redução de custo obtida pelo método hierárquico não é gratuita pois parte da diversidade topológica observável é perdida ao interromper a exploração antecipadamente.

Vale ressaltar novamente, que assim como em IPv4, o total de sub-redes omitidas considerado nesta caracterização pode ser menor que o volume bruto reportado na auditoria anterior. Isso ocorre porque a análise de caracterização exige que cada sub-rede /48 omitida possa ser associada a um prefixo BGP presente na tabela de roteamento de referência. Assim, sub-redes observadas nos traceroutes, mas sem correspondência direta nessa base de controle, são filtradas antes da análise. Dessa forma, a Tabela VII não mede apenas a diferença bruta entre os conjuntos de /48, mas sim o subconjunto de omissões que pôde ser caracterizado em relação ao bloco BGP pai e à diversidade de ASes.

Por fim, foi avaliado a distribuição dos ganhos de ASes vistos no método clássico em relação aos prefixos pai mais específicos podados no método hierárquico. Mesmo nos maiores testes, a perda por prefixo pai é quase sempre pequena. No experimento de 100k, 2.084 prefixos BGP pai não perderam nenhum AS final observado, 5.495 perderam apenas um, e somente 6 perderam dois. No experimento de 200k referenciado na Figura 8, o padrão se mantém, com 4.469 prefixos BGP pai não apresentando perda de AS final observado, 10.022 perdendo apenas um, 16 perdendo dois e apenas um prefixo perdendo entre três e cinco ASes finais observados. Com isso, embora o método hierárquico possa deixar de visitar muitos /48s, a diversidade adicional perdida dentro de cada bloco costuma ser rasa. O histograma reforça essa conclusão, pois a maior parte dos prefixos afetados se concentra no caso de apenas um AS final observado novo perdido, enquanto perdas maiores praticamente não aparecem. Os testes em IPv6 não apresentaram os piores casos observados em IPv4, nos quais alguns poucos prefixos muito amplos concentraram perdas de vários ASes finais observados distintos, ainda que como outliers da distribuição.

Um exemplo específico desses testes aparece no experimento de 200k para o prefixo `2001:8e0::/32`. Nesse caso, o método clássico sondou 735 sub-redes /48, enquanto o

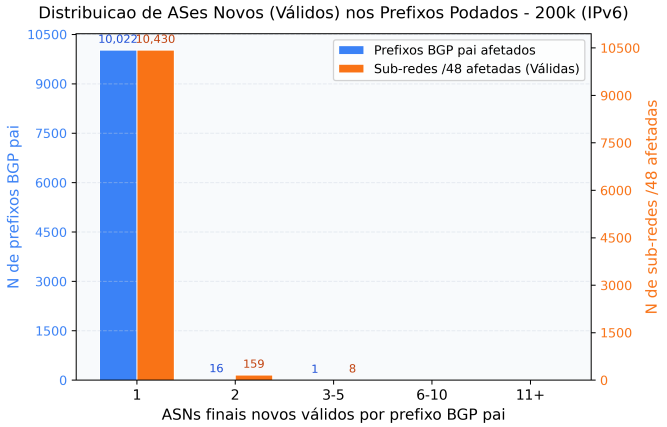

Fig. 8. Distribuição da quantidade de ASNs finais novos que seriam descobertos ao desfazer as podas no experimento de 200.000 prefixos IPv6.

método hierárquico explorou apenas 41. Das 694 sub-redes omitidas, 623 eram redundantes sob o critério de AS final observado, 71 revelavam algum AS final observado novo e nenhuma ficou inconclusiva. Apesar do número absoluto de /48s afetados, esses 71 casos correspondiam a apenas dois ASes finais observados distintos não observados pelo hierárquico mas que acabaram sendo medidos pelo clássico. Os *logs* desse experimento indicam que a exploração desse prefixo passou por vários eventos típicos do modo IPv6 com sub-redes sem representante na *hitlist*, comparações classificadas como redundantes, casos de evidência insuficiente e encerramento após múltiplas sondagens consecutivas improdutivas. Assim, a perda nesse estudo de caso não parece decorrer de uma falha isolada, mas do compromisso estrutural da heurística em IPv6, em que diante de um espaço esparso e de poucos sinais novos nos representantes explorados, o algoritmo limita a busca e evita aprofundar milhares de /48s que, na maioria dos casos, repetiriam o mesmo AS final observado.

Portanto, a conclusão para IPv6 se mantém alinhada à de IPv4, embora exija mais cuidado. O método hierárquico reduz substancialmente o custo e elimina grande quantidade de redundância, mas também introduz perda mensurável de diversidade de AS final observado. A principal evidência favorável é que essa perda raramente se concentra em muitos ASes finais observados diferentes por prefixo BGP pai, ao mesmo tempo em que se observa uma economia de sondagens superior a 90%. Ainda assim, a navegação no grande espaço de endereços demanda estratégias melhores para que as sondagens se mantenham eficientes sem degradar excessivamente a observabilidade.

V. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho mostrou a complexidade e a importância do mapeamento da topologia da Internet em larga escala. O objetivo do projeto foi alcançado, que era implementar e expandir a metodologia explorada pelo artigo base de Beverly et al. [5], avaliando o compromisso entre custo de execução e cobertura topológica na comparação de

estratégias de sondagem. Ao longo das duas etapas do projeto (POC1 e POC2), as abordagens clássica e hierárquica foram implementadas e analisadas, permitindo um comparativo de desempenho para os protocolos IPv4 e agora estendidos também para IPv6.

Os experimentos realizados reforçam a tendência da literatura com a abordagem hierárquica conseguindo preservar a maior parte da diversidade topológica útil observada pelo método clássico e mesmo assim gastando menos tempo e sondagens. Em IPv4, a economia de sondagens chegou a cerca de 95%, preservando uma boa cobertura de Sistemas Autônomos (ASes) nas medições filtradas. Em IPv6, novas mudanças foram necessárias, porém ainda assim a abordagem adaptativa com uso de uma fila de prioridades e exploração em profundidade reduziu os pacotes enviados em mais de 94% no cenário de 200.000 prefixos, mantendo ainda uma boa cobertura topológica nas sondagens conclusivas.

Já a mudança para o IPv6 mostrou dificuldades, com a sondagem em IPv6 precisando ser guiada por *hitlists* de alvos responsivos e limitada por controles de orçamento para evitar que a medição se perca em regiões que ainda não foram alocadas. A auditoria e a caracterização das podas foram muito relevantes pois indicam que boa parte das omissões possui justificativa ou redundância sob o critério de AS final observado, mas também mostram que essa economia introduz perda mensurável de diversidade, que deve ser analisada mais profundamente para entender o que está sendo ignorado. Como trabalho futuros é interessante realizar o aprofundamento da caracterização topológica das sub-redes que foram podadas, visando entender exatamente quais provedores ou regiões da Internet concentram a maior carga de redundância ou então verificar como o uso de diferentes *hitlists* impactam a sondagem em IPv6.

Os resultados também indicam outros pontos que podem ser explorados, como repetir os experimentos em diferentes janelas de tempo, avaliando como o horário e o dia da semana afetam a estabilidade das medições e das decisões de poda. Também seria válido realizar uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros do método hierárquico, como a granularidade mínima em IPv4, o passo de subdivisão dos prefixos e os limites de orçamento adotados em IPv6 para otimizar a exploração e entender os compromissos associados a isso. Por fim, uma comparação experimental mais direta com o ambiente e os critérios usados por Beverly et al. [5] permitiria medir com mais precisão em que medida a implementação desenvolvida neste trabalho reproduz ou diverge do artigo base.

Vale comentar que este trabalho utilizou ferramentas de Inteligência Artificial Generativa como apoio metodológico. Tais ferramentas auxiliaram na busca por materiais relevantes para a bibliografia, e na otimização da implementação, especificamente no desenvolvimento das rotinas de paralelização baseada em *threads* que garantiram o desempenho necessário para as medições.

REFERENCES

[1] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 12, no. 1, pp. 2–16, 2004.

[2] B. Donnet, P. Raoult, T. Friedman, and M. Crovella, "Efficient algorithms for large-scale topology discovery," *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 33, no. 1, pp. 327–338, Jun. 2005.

[3] B. Donnet, P. Raoult, T. Friedman, and M. Crovella, "Efficient algorithms for large-scale topology discovery," in *Proc. 2005 ACM SIGMETRICS Int. Conf. Meas. Model. Comput. Syst.*, New York, NY, USA, 2005, pp. 327–338.

[4] CAIDA, "Archipelago (Ark) Measurement Infrastructure," 2024. [Online]. Available: https://www.caida.org/projects/ark/

[5] R. Beverly, A. Berger, and G. G. Xie, "Primitives for active Internet topology mapping: toward high-frequency characterization," in *Proc. 10th ACM SIGCOMM Conf. Internet Meas.*, New York, NY, USA, 2010, pp. 165–171.

[6] A. King, A. Dainotti, C. Dovrolis, and K. Claffy, "Yarrp: Yet Another Rapid Probing Tool," in *Proc. 2016 Internet Meas. Conf. (IMC '16)*, 2016, pp. 535–549.

[7] B. Augustin, T. Friedman, and R. Teixeira, "Measuring Load-balanced Paths in the Internet," in *IMC*, 2007.

[8] Y. Rekhter, T. Li, and S. Hares, "RFC 4271: A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)," RFC Editor, USA, 2006.

[9] H. Asghari, "pyasn version 1.6.0b1," 2020. [Online]. Available: https://github.com/hadiasghari/pyasn

[10] The Paris Traceroute Team, "Paris traceroute." [Online]. Available: https://paris-traceroute.net/

[11] R. Almeida, I. Cunha, R. Teixeira, D. Veitch, and C. Diot, "Classification of Load Balancing in the Internet," in *IEEE INFOCOM*, 2020. [Online]. Available: https://pypi.org/project/mca-traceroute/

[12] Center for Applied Internet Data Analysis (CAIDA), "scamper." [Online]. Available: https://www.caida.org/catalog/software/scamper/

[13] J. Novlan, P. Tiwari, J. Juen, and E. Katz-Bassett, "Hubble: An Advanced Cooperative Monitoring System," in *5th USENIX Symp. Netw. Syst. Des. Implement. (NSDI '08)*, San Francisco, CA, 2008.

[14] H. V. Madhyastha, T. Isdal, M. Ponec, A. Ganjam, N. Katta, and T. Anderson, "iPlane: An Information Plane for Distributed Services," in *7th USENIX Symp. Oper. Syst. Des. Implement. (OSDI '06)*, Seattle, WA, 2006.

[15] RIPE NCC, "Routing Information Service (RIS)," 1999. [Online]. Available: https://www.ripe.net/analyse/Internet-measurements/routing-information-service-ris/

[16] V. Fuller, T. Li, K. Varadhan, and J. Yu, "Classless Inter-Domain Routing (CIDR): an Address Assignment and Aggregation Strategy," IETF, RFC 1519, Sep. 1993. [Online]. Available: https://www.rfc-editor.org/info/rfc1519

[17] X. Kou and Q. Wang, "Discovering IPv6 network topology," in *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT)*, vol. 2, Oct. 2005, pp. 1322–1325.

[18] O. Gasser, Q. Scheitle, S. Gebhard, and G. Carle, "Scanning the IPv6 Internet: Towards a Comprehensive Hitlist," *arXiv preprint arXiv:1607.05179*, 2016. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1607.05179

[19] O. Gasser, W. Lichtblau, T. Sattler, R. Beverly, and G. Carle, "A Cluster in the Eye of the Beholder: IPv6 Hitlist Services," in *Proc. Internet Meas. Conf. 2018 (IMC '18)*, 2018.

[20] R. Beverly, R. Durairajan, D. Plonka, and J. P. Rohrer, "In the IP of the Beholder: Strategies for Active IPv6 Topology Discovery," in *Proc. Internet Meas. Conf. 2018 (IMC '18)*, ACM, Oct. 2018, pp. 308–321.

[21] Z. Shen, P. Chen, Y. Xie, C. Chen, Y. Zhang, and G. Yang, "6Trace: An Effective Method for Active IPv6 Topology Discovery," *Electronics*, vol. 14, no. 2, p. 343, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/343