

ARTIGO COMPLETO/FULL PAPER

Investigando o uso de técnicas de engenharia de tráfego na Internet

Investigating the use of traffic engineering techniques on the Internet

Leonardo Mendonça • ✉ leonardo.mendonca@furg.br
Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Pedro Marcos • ✉ pbmarcos@furg.br
Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Vinícius Pinto • ✉ vinicius.pinto@furg.br
Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

RESUMO. Este estudo investiga o comportamento dos Sistemas Autônomos (ASes) na aplicação de duas das principais técnicas de engenharia de tráfego de entrada: AS-Path Prepend (ASPP) e Anúncio de Prefixo mais Específico, focando em redes IPv4. Avaliamos o uso, proporção e intensidade de ambas as técnicas ao longo de 11 anos (2014-2024), utilizando dados de roteamento do projeto RouteViews. Nossos resultados mostram que a fração de ASes que aplicam tanto ASPP quanto Anúncio de Prefixo mais Específico se manteve relativamente estável, enquanto a desagregação de prefixos mais específicos reduziu, refletindo uma menor tendência de desagregação intensa, possivelmente em resposta à escassez de endereços IPv4. Por fim, observamos que a técnica ASPP é mais popular, mas não há correlação significativa entre a proporção de uso das duas técnicas.

ABSTRACT. This study investigates the behavior of Autonomous Systems (ASes) in applying two of the main inbound traffic engineering techniques: AS-Path Prepend (ASPP) and More Specific Prefix Announcements, focusing on IPv4 networks. We evaluated the use, proportion, and intensity of both techniques over 11 years (2014-2024), using routing data from the RouteViews project. Our results show that the fraction of ASes applying both ASPP and More Specific Prefix Announcements remained relatively stable, while the disaggregation of more specific prefixes decreased, reflecting a lower tendency for intense disaggregation, possibly in response to IPv4 address scarcity. Finally, we observed that ASPP is the more popular technique, but there is no significant correlation between the proportion of use of the two techniques.

PALAVRAS-CHAVE: BGP • Interconexão • Engenharia de Tráfego • Internet • Roteamento

KEYWORDS: BGP • Interconnection • Traffic Engineering • Internet • Routing

1 Introdução

A complexidade da topologia da Internet tem aumentado expressivamente nas últimas décadas, refletindo quantidade de conexões entre Sistemas Autônomos (ASes) que a compõem. O número de novos ASes tem aumentado continuamente, contabilizando mais de 70.000 em 20 de outubro de 2024, com troca constante de informações de roteamento por meio do Protocolo BGP. À medida que a Internet se torna mais interconectada, compreender as técnicas de engenharia de tráfego é essencial para entender o comportamento dos ASes e identificar problemas em sua aplicação [1][2]. Nosso trabalho consiste em analisar os aspectos de **uso, proporção e intensidade** de duas das principais técnicas de engenharia de tráfego de **entrada: AS-Path Prepend e Anúncio de Prefixo mais Específico**, a fim de determinar qual técnica é mais utilizada e se existe correlação no modo de uso entre elas. O período de análise abrange de 15 de junho de 2014 a 15 de junho

de 2024, focando nos prefixos IPv4.

2 Fundamentação Teórica

No contexto da Internet, **Sistemas Autônomos** são redes ou conjuntos de redes que estão sob o controle de uma única entidade administrativa. A cada um deles é atribuído um identificador único, chamado Número de Sistema Autônomo (ASN). Eles se conectam através do Protocolo BGP, que auxilia na troca de informações de roteamento e na determinação do melhor caminho para que o tráfego de rede alcance seu destino. O BGP é dividido em dois tipos: o **eBGP** (External BGP), que interconecta os ASes, e o **iBGP** (Internal BGP), que gerencia rotas internas de um AS. Na Figura 1, podemos ver como o BGP opera nos ASes, gerenciando o tráfego entre redes distintas [3] [4] [5].

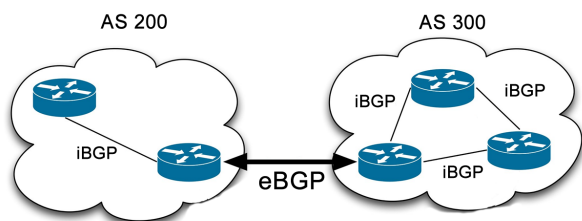


Figura 1. Protocolo BGP na interconexão de ASes

A **Engenharia de Tráfego** refere-se à prática de ajustar o encaminhamento do tráfego de rede utilizando técnicas específicas, de acordo com as necessidades do AS. Essa prática se divide em dois aspectos: **entrada** e **saída**. Uma das técnicas analisadas é o **AS-Path Prepend (ASPP)**, que, como exemplificado na Figura 2, consiste em manipular o atributo *AS-Path* em um dos anúncios BGP, com o objetivo de tornar essa rota menos atraente para o BGP, forçando o protocolo a escolher uma rota mais curta. Contudo, a aplicação dessa técnica pode apresentar desafios de segurança, como o sequestro de prefixos, que requer cautela por parte dos administradores.

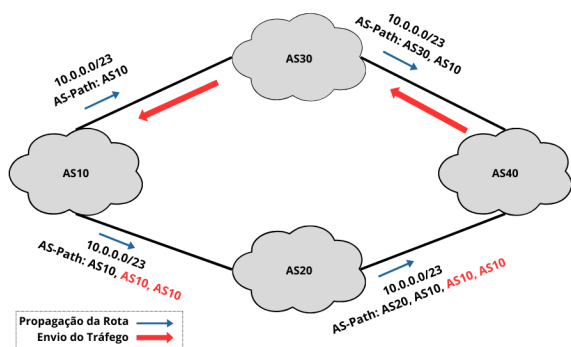


Figura 2. Aplicação da técnica AS-Path Prepend

A segunda técnica abordada em nosso trabalho é o **Anúncio de Prefixo mais Específico**. Essa técnica, como exemplificado na Figura 3, consiste em um AS anunciar prefixos desagregados em alguns de seus anúncios, a fim de direcionar o tráfego por essas rotas, uma vez que o protocolo BGP prioriza prefixos mais específicos ao definir a melhor rota.

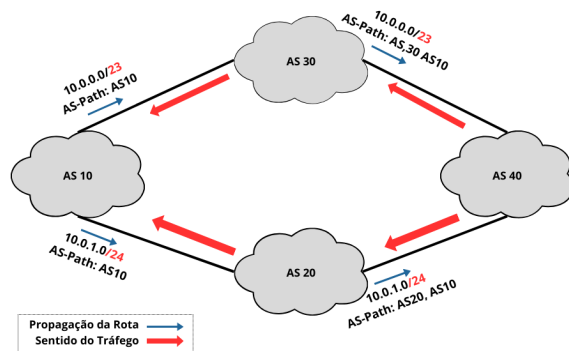


Figura 3. Aplicação da técnica Anúncio de Prefixo mais Específico

3 Trabalhos Relacionados

Em uma das pesquisas relacionadas sobre ASPP [1], foi observado que cerca de 30% dos ASes utilizam essa técnica, sendo que 25% dos prefixos IPv4 são originados com algum nível de prepending. O estudo mostrou que 18% dos prefixos com *prepend* são vulneráveis a sequestros, destacando a necessidade de cuidado no uso da técnica. Em relação ao **Anúncio de Prefixo mais Específico** [6], os autores revelam que a técnica é eficaz para minimizar o impacto de sequestros de BGP, onde o sequestrador redireciona o tráfego para si, uma vez que o BGP dá preferência a rotas com prefixos mais específicos. De acordo com os autores, a proporção de prefixos desagregados quase dobrou nos últimos quinze anos, passando de 22% em 2003 para 38% em 2017. Essa desagregação resulta em uma maior instabilidade, com esses prefixos aparecendo e desaparecendo com mais frequência.

4 Conjunto de Dados

Os nossos **dados de roteamento** foram obtidos através de coletores de rotas do projeto RouteViews [7]. Selecionamos coletores situados em **São Paulo (Brasil)**, **Sydney (Austrália)**, **Singapura (Sudeste Asiático)** e **Ashburn (Estados Unidos)**. Coletamos dados referentes a cada dia 15 de junho, às 22h, no período de 2014 a 2024. Já os **dados de alocação** foram obtidos do diretório público de estatísticas do LACNIC, que armazena informações detalhadas sobre a alocação de recursos de rede para cada dia da nossa análise, incluindo endereços IP e números de Sistemas Autônomos (ASNs), permitindo identificar as regiões geográficas associadas aos ASes [8].

5 Métricas de Análise

Primeiramente analisaremos o **uso da técnica**, observando quantos ASes aplicam, realizando uma análise quantitativa. Em seguida, analisaremos a **proporção de uso**, verificando em quantos anúncios cada AS aplica a técnica. Ao obter a lista de prefixos anunciados por cada AS, avaliaremos, anúncio por anúncio, se alguma técnica foi aplicada. Por fim, analisaremos a **intensidade de uso** das técnicas. No caso do ASPP, as análises calcularão o tamanho dos *prepend*s utilizados nas rotas dos ASes. Em relação à segunda técnica, a análise calculará o nível de desagregação que os ASes realizam, ou seja, o quanto um AS desagrega seus prefixos com base nos prefixos principais. Com esses resultados, poderemos avaliar qual das técnicas é mais popular e se é possível correlacionar a proporção ou intensidade entre elas.

6 Resultados e Discussão

Em nossas análises, buscamos observar o comportamento dos ASes que realizaram anúncios de prefixos IPv4 no período de 2014 a 2024. Nessas análises, foram ignoradas as rotas consideradas *bogon*, que representam uma média de 1,06% das rotas excluídas em cada data analisada. Na Figura 4, podemos observar o total de ASes que realizaram anúncios.

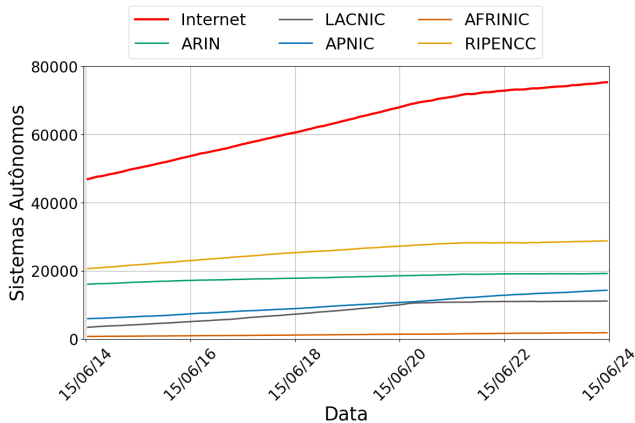


Figura 4. ASes anunciantes de prefixos IPv4

Houve um grande aumento de novos ASes anunciando prefixos ao longo do tempo. Observamos um crescimento de 28.547 novos ASes anunciando prefixos IPv4 entre 2014 e 2024, o que representa um aumento de 60,51%. Esse aumento de novos ASes na Internet era esperado devido à criação de novos serviços e empresas [9].

6.1 Técnica AS-Path Prepend (ASPP)

Ao analisar o **uso** da técnica ASPP, focamos nos ASes que utilizam a técnica em seus anúncios de origem,

ou seja, quando o *prepend* é realizado pelo próprio AS que está anunciando o prefixo, inflando o AS-Path de sua rota. Técnicas observadas apenas em vizinhos, dentro das rotas, não foram consideradas. Na Figura 5, é possível observar a fração de ASes que fazem uso da técnica, segmentados por região da IANA e na Internet de forma geral.

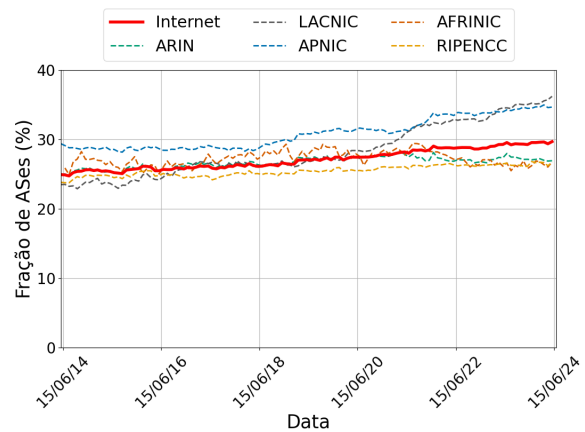


Figura 5. ASes que fazem uso de ASPP

A fração de ASes usando ASPP se manteve estável ao longo dos 11 anos de análise, variando levemente de 24,62% em 2014 para 29,50% em 2024, com 11.618 e 22.342 ASes, respectivamente. O APNIC apresentou o maior percentual de uso, refletindo a alta densidade de redes na região. Após 2020, a LACNIC registrou um aumento significativo, possivelmente devido ao crescimento da infraestrutura de redes.

No que diz respeito à **proporção** de uso da técnica, analisamos em quantos anúncios cada AS utiliza *prepend*. Consideramos apenas os ASes que aplicam a técnica em pelo menos um de seus prefixos. Dividimos os ASes em quatro grupos, de acordo com a proporção de anúncios em que utilizam o *prepend*. Por exemplo, se um AS utiliza *prepend* em 85% de seus anúncios, ele será inserido no último grupo, que é o **75% a 100%**. Os grupos são: **0,1% a 24,9%**, **25% a 49,9%**, **50% a 74,9%** e **75% a 100%**, conforme mostrado na Figura 6.

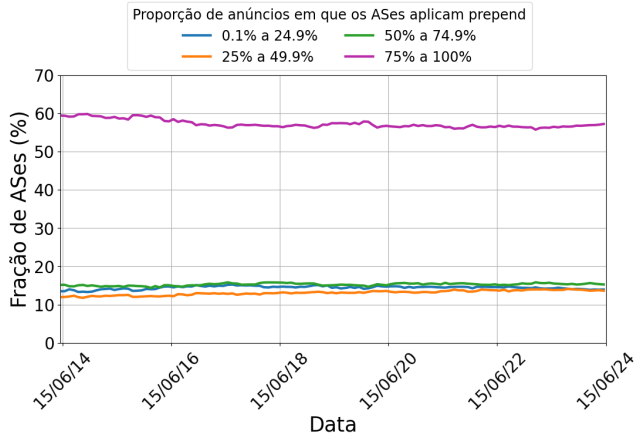


Figura 6. Proporção de anúncios em que os ASes aplicam a técnica ASPP

A maioria dos ASes utiliza *prepend* na maior parte de seus anúncios. Mais de 50% aplicam *prepend* em mais de 75% dos anúncios. Regionalmente, o RIPENCC lidera com mais de 65% dos ASes usando *prepend* em mais de 75% dos anúncios.

A **intensidade** de uso da técnica ASPP foi analisada com base no tamanho dos *prepends* aplicados ao AS-Path, ou seja, quantas vezes o AS repete seu ASN. Consideramos apenas os ASes originadores de prefixos, que foram divididos em 4 grupos: **tamanho 1**, **tamanho 2**, **tamanho 3** e **tamanho 4 ou mais**. O grupo é definido pelo tamanho de *prepend* mais utilizado. Por exemplo, se um AS utiliza 68,8% de *prepends* de tamanho 2, ele é classificado no grupo **Tamanho 2**. A Figura 7 mostra os ASes agrupados por tamanho.

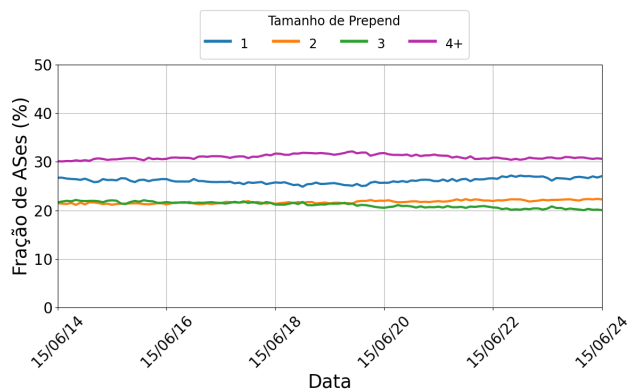


Figura 7. Tamanhos de *prepend* utilizados pelos ASes

A maioria dos ASes utiliza *prepends* de **tamanho 4 ou mais**. Essa observação levanta uma questão importante, pois uma grande quantidade de *prepends* nos anúncios pode causar problemas de segurança, como sequestros de prefixos, conforme já discutido em outro estudo da área [1].

6.2 Técnica Anúncio de Prefixo mais Específico

Para analisar o **uso** desta técnica, utilizamos a biblioteca *pytricia*, que usa a estrutura de dados Árvore Patricia. Com ela, identificamos todos os prefixos anunciados por cada AS e verificamos quais são mais específicos que outros [10]. Na Figura 8, é possível observar a fração de ASes que utilizam a técnica de desagregação de prefixos em seus anúncios. Consideramos qualquer AS que anuncie pelo menos um prefixo mais específico.

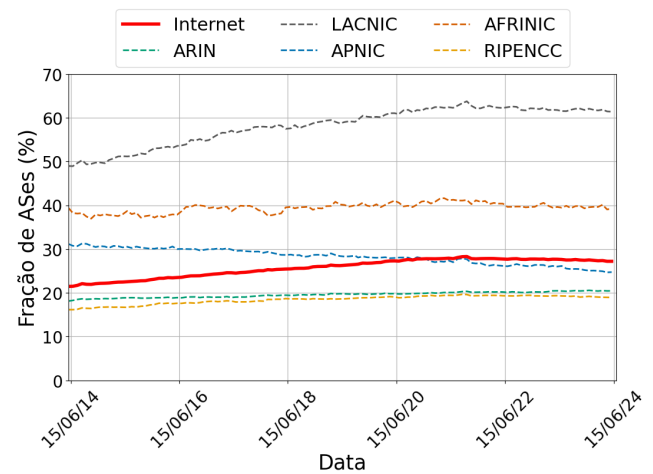


Figura 8. ASes que fazem uso de Anúncio mais Específico

A fração de ASes usando a técnica se manteve estável ao longo do tempo. O uso variou discretamente de 21,47% em 2014 para 27,21% em 2024, sendo considerado estável. Regionalmente, a maioria das regiões permaneceu estável, exceto o LACNIC, onde houve um aumento de 12,40% no uso. A variação foi de 48,98% em 2014 para 61,38% em 2024, possivelmente ligada ao aumento de novos ASes na região durante o período.

Para compreender a **proporção** de utilização da técnica, analisamos quantos dos prefixos anunciados por cada AS são mais específicos. Com base nisso, dividimos os ASes em 4 grupos, de acordo com a fração de prefixos mais específicos que cada AS anuncia, sendo eles: **0,1% a 24,9%**, **25% a 49,9%**, **50% a 74,9%** e **75% a 99,9%**. Na Figura 9, podemos observar os ASes segmentados por grupo.

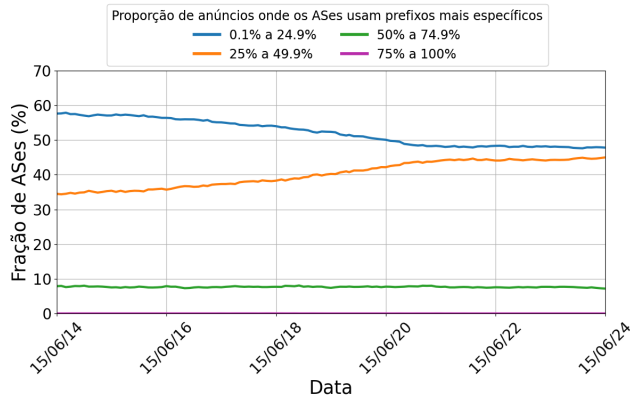


Figura 9. Prefixos anunciados pelos ASes que são mais específicos

Para analisar a **intensidade** da técnica, medimos o nível de desagregação dos prefixos de cada AS, avaliando a diferença entre o prefixo base e o mais específico. Os ASes foram categorizados em quatro grupos: **nível 1**, **nível 2**, **nível 3** e **nível 4 ou mais**. Na Figura 10, podemos observar os resultados.

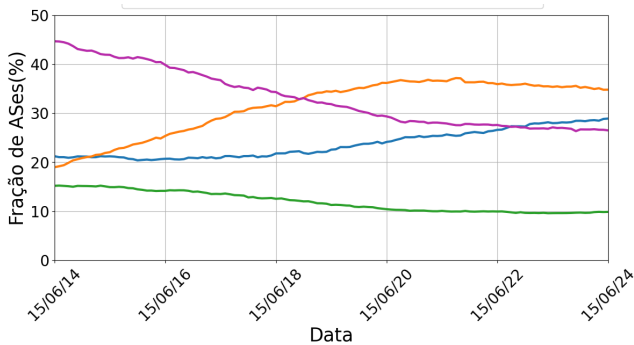


Figura 10. ASes agrupados pelo nível de desagregação dos prefixos

Os ASes estão desagregando menos seus prefixos. Houve uma redução significativa na fração de ASes que desagregam em 4 ou mais níveis ao longo do tempo, provavelmente devido ao fato de novos ASes estarem recebendo blocos menores de IPv4, pela escassez de endereços.

6.3 Utilização simultânea de ASPP e Prefixo mais Específico

Avaliamos qual técnica é mais popular, analisando como cada AS utiliza as duas técnicas, além de verificar se há correlação entre a intensidade e a proporção de uso. Comparamos o uso das técnicas, individual e simultaneamente. A Figura 11 mostra o comportamento de uso.

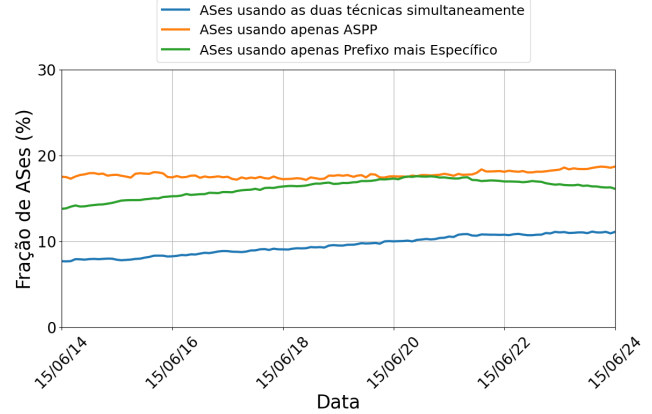


Figura 11. Utilização das duas técnicas pelos ASes

A técnica ASPP ainda é mais popular. Em 2014, 17,52% dos ASes usavam apenas ASPP, enquanto 13,78% utilizavam a outra técnica. Em 2020, essa diferença diminuiu, possivelmente devido ao aumento do trabalho remoto durante a pandemia de COVID-19. Para verificar se há correlação na proporção ou intensidade das duas técnicas, calculamos o coeficiente de correlação de Pearson. **Não foi observada correlação significativa entre o uso das duas técnicas.** Os valores obtidos, variando entre 0,07 e 0,10, sugerem que a correlação entre elas é fraca ou inexistente.

7 Considerações Finais

Em nossas análises, observamos que a fração de ASes utilizando ASPP se manteve estável, variando de 24,62% para 29,50% entre 2014 e 2024. A maioria dos ASes aplicou *prepend* em mais de 75% de seus anúncios, com uma predominância de *prepend*s de tamanho 4 ou mais, o que pode aumentar os riscos de segurança, como a vulnerabilidade a sequestros de prefixos. A técnica de Anúncio de Prefixo mais Específico também mostrou estabilidade, com um aumento notável na região do LACNIC, onde o uso cresceu 12,40%. Observamos uma redução na intensidade de desagregação, possivelmente devido à escassez de endereços IPv4. Não encontramos correlação significativa no uso simultâneo das duas técnicas, indicando que ambas são aplicadas de forma independente pela maioria dos ASes. Nas próximas etapas, analisaremos a técnica de **Anúncio Seletivo** e os anúncios em IPv6 para ampliar a compreensão do comportamento dos ASes, buscando identificar novos desafios e propor melhores práticas de uso, especialmente no contexto dos resultados para IPv4.

Disponibilidade de dados e materiais adicionais

Os dados e/ou materiais adicionais poderão ser disponibilizados mediante solicitação.

Referências

- 1 Marcos, P. *et al.* AS-Path Prepending: there is no rose without a thorn. In: PROCEEDINGS of the ACM Internet Measurement Conference. Association for Computing Machinery, out. 2020. P. 506–520. DOI: [10.1145/3419394.3423633](https://doi.org/10.1145/3419394.3423633).
- 2 Nemmi, E. N. *et al.* The parallel lives of autonomous systems. In: PROCEEDINGS of the 21st ACM Internet Measurement Conference. Association for Computing Machinery, nov. 2021. DOI: [10.1145/3487552.3487838](https://doi.org/10.1145/3487552.3487838).
- 3 Hawkinson, J. A.; Bates, T. J. *Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System (AS)*. RFC Editor, mar. 1996. 10 p. RFC 1930. (Request for Comments, 1930). DOI: [10.17487/RFC1930](https://doi.org/10.17487/RFC1930). Disponível em: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc1930>.
- 4 Elwalid, A. *et al.* Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. RFC Editor, mai. 2002. 71 p. RFC 3272. (Request for Comments, 3272). DOI: [10.17487/RFC3272](https://doi.org/10.17487/RFC3272). Disponível em: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3272>.
- 5 Rekhter, Y.; Hares, S.; Li, T. *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. RFC Editor, jan. 2006. 104 p. RFC 4271. (Request for Comments, 4271). DOI: [10.17487/RFC4271](https://doi.org/10.17487/RFC4271). Disponível em: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4271>.
- 6 Milolidakis, A. *et al.* On the Effectiveness of BGP Hijackers That Evade Public Route Collectors. *IEEE Access*, v. 11, p. 31092–31110, 2023. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3261128](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3261128). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10078883>.
- 7 Oregon, U. of. *Routeviews.org*. 2024. <http://www.routeviews.org/>. Accessed: (2024-10-17).
- 8 LACNIC. *LACNIC Statistics FTP Directory*. Jun. 2024. <https://ftp.lacnic.net/pub/stats/>. Accessed: 2024-10-17.
- 9 Kastanakis, S. *et al.* Replication: 20 Years of Inferring Interdomain Routing Policies. In: PROCEEDINGS of the 2023 ACM on Internet Measurement Conference. 2023. P. 16–29.
- 10 Sommers, J. *Pytricia: Patricia Trie Implementation for Python*. 2017. <https://github.com/jsommers/pytricia>. Accessed: (2024-08-06).