



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

Investigando o uso de técnicas de engenharia de tráfego na Internet

Leonardo Nunes Mendonça

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Garcia Pinto
Co-orientador: Prof. Dr. Pedro de Botelho Marcos

Rio Grande, 2025

Ficha Catalográfica

M539i Mendonça, Leonardo Nunes.
Investigando o uso de técnicas de engenharia de tráfego na Internet / Leonardo Nunes Mendonça. – 2025.
99 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2025.
Orientador: Dr. Vinícius Garcia Pinto.
Coorientador: Dr. Pedro de Botelho Marcos.

1. BGP 2. Engenharia de Trafego 3. Interconexão 4. Internet 5. Roteamento I. Pinto, Vinícius Garcia II. Marcos, Pedro de Botelho III. Título.

CDU 004

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Universidade Federal do Rio Grande
Centro de Ciências Computacionais
Programa de Pós-Graduação em Computação
Curso de Mestrado em Engenharia de Computação

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ata nº 2/2025

Aos vinte e cinco dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco, às quatorze horas, ocorreu a sessão de Defesa de Dissertação de Mestrado de LEONARDO NUNES MENDONÇA, que apresentou a dissertação intitulada **"Investigando o uso de técnicas de engenharia de tráfego na Internet"**, realizada sob a orientação do Prof. Dr. Vinícius Garcia Pinto. A banca examinadora foi constituída pelos Prof. Dr. Marcelo Rita Pias (FURG) e Prof. Dr. Leandro Márcio Bertholdo (UFRGS), sob a presidência do orientador. Após a apresentação do trabalho, a banca arguiu o candidato e, a seguir, deliberou pela

(X) aprovação da Dissertação
( ) aprovação da Dissertação, sugerindo modificações no texto
( ) reprovação da Dissertação

Rio Grande, 25 de fevereiro de 2025.

ASSINADO DIGITALMENTE
MARCELO RITA PIAS
A conformidade com a assinatura pode ser verificada em:
http://serpro.gov.br/assinador-digital
SERPRO

Prof. Dr. Marcelo Rita Pias

Documento assinado digitalmente
gov.br
LEANDRO MARCIO BERTHOLDO
Data: 26/02/2025 12:44:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Leandro Márcio Bertholdo

Documento assinado digitalmente
gov.br
VINICIUS GARCIA PINTO
Data: 25/02/2025 17:44:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Vinícius Garcia Pinto
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
PEDRO DE BOTELHO MARCOS
Data: 27/02/2025 10:59:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Pedro de Botelho Marcos
Coorientador

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFRINIC	African Network Information Centre
APNIC	Asia Pacific Network Information Centre
ARIN	American Registry for Internet Numbers
AS	Autonomous System
ASN	Autonomous System Number
BGP	Border Gateway Protocol
CDN	Content Delivery Network
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISP	Internet Service Provider
ITE	Inbound Traffic Engineering
IXP	Internet Exchange Point
LACNIC	Latin American and Caribbean Internet Address Registry
MPI	Message Passing Interface
OSPF	Open Shortest Path First
OSI	Open Systems Interconnection
POP	Point of Presence
RFC	Request for Comments
RIPENCC	RIPE Network Coordination Centre

RESUMO

MENDONÇA, Leonardo Nunes. **Investigando o uso de técnicas de engenharia de tráfego na Internet**. 2025. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

A Internet é composta por milhares de Sistemas Autônomos (ASes) que utilizam técnicas de engenharia de tráfego para controlar o fluxo de dados em suas redes. Este estudo examina o uso das técnicas *AS-Path Prepend (ASPP)*, *Anúncio de Prefixo Mais Específico* e *Anúncio Seletivo* em IPv4 e IPv6 ao longo de 10 anos (2014-2024). No IPv4, a desagregação de prefixos diminuiu devido à escassez de endereços, enquanto no IPv6, aumentou significativamente, refletindo o maior espaço de endereçamento do protocolo. A adoção do *ASPP* cresceu, especialmente na APNIC e LACNIC, com a LACNIC registrando um aumento de 12,02 pontos percentuais. Mais de 75% dos anúncios utilizaram *ASPP*, com *prepends* de tamanho 1 sendo os mais comuns, exceto na ARIN, onde *prepends* de tamanho 4 ou mais predominaram. O *Anúncio de Prefixo Mais Específico* também cresceu globalmente, com a LACNIC atingindo 61,06% de adoção em 2024, embora a maioria dos ASes a tenha utilizado em menos de 25% dos anúncios. O *Anúncio Seletivo* aumentou significativamente, principalmente entre ISPs e provedores de hospedagem, com mais de 75% dos prefixos anunciados de forma seletiva. A combinação de *Anúncio de Prefixo Mais Específico* e *Anúncio Seletivo* tornou-se mais comum, sendo usada por mais de 30% dos ASes, enquanto o uso simultâneo das três técnicas permaneceu raro, adotado por menos de 5% dos ASes. ISPs foram os principais usuários de *ASPP* e *Anúncio Seletivo*, enquanto provedores de hospedagem preferiram *prepends* de tamanho 1, e ASes governamentais utilizaram mais o *Anúncio de Prefixo Mais Específico*. Regionalmente, a LACNIC liderou a adoção dessas técnicas, a RIPE NCC preferiu *ASPP*, e a ARIN optou por *prepends* de tamanho 4 ou mais. Este estudo destaca tendências na engenharia de tráfego, enfatizando a influência de fatores regionais e específicos de cada protocolo.

Palavras-chave: BGP, Engenharia de Tráfego, Interconexão, Internet, Roteamento.

ABSTRACT

MENDONÇA, Leonardo Nunes. **Investigating the Use of Internet Traffic Engineering Techniques**. 2025. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

The Internet consists of thousands of Autonomous Systems (ASes) that use traffic engineering techniques to control data flow into their networks. This study examines the use of *AS-Path Prepend (ASPP)*, *More Specific Prefix Announcement*, and *Selective Announcement* in IPv4 and IPv6 over 10 years (2014-2024). In IPv4, prefix disaggregation decreased due to address scarcity, while in IPv6, it increased significantly, reflecting the protocol's larger address space. *ASPP* adoption grew, especially in APNIC and LACNIC, with LACNIC showing a 12.02 percentage point increase. Over 75% of announcements used *ASPP*, with size-1 prepends being most common, except in ARIN, where size-4 or larger prepends dominated. *More Specific Prefix Announcement* also grew globally, with LACNIC reaching 61.06% adoption in 2024, though most ASes used it in less than 25% of announcements. *Selective Announcement* increased notably, particularly among ISPs and hosting providers, with over 75% of prefixes announced selectively. The combination of *More Specific Prefix Announcement* and *Selective Announcement* became more common, used by over 30% of ASes, while the simultaneous use of all three techniques remained rare, adopted by less than 5% of ASes. ISPs were the main users of *ASPP* and *Selective Announcement*, while hosting providers preferred size-1 prepends, and government ASes relied more on *More Specific Prefix Announcement*. Regionally, LACNIC led in adopting these techniques, RIPE NCC favored *ASPP*, and ARIN preferred size-4 or larger prepends. This study highlights trends in traffic engineering, emphasizing the influence of regional and protocol-specific factors.

Keywords: BGP, Traffic Engineering, Interconnection , Internet, Routing.

LISTA DE FIGURAS

1 Comunicação entre Sistemas Autônomos 15
2 Técnica de AS-Path Prepend 21
3 Técnica de Anúncio Seletivo 22
4 Técnica de Anúncio de Prefixo mais Específico 23

5 ASes anunciando prefixos IPv4 segmentados por região. 35
6 ASes anunciando prefixos IPv6 segmentados por região. 36
7 Prefixos IPv4 agrupados de acordo com a região do AS originador do prefixo. 37
8 Prefixos IPv6 agrupados de acordo com a região do AS originador do prefixo. 38
9 ASes anunciando prefixos IPv4, classificados por tipo de AS. 39
10 ASes anunciando prefixos IPv6, classificados por tipo de AS. 40
11 Prefixos IPv4 agrupados de acordo com o tipo do AS originador do prefixo. 41
12 Prefixos IPv6 agrupados de acordo com o tipo do AS originador do prefixo. 42
13 Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem, observados regional e globalmente - IPv4. 43
14 Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem, observados regional e globalmente - IPv6. 44
15 Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem agrupados de acordo com o tipo de AS - IPv4. 45
16 Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem agrupados de acordo com o tipo de AS - IPv6. 46
17 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma global - IPv4. 47
18 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma global - IPv6. 47
19 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma regional - IPv4. 48
20 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma regional - IPv6. 49
21 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, segmentados por tipo de AS - IPv4. 50
22 ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, segmentados por tipo de AS - IPv6. 51

23 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma global - IPv4. 52
24 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma global - IPv6. 53
25 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma regional - IPv4. 54
26 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma regional - IPv6. 55
27 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, segmentados por tipo de AS - IPv4. 56
28 ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de acordo com tipo de AS - IPv6. 57
29 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, em visão regional e global - IPv4. 58
30 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, em visão regional e global - IPv6. 59
31 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, de acordo com o tipo de AS - IPv4. 60
32 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, de acordo com o tipo de AS - IPv6. 61
33 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados globalmente - IPv4. 62
34 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados globalmente - IPv6. 63
35 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados regionalmente - IPv4. 64
36 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados regionalmente - IPv6. 65
37 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, de acordo com tipo do AS - IPv4. 66
38 ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, de acordo com tipo do AS - IPv6. 67
39 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados globalmente - IPv4. . 68
40 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados globalmente - IPv6. . 69
41 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados regionalmente - IPv4. 70
42 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados regionalmente - IPv6. 71
43 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, de acordo com tipo de AS - IPv4. 72
44 ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, de acordo com tipo de AS - IPv6. 73
45 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observada regionalmente - IPv4. 74
46 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observados regionalmente - IPv6. 75

47 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observada de acordo com o tipo de AS - IPv4. 76
48 Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observados de acordo com o tipo de AS. 77
49 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes - IPv4. . 78
50 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes 78
51 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados regionalmente - IPv4. 79
52 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados regionalmente 80
53 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados de acordo com tipo de AS - IPv4. 81
54 Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados de acordo com tipo de AS 82
55 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados globalmente - IPv4. 83
56 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados globalmente. 83
57 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados regionalmente - IPv4. 84
58 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados regionalmente. 85
59 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, de acordo com tipo de AS - IPv4. 86
60 Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, de acordo com tipo de AS. 87
61 Usos simultâneo e exclusivo das técnicas AS-Path Prepend, Anúncio de Prefixo mais Específico e Anúncio Seletivo, de forma global - IPv4. 88
62 Usos simultâneo e exclusivo das técnicas AS-Path Prepend, Anúncio de Prefixo mais Específico e Anúncio Seletivo, de forma global - IPv6. 89
63 Análise da proporção de uso das 3 técnicas em IPv4. 90
64 Análise da proporção de uso das 3 técnicas em IPv6. 91
65 Correlação entre os prefixos anunciados em IPv4 e IPv6 ao longo dos 10 anos. 93

SUMÁRIO

1 Introdução **12**

2 Conceitos **14**
2.1 Sistemas Autônomos . . . 14
2.2 Endereçamento de Rede . . . 15
2.2.1 Protocolo IP (Internet Protocol) . . . 15
2.2.2 Autoridade para Atribuição de Números da Internet (IANA) e Registro Regional da Internet (RIR) . . . 16
2.2.3 Prefixos *bogon* . . . 17
2.3 Roteamento e Interconexão . . . 17
2.3.1 Protocolo BGP . . . 17
2.3.2 *Peering* . . . 18
2.4 Engenharia de Tráfego . . . 19
2.4.1 AS-Path Prepend - ASPP . . . 20
2.4.2 Anúncio Seletivo de Prefixo . . . 21
2.4.3 Anúncio de Prefixo Mais Específico . . . 22
2.5 Coletores de Rotas . . . 23

3 Trabalhos Relacionados **25**
3.1 Engenharia de Tráfego . . . 25
3.2 Relacionamento entre Sistemas Autônomos . . . 26
3.3 AS-Path Prepending . . . 26
3.4 Anúncio Seletivo de Prefixo . . . 27
3.5 Anúncio de Prefixo Mais Específico . . . 27

4 Metodologia **30**
4.1 Objetivo . . . 30
4.2 Base de dados . . . 30
4.2.1 Dados de Roteamento . . . 30
4.2.2 Dados de Alocação . . . 31
4.3 Protocolos e técnicas analisadas . . . 31
4.4 Sanitização . . . 32
4.5 Métricas de análise . . . 32

5 Resultados **33**
5.1 Considerações de desempenho . . . 33
5.2 Sistemas Autônomos e Prefixos Analisados . . . 33

5.2.1 Evolução dos ASes e Prefixos por Região 34
5.2.2 Evolução dos ASes e Prefixos por Tipo 38
5.3 Técnica AS-Path Prepend (ASPP) 42
5.3.1 Utilização 43
5.3.2 Proporção 46
5.3.3 Intensidade 51
5.4 Técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico 57
5.4.1 Utilização 58
5.4.2 Proporção 61
5.4.3 Intensidade 67
5.5 Técnica de Anúncio Seletivo 73
5.5.1 Utilização 74
5.5.2 Proporção 77
5.5.3 Intensidade 82
5.6 Análise da Utilização Simultânea das Três Técnicas 87
5.6.1 Utilização 88
5.6.2 Proporção 90
5.6.3 Intensidade 91
5.7 Correlação entre anúncios IPv4 e IPv6 92

6 Considerações Finais **94**

Referências **97**

1 INTRODUÇÃO

A complexidade da topologia da Internet tem aumentado significativamente nas últimas décadas, refletindo na interconexão dos Sistemas Autônomos (do inglês, *Autonomous Systems - ASes*) que a compõem. O número de ASes tem aumentado continuamente, com pelo menos, 75.000 deles trocando informações de roteamento continuamente por meio do protocolo BGP (do inglês, *Border Gateway Protocol*). Essa expansão impulsiona o crescimento de toda infraestrutura responsável pela comunicação entre ASes e pela adoção de Redes de Distribuição de Conteúdo (do inglês, *Content Delivery Networks - CDN*), que auxiliam na redução de custos de interconexão, além de melhorar o desempenho da entrega de tráfego. À medida que a Internet se torna mais interconectada e menos hierárquica, a compreensão das práticas de interconexão e das técnicas de engenharia de tráfego se torna essencial para otimizar o fluxo de dados e garantir a segurança da rede. Analisar a evolução da topologia da Internet é essencial para enfrentar os desafios que seu crescimento traz e desenvolver estratégias eficazes para a gestão do tráfego [11][18][21].

Inicialmente devemos entender que, na engenharia de tráfego, há dois aspectos a serem analisados, sendo elas o **tráfego de entrada** e o **tráfego de saída**. O tráfego de saída é menos complexo de gerenciar, pois os ASes têm maior controle sobre suas opções de roteamento, ajustando suas rotas para controlar os dados que estão sendo enviados para seus vizinhos, ainda que não se tenha controle de como chegarão até o destino. No entanto, quando se trata de tráfego de entrada, já não é tão simples o seu gerenciamento. É possível manipular o tráfego recebido, para que o mesmo adote um comportamento que desejamos, mas não temos total controle de como chegará até nós. Em nossa pesquisa, iremos focar na **engenharia de tráfego de entrada** (do inglês, *Inbound Traffic Engineering - ITE*) [7].

Compreendendo isso, um bom entendimento do uso de técnicas de engenharia de tráfego é essencial para gestão de grandes redes na Internet, garantindo operações mais eficientes e otimizadas. Importante ressaltar que Kastanakis (2023) conduziu um estudo sobre as práticas atuais de interconexão na Internet, lançando luz sobre o cenário em evolução dos acordos de interconexão e os fatores que influenciam o desempenho da rede [16].

Nossa pesquisa busca responder a questionamentos em relação ao **uso** das técnicas, observando como os ASes as aplicam, a **proporção** em que são aplicadas nos anúncios de cada AS, e qual sua **intensidade** de uso, seja em relação à seletividade de anúncios, desagregação ou quantidades de *prepends* utilizados pelos ASes. O período das análises é de 15 de junho de 2014 à 15 de junho de 2024, abordando as técnicas **AS-Path Prepend (ASPP)**, **Anúncio Seletivo de Prefixo** e **Anúncio de Prefixo Mais Específico**, tanto no protocolo IPv4 quanto no protocolo IPv6.

Para nortear nossa pesquisa, buscamos responder às seguintes perguntas:

- Quantos ASes usam uma ou várias técnicas combinadas?
- Em quantos prefixos eles as aplicam?
- Qual é a intensidade de aplicação dessas técnicas?
- Existe diferença entre o uso das técnicas no IPv4 e no IPv6?
- Existe correlação entre o uso das técnicas?
- Existem diferenças por tipo de AS?
- Existem diferenças por região?

Essas questões nos permitirão compreender não apenas a adoção das técnicas, mas também suas nuances e variações em diferentes contextos, contribuindo para um entendimento mais aprofundado das práticas de roteamento na Internet.

Este trabalho está estruturado em uma sequência de capítulos que exploram os principais aspectos deste estudo. No Capítulo 2, examinamos os fundamentos teóricos que sustentam nossa pesquisa. No Capítulo 3, revisamos estudos anteriores e pesquisas relevantes da área. No Capítulo 4, apresentamos a metodologia das análises. No Capítulo 5, mostramos nossos resultados parciais. Por fim, no Capítulo 6, discutiremos os resultados e maiores constatações de nosso trabalho de pesquisa.

2 CONCEITOS

2.1 Sistemas Autônomos

Um Sistema Autônomo [11] refere-se a uma rede ou a um conjunto de redes que estão sob o controle de uma única entidade administrativa [1]. Os ASes são responsáveis pelo roteamento e pela troca de tráfego de rede entre si e com outros ASes. Eles constantemente aumentam suas capacidades de interconexão e expandem sua presença para garantir uma comunicação e conectividade eficientes, desempenhando um papel crucial no funcionamento da Internet [7]. A eles são atribuídos identificadores únicos chamados Números de Sistema Autônomo (do inglês, Autonomous System Number - ASN) para diferenciá-los de outros ASes. Para se conectar usam o protocolo o protocolo BGP (do inglês, Border Gateway Protocolo - BGP), auxiliando na troca de informações de roteamento e determinando o melhor caminho para que o tráfego.

A interconexão entre os ASes pode ser realizada por meio de relações de *peering* ou de trânsito, que são dois tipos distintos de acordos entre redes. O *peering* é uma relação direta entre dois ASes, na qual eles concordam em trocar tráfego entre si sem a necessidade de envolver redes de terceiros. Esse tipo de relação é geralmente estabelecido quando ambos os ASes percebem benefícios mútuos na troca de tráfego, como redução de custos ou melhoria no desempenho. Já o trânsito é uma relação em que um AS paga a outro (geralmente um provedor de maior porte) para ter acesso à Internet global. Nesse caso, o AS provedor assume a responsabilidade de encaminhar o tráfego do AS cliente para qualquer destino na Internet.

Essas relações de *peering* e trânsito podem ocorrer em diferentes contextos, incluindo a utilização de pontos de troca de tráfego da Internet (do inglês, Internet Exchange Point - IXPs). Os IXPs são infraestruturas físicas onde múltiplos ASes se conectam para facilitar a troca de tráfego entre si. Eles funcionam como hubs neutros, permitindo que ASes estabeleçam conexões diretas (via *peering*) ou indiretas (via trânsito) de forma eficiente. A presença de IXPs é fundamental para a redução de custos e a melhoria do desempenho na interconexão de redes, além de contribuir para a resiliência e a conectividade global da Internet [10].

Na Figura 1, podemos observar como os Sistemas Autônomos se comunicam. No exemplo, os AS100 e AS300 estão conectados através do AS200. Todos os ASes possuem seus roteadores internos, e alguns deles estão configurados para realizar comunicação externa, utilizando o Protocolo BGP para se conectar a outros ASes.

Compreender as políticas e o comportamento dos ASes é essencial para a gestão e otimização eficazes da rede. Alguns pesquisadores têm estudado as políticas de roteamento interdomínio e realizado medições ao longo de 20 anos [16]. Esse conhecimento ajuda a entender como os ASes tomam decisões de roteamento e como impactam o desempenho geral e a estabilidade da Internet.

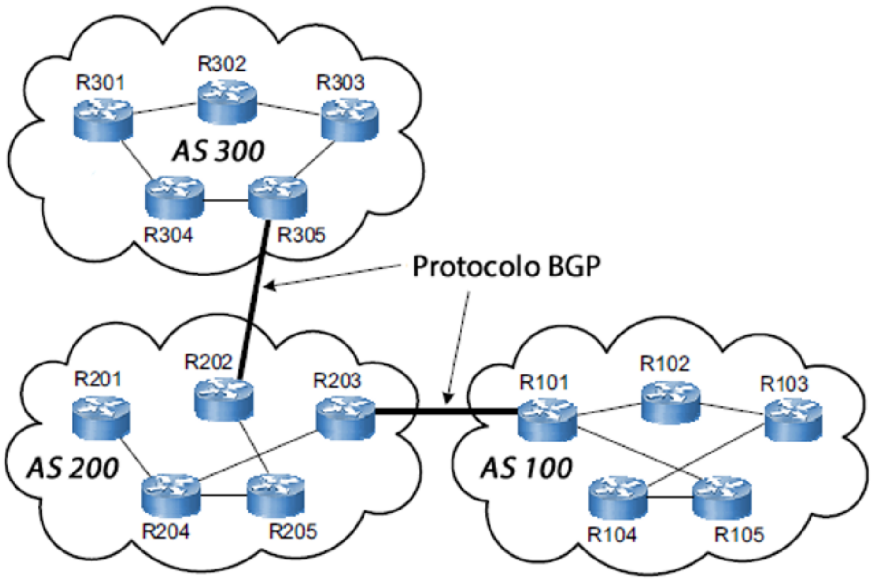


Figura 1: Comunicação entre Sistemas Autônomos

2.2 Endereçamento de Rede

2.2.1 Protocolo IP (Internet Protocol)

O Protocolo de Internet (IP), nas versões quatro (IPv4) e seis (IPv6), é um protocolo essencial para a comunicação em redes de computadores. O IP é o principal protocolo de rede na camada de Internet do modelo OSI e no conjunto de protocolos da Internet, encarregado do endereçamento e roteamento dos dados.

O IPv4 é constituído por 32 bits, divididos em quatro grupos com oito bits, comumente representados no formato X.X.X.X. Esta estrutura de endereçamento permitiu a ampla expansão inicial da Internet. No entanto, com o aumento do número de dispositivos conectados, o espaço de endereçamento do IPv4 tornou-se insuficiente.

Para superar essa limitação, o IPv6 foi desenvolvido com um espaço de endereçamento muito maior. O tamanho dos endereços de IPv6 é de 128 bits. A representação de endereços IPv6 preferenciais é: X:X:X:X:X:X:X:X, em que cada x é

o valor hexadecimal das oito partes de 16 bits do endereço. Os endereços de IPv6 vão de 0000:0000:0000:0000:0000:0000:0000:0000 a ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff. Esta expansão supera o esgotamento dos endereços.

Os prefixos de rede são fundamentais na organização das redes IP. No IPv4, os prefixos são utilizados para definir sub-redes. Uma máscara de rede, como /24 em um endereço X.X.X.X/24, indica que os primeiros 24 bits do endereço IP são usados para identificar a rede, enquanto os 8 bits restantes são usados para dispositivos específicos dentro dessa rede. Este sistema permite uma divisão eficiente do espaço de endereçamento e a organização lógica de redes de diferentes tamanhos.

No IPv6, a organização dos prefixos é mais abrangente, devido ao seu vasto espaço de endereçamento. Um prefixo comum no IPv6, como /64, indica que os primeiros 64 bits do endereço são para a rede, deixando um enorme espaço para endereçamento de dispositivos dentro da rede. Esses prefixos facilitam a alocação de endereços e a administração de redes, especialmente em ambientes onde o número de dispositivos conectados é significativamente grande.

A transição do IPv4 para o IPv6 é um processo essencial e progressivo, vital para atender às crescentes demandas de conectividade. Com um espaço de endereçamento ampliado e funcionalidades aprimoradas, o IPv6 é fundamental para suportar a próxima geração de inovações tecnológicas e conexão entre dispositivos [22, 12].

2.2.2 Autoridade para Atribuição de Números da Internet (IANA) e Registro Regional da Internet (RIR)

A Autoridade para Atribuição de Números da Internet (do inglês, *Internet Assigned Numbers Authority - IANA*) é uma entidade crucial para o funcionamento da Internet, responsável pela coordenação global dos identificadores exclusivos que garantem a interoperabilidade entre diferentes sistemas na rede. A IANA é operada pela Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN) e mantém uma ampla gama de registros de parâmetros de protocolos, incluindo números de portas, nomes de serviços, endereços IP e outros valores críticos usados pelos protocolos da Internet.

Os registros da IANA são mantidos de forma centralizada ou delegada hierarquicamente, dependendo do tipo de identificador. Por exemplo, enquanto os endereços IP e nomes de domínio são alocados hierarquicamente, outros valores, como números de portas. A IANA trabalha para garantir que esses registros estejam disponíveis de maneira pública e acessível, seguindo processos transparentes e abertos que envolvem a comunidade interessada, conforme descrito na RFC 8720.

A IANA coordena a alocação de endereços IP e números de Sistemas Autônomos (ASNs) através de cinco Registros Regionais da Internet (RIRs), que são responsáveis pela distribuição desses recursos em suas respectivas regiões. Os cinco RIRs são: AFRINIC (África), APNIC (Ásia-Pacífico), ARIN (América do Norte), LACNIC (América

Latina e Caribe) e RIPE NCC (Europa, Oriente Médio e partes da Ásia Central). Esta segmentação permite uma gestão eficiente e regionalizada dos recursos de rede, assegurando que as necessidades específicas de cada região sejam atendidas.

2.2.3 Prefixos *bogon*

O termo *bogon* refere-se a prefixos de endereços IP que não deveriam ser roteados pela Internet pública. Esses prefixos incluem tanto endereços privados, como os definidos na RFC 1918 [24], quanto endereços reservados ou não alocados pela IANA. Como esses endereços não têm um uso legítimo na Internet, qualquer anúncio de rotas utilizando esses prefixos é potencialmente suspeito e pode indicar uma configuração incorreta ou, em casos mais graves, uma tentativa de realizar ataques, como IP spoofing ou desvio de tráfego.

Os prefixos *bogon* são, portanto, importantes alvos de filtragem em sistemas autônomos e nas políticas de roteamento de provedores de serviços de internet (ISPs). A filtragem desses prefixos é uma prática recomendada para proteger a integridade das redes e evitar a propagação de tráfego não autorizado. Isso é particularmente relevante em cenários onde o roteamento dinâmico, como em rotas BGP, é utilizado para determinar o caminho que os dados seguirão através da Internet. Prefixos bogon podem ser anunciados devido a erros de configuração de operadores de rede ou de maneira ilícita para redirecionar tráfego de rede a locais não seguros.

A importância de identificar e bloquear estes prefixos é reconhecida por várias organizações de segurança e operadoras de rede. A *Team Cymru*, por exemplo, mantém listas atualizadas desses prefixos, fornecendo uma ferramenta essencial para a implementação de políticas de segurança de roteamento. Redes que implementam essas práticas conseguem reduzir significativamente o risco de exposição a ataques que exploram essas vulnerabilidades, garantindo um ambiente mais seguro e controlado para a troca de dados na internet [6].

2.3 Roteamento e Interconexão

2.3.1 Protocolo BGP

O Protocolo BGP (do inglês, Border Gateway Protocol) é um protocolo de roteamento usado para trocar informações de roteamento e facilitar as decisões de roteamento entre Sistemas Autônomos na Internet. O BGP é responsável por determinar o melhor caminho para o tráfego de rede atingir seu destino, considerando vários fatores, como políticas de rede, atributos de caminho e alcance de rede.

O BGP opera etabelecendo conexões entre os ASes. Essas conexões são conhecidas como sessões BGP ou relacionamentos de *peer* BGP. Através desses relacionamentos de *peer*, os roteadores BGP trocam informações de roteamento na forma de atualizações

de roteamento, que contêm informações sobre os prefixos de rede e os caminhos para alcançá-los.

Uma das principais características do BGP é sua capacidade de suportar o roteamento baseado em políticas. Os ASes podem definir suas políticas de roteamento usando o BGP para controlar o fluxo de tráfego e tomar decisões de roteamento com base em seus requisitos específicos. O BGP permite que os ASes implementem políticas de roteamento complexas, como preferir determinados caminhos em relação a outros, filtrar rotas com base em critérios específicos e manipular os atributos das rotas.

O BGP usa um algoritmo de vetor de caminho para determinar o melhor caminho para o roteamento. Cada roteador BGP mantém uma tabela de roteamento que contém informações sobre os caminhos disponíveis para alcançar diferentes prefixos de rede. Os roteadores BGP trocam essas informações de roteamento com seus vizinhos e usam os atributos de caminho, como o comprimento do caminho do AS, a origem da rota e as informações do próximo salto, para selecionar o melhor caminho.

O BGP é utilizado na Internet para permitir o roteamento entre domínios e garantir a conectividade global das redes. É o protocolo de roteamento usado por ISPs e grandes redes para trocar informações de roteamento e estabelecer conectividade com outros ASes. O BGP desempenha um papel crítico na estabilidade e escalabilidade da Internet, permitindo que os ASes tomem decisões de roteamento informadas e se adaptem às mudanças na topologia da rede [23][26].

2.3.2 *Peering*

A interconectividade entre redes depende de dois fatores essenciais: eficiência e desempenho. Para otimizar esses aspectos, é necessário escolher o método adequado para gerenciar o tráfego de dados. Uma das abordagens amplamente utilizadas para atingir esses objetivos é o *Peering* de Redes.

O *Peering* de Redes, também conhecido como *IP Peering* ou apenas *Peering*, é um método que permite que dois ou mais Sistemas Autônomos (ASes) se conectem e troquem tráfego diretamente, sem a necessidade de intermediários. Essa troca de tráfego ocorre por meio de sessões BGP (Border Gateway Protocol) e é geralmente estabelecida quando ambas as partes percebem benefícios mútuos, como redução de custos e melhoria no desempenho da rede. O *Peering* é uma relação de reciprocidade, na qual os ASes envolvidos concordam em trocar tráfego de forma equilibrada, sem pagamentos diretos.

Existem diferentes tipos de *Peering*, que variam conforme os acordos firmados entre os ASes. Um deles é o *Peering* Privado, que é o tipo mais simples e comum. Nele, dois ASes se interconectam por meio de uma conexão IP dedicada, geralmente implementada em Data Centers de Colocação através de serviços de *cross-connect*. Esse tipo de *Peering* também pode ser realizado via conexão virtual em Nuvem.

Outro tipo é o *Peering* Público, onde dois ou mais ASes se conectam através de um

Ponto de Troca de Internet (IXP). Ao utilizar um IXP neutro, os ASes podem estabelecer *peering* multilateral, permitindo a troca de tráfego sem a necessidade de acordos privados individuais. Esse tipo de *Peering* geralmente não envolve custos diretos entre os participantes e permite o compartilhamento de capacidade em um ponto de troca neutro.

Além do *Peering*, existe a relação de trânsito, que é fundamentalmente diferente. No trânsito, um AS paga a outro (geralmente um provedor de maior porte) para ter acesso à Internet global. Nesse caso, o AS provedor assume a responsabilidade de encaminhar o tráfego do AS cliente para qualquer destino na Internet. Embora o trânsito envolva pagamento, ele não é considerado uma forma de *Peering*, pois não há reciprocidade na troca de tráfego.

Por fim, há o *Peering* Pago, que é uma modalidade menos comum e distinta do trânsito. No *Peering* Pago, dois ASes estabelecem uma relação em que uma parte paga pela capacidade de troca de tráfego, mas ainda há uma reciprocidade na troca de dados. Esse tipo de acordo é frequentemente utilizado entre grandes Provedores de Serviços de Internet e provedores de conteúdo que precisam enviar grandes volumes de dados diretamente para seus clientes, garantindo maior qualidade e velocidade na entrega do conteúdo [1, 16].

2.4 Engenharia de Tráfego

A Engenharia de Tráfego refere-se à prática de adaptar o encaminhamento do tráfego de rede para otimizar o desempenho da rede e utilizar eficientemente os recursos de rede. Isso envolve configurar dinamicamente as rotas de tráfego para se ajustar às mudanças nas condições de tráfego, com o objetivo de garantir bom desempenho do usuário e uso eficiente dos recursos de rede.

O principal objetivo da Engenharia de Tráfego é controlar e gerenciar o fluxo de tráfego dentro de uma rede ou entre redes. Ao controlar estrategicamente o tráfego, os operadores de rede podem atingir diversos objetivos, como minimizar congestionamentos, equilibrar a carga da rede, otimizar a utilização de recursos e melhorar a qualidade do serviço. As técnicas desta prática podem envolver ajustes em protocolos de roteamento, manipulação de métricas de roteamento ou implementação de mecanismos de priorização de tráfego.

O Protocolo BGP desempenha um papel essencial na interconexão dos sistemas autônomos permitindo que os operadores de rede façam escolhas estratégicas de roteamento influenciando o tráfego recebido. O BGP possui critérios na decisão de rotas que incluem políticas de rede estabelecidas pelos administradores, podendo priorizar rotas com base em acordos comerciais, qualidade de serviço ou considerações de segurança. Além disso, as preferências de caminho, como a escolha de rotas que passam por menos ASes, são fundamentais, assim como os objetivos de gerenciamento de tráfego, que in-

cluem o balanceamento de carga e a prevenção de congestionamentos. O BGP também utiliza uma série de atributos de rota, como AS_PATH, NEXT_HOP e LOCAL_PREF [9], para determinar a rota preferencial. A manipulação desses critérios pelos operadores de rede influencia como o tráfego é roteado entre os ASes, com o objetivo de otimizar o roteamento interdomínio e afetar a eficiência, a segurança e a resiliência da rede. Este processo ressalta a importância de um entendimento aprofundado do BGP e de seus mecanismos de tomada de decisão.

Além disso, as técnicas de engenharia de tráfego podem auxiliar na previsibilidade de tráfego futuro e ajustar as configurações de rede de acordo com os Sistemas Autônomos. Ao prever com precisão as demandas de tráfego, os operadores de rede podem alocar recursos de forma proativa e otimizar o desempenho da rede [7, 25, 9, 8].

Das técnicas de Engenharia de Tráfego existentes, iremos abordar três, que serão utilizados nas análises de nosso projeto, sendo elas o **AS-Path Prepend**, **Anúncio Seletivo de Prefixo** e **Anúncio de Prefixo Mais Específico**.

2.4.1 AS-Path Prepend - ASPP

O AS-Path Prepend (ASPP) é uma técnica usada no Protocolo BGP para influenciar a seleção de caminho do tráfego de rede, manipulando o atributo do caminho do sistema autônomo “AS path”. O atributo AS path no BGP contém uma sequência de números de Sistemas Autônomos que representam o caminho que a atualização do BGP percorreu.

Esta técnica envolve adicionar instâncias adicionais do número AS ao atributo AS path das atualizações do BGP. Ao anexar seu próprio número AS várias vezes ao caminho AS, um sistema autônomo pode fazer com que seu caminho pareça menos atraente para outros ASes, reduzindo efetivamente a probabilidade de o tráfego ser encaminhado por esse caminho. Essa técnica é comumente usada para fins de engenharia de tráfego, como balanceamento de carga ou evitar enlaces congestionados.

A eficácia do Prepend depende das políticas de roteamento de outros ASes e da maneira como eles selecionam caminhos com base no atributo em questão. Alguns ASes podem priorizar caminhos mais curtos, enquanto outros podem considerar outros fatores, como o número de saltos entre ASes ou a presença de números de ASes específicos no caminho. Ao manipular o AS-Path por meio de Prepending, os operadores de rede podem influenciar o processo de seleção de caminho e direcionar o tráfego nas direções desejadas [18, 5].

Na Figura 2 podemos compreender melhor funcionamento desta técnica. Neste exemplo, o AS10 propaga sua rota através do AS20 e AS30. Na rota enviada para o AS30 o atributo AS-Path teve o AS10 inserido apenas uma vez. Já para o AS20, seu ASN é inserido duas vezes, além do convencional. Isso fará com que os próximos Sistemas Autônomos, que receberem essas informações, identifiquem este caminho como mais longo, possivelmente escolhendo a rota do AS30 para transmissão dos dados.

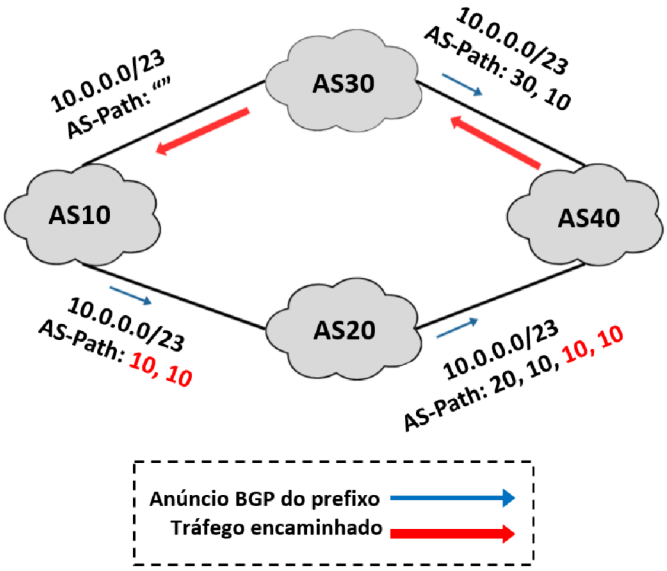


Figura 2: Técnica de AS-Path Prepend

2.4.2 Anúncio Seletivo de Prefixo

O anúncio seletivo de prefixo refere-se à prática de escolher quais prefixos de rede um sistema autônomo irá anunciar para seus vizinhos no BGP. Esta seleção é feita com base em várias políticas e considerações, como segurança, eficiência do roteamento e acordos comerciais.

Ao anunciar seletivamente os prefixos, um AS pode direcionar o tráfego para seguir determinados caminhos ou evitar enlaces congestionados dentro de sua rede. Isso permite uma engenharia de tráfego eficiente e balanceamento de carga. Por exemplo, um AS pode anunciar um prefixo para apenas um Sistema Autônomo vizinho específico, para atrair tráfego através de outro vizinho, distribuindo a sua carga. Na Figura 3 podemos observar que o AS10 optou por não anunciar o prefixo 10.0.0.0/23 ao AS30. Neste caso, se o AS40 necessitar transmitir informações para o AS10, utilizará a rota através do AS20, evitando a rota através do AS30 livre.

Os Anúncios Seletivos de Prefixos podem dificultar a tolerância a falhas e resiliência de rede. Caso o enlace por onde foi propagado a rota venha a falhar, não haveria redundância na conexão.

É importante que os operadores de rede planejem e configurem cuidadosamente seus anúncios seletivos de prefixos para alcançar os objetivos desejados de engenharia de tráfego, ao mesmo tempo em que mantêm a estabilidade e escalabilidade do sistema de roteamento [10].

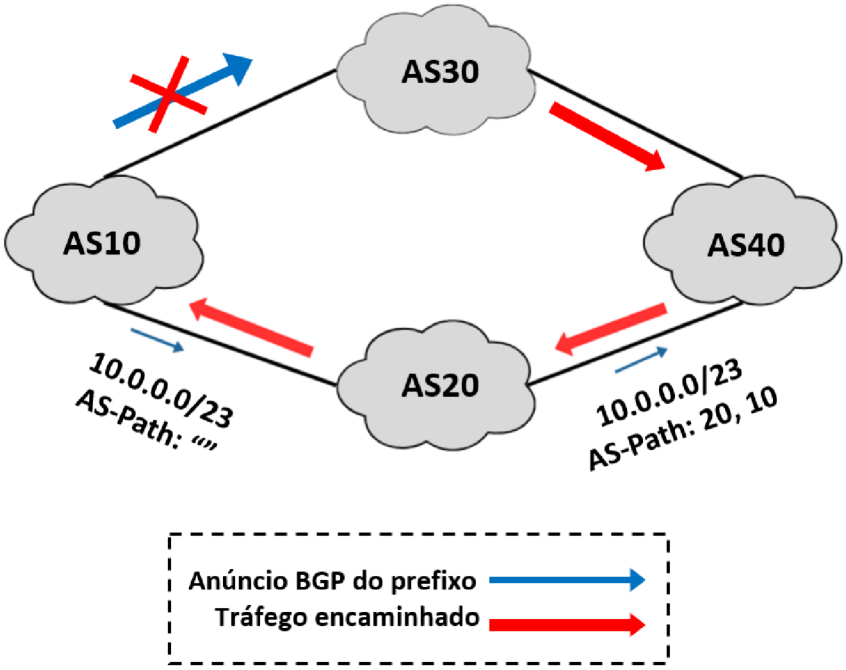


Figura 3: Técnica de Anúncio Seletivo

2.4.3 Anúncio de Prefixo Mais Específico

Anúncios de prefixos mais específicos, frequentemente referidos como desagregação de prefixos ou roteamento mais específico, é uma técnica em que um Sistema Autônomo anuncia sub prefixos ou prefixos de endereços IP individuais para o sistema global de roteamento do Protocolo BGP em vez de usar prefixos agregados e resumidos. Isso significa que, em vez de anunciar um prefixo maior e agregado, um AS anuncia sub-redes menores e mais específicas de seu espaço de endereço alocado.

Os ASes utilizam essa prática para influenciar o caminho e o roteamento do tráfego de entrada. Ao anunciar sub prefixos individualmente, os administradores de rede podem otimizar o fluxo de tráfego em sua infraestrutura de rede. Isso pode ser especialmente valioso em cenários em que o tráfego precisa ser direcionado por enlaces específicos ou por pontos específicos na rede.

Uma aplicação importante dos anúncios de prefixos mais específicos é o balanceamento de carga. Os ASes podem distribuir o tráfego de entrada de forma mais equilibrada em sua infraestrutura, anunciando sub prefixos para várias partes de sua rede. Isso ajuda a evitar o congestionamento de rede em enlaces específicos e garante uma utilização equilibrada dos recursos. Na Figura 4 podemos observar que o AS10 optou por influenciar o recebimento do tráfego do AS30 através de seu prefixo original e propagou parte dele, sendo o 10.0.1.0/24, influenciando o tráfego do AS20 a passar por ali. É esperado que o AS40 opte, inicialmente, por utilizar a rota do AS20 para chegar no AS10, utilizando o prefixo mais específico, já que este é o primeiro critério usado pelo protocolo BGP. A rota

com prefixo menos específico ficará com um tráfego menor, evitando congestionamento [10].

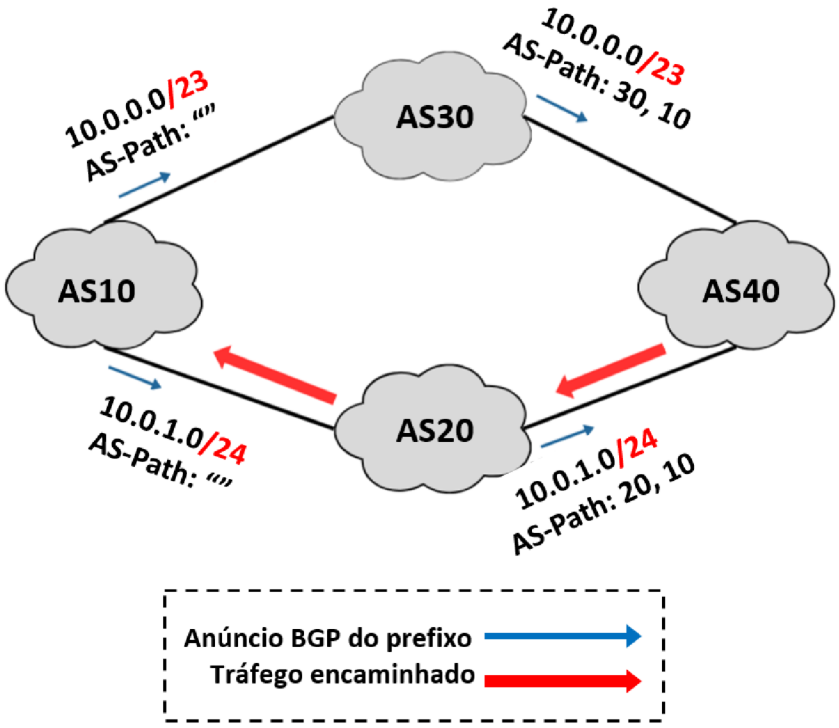


Figura 4: Técnica de Anúncio de Prefixo mais Específico

2.5 Coletores de Rotas

Coletores de rotas desempenham um papel fundamental no estudo e análise do comportamento dos Sistemas Autônomos (ASes) na Internet. Esses coletores são responsáveis por capturar e armazenar dados de roteamento, permitindo que pesquisadores e engenheiros de rede observem e compreendam as decisões de encaminhamento feitas pelos ASes. Analisando a base de dados destes coletores, podemos detectar variações nas tabelas de roteamento BGP, o que nos ajuda a identificar como os ASes se comportam, especialmente em relação à engenharia de tráfego.

Em nosso trabalho, utilizaremos coletores de rotas que disponibilizam publicamente dados de roteamento BGP, capturados de diversos pontos ao redor do mundo. Eles nos permitem visualizar como diferentes ASes anunciam e propagam rotas, especialmente de forma regional, fornecendo uma excelente base de dados para nossas análises. Todos estes dados coletados ficam armazenados em arquivos no formato *Multi-threaded Routing Toolkit* (MRT).

O ***Multi-Threaded Routing Toolkit*** **(MRT)** é um formato amplamente utilizado para exportar e armazenar dados de roteamento BGP. Desenvolvido para fornecer um meio eficiente e detalhado de registrar informações de roteamento, o MRT é essencial para a

análise e pesquisa no campo de redes. A especificação mais recente deste formato está documentada na RFC 8050 [2].

O formato MRT captura e armazena grandes volumes de dados de roteamento, incluindo anúncios de prefixos realizados pelos Sistemas Autônomos, detalhes sobre os ASes que realizam esses anúncios, e informações sobre os monitores de rede. Esses dados estruturados são essenciais para a análise do comportamento de roteamento BGP, permitindo a identificação de padrões e anomalias, além de serem compatíveis com diversas ferramentas de análise de rede, o que facilita a pesquisa e otimização de redes.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, abordaremos os trabalhos que serviram como base para nossa pesquisa científica. Nestes trabalhos procuramos aspectos sobre usabilidade, proporção ou intensidade de uso de alguma das técnicas de engenharia de tráfego de entrada que estudamos. Embora estas pesquisas tenham utilizado metodologias diferentes das nossas, conseguiram nos auxiliar com mais clareza sobre como as técnicas funcionam, além de nos ajudar a entender as dificuldades nas análises, como no Anúncio Seletivo de Prefixo, por exemplo. Para facilitar o entendimento, optamos por dividir as seções de trabalhos relacionados de acordo com o assunto abordado.

3.1 Engenharia de Tráfego

Na pesquisa conduzida por Castellanos et al. [4], os autores fizeram importantes contribuições ao entendimento do comportamento dos Sistemas Autônomos (ASes) em relação a técnicas de engenharia de tráfego, especialmente no contexto da Internet global. O trabalho apresenta uma abordagem sistemática para identificar sinais de engenharia de tráfego utilizando dados públicos do BGP, abordando como as técnicas de anúncios seletivos e manipulação de rotas são empregadas para atingir objetivos específicos.

Uma das principais constatações do estudo é que a prática de manipulação de rotas no BGP é amplamente utilizada, mas frequentemente difícil de ser detectada diretamente devido à falta de visibilidade completa das políticas internas dos ASes. Os autores introduzem métricas e métodos que correlacionam alterações no AS-Path e variações na visibilidade de prefixos para inferir o uso de técnicas como AS-Path Prepending e Anúncios Seletivos.

Além disso, a análise revelou que a intensidade do uso dessas técnicas varia significativamente entre ASes de diferentes tamanhos e regiões, indicando que fatores econômicos e estruturais desempenham um papel crucial. ASes menores tendem a utilizar anúncios seletivos de forma mais agressiva para evitar sobrecarga de tráfego ou melhorar a conectividade com redes estratégicas, enquanto grandes provedores utilizam técnicas mais estáveis para otimização de custo e controle de tráfego.

Os autores também destacam a importância de ferramentas estatísticas robustas na análise de rotas BGP. Por exemplo, variações súbitas na visibilidade de prefixos em múltiplos coletores foram associadas à aplicação de técnicas específicas, indicando que a correlação entre diferentes fontes de dados é fundamental para identificar práticas de engenharia de tráfego de forma precisa.

3.2 Relacionamento entre Sistemas Autônomos

O trabalho de Xu et al. [29] examina as diferenças entre os algoritmos *ASRank* [3], *ProbLink* [15] e *TopoScope* [14] no contexto da inferência de relacionamentos entre Sistemas Autônomos. O estudo destaca que o *ASRank* é eficiente em identificar relações provedor-cliente, sendo baseado em modelos de hierarquia, mas pode ser limitado em situações onde essas hierarquias não são claramente definidas. O *ProbLink*, por outro lado, utiliza técnicas probabilísticas para inferir relacionamentos, o que permite uma maior flexibilidade e adaptabilidade a diferentes cenários, embora possa apresentar maior complexidade computacional. Já o *TopoScope* se foca na análise topológica da rede, proporcionando uma visão mais detalhada das interconexões entre ASes, porém pode ser menos eficaz em redes com menos informações disponíveis.

Além disso, o artigo de Xu et al. (2021) propõe um *framework* inovador para criar *datasets* de validação, facilitando a avaliação e o aprimoramento dos modelos de inferência. Isso é particularmente importante para validar as deduções feitas pelos algoritmos e garantir que as decisões tomadas pelos operadores de rede sejam baseadas em dados precisos.

3.3 AS-Path Prepending

Analisando os trabalhos relacionados à técnica AS-Path Prepend buscamos compreender como os autores expuseram os aspectos de uso em suas análises. Na pesquisa conduzida por Marcos et al. (2020), foi destacado que cerca de 30% dos ASes utilizam a técnica ASPP, sendo que 25% dos prefixos IPv4 são originados com algum nível de prepending. Além disso, o estudo apontou que 18% dos prefixos com *prepend* são vulneráveis a sequestros de prefixo, evidenciando a necessidade de uma aplicação cuidadosa para evitar a amplificação de riscos de segurança e rotas ineficazes [18].

Na pesquisa conduzida por Wang et al. (2007), os autores propõem o *AutoPrepend*, uma abordagem automatizada para melhorar a eficácia da ASPP. Eles observaram que a técnica é usada por cerca de 33% Sistemas Autônomos que se conectam a múltiplos provedores de internet, conhecidos como *multihomed*. Essa configuração permite que essas redes tenham múltiplas rotas para o tráfego, aumentando a segurança e a estabilidade. Os autores destacaram que o uso moderado de AS-Path Prepend, com tamanho dois ou três, é o mais comum, pois oferece um equilíbrio eficaz entre influenciar o tráfego e evitar

problemas como instabilidade na rede [28].

De acordo com Chang et al. (2005), a técnica ASPP foi explorada de forma prática, revelando que mais de 12% das rotas analisadas envolvem algum nível de *prepending*. No entanto, a aplicação da técnica muitas vezes ocorre de maneira experimental ou empírica, resultando em eficácia limitada, especialmente em cenários com poucos provedores de trânsito (*upstreams*) ou onde políticas de *prepending* são aplicadas de forma independente por diferentes ASes. O estudo sugere a implementação de abordagens mais sistemáticas, como o *Greedy ASPP Search*, um algoritmo projetado para otimizar o uso da técnica ao encontrar a melhor configuração de *prepending* que maximize a eficiência e minimiza os riscos de instabilidade [5].

3.4 Anúncio Seletivo de Prefixo

Na pesquisa conduzida por Kastanakis et al. (2023), os autores fazem importantes contribuições ao entendimento da usabilidade, proporção de uso e intensidade de uso da técnica de anúncio seletivo ao longo das últimas duas décadas. Uma das principais contribuições do trabalho é a evidência de que a prática de anúncios seletivos de prefixos se manteve não apenas persistente ao longo do tempo, mas também se tornou mais prevalente entre diferentes sistemas autônomos (ASes). Os autores conduziram uma análise longitudinal que mostra que a proporção de prefixos anunciados seletivamente aumentou significativamente desde 2003, com alguns ASes apresentando um aumento de até 30% na utilização dessa técnica. A pesquisa revela que a intensidade do uso de anúncios seletivos varia substancialmente entre os ASes, sugerindo que as políticas de roteamento se tornaram mais dinâmicas e adaptativas com o passar dos anos. Este crescimento na utilização está associado às mudanças topológicas na estrutura da Internet, como o aumento das interconexões *peer-to-peer* e a evolução das estratégias de *peering*, que tornaram a técnica de anúncios seletivos mais relevante e amplamente empregada. Este trabalho também destaca a importância da periodicidade na análise das políticas de roteamento, mostrando que a prática de anúncios seletivos pode apresentar variações significativas não apenas entre diferentes ASes, mas também ao longo do tempo dentro do mesmo AS. Os resultados indicam que a técnica é utilizada de forma estratégica para atingir objetivos específicos, como controle de tráfego e redução de custos, e que a flexibilidade e a variabilidade do uso são influenciadas por fatores econômicos e de desempenho [16].

3.5 Anúncio de Prefixo Mais Específico

O estudo realizado por Milolidakis et al. revela que a técnica de anúncios de rotas mais específicas é extremamente eficaz para maximizar o impacto de sequestros de BGP, redirecionando grandes volumes de tráfego para o sequestrador. Ao explorar a preferência

do BGP por rotas mais específicas, os invasores conseguem desviar o tráfego destinado aos prefixos legítimos, tornando essa técnica uma ferramenta poderosa em ataques de intercepção de tráfego. No entanto, o artigo destaca que essa abordagem aumenta a visibilidade do ataque para os monitores de rota, o que eleva o risco de detecção, criando um desafio para os sequestradores que buscam manter a furtividade.

Além disso, Milolidakis et al. [10] discutem como os sequestradores podem ajustar o comprimento do caminho de AS (AS-path) e selecionar cuidadosamente os prefixos anunciados para equilibrar entre o impacto no tráfego e a furtividade do ataque. Embora o artigo não forneça dados quantitativos sobre a frequência de uso dessa técnica em redes reais, ele oferece uma análise detalhada de como essas estratégias podem ser implementadas para evitar a detecção por coletores de rotas públicos, contribuindo para o entendimento das vulnerabilidades no sistema BGP e informando práticas de segurança mais eficientes [20].

Já o trabalho de Gamba et al. (2017), mostra que a desagregação de prefixos tem sido identificada como um dos principais fatores contribuintes para o crescimento das tabelas de roteamento BGP, representando um desafio significativo para a escalabilidade da Internet. De acordo os autores, a proporção de prefixos desagregados quase dobrou nos últimos quinze anos, passando de 22% em 2003 para 38% em 2017. Essa desagregação, embora utilizada por muitos ASes para fins de engenharia de tráfego, resulta em uma maior instabilidade, com esses prefixos aparecendo e desaparecendo com mais frequência em comparação com outros tipos de prefixos. Esse aumento na desagregação reflete não apenas mudanças nas práticas operacionais dos ASes, mas também a necessidade crescente de otimização do tráfego em uma infraestrutura de rede cada vez mais complexa.

Além disso, o uso de prefixos desagregados para engenharia de tráfego é uma prática amplamente adotada, especialmente entre grandes provedores de trânsito. Gamba et al. (2017) destacam que esses prefixos são frequentemente anunciados de maneira seletiva, indicando um esforço deliberado para controlar o fluxo de tráfego. A fragmentação resultante dessa prática, no entanto, tem um impacto negativo no tamanho das tabelas de roteamento, aumentando a carga sobre os recursos de roteamento e potencialmente degradando o desempenho da rede. Embora a agregação desses prefixos pudesse reduzir o tamanho das tabelas de roteamento em aproximadamente 20%, muitos operadores de rede continuam a fragmentar seus prefixos, seja para maximizar a eficiência de seus links de trânsito, ou para gerenciar melhor seus PoPs, que são pontos físicos onde os provedores de serviços de Internet ou outras organizações de rede conectam seus equipamentos de rede à infraestrutura de *backbone* da Internet.

Por fim, o estudo revela um fenômeno interessante de ”desagregação oculta”, onde prefixos que parecem ser solitários na verdade refletem uma prática de desagregação disfarçada. Isso ocorre quando um AS, que possui um prefixo maior, opta por anunciar apenas subpartes menores desse prefixo, possivelmente para manter redundância ou para

aplicar uma estratégia específica de engenharia de tráfego. Gamba et al. (2017) sugerem que a agregação desses prefixos poderia não apenas melhorar a eficiência do roteamento, mas também contribuir significativamente para a redução do tamanho das tabelas de roteamento BGP, um benefício que, até agora, tem sido subaproveitado na prática operacional de muitos provedores de rede.

4 METODOLOGIA

4.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é compreender como os ASes utilizam a engenharia de tráfego na Internet. Iremos analisar rotas anunciadas por ASes, obtidas em bases de dados públicas, para compreender de que forma é aplicada a engenharia de tráfego por estes sistemas e observar se há um comportamento padrão na utilização das técnicas ou relação entre proporção e intensidade, quando há aplicação de técnicas diferentes pelos mesmos ASes.

4.2 Base de dados

4.2.1 Dados de Roteamento

Os nossos dados de roteamento foram obtidos a partir de três fontes principais: os projetos RouteViews, RIPE Routing Information Service (RIPE RIS) e Packet Clearing House (PCH). Essas plataformas são amplamente reconhecidas por fornecerem informações públicas e acessíveis sobre o comportamento do BGP (Border Gateway Protocol) ao redor do mundo.

O RouteViews é um projeto que conta com 39 coletores de rede distribuídos em 19 países, abrangendo regiões como América do Norte, América do Sul, Europa, África, Ásia e Oceania. Esses coletores capturam informações no formato MRT, permitindo observar os prefixos anunciados, os sistemas autônomos (ASes) envolvidos, os vizinhos conectados a esses ASes, bem como outras informações relevantes para a análise de engenharia de tráfego.

Já o RIPE RIS é um serviço global operado pelo RIPE NCC (Réseaux IP Européens Network Coordination Centre), que coleta e armazena dados BGP em tempo real, por meio de uma rede de Route Collectors estrategicamente localizados. O objetivo do RIPE RIS é monitorar as dinâmicas do roteamento global e oferecer uma visão abrangente da conectividade entre ASes. Os dados capturados pelo RIPE RIS complementam os do RouteViews ao fornecer perspectivas adicionais sobre diferentes regiões e topologias.

Por sua vez, o Packet Clearing House (PCH) é uma organização sem fins lucrativos que opera uma infraestrutura de suporte para pontos de troca de tráfego (IXPs). Os dados de roteamento disponibilizados pelo PCH são coletados a partir de uma ampla variedade de IXPs ao redor do mundo, sendo particularmente valiosos para entender as dinâmicas locais e regionais de conectividade.

Para nossas análises, selecionamos 10 diferentes coletores distribuídos entre as três fontes de dados mencionadas, priorizando aqueles com maior relevância na observação de enlaces IPv4 e IPv6. A relevância foi estudada previamente em nosso grupo de pesquisa de forma à detectar quantos enlaces possíveis eram visíveis em cada coletor. Os coletores selecionados do RIPE RIS foram os seguintes: **rrc00, rrc03, rrc12, rrc15 e rrc25**. Do Route Views, escolhemos os coletores **route-views2.saopaulo, route-views.linx e route-views3**. Por fim, os coletores selecionados do PCH foram **route-collector.netix.pch.net** e **route-collector.icn.pch.net**. Todos os coletores possuem dados para IPv4 e IPv6, e foram baixados entre **outubro de 2023 e novembro de 2024**, representando o comportamento dos ASes no período de **15 de junho de 2014 até 15 de junho de 2024**.

4.2.2 Dados de Alocação

Os dados de alocação utilizados no trabalho foram obtidos do diretório de estatísticas do LACNIC [17], que contém dados detalhados sobre a alocação de recursos de rede, para cada dia de nossa análise, como endereços IP e números de Sistemas Autônomos (ASNs). Assim temos conhecimento de quais ASNs estavam alocados em cada dia da análise. Esses dados são coletados e publicados regularmente pelos Registros Regionais da Internet (RIRs) e forneceram uma visão abrangente da distribuição global desses recursos. Através dessas informações, foi possível identificar as regiões da IANA da qual os ASes estavam alocados.

4.3 Protocolos e técnicas analisadas

Nosso trabalho irá analisar rotas anunciadas para os protocolos IPv4 e IPv6, de ASes que estejam utilizam as técnicas AS-Path Prepend, Anúncio Seletivo ou Anúncio de Prefixo mais Específico. Consideramos ASes alocados em uma das 5 regiões da IANA, sendo AFRINIC, ARIN, APNIC, LACNIC e RIPE NCC. Para analisar os ASes por tipo, utilizamos os dados dos ASes obtidos na plataforma “IPinfo” [13], considerando a classificação utilizada pela plataforma. Os ASes estão divididos em Provedores de Serviços de Internet(ISP), Serviços de Hospedagem, Negócios, Governo, Educação e demais ASes que não possuem tipo registrado.

4.4 Sanitização

Para garantir a precisão das nossas análises, realizamos uma sanitização dos dados coletados, excluindo rotas que contêm prefixos bogon [6]. Rotas bogons são rotas BGP que contêm prefixos de endereços IP que, por diversas razões, não deveriam ser anunciados na Internet pública. Esses prefixos incluem blocos de endereços IP não alocados pela IANA ou pelos Registros Regionais da Internet, além de faixas reservadas para uso privado, documentação, ou outros fins específicos que não envolvem roteamento público. Por exemplo, endereços na faixa 10.0.0.0/8 são destinados a redes privadas e nunca devem ser roteados na Internet. Quando tais endereços são anunciados como rotas BGP, eles são considerados bogons. Se não filtrados adequadamente, rotas bogons podem não apenas aumentar o volume de dados a ser processado, mas também pode mascarar padrões reais de roteamento ao misturar rotas válidas com inválidas. Isso ainda resultaria em mais recurso de processamento, uma vez que as bases de dados válidas já são bem extensas.

4.5 Métricas de análise

Primeiramente observamos aspectos relacionados ao **uso da técnica**. Começamentos analisando as técnicas **AS-Path Prepend**, **Anúncio de Prefixo Mais Específico** e **Anúncio Seletivo**, focando em como os sistemas autônomos (ASes) utilizam essas técnicas de forma global, regional e segmentados por tipo de AS.

Quanto à **proporção de uso**, buscamos observar ao que se refere à quantidade de prefixos anunciados em que os ASes aplicam essas técnicas. Essa métrica nos permite entender a extensão do uso das técnicas por parte dos ASes em diferentes regiões, nos protocolos IPv4 e IPv6.

Por fim, buscamos compreender a **intensidade de uso**. Para o AS-Path Prepend, isso envolveu analisar o tamanho dos *prepends* utilizados pelos ASes. No caso do Anúncio de Prefixo Mais Específico, a intensidade foi medida pelo nível de desagregação dos prefixos. Por fim, para o Anúncio Seletivo, buscamos observar como os ASes selecionavam os vizinhos para quem anunciavam. Essas análises foram realizadas considerando amostras que incluem o conjunto de prefixos anunciados, o anunciante e o vizinho direto que recebeu o anúncio de rota.

Após essa análise inicial, correlacionamos os resultados das três técnicas para identificar se os ASes que utilizam uma delas também empregam a outra. Além disso, verificamos a existência de relações entre a proporção e a intensidade de uso das técnicas, considerando variações comportamentais por região e versão de protocolo IP, uma vez que detectamos comportamentos diferentes de acordo com a região observada.

5 RESULTADOS

Para melhor compreensão dos resultados, dividimos os resultados de acordo com o protocolo de rede analisado. Após as análises individuais para IPv4 e IPv6, realizamos uma análise mais ampla do uso das técnicas, correlacionando os ASes que anunciaram prefixos nos dois protocolos.

5.1 Considerações de desempenho

As análises foram processadas em um computador pessoal utilizando a linguagem Python 3.12, com processador Intel Core i5 9600KF, de 6 núcleos e 6 threads, 32GB de memória RAM DDR4, 2TB de armazenamento NVMe e 3TB de armazenamento em HD. Os códigos utilizados nas análises foram disponibilizados em diretório público do GitHub, para apreciação e base para análises na área do estudo [19].

O tamanho total da nossa base de dados, incluindo os resultados obtidos nas análises, foi de 2,9 Terabytes. Cada data analisada consistiu em até 10 arquivos, correspondendo a cada coletor de rotas BGP. Esses arquivos podiam possuir até 55 milhões de rotas registradas em um dia, chegando a um tamanho de armazenamento de 7 Gigabytes. Ao todo, trabalhamos com 1.335 arquivos, que contemplaram 10 anos de observação, de 15 de junho de 2014 a 15 de junho de 2024.

Na primeira data de análise dos dados, 15 de junho de 2014, levamos cerca de 15 minutos para processar todos os coletores. Já na última data, 15 de junho de 2024, o tempo foi de aproximadamente 48 minutos. A análise completa, abrangendo os 120 meses do estudo, levou cerca de 63 horas para ser concluída.

5.2 Sistemas Autônomos e Prefixos Analisados

Em nossas análises, consideramos exclusivamente os Sistemas Autônomos (ASes) originadores de prefixos IPv4 e IPv6. Para ambos os protocolos, não incluímos ASes que apareceram no meio das rotas, analisando apenas prefixos válidos e descartando prefixos bogons. No caso do IPv4, delimitamos a análise entre prefixos /8 e /24, enquanto para o IPv6, o intervalo foi definido entre /29 e /48. Essas escolhas foram motivadas pela

relevância dos prefixos nas tabelas BGP e pela necessidade de garantir uma análise focada e computacionalmente viável.

Para o IPv4, descartamos prefixos menos específicos que /8 e mais específicos que /24, garantindo que a análise se concentrasse em dados representativos. Já para o IPv6, a limitação entre /29 e /48 foi essencial para evitar a explosão combinatória gerada pela desagregação de prefixos, especialmente considerando que cada /29 pode ser desagregado em 524.288 prefixos /48. Essa abordagem permitiu um estudo mais confiável e proporcional ao realizado no IPv4, onde prefixos /8 foram desagregados para /24.

Ao longo dos 10 anos de dados analisados, descartamos, em média, 1,2% das rotas IPv4 e 0,3% das rotas IPv6, que se encaixaram nos critérios de exclusão mencionados. Essa filtragem assegurou que os resultados obtidos fossem representativos e confiáveis, com foco nos prefixos mais relevantes para as técnicas analisadas, como o Anúncio Seletivo.

5.2.1 Evolução dos ASes e Prefixos por Região

A Figura 5 apresenta a evolução do número total de ASes originadores de prefixos IPv4 por região, considerando AFRINIC, APNIC, ARIN, LACNIC e RIPENCC, de 2014 a 2024. Os dados absolutos demonstram um crescimento significativo no número total de ASes, passando de 46.612 em junho de 2014 para 75.429 em junho de 2024. A região do RIPENCC liderou consistentemente em números absolutos, representando cerca de 43% do total ao longo da maior parte do período analisado. A APNIC e LACNIC destacaram-se pelo notável crescimento proporcional, evidenciando o rápido desenvolvimento da conectividade na região Ásia-Pacífico e América Latina. Em contrapartida, a AFRINIC, apesar de ter apresentado o menor número absoluto de ASes, registrou um pequeno aumento de 1,62% para 2,46% ASes.

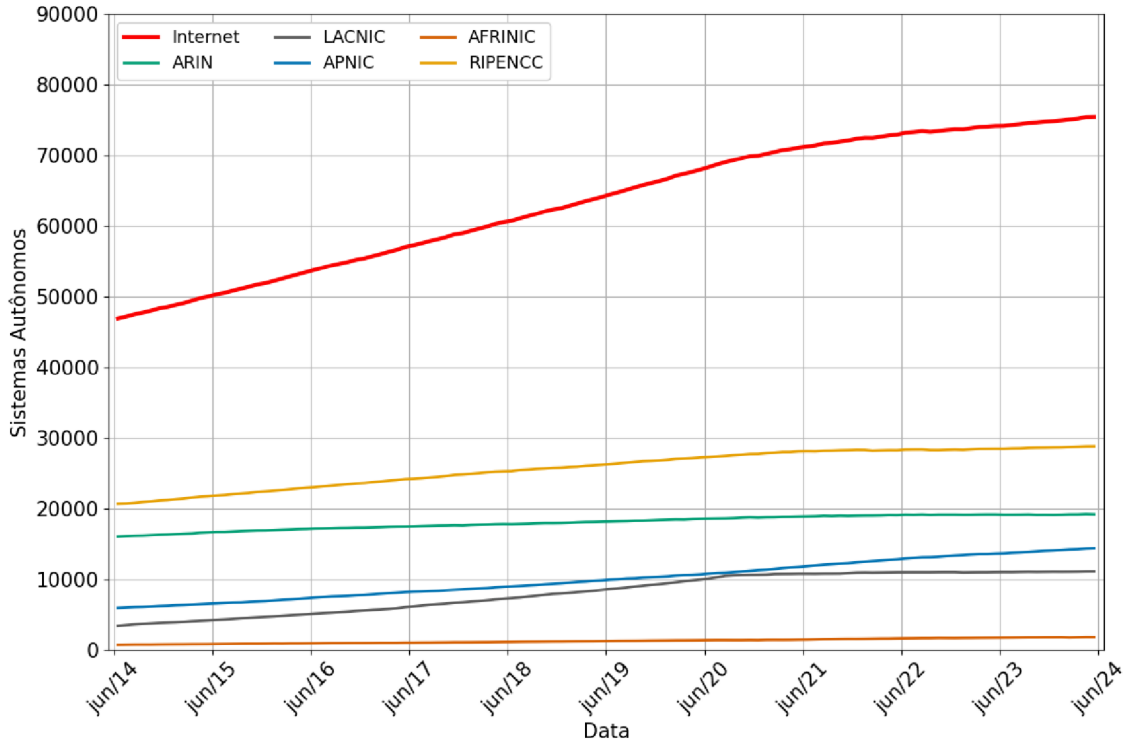


Figura 5: ASes anunciando prefixos IPv4 segmentados por região.

Para o IPv6, a Figura 6 apresenta a evolução do número total de ASes originadores de prefixos por região no mesmo período. Regiões mais desenvolvidas tecnologicamente, como a RIPENCC (Europa) e a ARIN (América do Norte), concentram o maior número de ASes. A APNIC (Ásia-Pacífico) também apresenta um número significativo, refletindo o rápido crescimento econômico e a expansão da infraestrutura digital em países asiáticos. Em contrapartida, a AFRINIC (África) registra o menor número de ASes, ilustrando desafios de conectividade e infraestrutura tecnológica no continente, frequentemente associados a fatores econômicos e políticos.

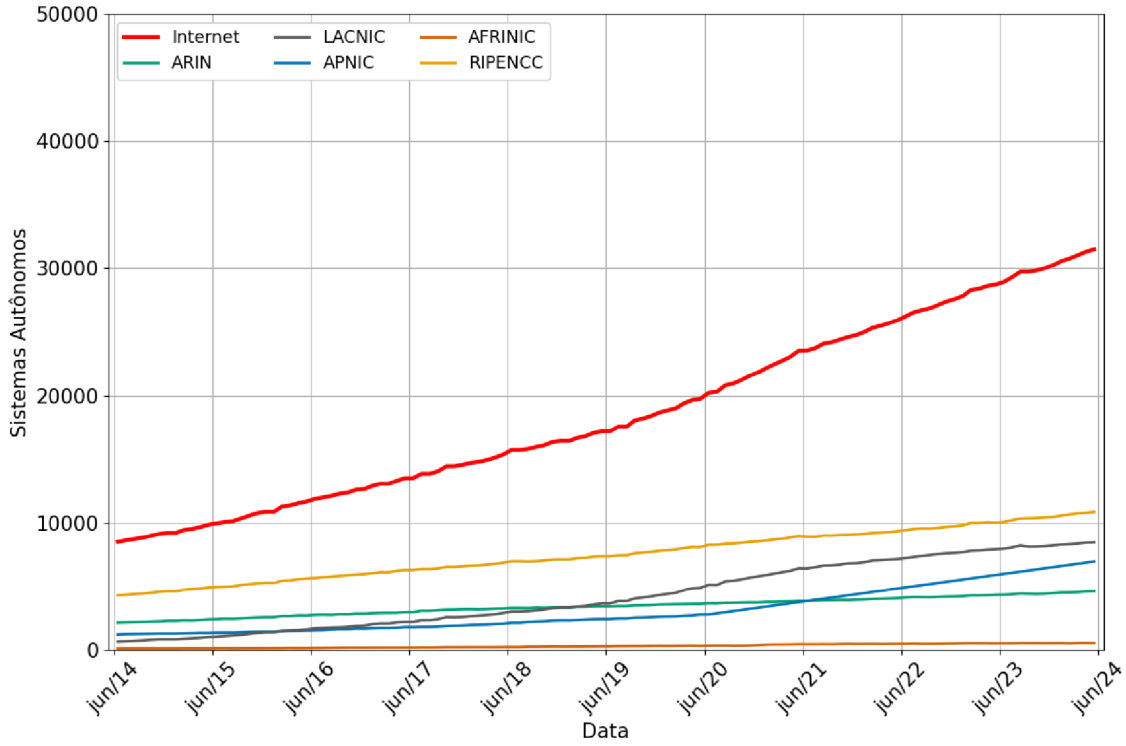


Figura 6: ASes anunciando prefixos IPv6 segmentados por região.

A Figura 7 apresenta o número total de prefixos IPv4 anunciados, agrupados de acordo com a região do AS originador, ao longo do período analisado. Os resultados mostraram um crescimento significativo no total de prefixos IPv4 anunciados, passando de 529.102 em junho de 2014 para 1.042.385 em junho de 2024. A região RIPENCC liderou em números absolutos ao longo de todo o período, com um aumento de mais de 118% nos prefixos anunciados. A APNIC seguiu como a segunda maior contribuinte, com crescimento expressivo de mais de 105% no mesmo período, refletindo a intensa atividade de anúncios na Ásia-Pacífico.

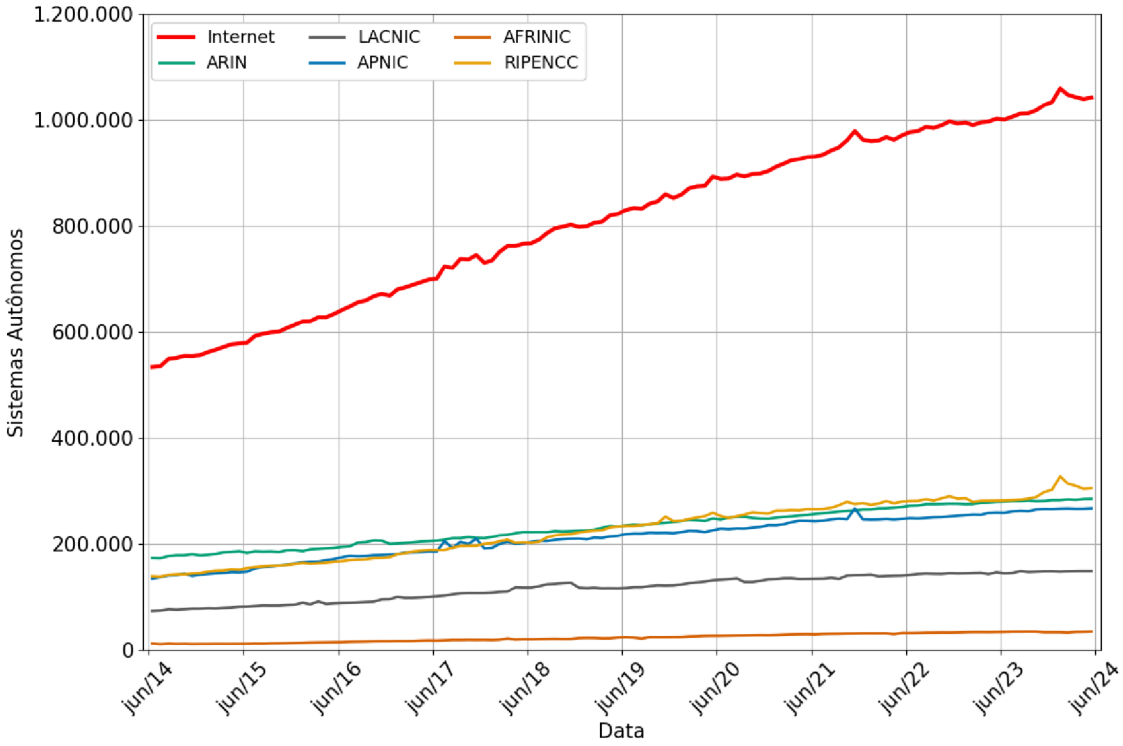


Figura 7: Prefixos IPv4 agrupados de acordo com a região do AS originador do prefixo.

Para o IPv6, a Figura 8 apresenta o número total de prefixos anunciados, agrupados por região. O crescimento expressivo na adoção do IPv6 é liderado pelas regiões APNIC e RIPENCC, enquanto a AFRINIC enfrenta desafios estruturais e econômicos que limitam seu progresso. A expansão na região da APNIC reflete o avanço tecnológico e a crescente demanda de endereços IP em países como China e Índia, enquanto na RIPENCC, o foco na modernização das infraestruturas e a maturidade das redes europeias impulsionam o aumento.

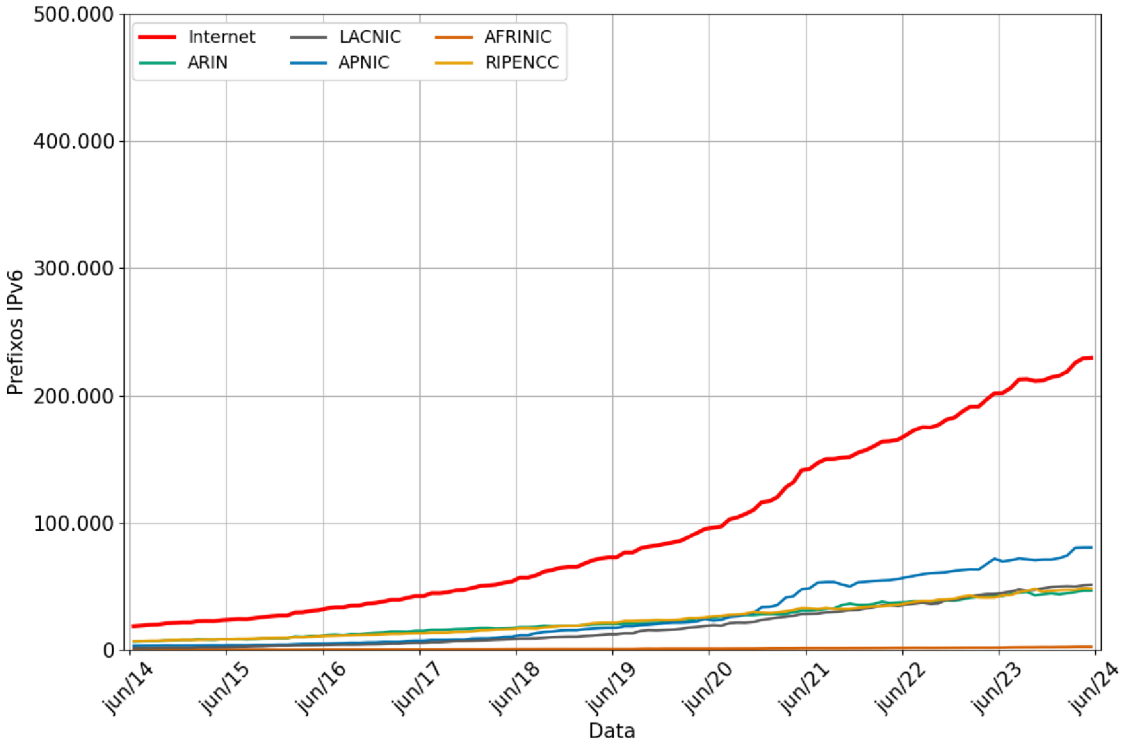


Figura 8: Prefixos IPv6 agrupados de acordo com a região do AS originador do prefixo.

5.2.2 Evolução dos ASes e Prefixos por Tipo

A Figura 9 apresenta a evolução do número total de ASes IPv4, categorizados de acordo com o tipo ou função, no período de 2014 a 2024. Os ASes voltados para **Negócios** foram os que apresentaram o maior crescimento, passando de 13.928 ASes em junho de 2014 para 25.798 em junho de 2024. Os provedores de Internet (**ISPs**) também registraram um crescimento expressivo, consolidando-se como a categoria mais numerosa em termos absolutos, representando cerca de 37,75% do total de ASes em 2024.

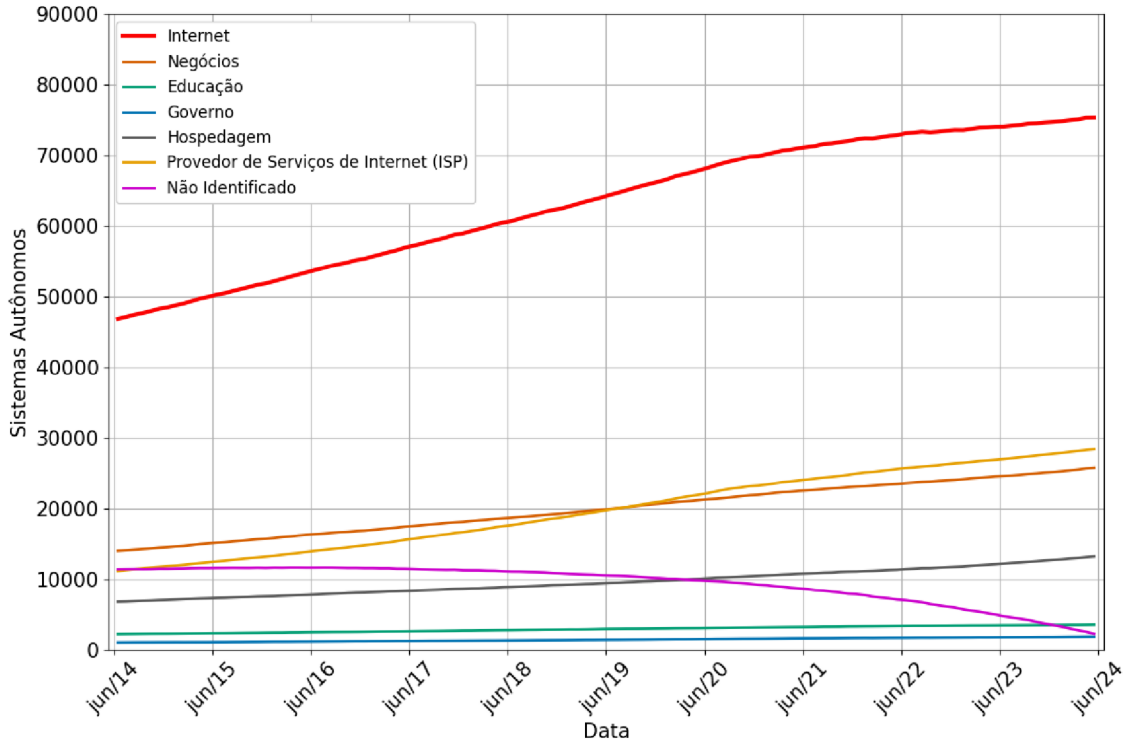


Figura 9: ASes anunciando prefixos IPv4, classificados por tipo de AS.

Para o IPv6, a Figura 10 apresenta a evolução do número total de ASes, categorizados por tipo. Os dados mostram que os ISPs e empresas de hospedagem dominam o cenário, seguidos por negócios e educação. O crescimento contínuo no número de ISPs reflete seu papel fundamental como intermediários no tráfego da Internet e sua necessidade de suportar a transição para IPv6. O setor de hospedagem, com aumento significativo, destaca a crescente demanda por serviços baseados em nuvem e a necessidade de endereços IPv6 para atender clientes globais.

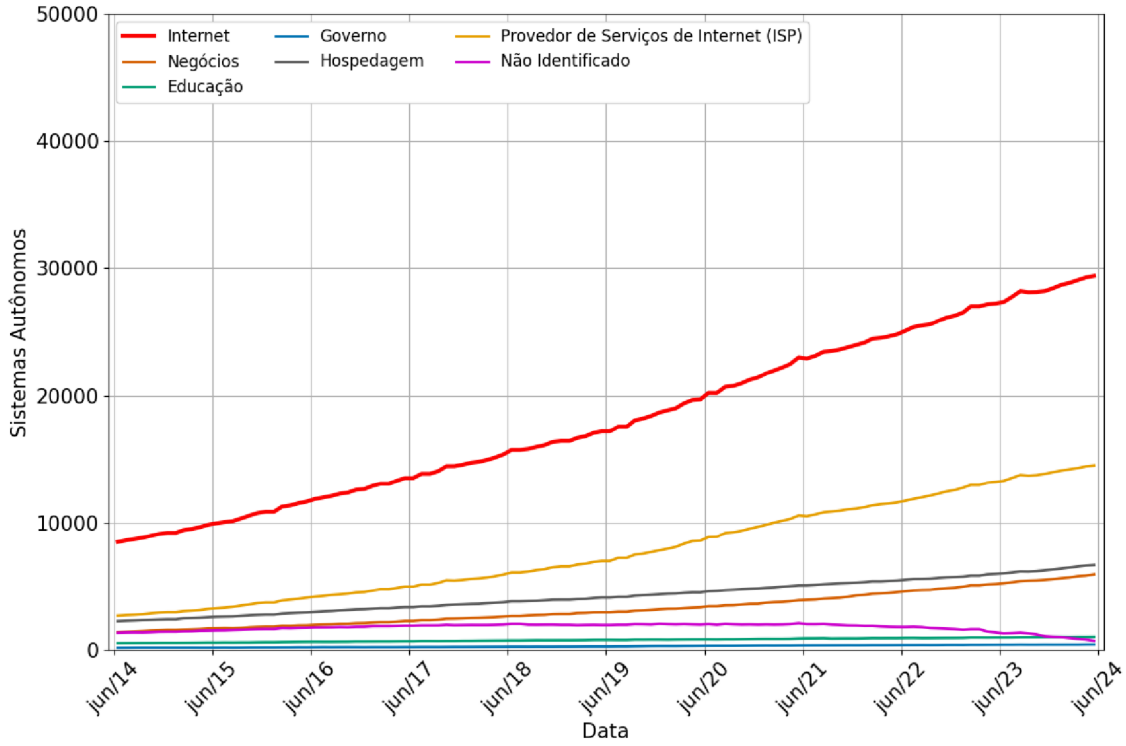


Figura 10: ASes anunciando prefixos IPv6, classificados por tipo de AS.

A Figura 11 apresenta o número total de prefixos IPv4 anunciados, segmentados pelo tipo do AS originador do prefixo. Os resultados indicaram que os provedores de Internet (**ISPs**) foram responsáveis pela maior parte dos prefixos anunciados, passando de 278.269 em junho de 2014 para 634.053 em junho de 2024. A categoria de **Negócios** também apresentou um crescimento significativo, passando de 57.944 prefixos anunciados em 2014 para 104.601 em 2024.

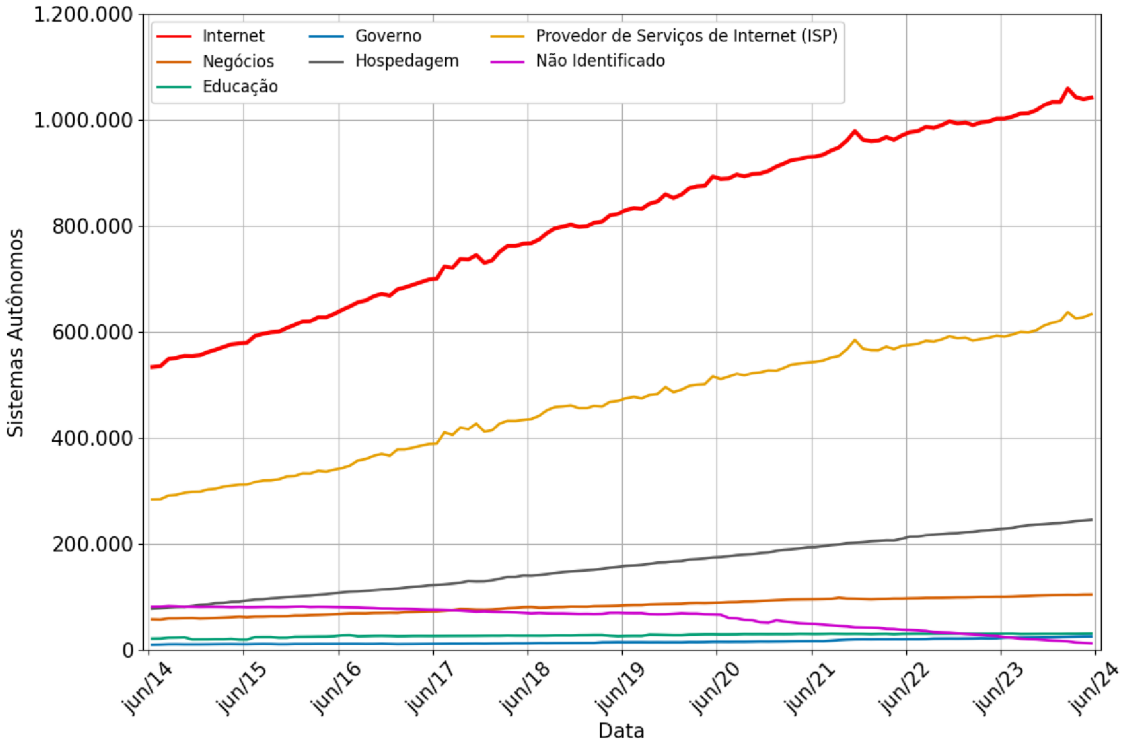


Figura 11: Prefixos IPv4 agrupados de acordo com o tipo do AS originador do prefixo.

Para o IPv6, a Figura 12 apresenta o número total de prefixos anunciados, segmentados pelo tipo do AS originador. Os ISPs e os provedores de hospedagem se destacam na quantidade de prefixos IPv6 anunciados, reforçando seu papel estratégico na conectividade dos ASes. Os ISPs lideram consistentemente no número de prefixos anunciados, refletindo sua importância na conectividade da Internet e na modernização das infraestruturas. Provedores de hospedagem seguem como segundo maior grupo, impulsionados pela crescente demanda de serviços online compatíveis com IPv6.

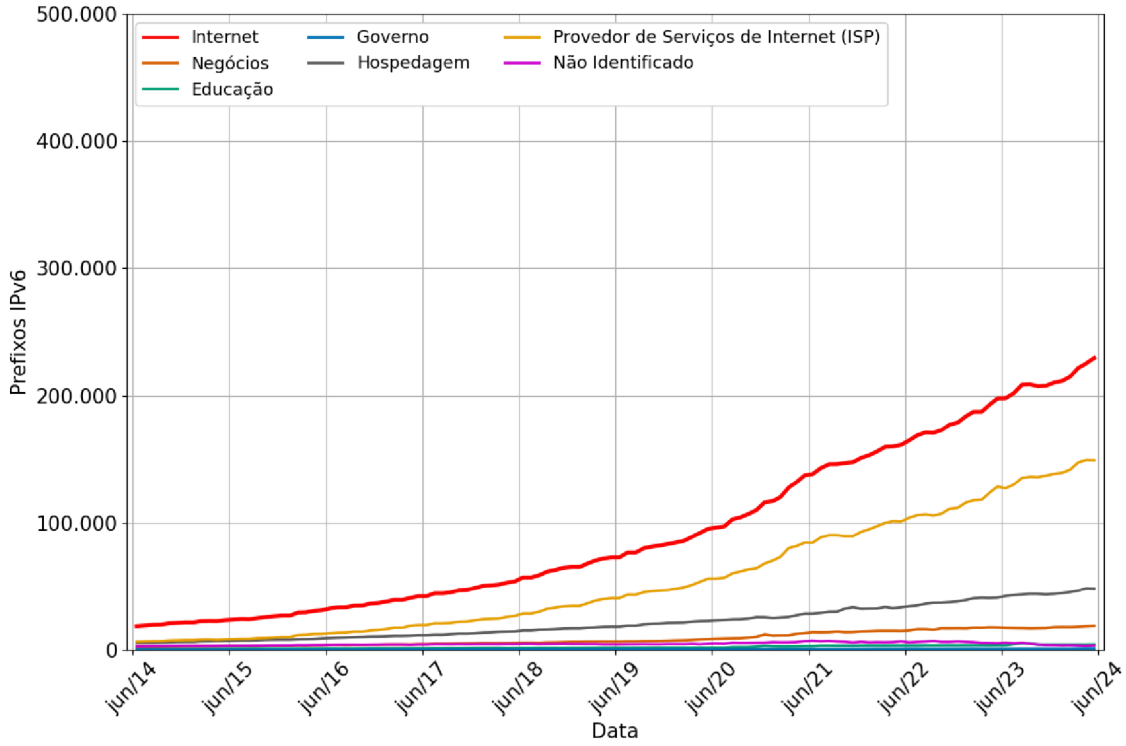


Figura 12: Prefixos IPv6 agrupados de acordo com o tipo do AS originador do prefixo.

Em resumo, as análises dos prefixos IPv4 e IPv6 revelaram padrões semelhantes em termos de crescimento e distribuição regional, mas com diferenças significativas na adoção por tipo de AS. Enquanto o IPv4 continua a ser amplamente utilizado, o IPv6 apresenta um crescimento acelerado, especialmente em regiões com infraestrutura tecnológica avançada e em setores como ISPs e hospedagem. Esses resultados destacam a importância de considerar as particularidades de cada protocolo ao analisar a evolução da conectividade global.

5.3 Técnica AS-Path Prepend (ASPP)

Nesta seção, analisaremos a técnica AS-Path Prepend (ASPP), uma prática do BGP que adiciona repetidamente o número do próprio Sistema Autônomo ao atributo AS-path, tornando um caminho menos atraente para outros ASes. A técnica é amplamente utilizada tanto em IPv4 quanto em IPv6, mas com diferenças significativas na adoção e aplicação, refletindo as particularidades de cada protocolo. Aqui, exploraremos a utilização, proporção e intensidade da técnica em ambos os protocolos, destacando padrões regionais e por tipo de AS.

5.3.1 Utilização

Para analisar a utilização da técnica ASPP, consideramos todos os ASes que foram observados utilizando *prepend* em seus anúncios como originadores de prefixos, ou seja, aqueles que aparecem na posição inicial da rota. A Figura 13 apresenta a fração de ASes que aplicaram essa técnica em cada uma das regiões definidas pela IANA, além de exibir os resultados no contexto global para IPv4.

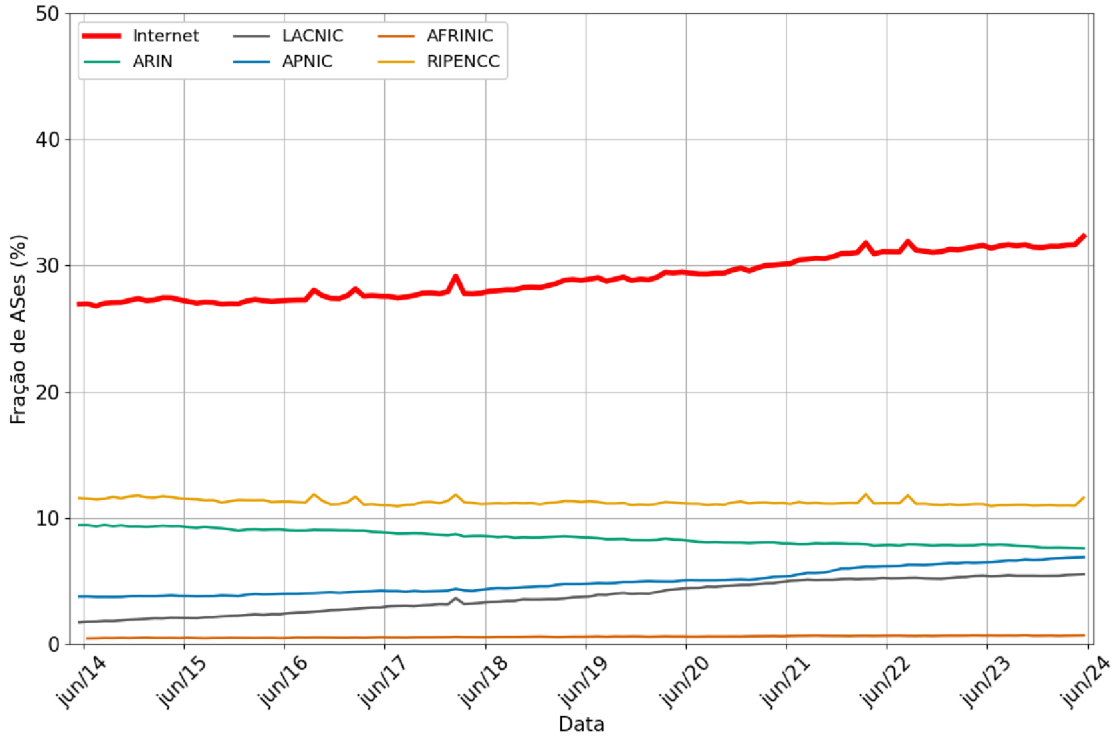


Figura 13: Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem, observados regional e globalmente - IPv4.

A fração de ASes utilizando ASPP apresentou um crescimento discreto ao longo do tempo, com variações regionais relevantes. Entre 2014 e 2024, a adoção global passou de 26,93% para 33,43%, indicando uma tendência de maior aplicação da técnica em diferentes regiões. A APNIC manteve-se como a região com maior percentual de utilização, subindo de 4,68% em 2014 para 7,25% em 2024, enquanto a LACNIC registrou o crescimento mais expressivo, alcançando 5,60% em 2024. Por outro lado, ARIN exibiu uma leve queda em seus percentuais.

Para o IPv6, a Figura 14 apresenta a fração de ASes que aplicaram a técnica ASPP em cada região. **LACNIC tem se destacado ao longo dos anos, pela quantidade de ASes anunciando prefixos IPv6, superando o RIPENCC a partir de 2022.** Essa inversão pode ser explicada por diversos fatores: o aumento de iniciativas regionais para adoção de boas práticas de engenharia de tráfego, maior conscientização sobre a eficiência do ASPP para mitigar ataques ou otimizar rotas, ou ainda políticas específicas incentivando

o uso de IPv6 e técnicas associadas.

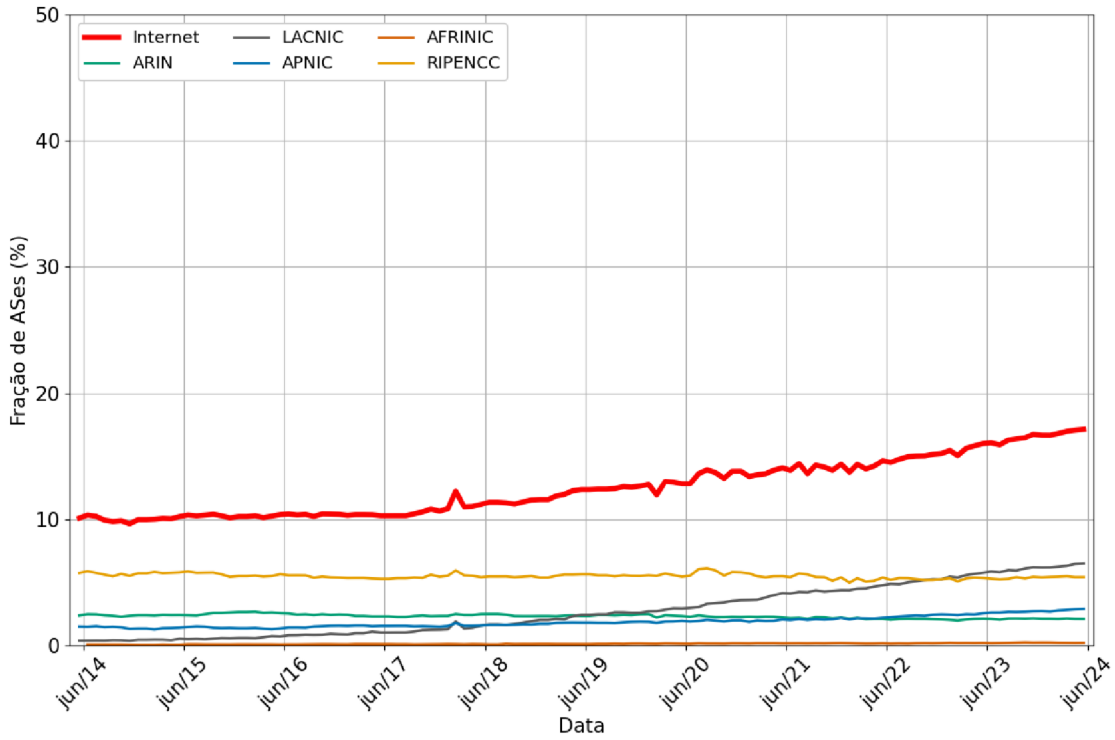


Figura 14: Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem, observados regional e globalmente - IPv6.

A Figura 15 destaca a fração de ASes que utilizaram ASPP agrupados por tipo de AS para IPv4, permitindo observar tendências específicas por categoria.

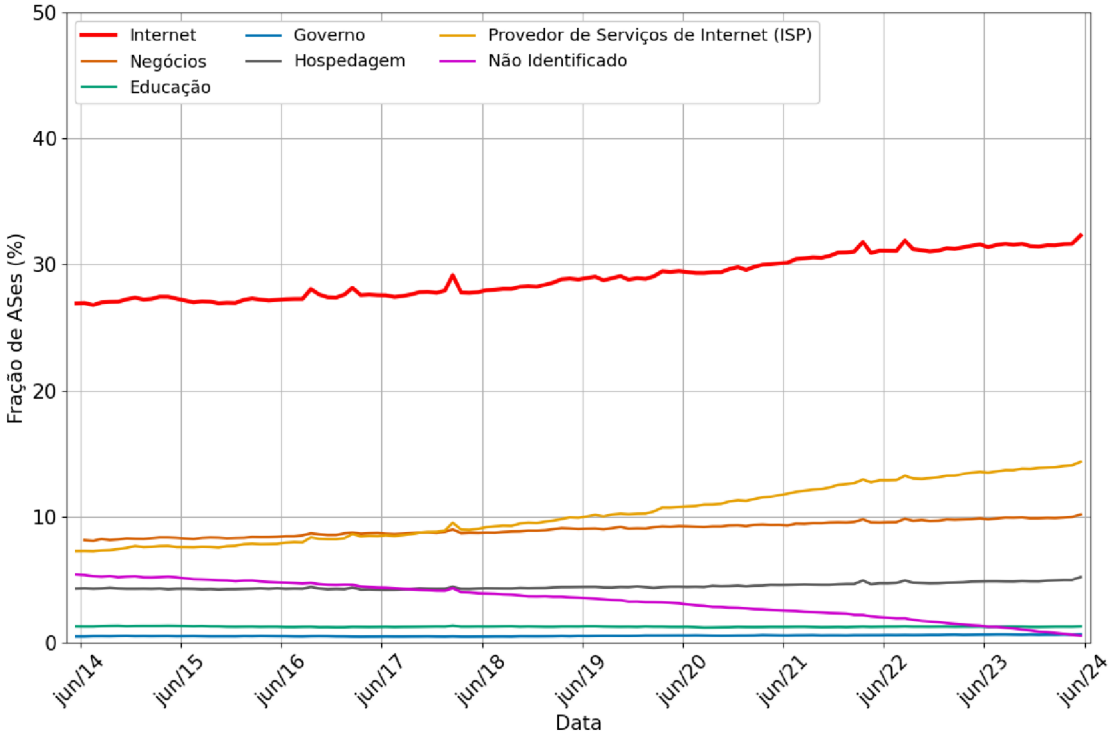


Figura 15: Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem agrupados de acordo com o tipo de AS - IPv4.

Os provedores de Internet (ISPs) lideraram o crescimento no uso da técnica ASPP, passando de 8,25% em 2014 para 15,13% em 2024. Essa liderança reflete o aumento da demanda por parte dos ISPs, ao longo do tempo.

Para o IPv6, a Figura 16 mostra a fração de ASes que utilizaram ASPP agrupados por tipo de AS.

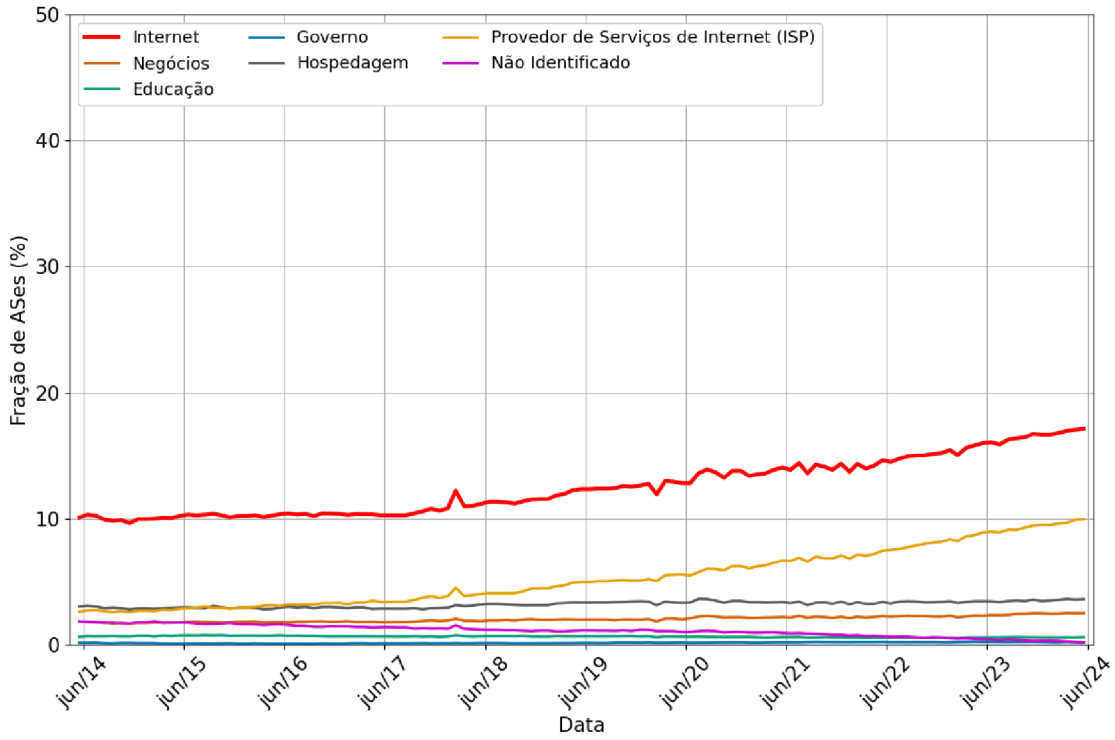


Figura 16: Fração de ASes que utilizam a técnica ASPP na origem agrupados de acordo com o tipo de AS - IPv6.

Os ISPs destacaram-se significativamente a partir de 2017 na quantidade de ASes anunciando prefixos IPv6, apresentando o maior crescimento entre os tipos de AS analisados. Esse comportamento pode ser proveniente da consolidação do IPv6, enquanto os prefixos IPv4 ficam cada vez mais escassos.

5.3.2 Proporção

A análise da proporção de uso da técnica ASPP buscou identificar em quantos anúncios um AS utilizou *prepends*, considerando apenas os ASes que empregaram essa técnica. Classificamos esses ASes em quatro grupos, levando em consideração a quantidade de anúncios em que o AS aplicou a técnica. Os grupos foram definidos como: Grupo 1, abrangendo quem aplicou em 0,1% a 24,9% dos anúncios; Grupo 2, de 25% a 49,9% dos anúncios; Grupo 3, de 50% a 74,9% dos anúncios; e Grupo 4, de 75% a 100% dos anúncios.

Na Figura 17, observamos os ASes agrupados com uma visualização global da proporção de uso de ASPP em seus anúncios para IPv4. **Mais de 50% dos ASes observados utilizam ASPP em mais de 75% de seus anúncios.** Os resultados globais indicam que a maioria dos ASes faz uso intenso da técnica, demonstrando uma adoção confiável por parte dos operadores de rede.

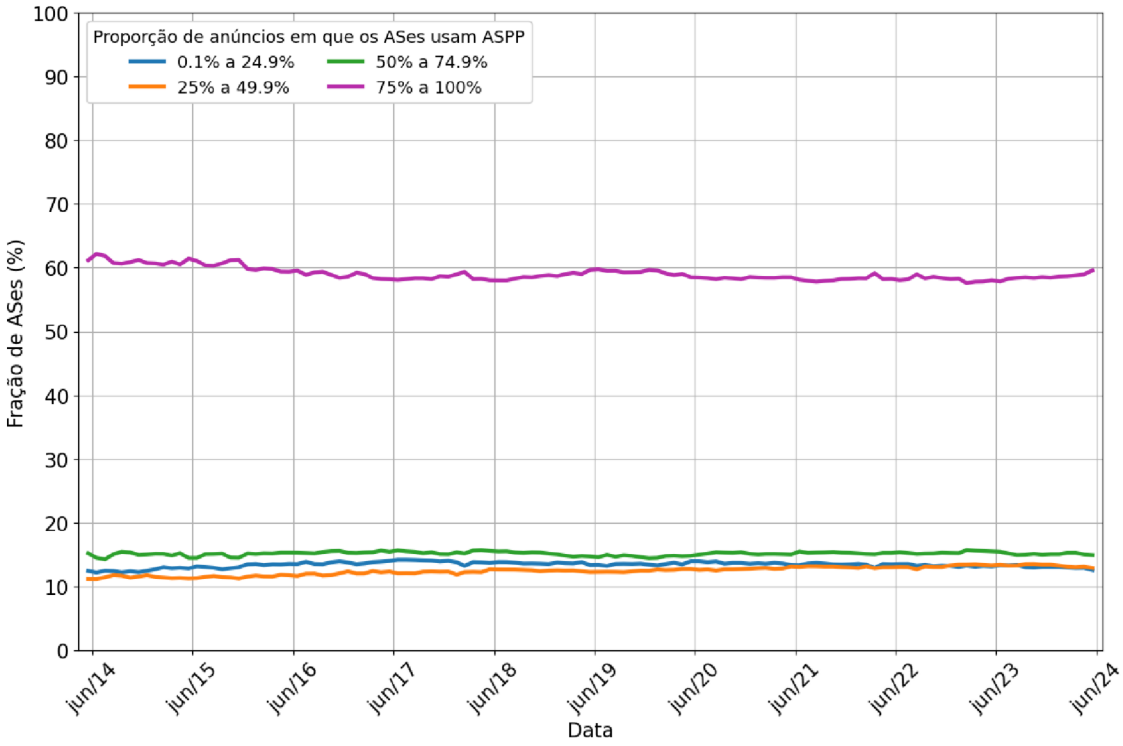


Figura 17: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma global - IPv4.

Para o IPv6, a Figura 18 apresenta a proporção de uso de ASPP em seus anúncios.

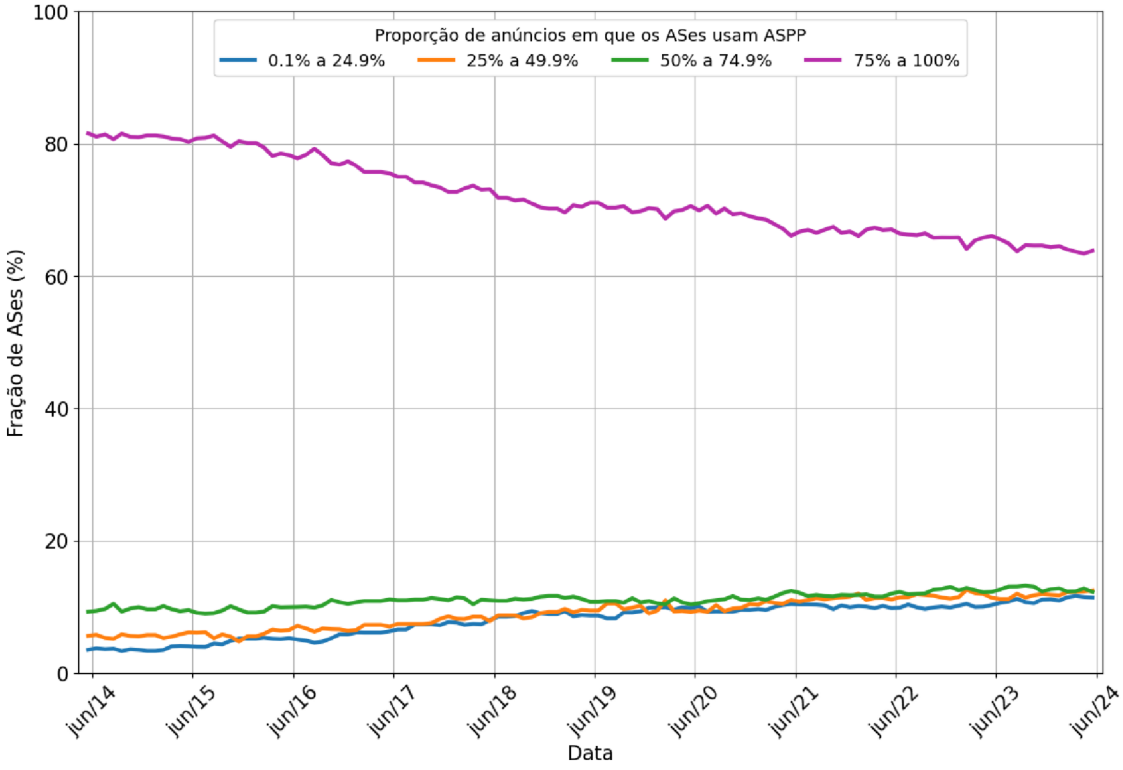


Figura 18: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma global - IPv6.

Observamos uma queda acentuada na forma de aplicação da técnica onde os ASes a utilizavam em maior parte de seus anúncios, reduzindo de 82% para 63% ao longo dos anos, enquanto houve um leve aumento nos demais grupos. Esse cenário indica que, embora a prática de *prepend* continue muito relevante, há uma tendência de adoção mais seletiva, possivelmente refletindo maior maturidade na engenharia de tráfego.

Nas Figuras 19 e 20, podemos observar o comportamento dos ASes de forma regional para IPv4 e IPv6, respectivamente.

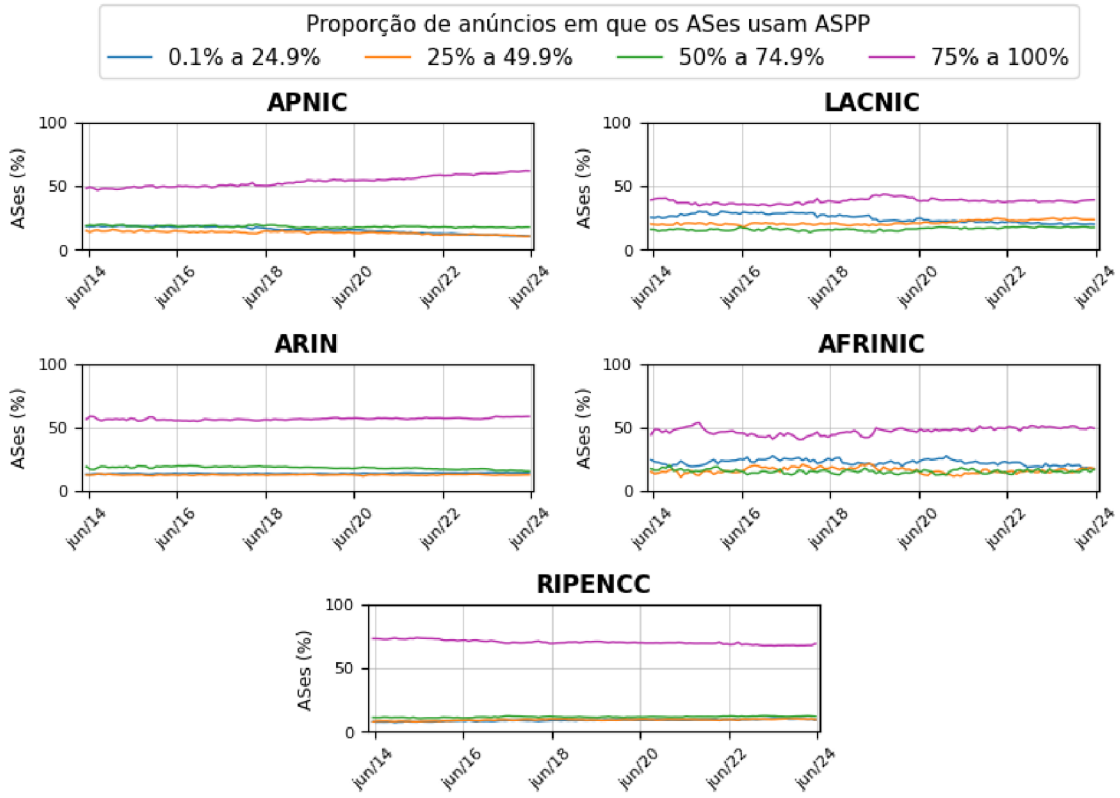


Figura 19: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma regional - IPv4.

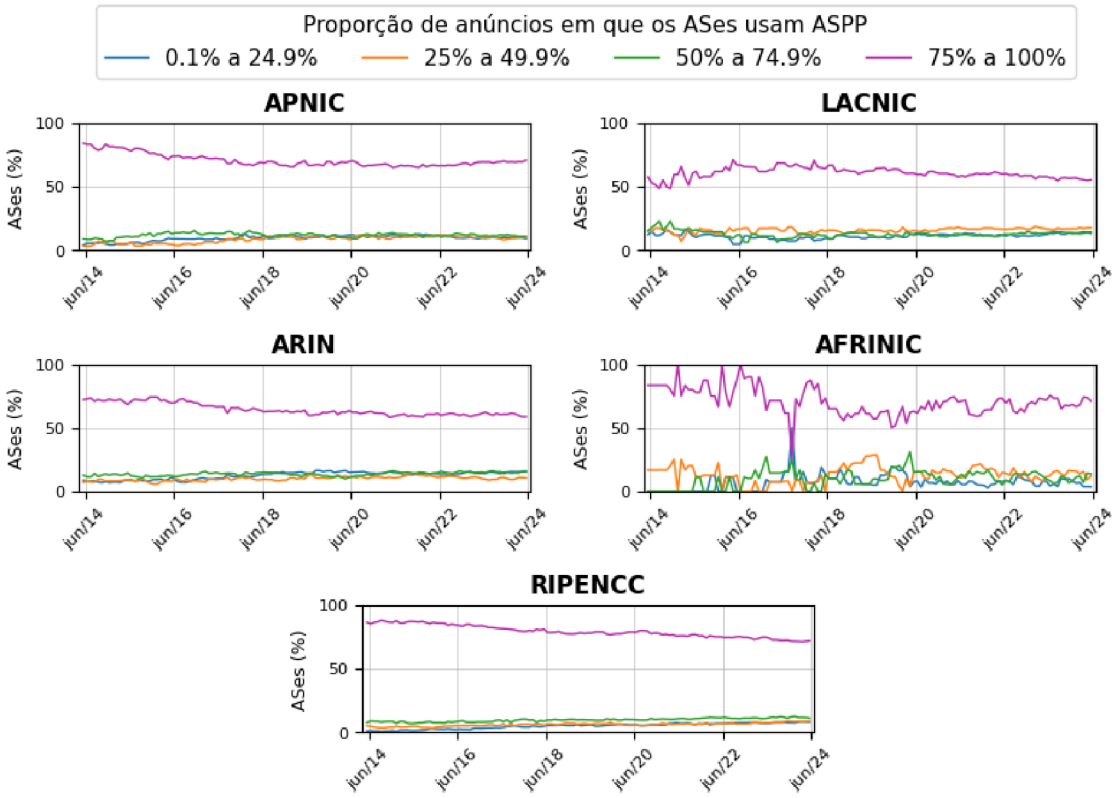


Figura 20: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, de forma regional - IPv6.

A região RIPENCC lidera na adoção do ASPP em altos níveis de proporção de anúncios para IPv4, enquanto a LACNIC e AFRINIC mostram evolução contínua para IPv6. Esses padrões regionais refletem diferenças na maturidade das redes e nas políticas de adoção de técnicas de engenharia de tráfego.

A Figura 21 e 22 apresentam a proporção de uso de ASPP por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

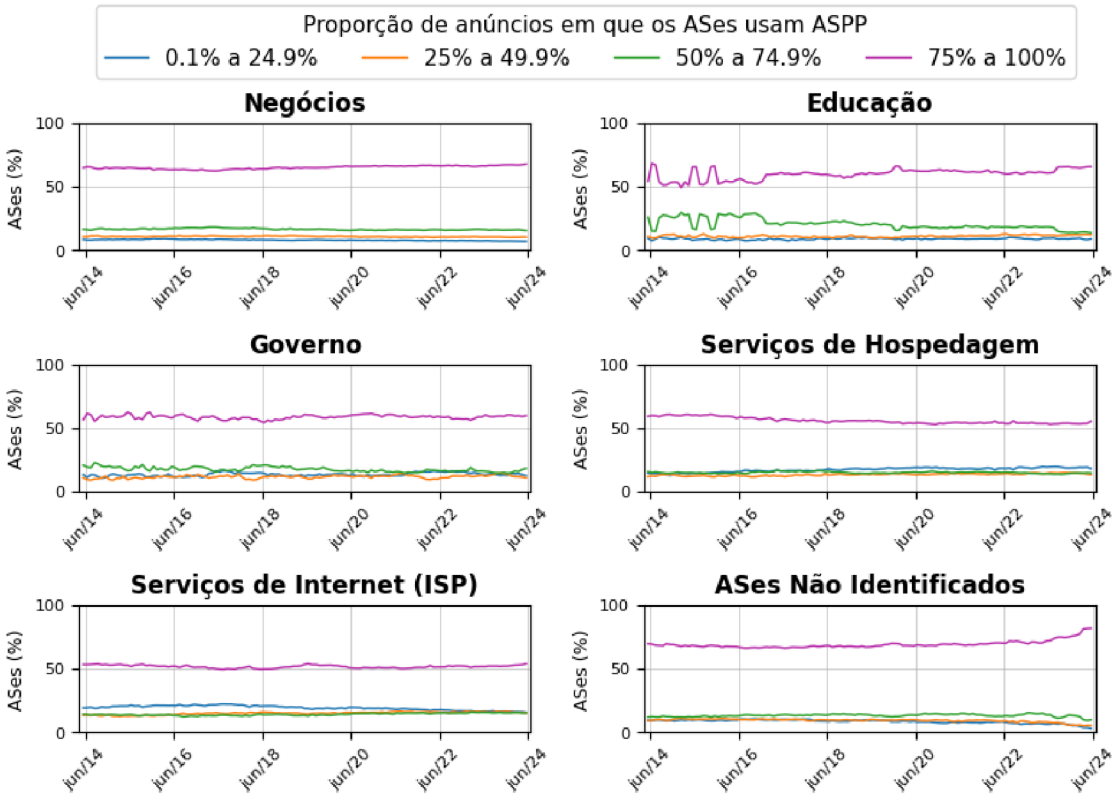


Figura 21: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, segmentados por tipo de AS - IPv4.

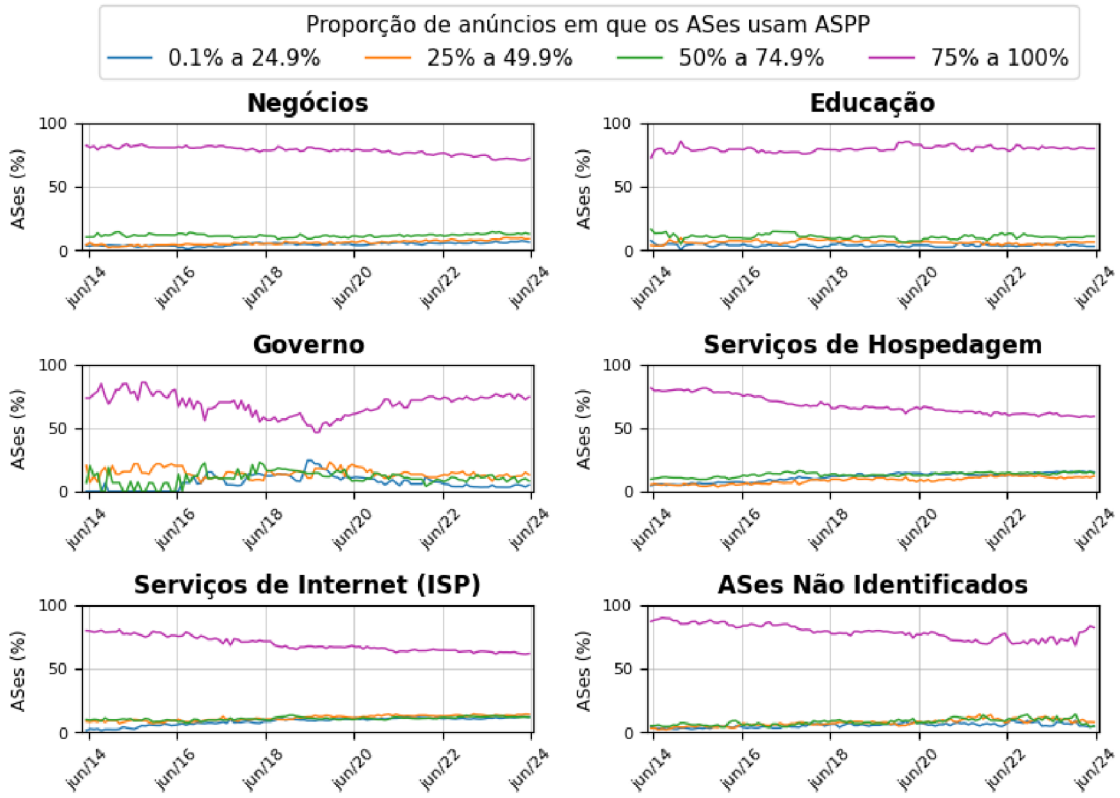


Figura 22: ASes agrupados de acordo com a proporção de uso de ASPP em seus anúncios, segmentados por tipo de AS - IPv6.

ISPs e ASes de hospedagem lideram na proporção de uso da técnica ASPP para IPv4, enquanto para IPv6, ISPs e serviços de hospedagem possuem clara preferência por *prepends* tamanho 1. Esses resultados destacam a importância da técnica para provedores de Internet e hospedagem, que demandam estratégias robustas para garantir conectividade eficiente.

5.3.3 Intensidade

A intensidade de uso da técnica ASPP foi analisada com base no tamanho dos *prepends* utilizados nos anúncios. Para IPv4, a Figura 23 apresenta uma visão geral dos ASes em relação à intensidade de uso.

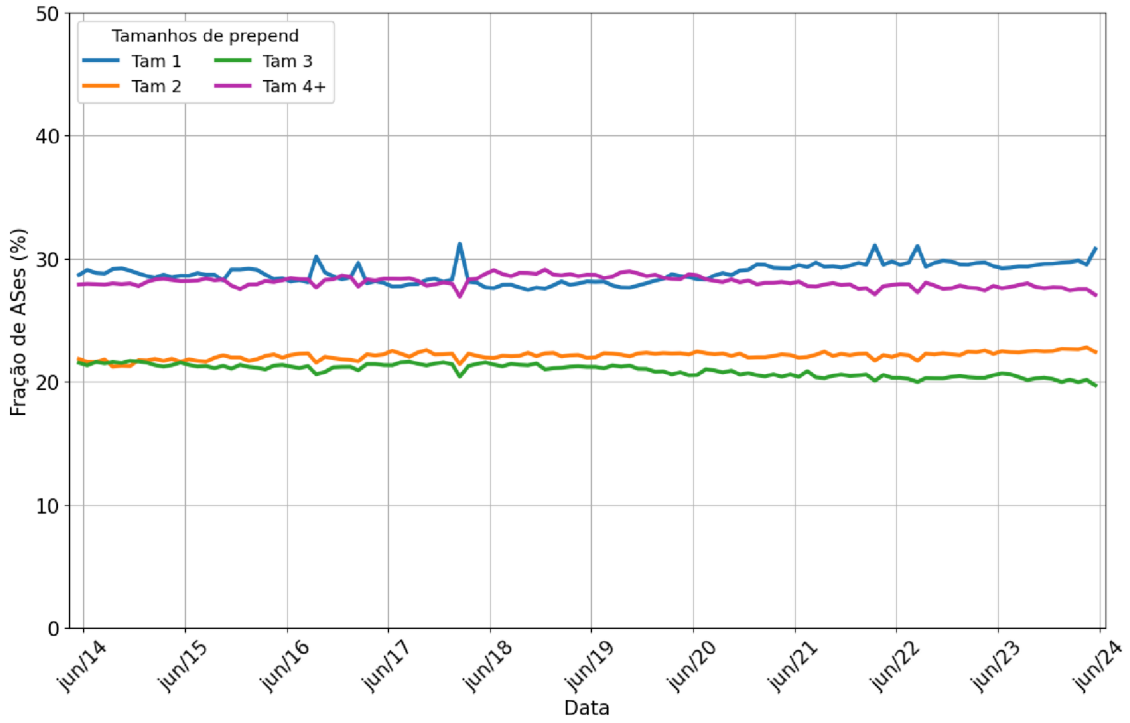


Figura 23: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma global - IPv4.

A maioria dos ASes adota *prepends* de tamanho 4 ou mais, destacando preocupações de segurança. Esse comportamento pode ser preocupante, pois o uso de *prepends* longos pode resultar em problemas de segurança, como destacado em trabalhos relacionados mencionados no Capítulo 3.

Para o IPv6, a Figura 24 mostra que **os *prepends* de tamanho 1 são amplamente preferidos pelos ASes usuários da técnica.** Diferente do comportamento em IPv4, em IPv6 os ASes deram preferência por utilizar *prepends* de tamanho 1, seguido pelo 2, 3 e, finalmente, 4 ou mais. Isso pode indicar uma maior maturidade na forma de utilização da técnica, por parte dos operadores, ou melhor flexibilidade no gerenciamento de rotas, uma vez que a escassez de prefixos não seria um problema agora.

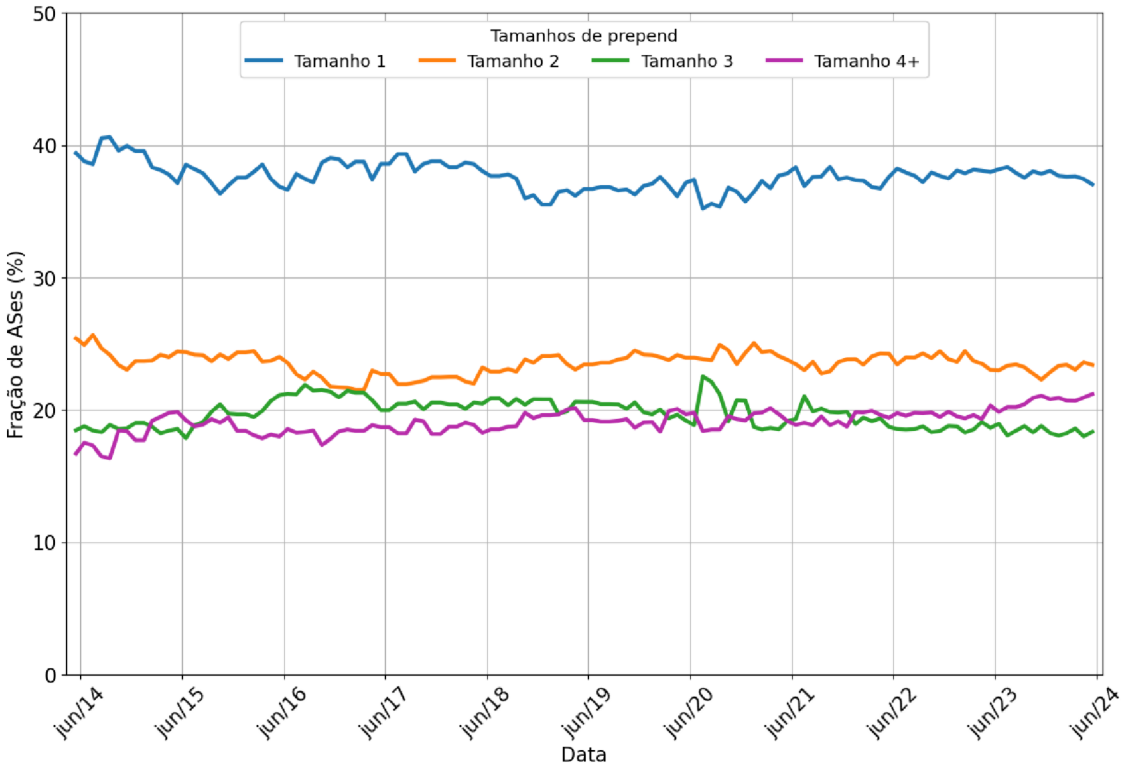


Figura 24: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma global - IPv6.

Nas Figuras 25 e 26, observamos a intensidade de uso de ASPP por região para IPv4 e IPv6, respectivamente.

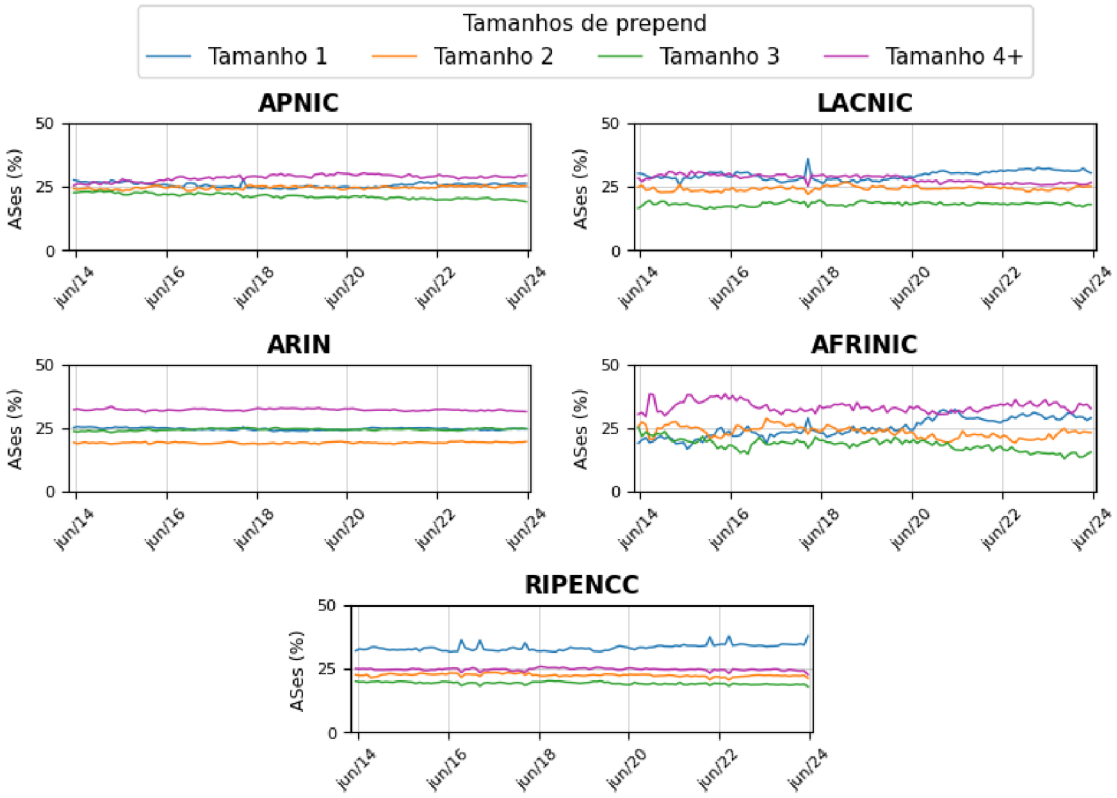


Figura 25: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma regional - IPv4.

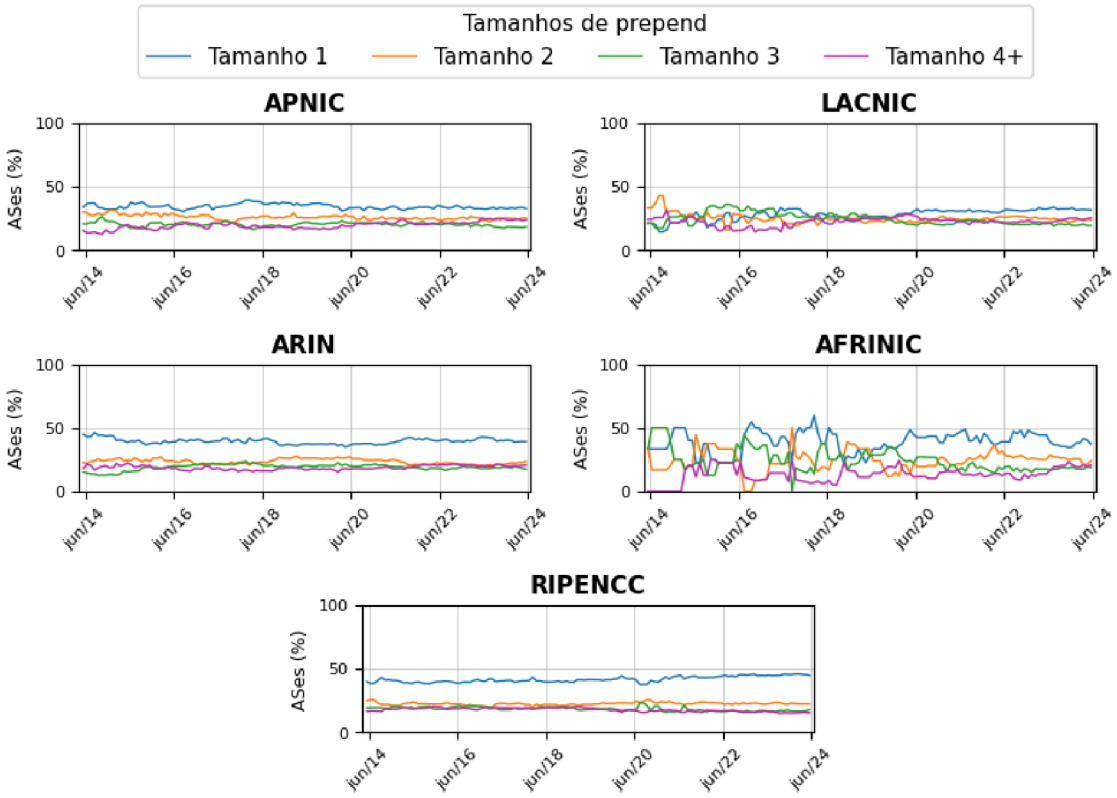


Figura 26: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de forma regional - IPv6.

A APNIC e a LACNIC lideram no uso de *prepends* de tamanho 4 ou mais para IPv4, enquanto as regiões com redes mais antigas e densas dão preferência por *prepends* tamanho 1 para IPv6. Esses padrões regionais refletem diferenças na maturidade das redes e nas práticas de engenharia de tráfego.

A Figura 27 e 28 apresentam a intensidade de uso de ASPP por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

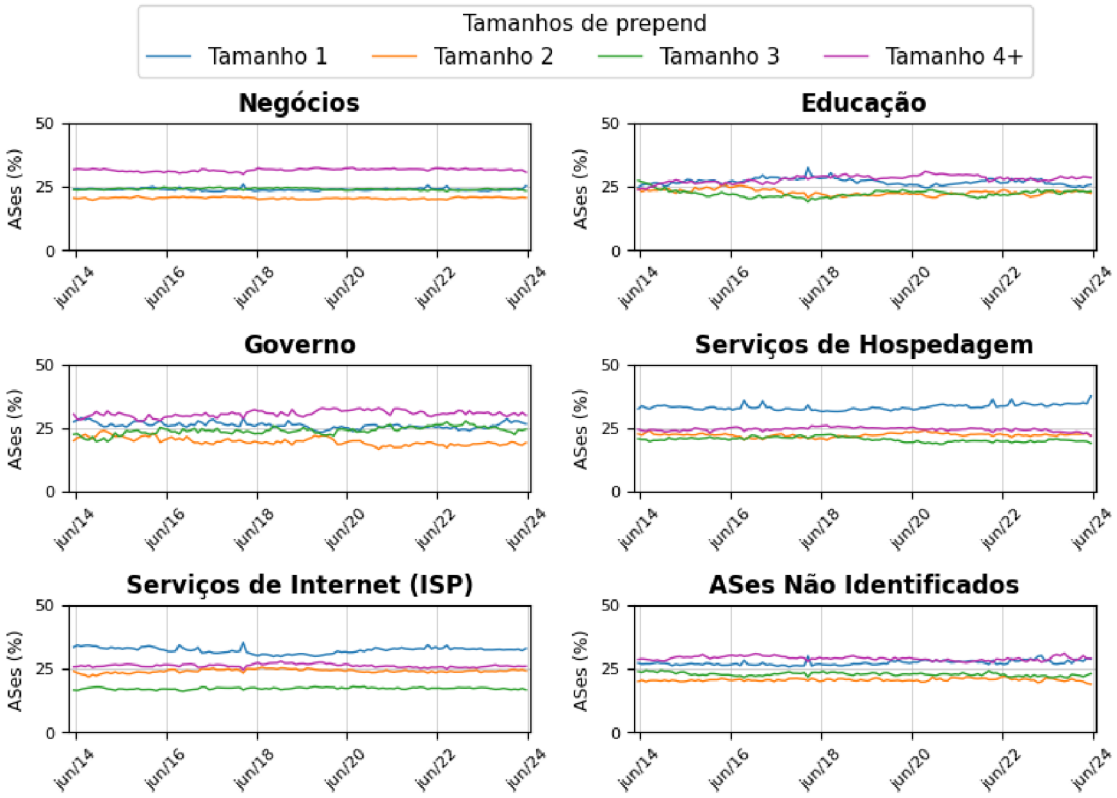


Figura 27: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, segmentados por tipo de AS - IPv4.

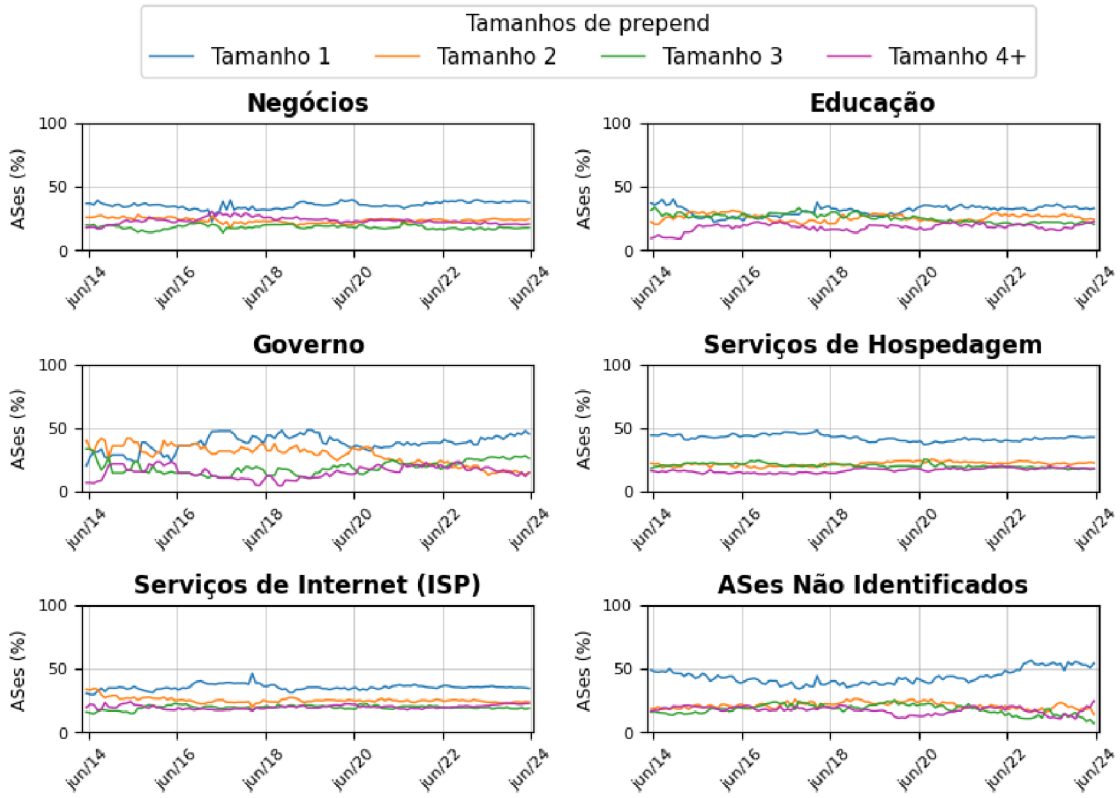


Figura 28: ASes agrupados de acordo com percentual dominante de tamanhos de *prepend*, de acordo com tipo de AS - IPv6.

Provedores de Internet e hospedagem lideram no uso de *prepends* de tamanho 4 ou mais para IPv4, enquanto para IPv6, ISPs e serviços de hospedagem possuem clara preferência por *prepends* tamanho 1. Esses resultados destacam a importância da técnica para provedores de Internet e hospedagem, que demandam estratégias robustas para garantir conectividade eficiente.

Importante ressaltarmos que o sequestro de prefixo é um tipo de ataque em que um AS anuncia rotas para prefixos IP que não lhe pertencem. Devido à regra do BGP de escolher o caminho mais curto, muitos ASes podem adotar automaticamente a rota do sequestrador, desviando o tráfego para o invasor. Esse risco é ampliado quando a rota legítima possui *prepends* muito longos, tornando mais atrativo o desvio para um caminho mais curto. Assim, os resultados sugerem que os operadores de rede deveriam revisar suas políticas de *prepend*, adotando tamanhos menores sempre que possível, a fim de mitigar os riscos de segurança associados ao uso excessivo da técnica.

5.4 Técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico

Esta técnica consiste em o Sistema Autônomo anunciar sub-redes menores dos prefixos que possui, direcionando o tráfego de entrada por essas redes, uma vez que o BGP dá preferência à prefixos mais específicos ao escolher as melhores rotas. A técnica é

amplamente utilizada tanto em IPv4 quanto em IPv6, mas com diferenças significativas na adoção e aplicação, refletindo as particularidades de cada protocolo. Aqui, exploraremos a utilização, proporção e intensidade da técnica em ambos os protocolos, destacando padrões regionais e por tipo de AS.

5.4.1 Utilização

Para detectarmos o uso da técnica e verificarmos se os prefixos anunciados pelos ASes são mais específicos que outros já anunciados, utilizamos a biblioteca *pytricia* [27], que implementa a estrutura de dados Árvore Patrícia. Com ela, inserimos os prefixos na árvore e realizamos buscas para identificar rapidamente qual prefixo era mais longo entre os prefixos anunciados por cada Sistema Autônomo. Consideramos utilizador da técnica qualquer AS que anunciasse, pelo menos, um prefixo mais específico na lista de prefixos observados.

Na Figura 29, apresentamos a fração dos ASes utilizadores da técnica de forma global e regional para IPv4.

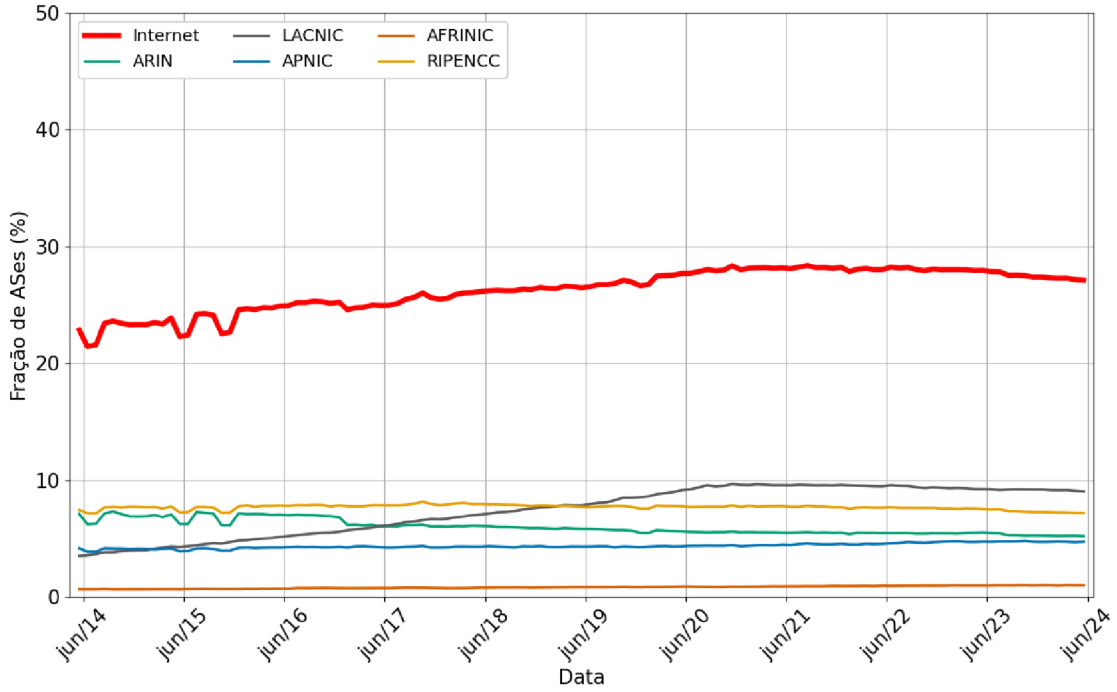


Figura 29: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, em visão regional e global - IPv4.

A fração de ASes utilizando a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico apresentou variações ao longo dos 10 anos, com uma tendência de leve aumento. Em 2014, a fração global de ASes que utilizavam a técnica era de 22,84%, enquanto em 2024 esse valor chegou a 27,39%, representando um aumento gradual de 4,55 pontos percentuais. Regionalmente, a tendência foi heterogênea: na região do LACNIC, houve o maior

crescimento relativo, com um aumento de 12,02 pontos percentuais (de 49,04% em 2014 para 61,06% em 2024), possivelmente relacionado à expansão significativa de novos ASes na região.

Para o IPv6, a Figura 30 apresenta a fração de ASes utilizadores da técnica de forma global e regional.

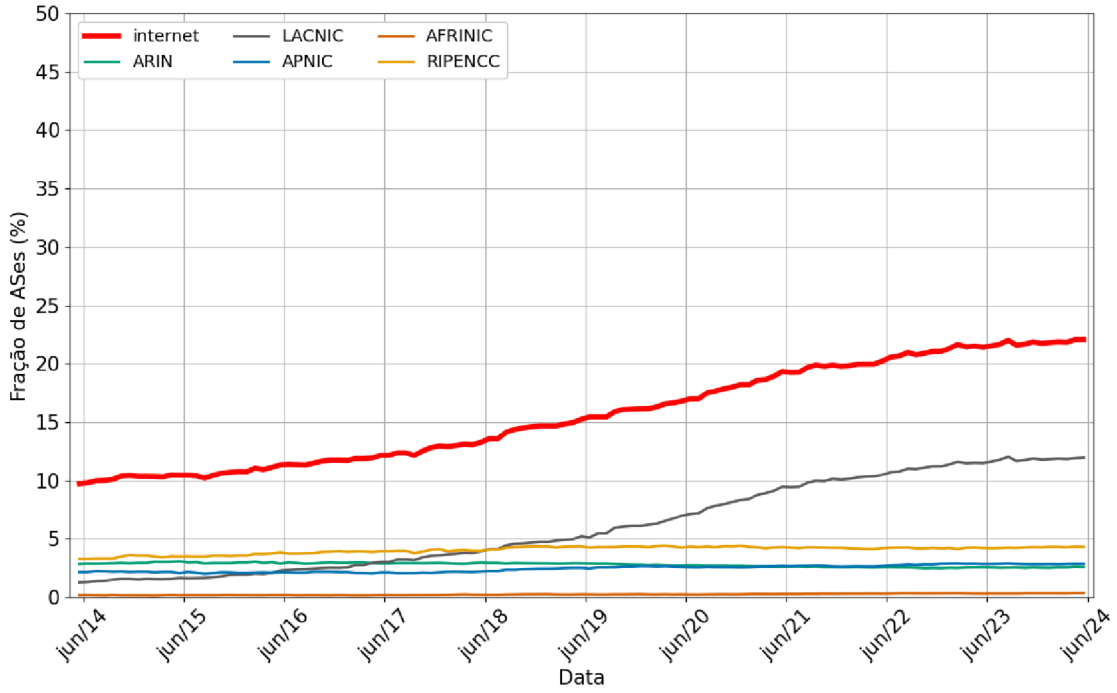


Figura 30: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, em visão regional e global - IPv6.

LACNIC se destacou como a região que mais aderiu ao uso da técnica, a partir de 2019. Com o maior crescimento percentual, aumentando de 3,05% em 2014 para 12,48% em 2024, os ASes da LACNIC passaram a adotar a técnica com muita força nos últimos anos. Isso pode ter acontecido por diversos fatores, como o crescimento acelerado da infraestrutura de rede e a expansão das telecomunicações na América Latina.

A Figura 31 destaca a fração dos ASes utilizadores da técnica de acordo com o tipo de AS para IPv4.

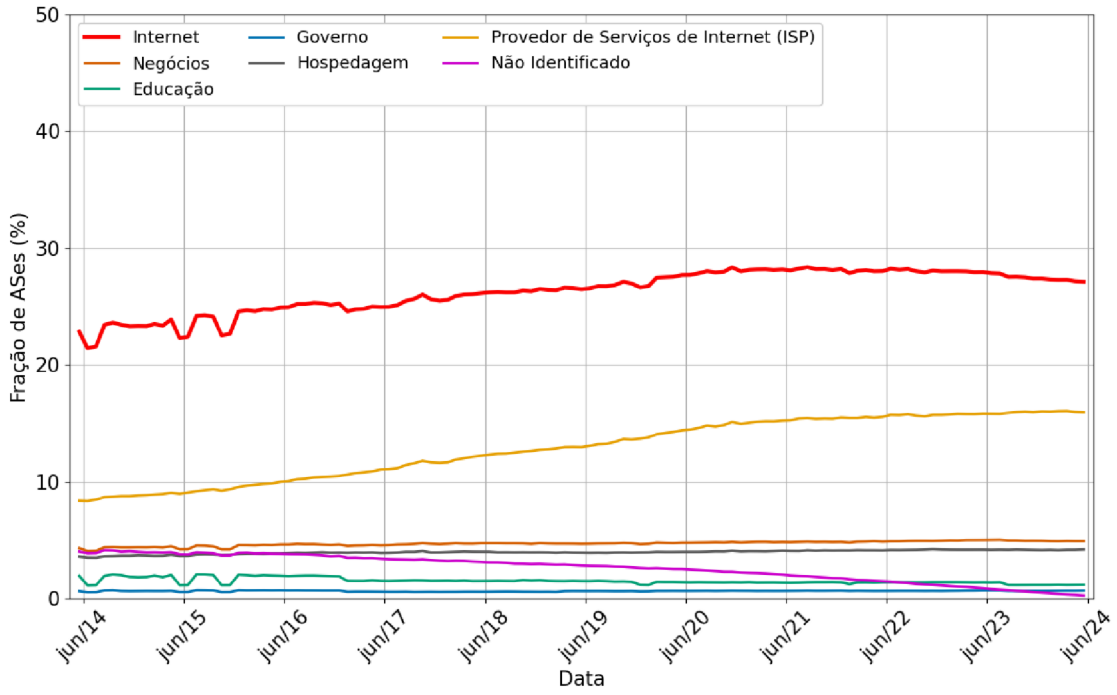


Figura 31: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, de acordo com o tipo de AS - IPv4.

ASes provedores de hospedagem apresentaram adesão moderada e relativamente estável à técnica. Para os ASes provedores de hospedagem, observamos uma fração consistente em torno de 25% ao longo dos anos. Houve um leve aumento de 2014 a 2020, alcançando um pico de 27,3% em dezembro de 2020. Após esse período, a fração apresentou uma leve queda, estabilizando-se em 24,2% em 2024.

Para o IPv6, a Figura 32 mostra a fração de ASes que utilizaram a técnica de acordo com o tipo de AS.

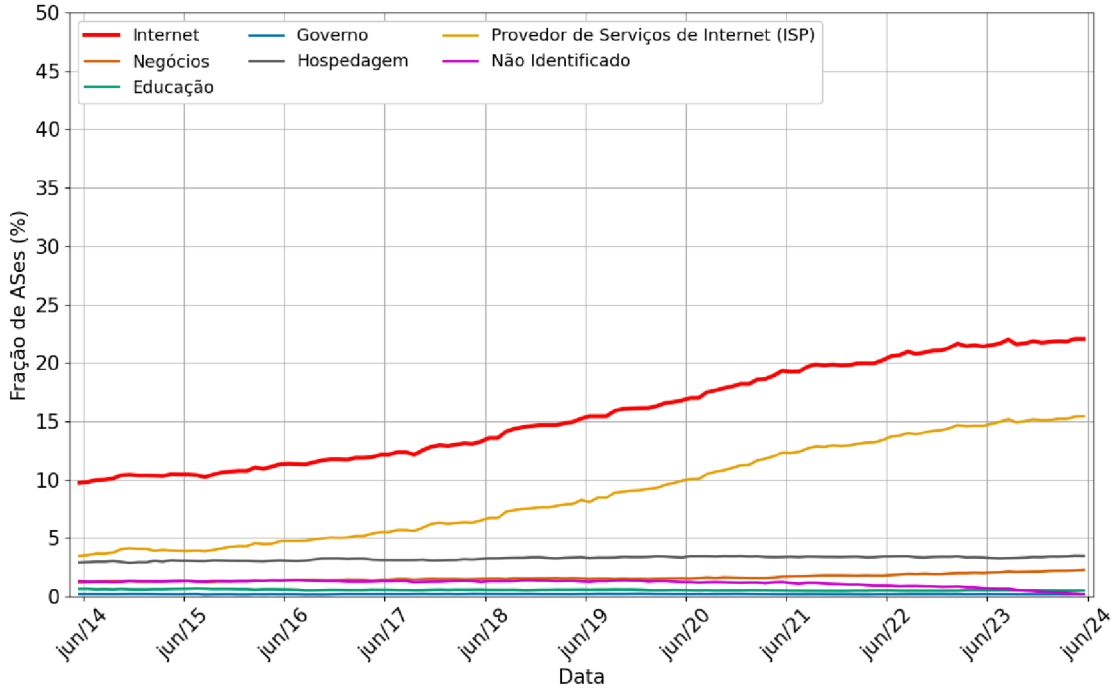


Figura 32: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio de Prefixo Mais Específico, de acordo com o tipo de AS - IPv6.

Provedores de Internet se destacam no aumento expressivo da técnica ao longo dos anos. O uso de Anúncio de Prefixo Mais Específico por ISPs em IPv6 cresceu de 4,76% para 15,04% de 2014 à 2024, refletindo a necessidade de otimização no roteamento e alocação eficiente de endereços frente à expansão do IPv6.

5.4.2 Proporção

Para compreendermos a proporção de utilização da técnica por cada AS, analisamos em quantos anúncios cada AS a utilizou. Dividimos os ASes em 4 grupos de acordo com a quantidade de prefixos mais específicos encontrados nos anúncios, sendo eles: Grupo 1, com 0,1% a 24,9% dos anúncios; Grupo 2, com 25% a 49,9% dos anúncios; Grupo 3, com 50% a 74,9% dos anúncios; e Grupo 4, com 75% a 99,9% dos anúncios. O Grupo 4 foi limitado a 99,9%, pois ao menos um prefixo anunciado precisa ser o prefixo base para que seja desagregado em outros prefixos.

Na Figura 33, observamos os ASes agrupados com uma visualização global da proporção de uso de prefixos mais específicos para IPv4.

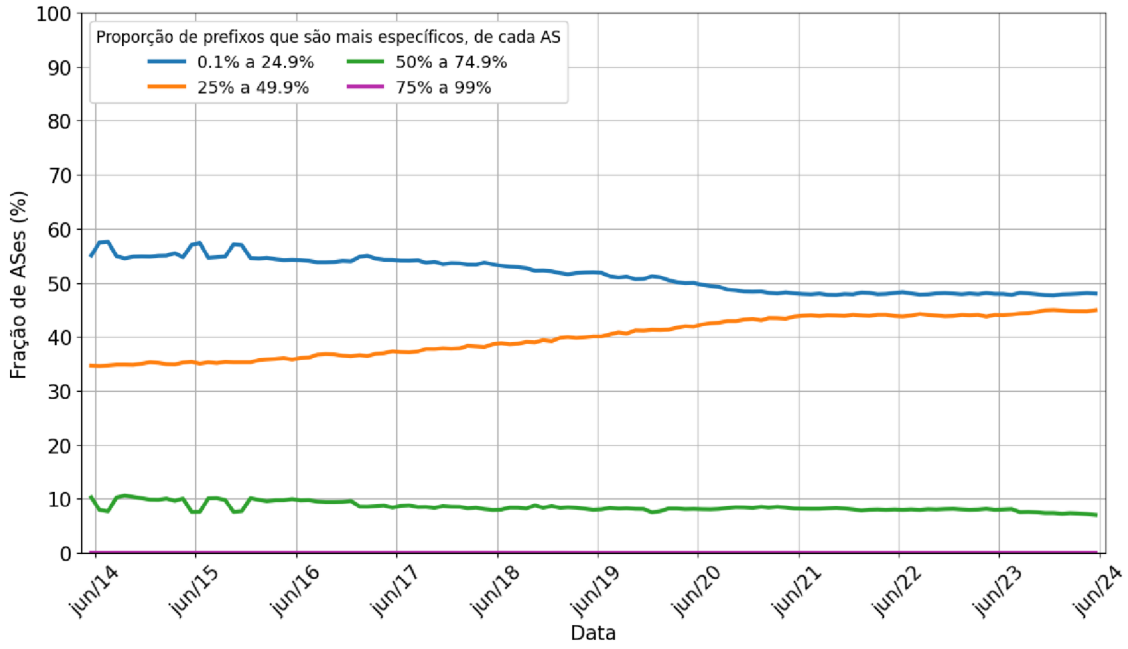


Figura 33: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados globalmente - IPv4.

A maior parte dos ASes utilizou a técnica de forma seletiva, aplicando-a em menos de 25% de seus anúncios. Em 2014, 57,64% dos ASes aplicaram a técnica em menos de 25% dos seus anúncios. Em 2024, esse valor sofreu uma leve redução, chegando a 47,82%. Essa queda foi acompanhada pelo aumento de ASes que passaram a aplicar a técnica em mais de 25% dos seus anúncios.

Para o IPv6, a Figura 34 apresenta a proporção de uso de prefixos mais específicos em seus anúncios.

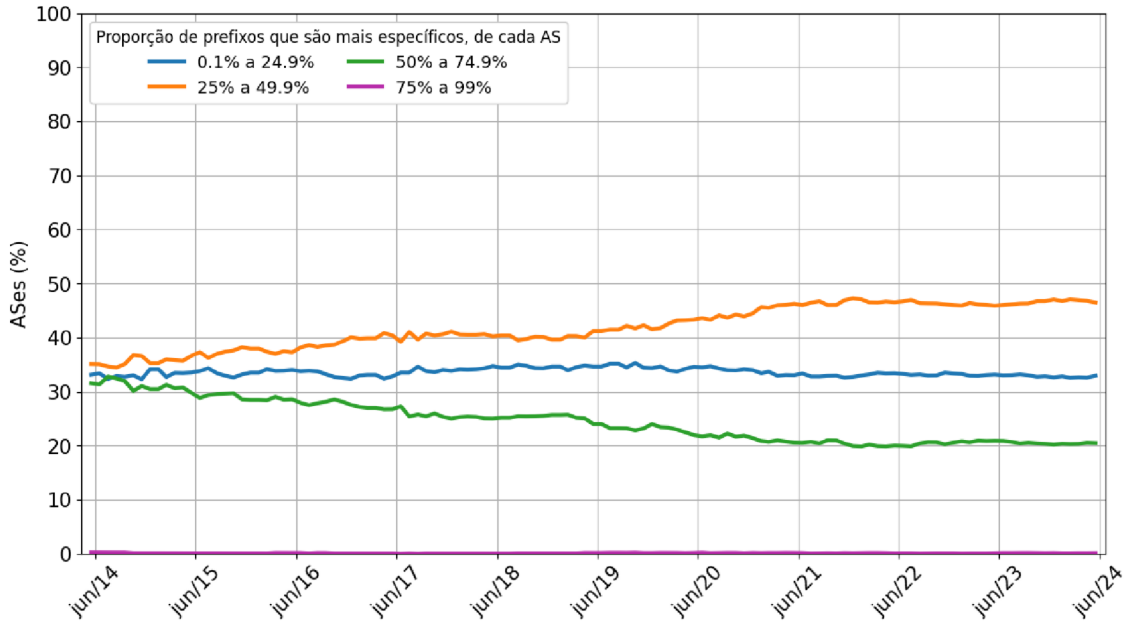


Figura 34: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados globalmente - IPv6.

Em IPv6, a desagregação moderada de prefixos é amplamente preferida pelos ASes. Ao longo de 10 anos, a maioria dos ASes anunciou entre 25% e 49,9% de seus prefixos de forma mais específica, evidenciando uma prática consistente de desagregação mais equilibrada.

Nas Figuras 35 e 36, podemos observar o comportamento dos ASes de forma regional para IPv4 e IPv6, respectivamente.

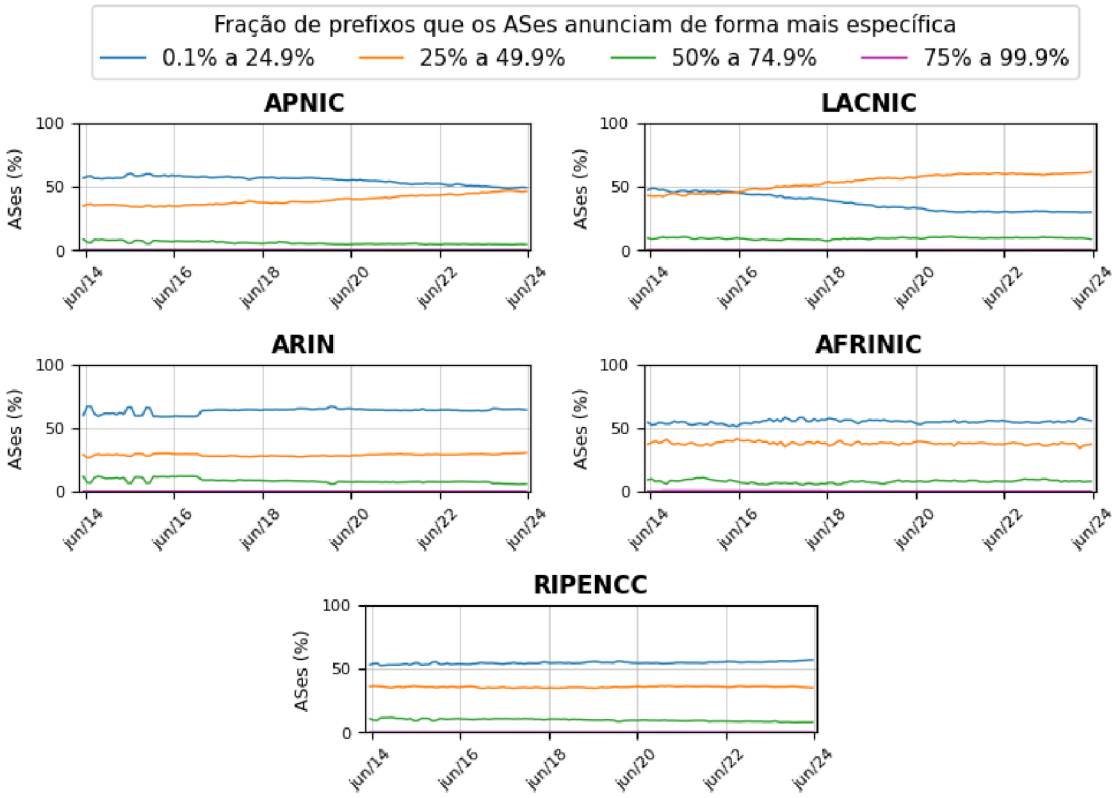


Figura 35: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados regionalmente - IPv4.

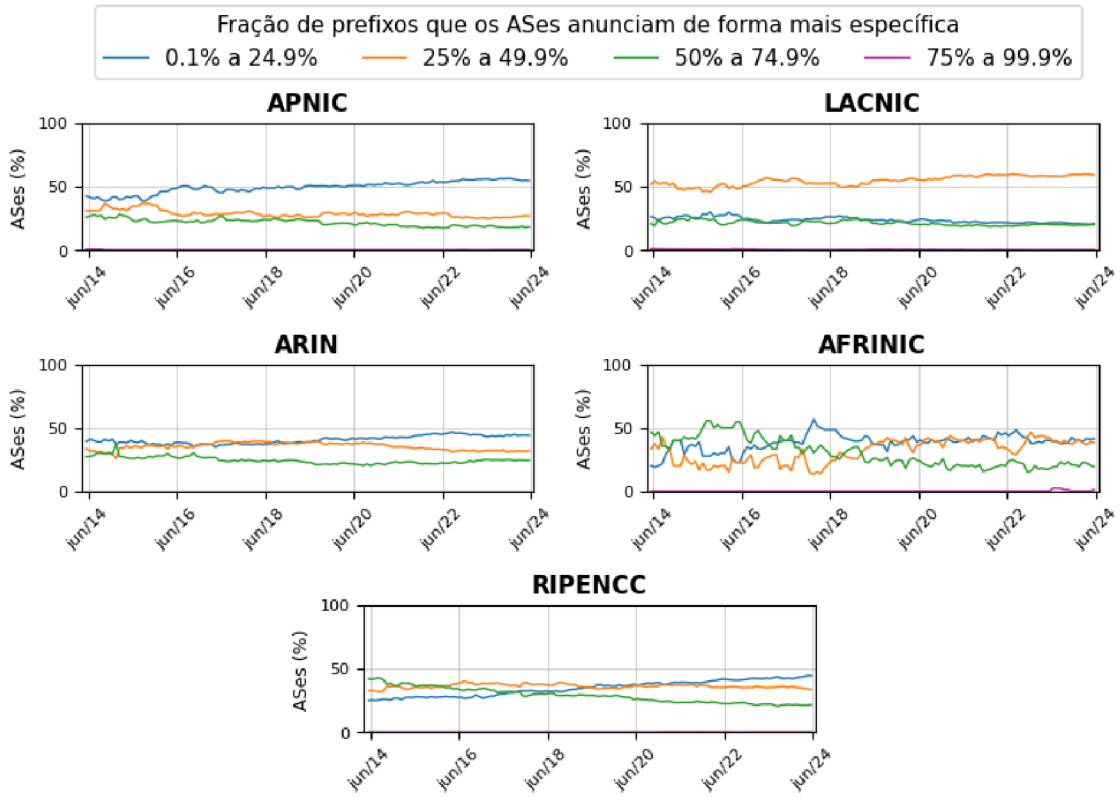


Figura 36: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, observados regionalmente - IPv6.

Adoção de Anúncio de Prefixo Mais Específico varia amplamente entre regiões, refletindo estratégias regionais distintas. Os resultados revelaram comportamentos distintos entre as regiões na adoção da técnica de Anúncio de Prefixo Mais Específico, evidenciando estratégias regionais específicas para lidar com o roteamento e a gestão de tráfego na Internet.

A Figura 37 e 38 apresentam a proporção de uso de prefixos mais específicos por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

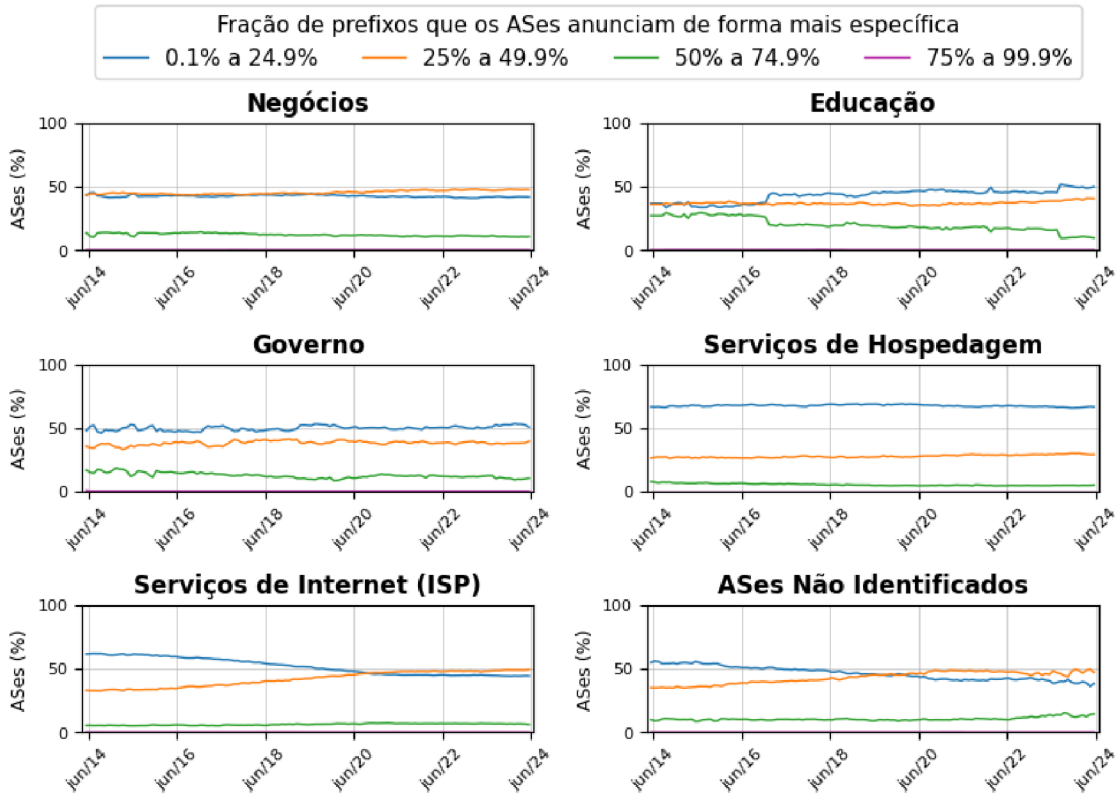


Figura 37: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, de acordo com tipo do AS - IPv4.

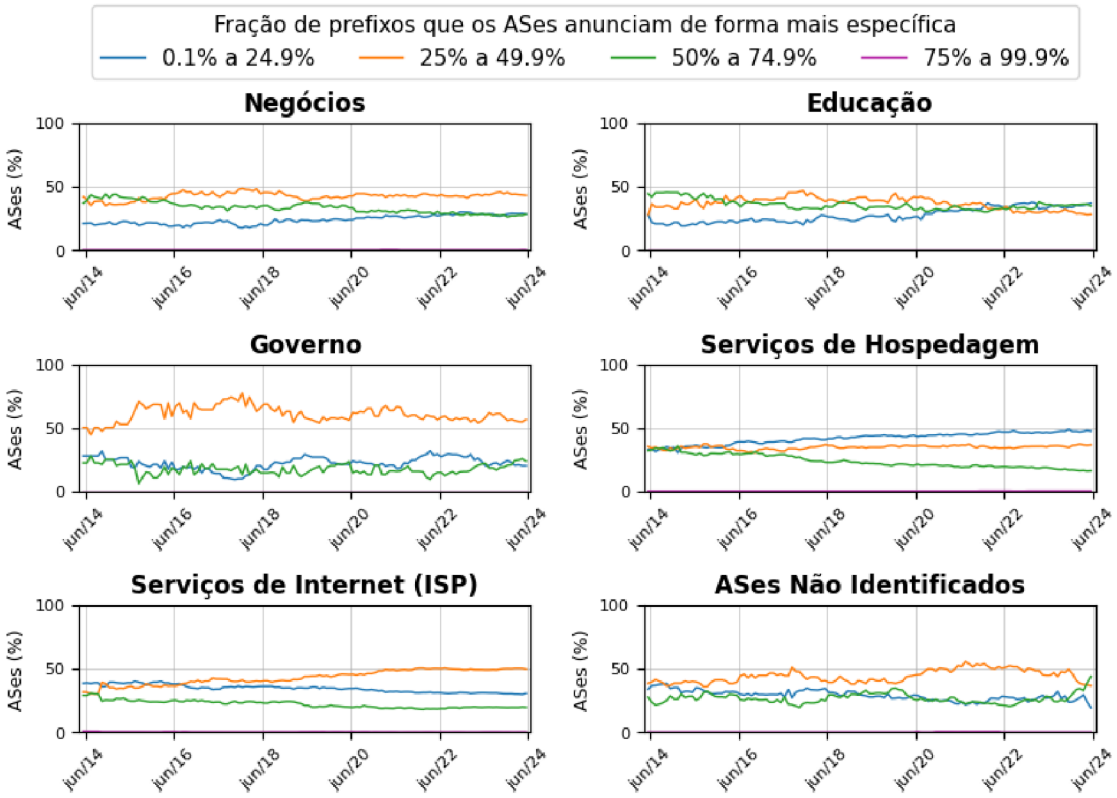


Figura 38: ASes agrupados de acordo com a fração de prefixos anunciados que são mais específicos, de acordo com tipo do AS - IPv6.

Diferentes tipos de AS adotam estratégias distintas no uso de Anúncio de Prefixo Mais Específico. Os resultados indicaram que os diferentes tipos de AS adotaram a técnica de Anúncio de Prefixo Mais Específico de forma estratégica, conforme suas prioridades operacionais.

5.4.3 Intensidade

Por último, buscamos compreender o nível de desagregação de prefixos que os ASes alcançam ao utilizar a técnica de Anúncio de Prefixos Mais Específicos. Para isso, categorizamos os ASes em quatro níveis de desagregação, com base na quantidade de subprefixos diretos derivados de um prefixo base, sendo eles **nível 1**, **nível 2**, **nível 3** e **nível 4 ou mais**.

Na Figura 39, observamos os ASes agrupados com uma visualização global da intensidade de uso de prefixos mais específicos para IPv4.

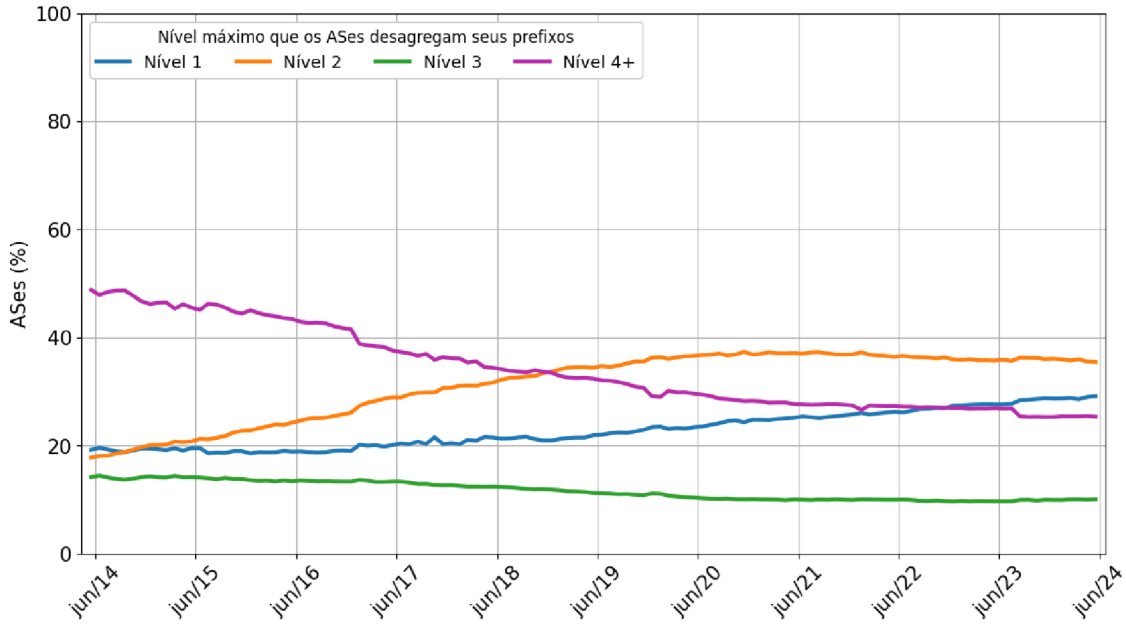


Figura 39: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados globalmente - IPv4.

Observamos tendência de redução na intensidade da desagregação de prefixos ao longo do tempo, com mais ASes consolidando suas rotas em níveis menores de desagregação. Essa diminuição sugere uma mudança nas práticas de roteamento, possivelmente motivada por fatores como a escassez de prefixos IPv4, que força uma gestão mais eficiente e restritiva dos recursos disponíveis.

Para o IPv6, a Figura 40 mostra a intensidade de uso de prefixos mais específicos em seus anúncios.

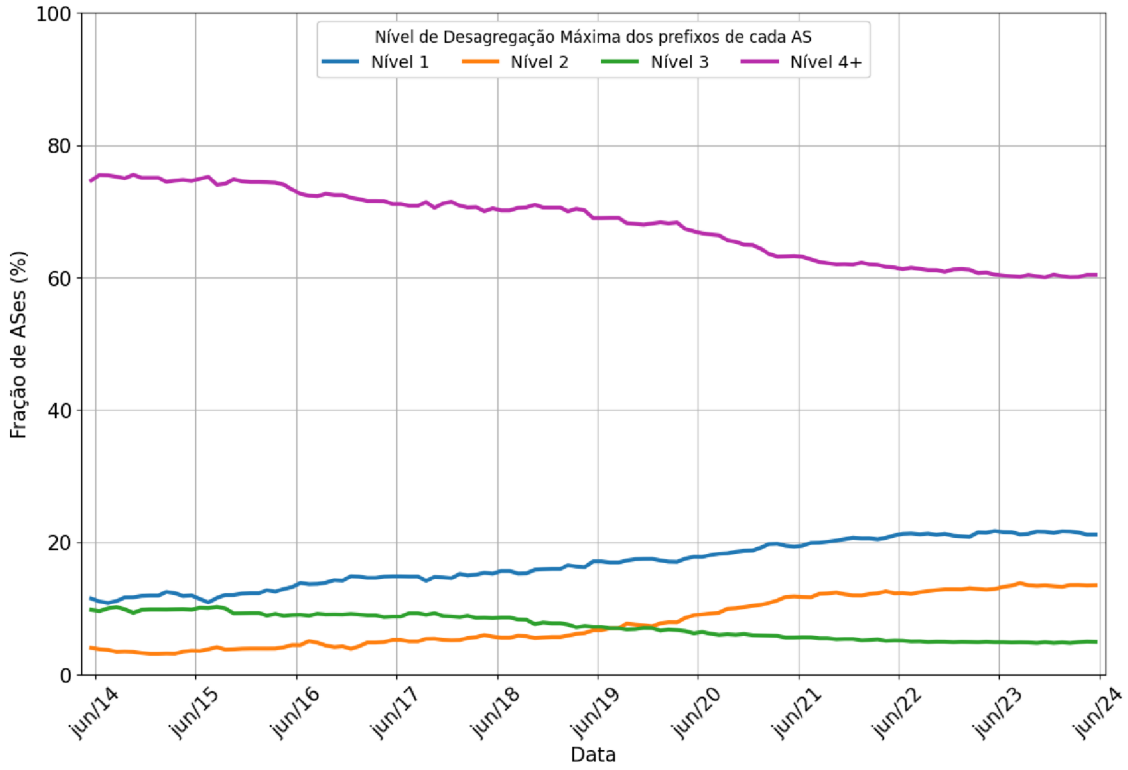


Figura 40: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados globalmente - IPv6.

Em anúncios IPv6 os ASes possuem ampla preferência por grande desagregação de prefixos. Apesar da predominância histórica de desagregação intensa no IPv6, evidenciada pelo nível 4 ou mais, que ainda representava cerca de 80% dos ASes em 2014 e caiu para aproximadamente 60% em 2024, há uma tendência clara de adoção de práticas mais controladas nos últimos anos.

Nas Figuras 41 e 42, observamos a intensidade de uso de prefixos mais específicos por região para IPv4 e IPv6, respectivamente.

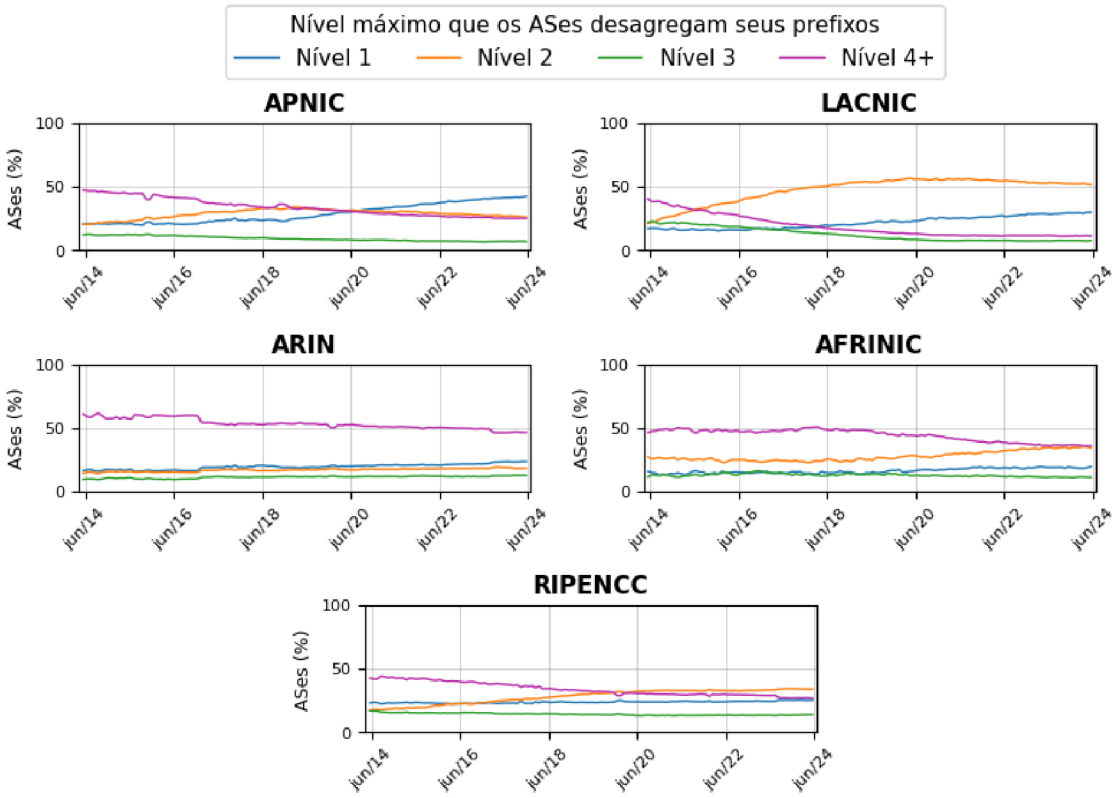


Figura 41: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados regionalmente - IPv4.

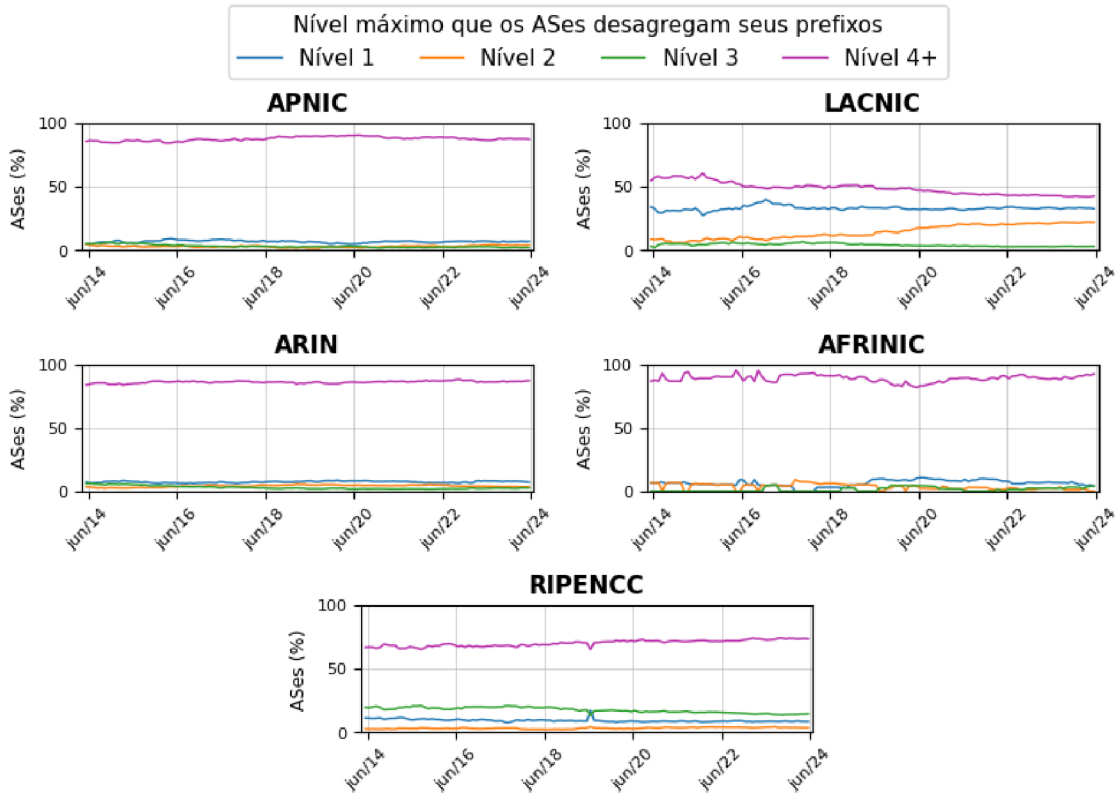


Figura 42: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, observados regionalmente - IPv6.

Regiões com menor disponibilidade de recursos IP mostram redução mais acentuada na desagregação. Em regiões como AFRINIC e LACNIC, onde há maior escassez de recursos IP, observa-se um padrão mais pronunciado de redução de desagregação.

A Figura 43 e 44 apresentam a intensidade de uso de prefixos mais específicos por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

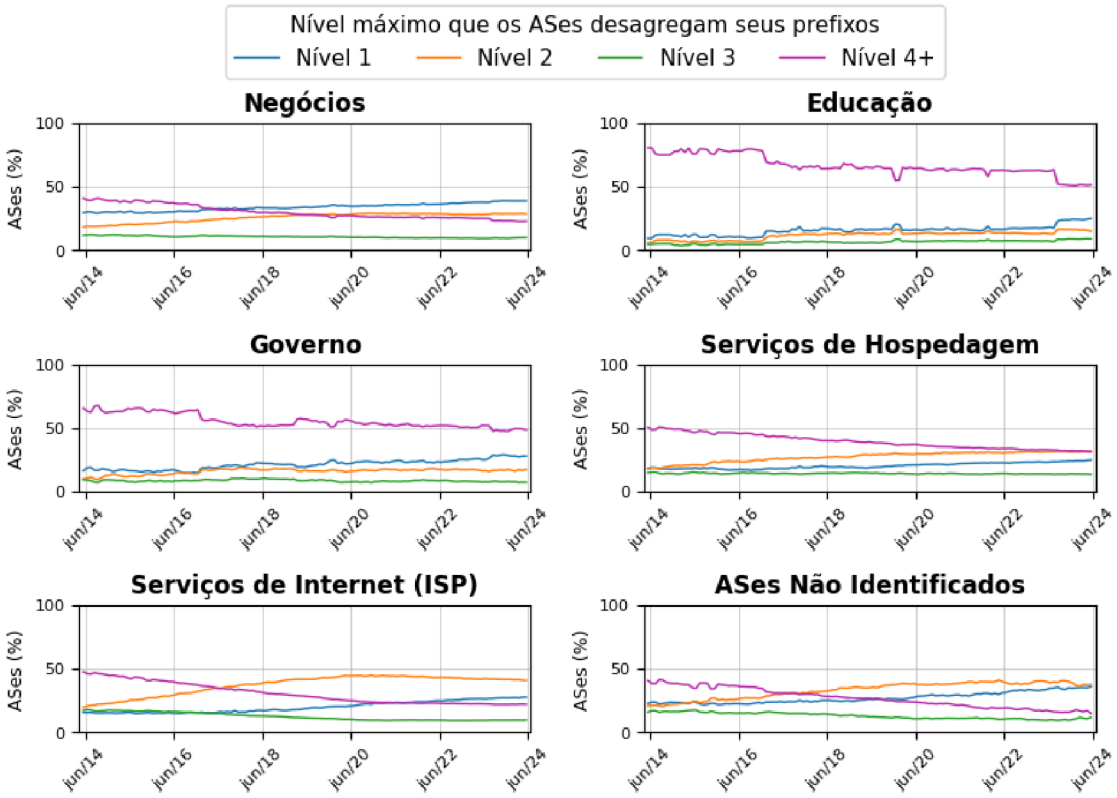


Figura 43: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, de acordo com tipo de AS - IPv4.

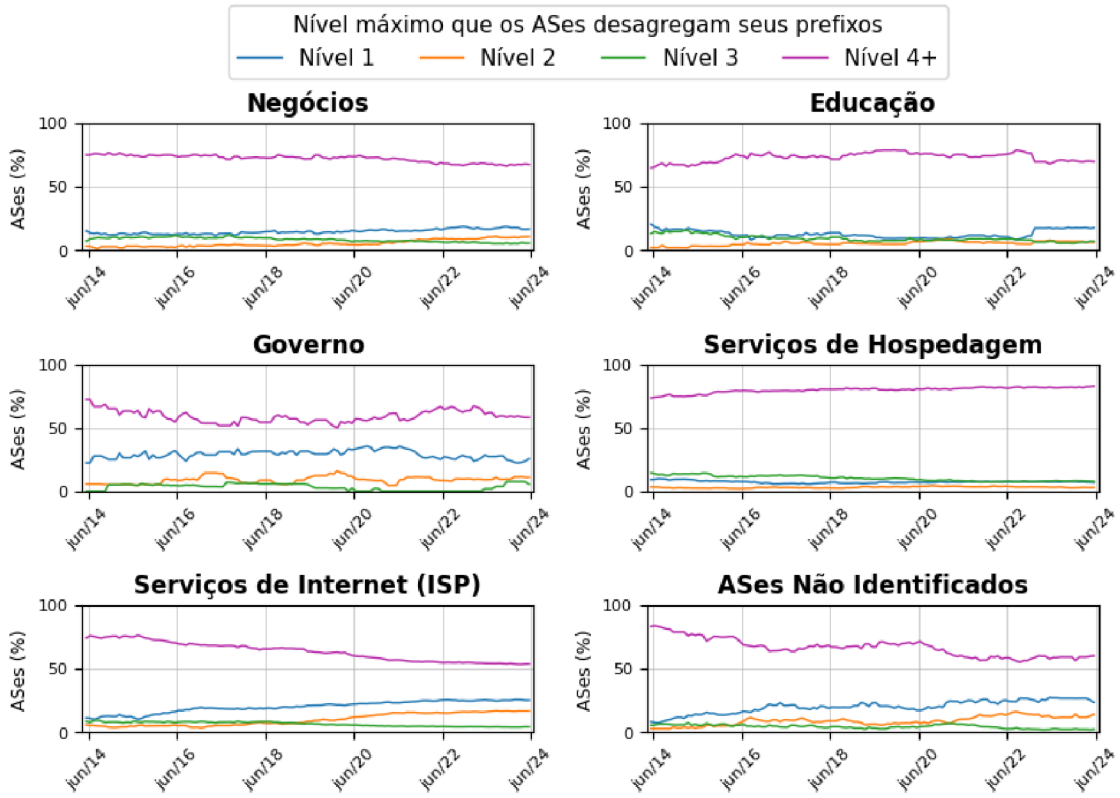


Figura 44: ASes categorizados de acordo com o nível de desagregação que os prefixos anunciados podem chegar, de acordo com tipo de AS - IPv6.

ISPs e serviços de hospedagem mostram aumento na desagregação em níveis menores, refletindo a escassez de prefixos. No que diz respeito aos tipos de ASes observados, notamos que, em relação aos de provedores de Internet (ISPs), observou-se um aumento contínuo na quantidade de prefixos desagregados de níveis 1 e 2 enquanto ocorre uma brusca redução nos níveis 3 e 4+, indicando uma possível entrada de novos ASes desse tipo na rede, recebendo menos blocos IPv4, devido à escassez de prefixos.

Em resumo, as análises dos prefixos IPv4 e IPv6 revelaram padrões semelhantes em termos de crescimento e distribuição regional, mas com diferenças significativas na adoção por tipo de AS. Enquanto o IPv4 continua a ser amplamente utilizado, o IPv6 apresenta um crescimento acelerado, especialmente em regiões com infraestrutura tecnológica avançada e em setores como ISPs e hospedagem. Esses resultados destacam a importância de considerar as particularidades de cada protocolo ao analisar a evolução da conectividade global.

5.5 Técnica de Anúncio Seletivo

A técnica de Anúncio Seletivo consiste em o Sistema Autônomo (AS) decidir para quais vizinhos irá anunciar seus prefixos na totalidade ou parcialmente. Dessa forma, ele tenta influenciar o tráfego de entrada pela rota que preferir. Essa técnica é ampla-

mente utilizada tanto em IPv4 quanto em IPv6, mas com diferenças significativas na adoção e aplicação, refletindo as particularidades de cada protocolo. Aqui, exploraremos a utilização, proporção e intensidade da técnica em ambos os protocolos, destacando padrões regionais e por tipo de AS.

5.5.1 Utilização

Para detectarmos os ASes que fizeram uso da técnica, analisamos todos os anúncios realizados pelos originadores de prefixos, observando para quais vizinhos os prefixos eram anunciados na origem. Dessa forma, foi possível avaliar se o AS utilizou a técnica, quantos vizinhos receberam os prefixos anunciados de forma seletiva e qual foi a intensidade de seletividade.

No IPv4, desagregamos todos os prefixos anunciados para o tamanho /24, que é considerado o mais específico para roteamento na Internet. No IPv6, a desagregação foi feita para o tamanho /48, que é amplamente observado como o menor prefixo mais relevante alocado em redes locais. Essa abordagem permite identificar comportamentos seletivos de anúncio de forma precisa, evitando a interferência de outras técnicas, como o Anúncio de Prefixo Mais Específico.

Na Figura 45, apresentamos a fração dos ASes utilizadores da técnica de forma global e regional para IPv4.

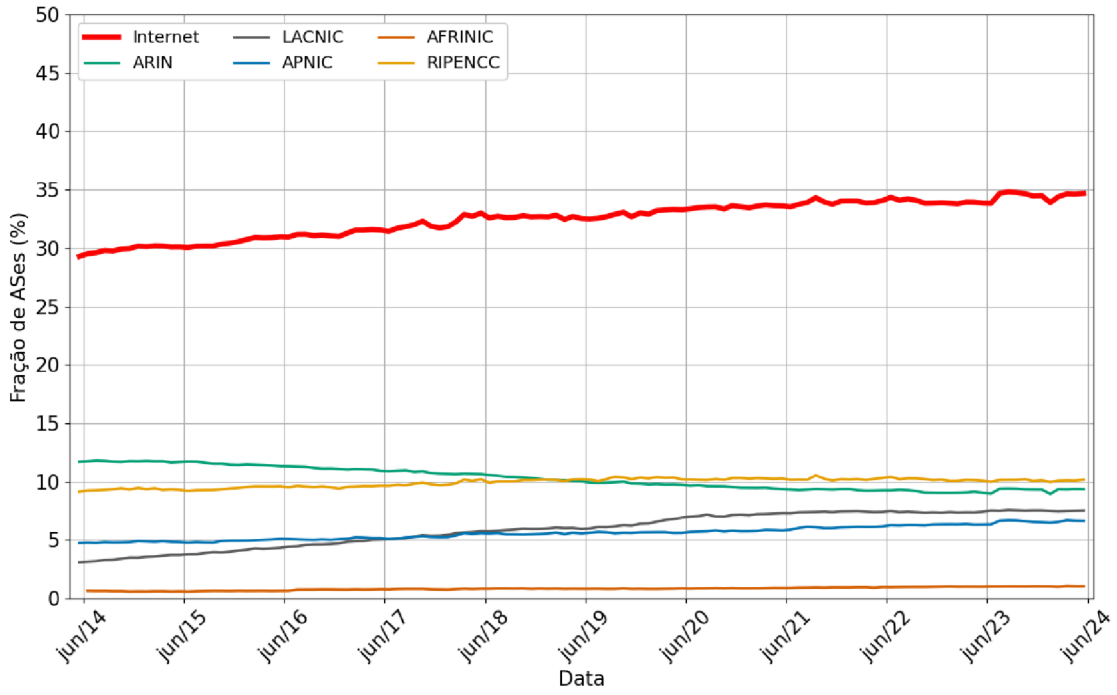


Figura 45: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observada regionalmente - IPv4.

O uso do Anúncio Seletivo apresentou crescimento consistente em nível global

e regional. Os dados revelam um notável crescimento no uso do Anúncio Seletivo pelos ASes ao longo dos anos, tanto globalmente quanto regionalmente. Globalmente, a proporção de ASes utilizando a técnica passou de cerca de 29,3% em 2014 para aproximadamente 34,7% em 2024.

Para o IPv6, a Figura 46 apresenta a fração de ASes utilizadores da técnica de forma global e regional.

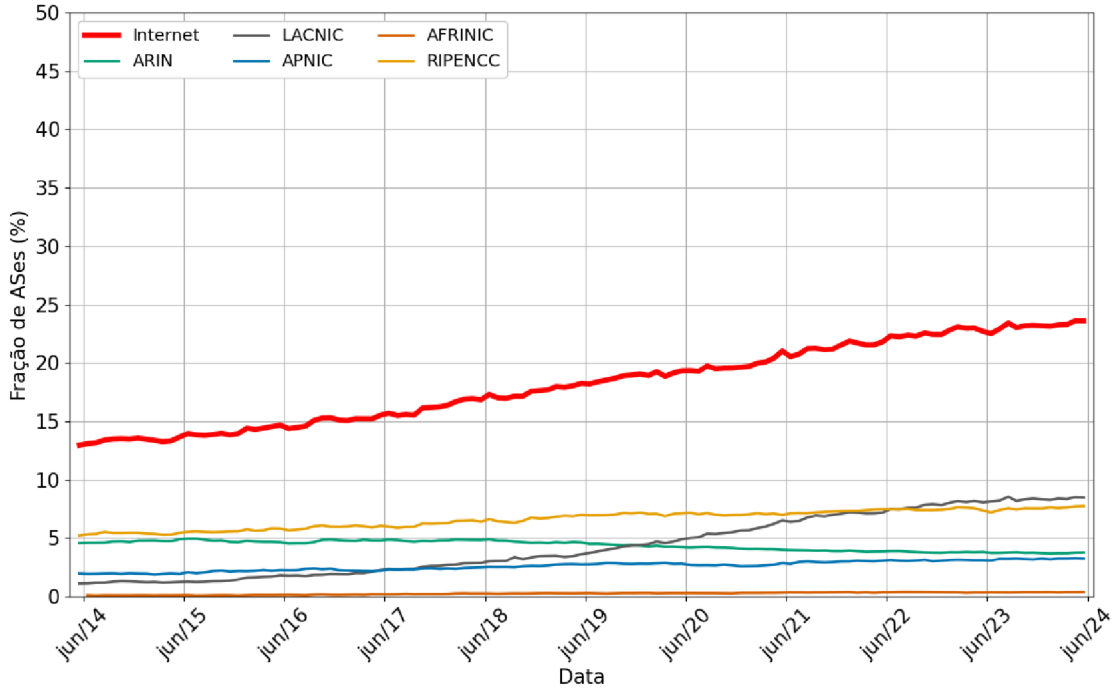


Figura 46: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observados regionalmente - IPv6.

LACNIC apresentou um grande aumento de uso da técnica pelos ASes, ao longo dos anos, enquanto as outras regiões mantiveram estabilidade. A adoção da técnica de Anúncio Seletivo mostra um crescimento geral constante, mas com pequenas diferenças entre regiões, influenciadas por fatores como maturidade técnica, políticas regionais e infraestrutura.

A Figura 47 destaca a fração dos ASes utilizadores da técnica de acordo com o tipo de AS para IPv4.

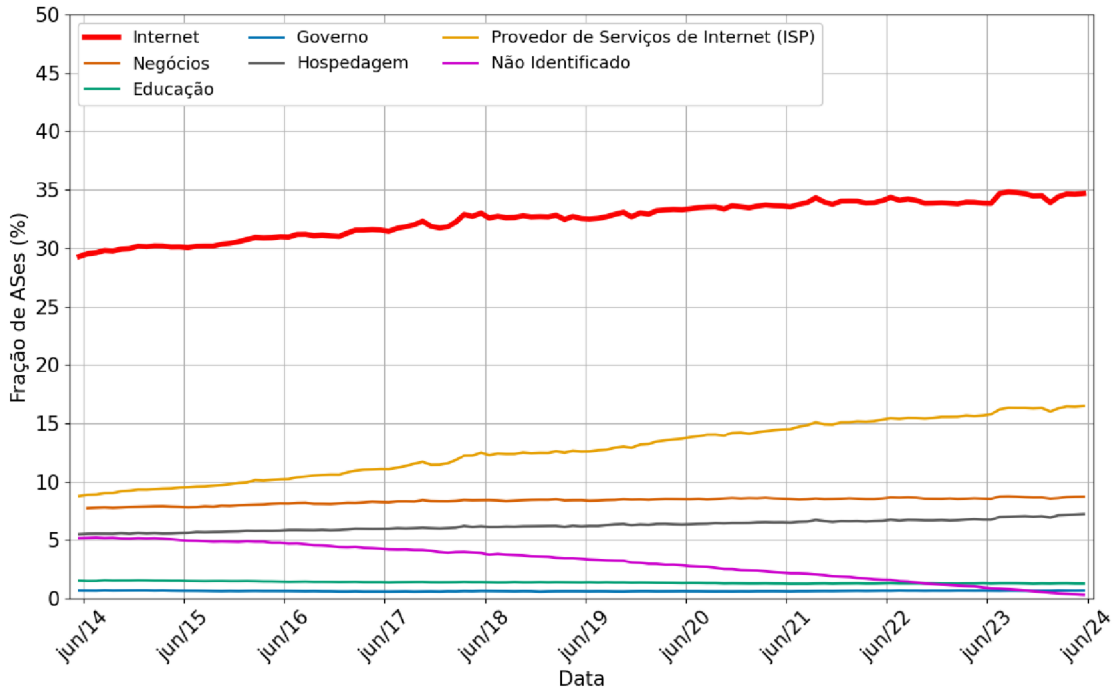


Figura 47: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observada de acordo com o tipo de AS - IPv4.

O segmento de ISPs liderou o crescimento proporcional no uso do Anúncio Seletivo na última década. Os ASes voltados para negócios mantiveram estabilidade no uso do Anúncio Seletivo, com a proporção em torno de 25% ao longo da década.

Para o IPv6, a Figura 48 mostra a fração de ASes que utilizaram a técnica de acordo com o tipo de AS.

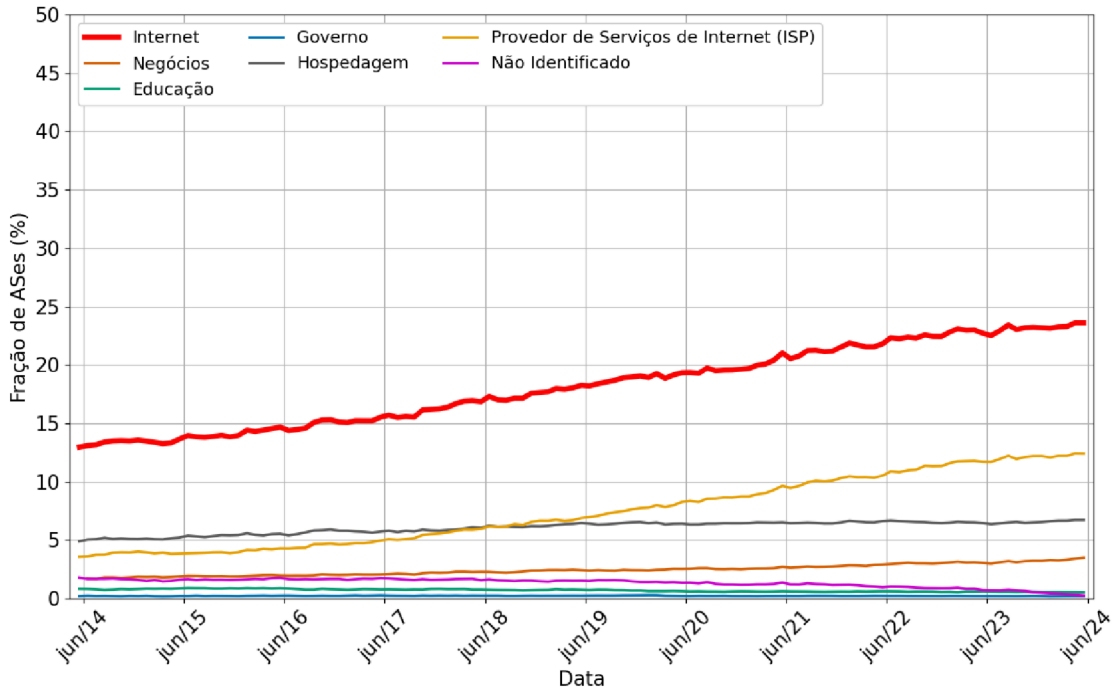


Figura 48: Fração de ASes que utilizam a técnica Anúncio Seletivo, observados de acordo com o tipo de AS.

ISPs possuem aumento mais relevante de uso da técnica, ao longo do tempo. O gráfico evidencia que os ISPs lideram a adoção da técnica de Anúncio Seletivo, seguidos pelos serviços de hospedagem, enquanto os setores de negócios, educação e governo apresentam adoção quase inexistente.

5.5.2 Proporção

A metodologia utilizada para analisar a proporção de uso da técnica de Anúncio Seletivo baseia-se na identificação da quantidade de prefixos desagregados para o tamanho /24 no IPv4 e /48 no IPv6. Essa abordagem permite avaliar o grau de desagregação promovido pelo Anúncio Seletivo de maneira quantitativa e objetiva.

Na Figura 49, observamos os resultados obtidos da análise de proporção de uso para IPv4.

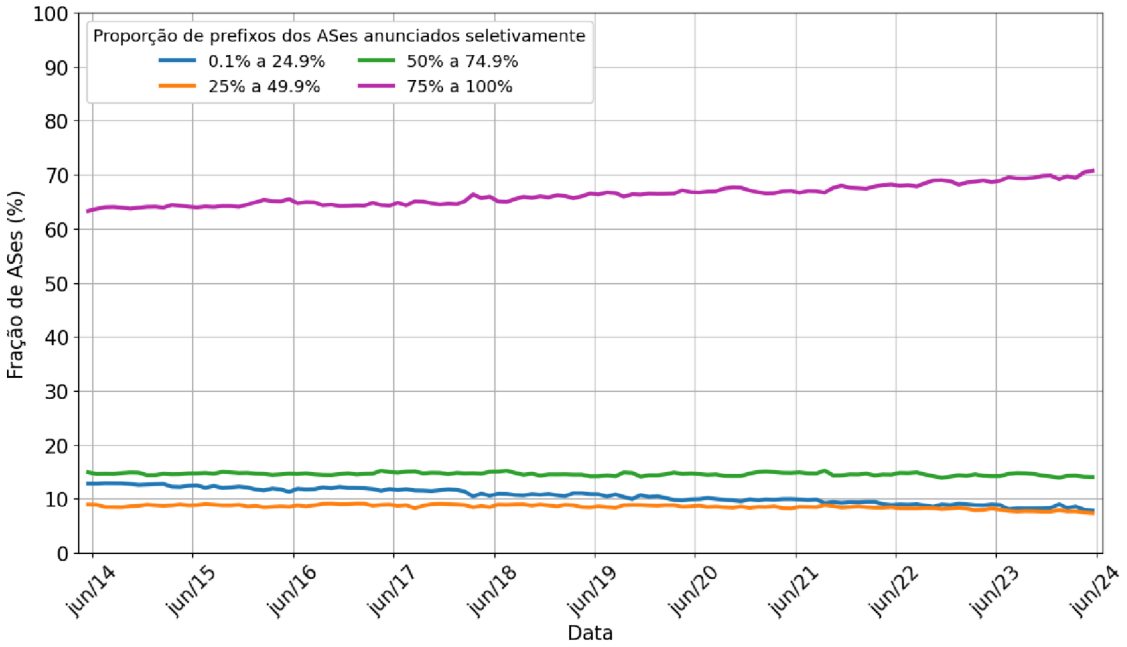


Figura 49: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes - IPv4.

O uso intenso do Anúncio Seletivo está em ascensão globalmente, com destaque para a categoria 75% a 100%. Os dados mostram que, em 2014, cerca de 7.353 ASes utilizavam a técnica em 75% a 100% de seus prefixos, número que cresceu significativamente para 15.356 em 2024.

Para o IPv6, a Figura 50 apresenta a proporção de uso de prefixos mais específicos em seus anúncios.

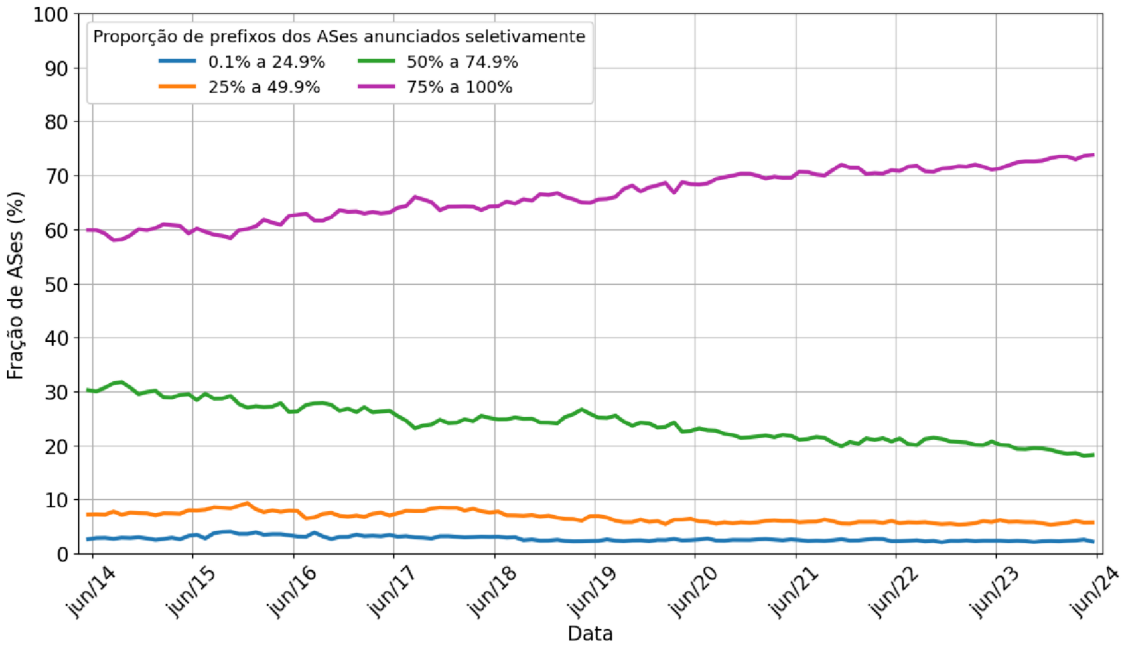


Figura 50: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes

Maior parte dos ASes anuncia seletivamente mais de 75% dos seus prefixos IPv6.

A técnica de Anúncio Seletivo no IPv6 é predominantemente utilizada de forma intensiva, especialmente por ASes que buscam granularidade no gerenciamento de tráfego e engenharia de roteamento.

Nas Figuras 51 e 52, podemos observar o comportamento dos ASes de forma regional para IPv4 e IPv6, respectivamente.

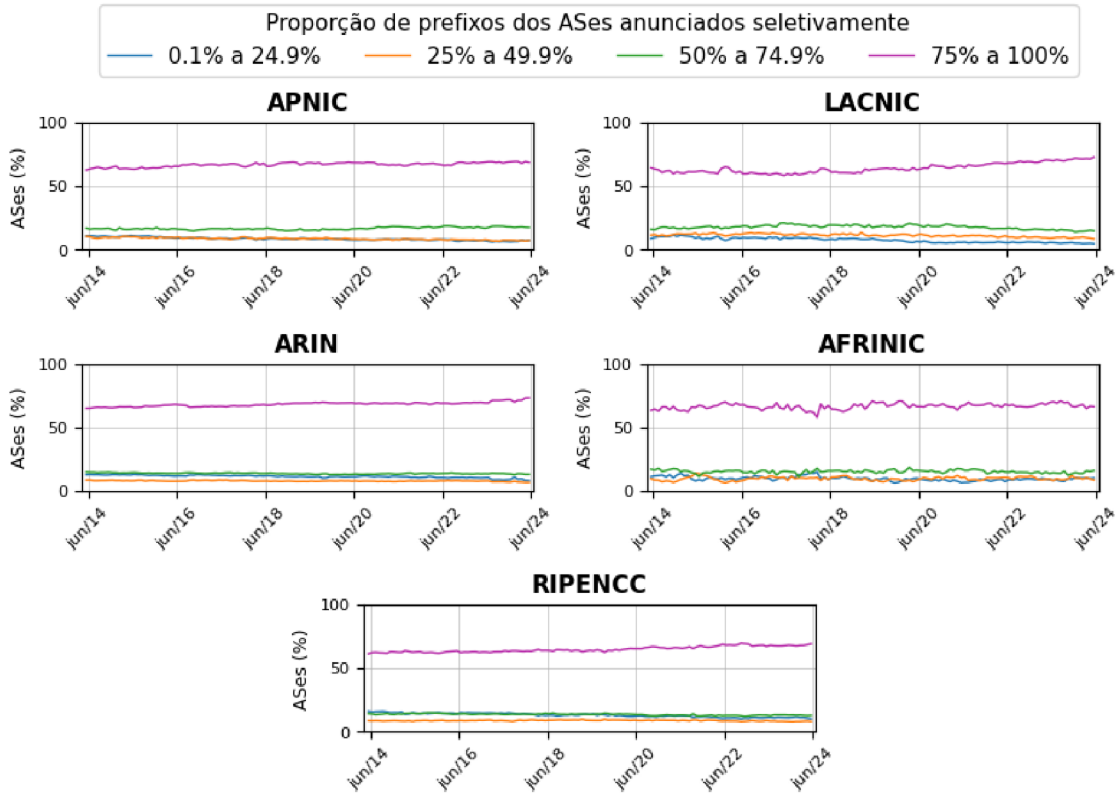


Figura 51: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados regionalmente - IPv4.

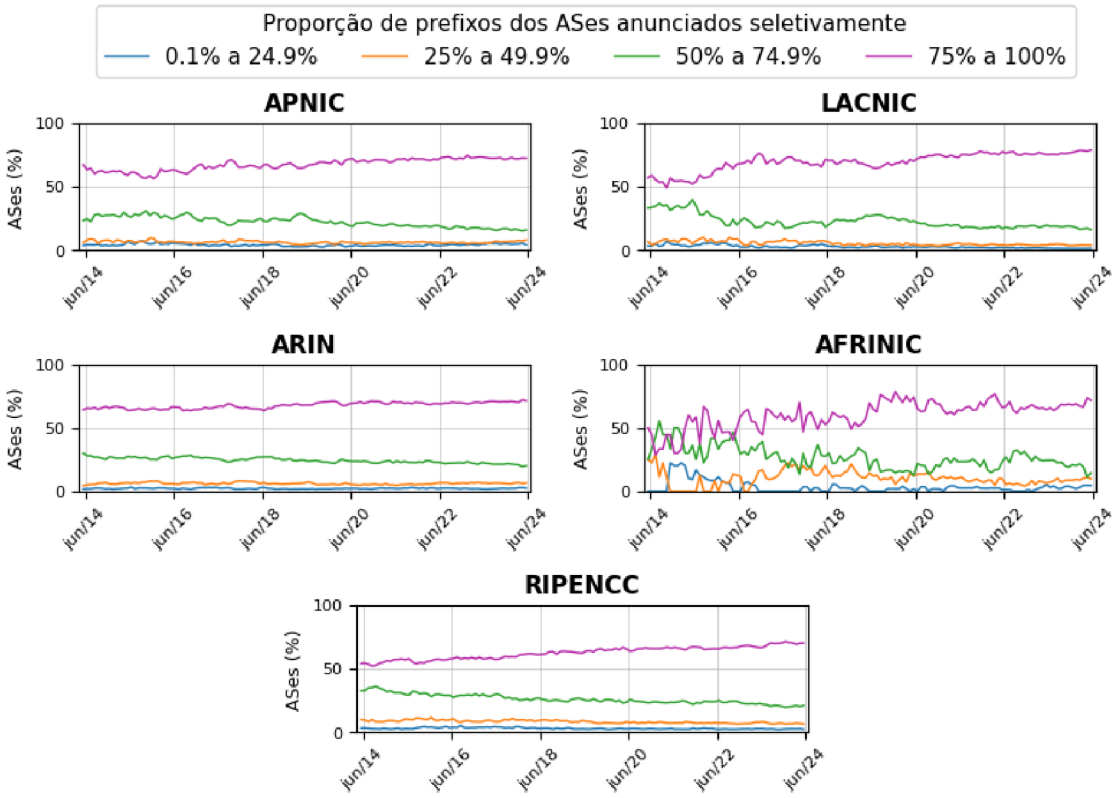


Figura 52: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados regionalmente

O uso do Anúncio Seletivo intensivo (75% a 100%) cresceu em todas as regiões, destacando-se como a principal estratégia adotada globalmente. Regiões como AFRINIC e LACNIC apresentaram os maiores avanços nessa categoria, passando de 64,7% para 72,8% e de 62,9% para 72,8%, respectivamente, ao longo da década.

A Figura 53 e 54 apresentam a proporção de uso de prefixos mais específicos por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

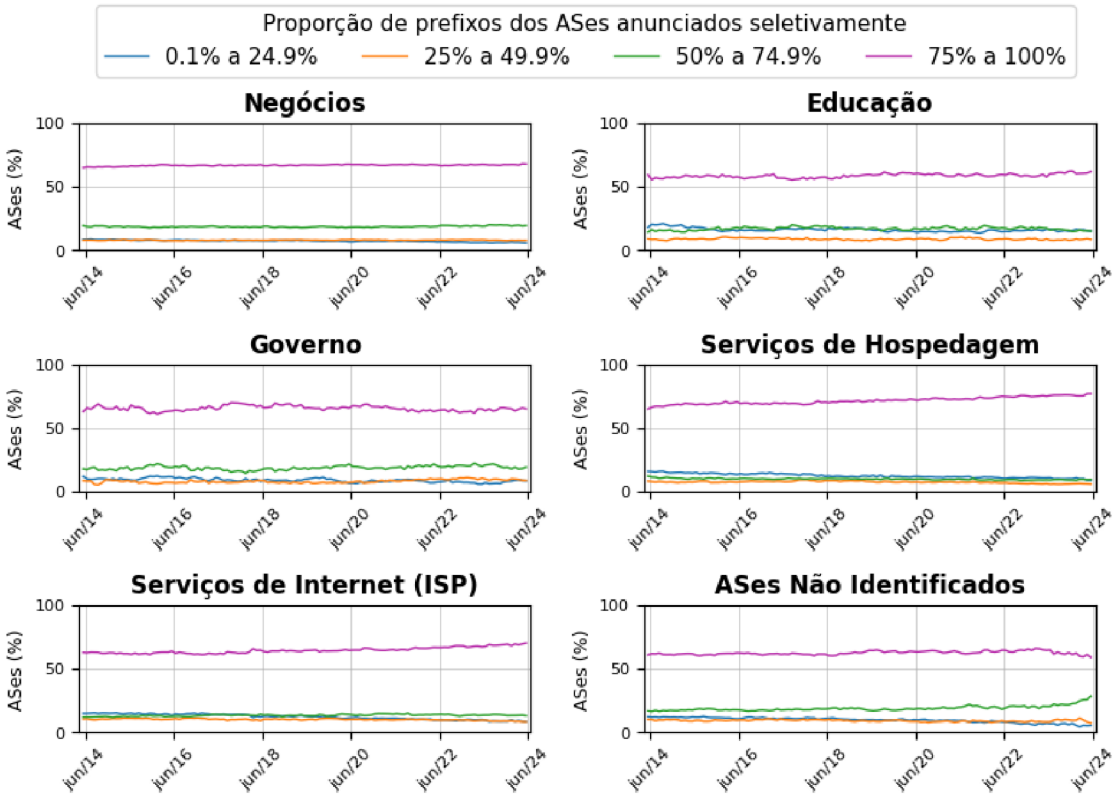


Figura 53: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados de acordo com tipo de AS - IPv4.

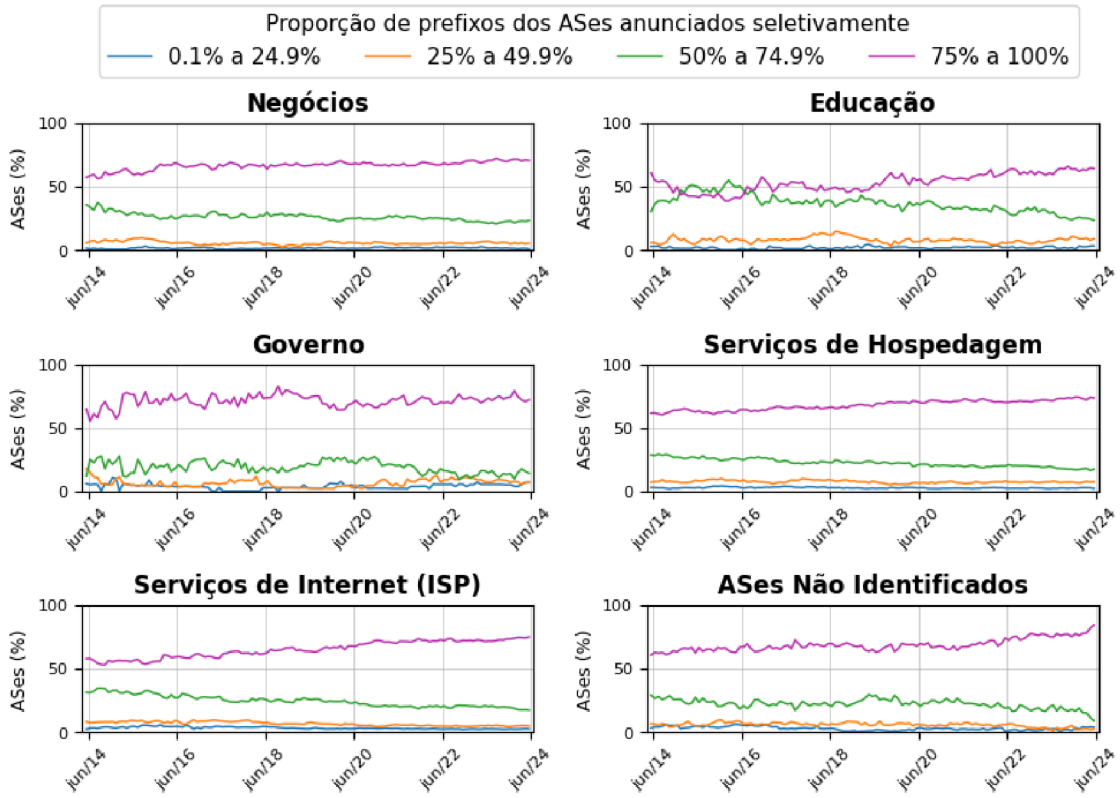


Figura 54: Proporção de prefixos anunciados seletivamente pelos ASes, observados de acordo com tipo de AS

Os ASes voltados para negócios destacam-se pelo aumento contínuo no uso intensivo (75% a 100%), representando mais de 72% das configurações em 2024. Esse crescimento reflete o foco dessas entidades em otimizar a gestão de tráfego e atender às demandas crescentes de conectividade em ambientes corporativos complexos.

5.5.3 Intensidade

A intensidade de seletividade é definida como a fração de vizinhos que receberam cada prefixo /24 (IPv4) ou /48 (IPv6) anunciado pelo AS originador. Para classificar os ASes, utilizamos a mediana da intensidade da seletividade, dividindo-os em três níveis: baixo (mediana entre 0,01 e 0,33), médio (mediana entre 0,34 e 0,66) e alto (mediana entre 0,67 e 1,00).

Na Figura 55, observamos os resultados obtidos da análise das medianas de intensidade da seletividade dos ASes para IPv4.

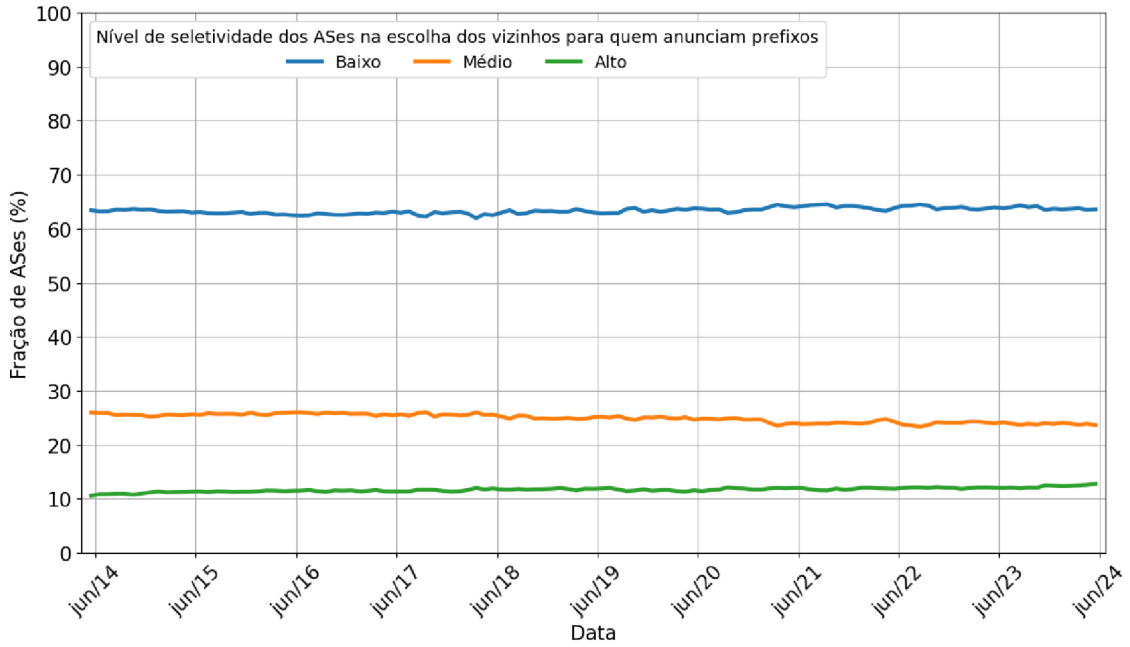


Figura 55: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados globalmente - IPv4.

A maioria dos ASes prioriza visibilidade e conectividade em suas estratégias de roteamento. Isso é evidenciado pelo fato de 65% deles adotar um baixo nível de seletividade na escolha dos vizinhos para quem anunciam suas rotas, garantindo que a maior parte dos vizinhos receba as rotas propagadas.

Para o IPv6, a Figura 56 mostra a intensidade de uso de prefixos mais específicos em seus anúncios.

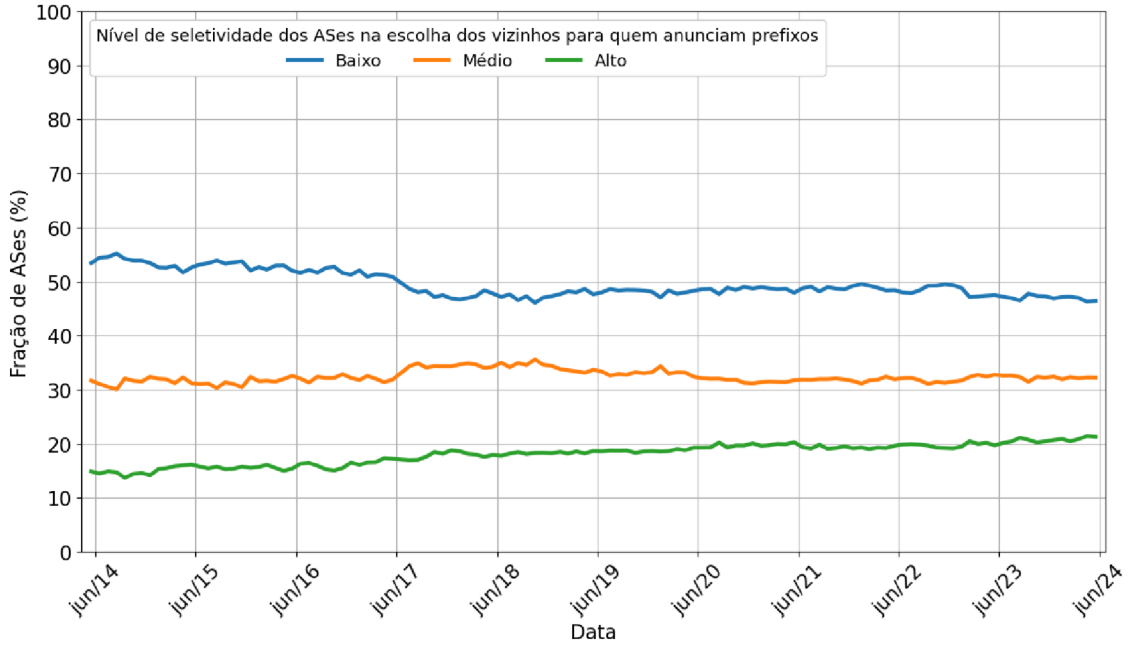


Figura 56: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados globalmente.

A maioria dos ASes prioriza visibilidade e conectividade na hora de selecionar vizinhos para anunciar prefixos IPv6. Isso é evidenciado pelo fato de que a variação de ASes que possuem baixo nível de seletividade na escolha dos vizinhos varia de 54,03% em 2014 para 47,89% em 2024, mantendo sempre acima dos outros níveis.

Nas Figuras 57 e 58, observamos a intensidade de uso de prefixos mais específicos por região para IPv4 e IPv6, respectivamente.

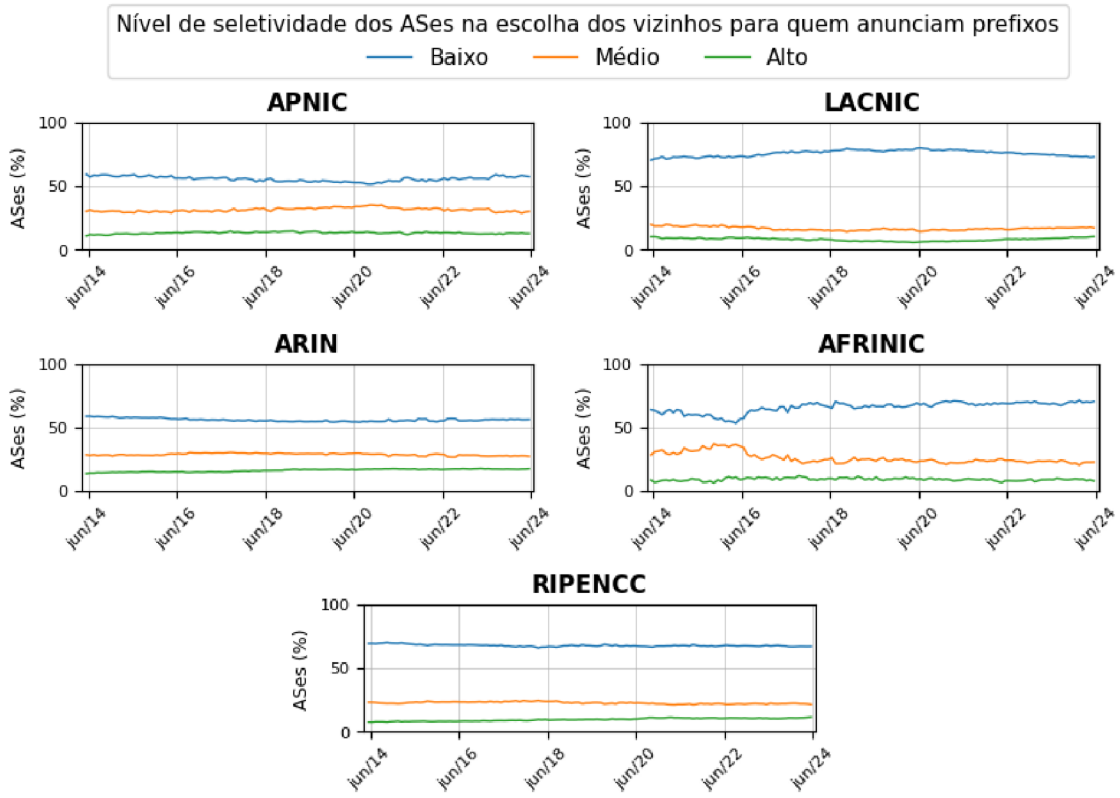


Figura 57: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados regionalmente - IPv4.

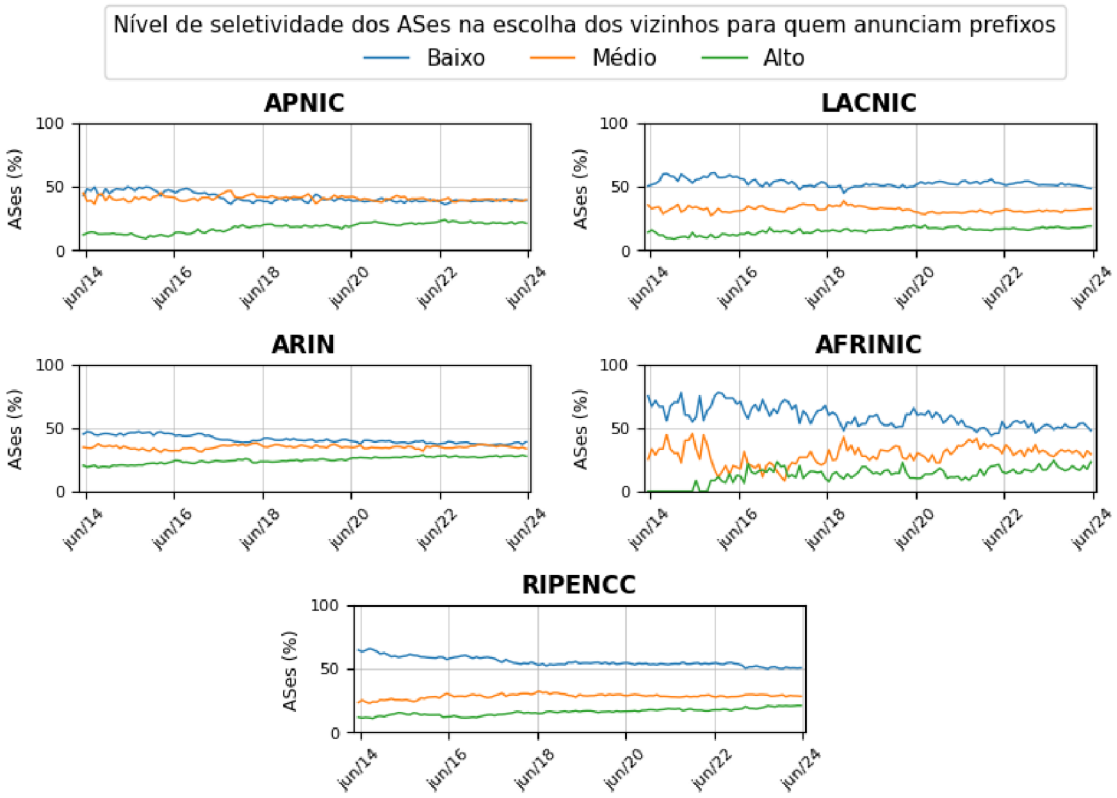


Figura 58: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, observados regionalmente.

Todas as regiões da IANA apresentam um nível de seletividade baixo, indicando uma preferência por maior conectividade e visibilidade de rotas. Esse comportamento sugere que os ASes, independentemente da região, adotam estratégias que maximizam a propagação de suas rotas, evitando restrições excessivas na escolha de vizinhos.

A Figura 59 e 60 apresentam a intensidade de uso de prefixos mais específicos por tipo de AS para IPv4 e IPv6, respectivamente.

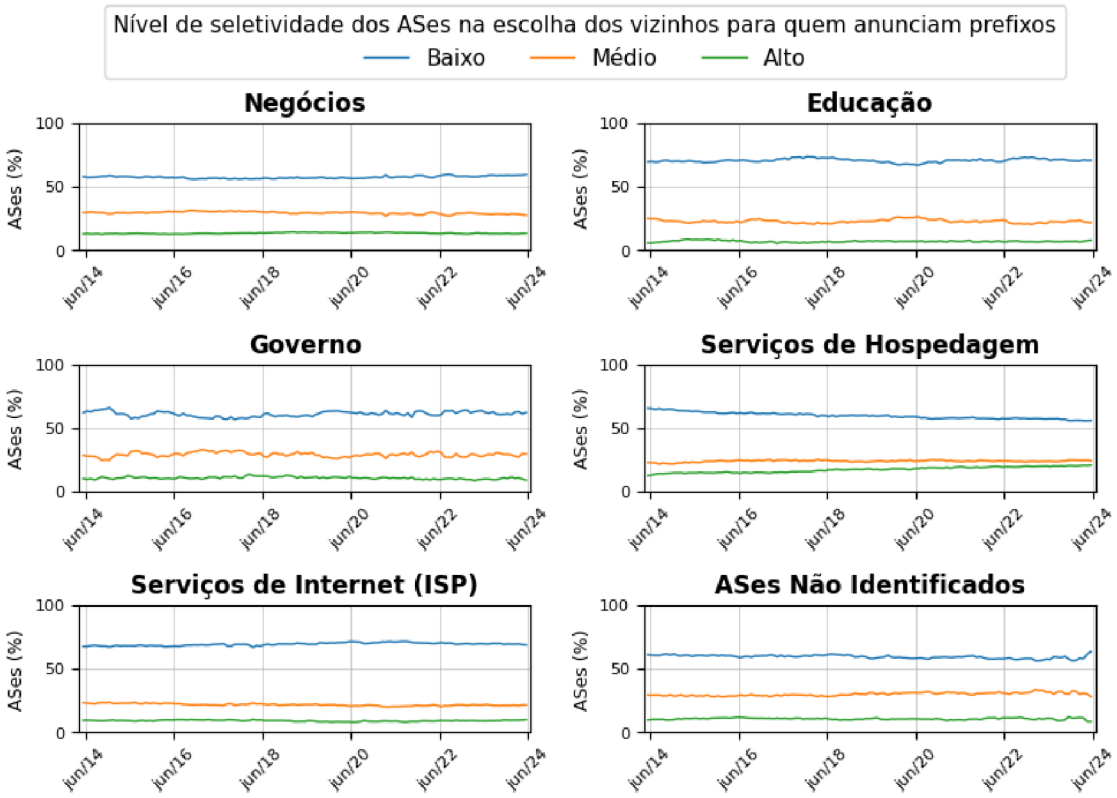


Figura 59: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, de acordo com tipo de AS - IPv4.

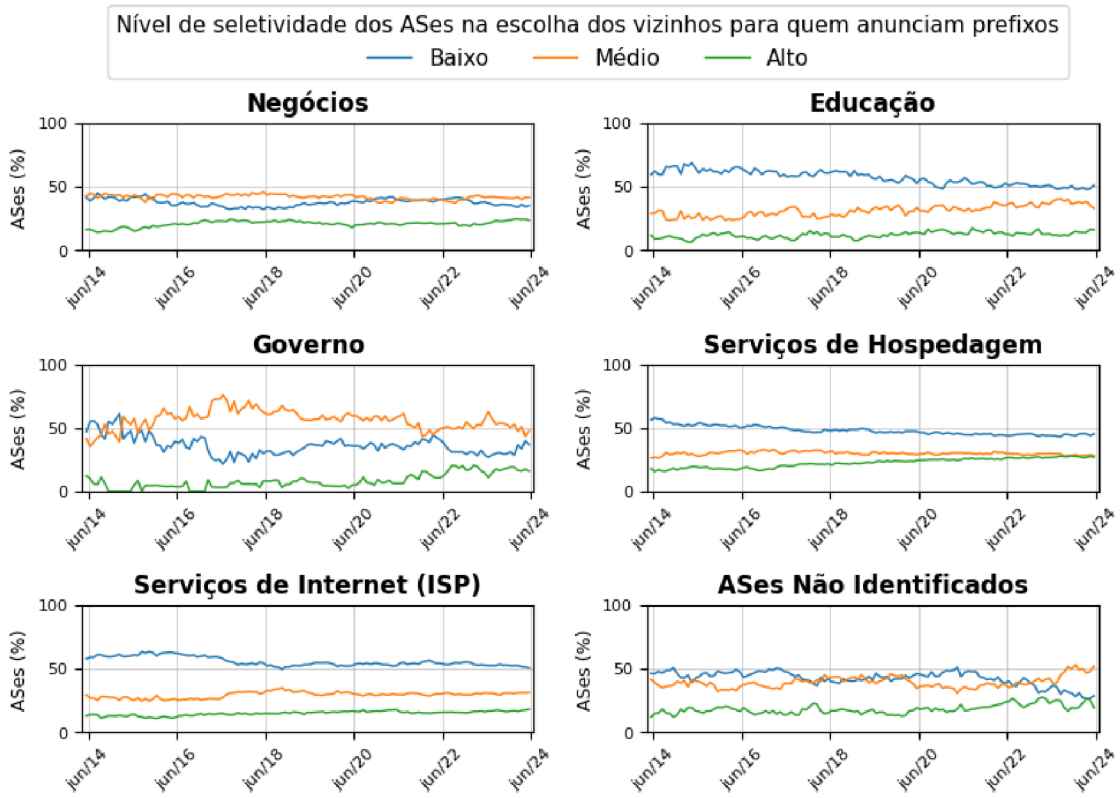


Figura 60: Nível de seletividade dos ASes na hora de escolher vizinhos para anunciar os prefixos, de acordo com tipo de AS.

ISPs lideram em intensidade alta de anúncios seletivos, o que reflete sua necessidade de gerenciar rotas de maneira otimizada para atender a grandes volumes de tráfego e a diferentes clientes. Provedores de hospedagem também apresentam níveis elevados de intensidade, destacando a importância de flexibilidade e ajustes para lidar com diferentes tipos de serviços e clientes.

Em resumo, as análises dos prefixos IPv4 e IPv6 revelaram padrões semelhantes em termos de crescimento e distribuição regional, mas com diferenças significativas na adoção por tipo de AS. Enquanto o IPv4 continua a ser amplamente utilizado, o IPv6 apresenta um crescimento acelerado, especialmente em regiões com infraestrutura tecnológica avançada e em setores como ISPs e hospedagem. Esses resultados destacam a importância de considerar as particularidades de cada protocolo ao analisar a evolução da conectividade global.

5.6 Análise da Utilização Simultânea das Três Técnicas

Nesta seção, exploramos a utilização simultânea das três técnicas de engenharia de tráfego: AS-Path Prepend (ASPP), Anúncio de Prefixo Mais Específico e Anúncio Seletivo. Nosso objetivo foi compreender como os ASes combinam essas técnicas, tanto em IPv4 quanto em IPv6, e identificar padrões de comportamento que possam revelar

estratégias de roteamento mais complexas. Para isso, analisamos a utilização, proporção e intensidade de uso das técnicas, destacando semelhanças e diferenças entre os dois protocolos.

5.6.1 Utilização

Para compreender as escolhas dos ASes em relação às técnicas analisadas, agrupamos os ASes de acordo com a aplicação das técnicas observadas em seus anúncios durante o período analisado. Esses agrupamentos consideram ASes que utilizam as técnicas de forma alternada ou combinada em diferentes momentos, mas não identificam o uso simultâneo das técnicas em um mesmo anúncio. Por exemplo, ASes incluídos no grupo ”Somente Anúncio Seletivo”foram observados aplicando exclusivamente essa técnica ao longo do período analisado, sem evidência de uso de outras.

Na Figura 61, apresentamos a visão global da utilização simultânea das técnicas para IPv4.

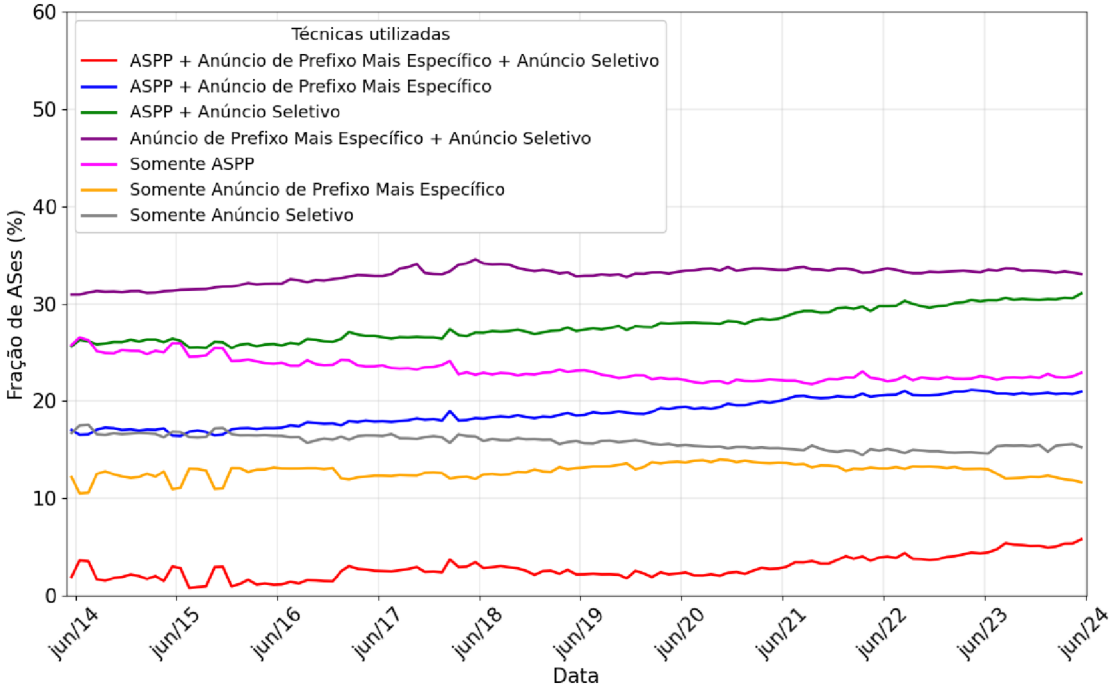


Figura 61: Usos simultâneo e exclusivo das técnicas AS-Path Prepend, Anúncio de Prefixo mais Específico e Anúncio Seletivo, de forma global - IPv4.

Os dados analisados revelam uma predominância no uso combinado das técnicas Anúncio de Prefixo Mais Específico + Anúncio Seletivo, com percentuais frequentemente superiores a 30%, indicando ampla adoção por parte dos ASes. Por outro lado, a fração de ASes que faz uso simultâneo das três técnicas é relativamente baixa, com percentuais geralmente abaixo de 5%. Esse comportamento sugere que a aplicação das

três técnicas em conjunto ocorre apenas em cenários específicos, possivelmente devido a requisitos técnicos ou operacionais.

Para o IPv6, a Figura 62 apresenta a visão global da utilização simultânea das técnicas.

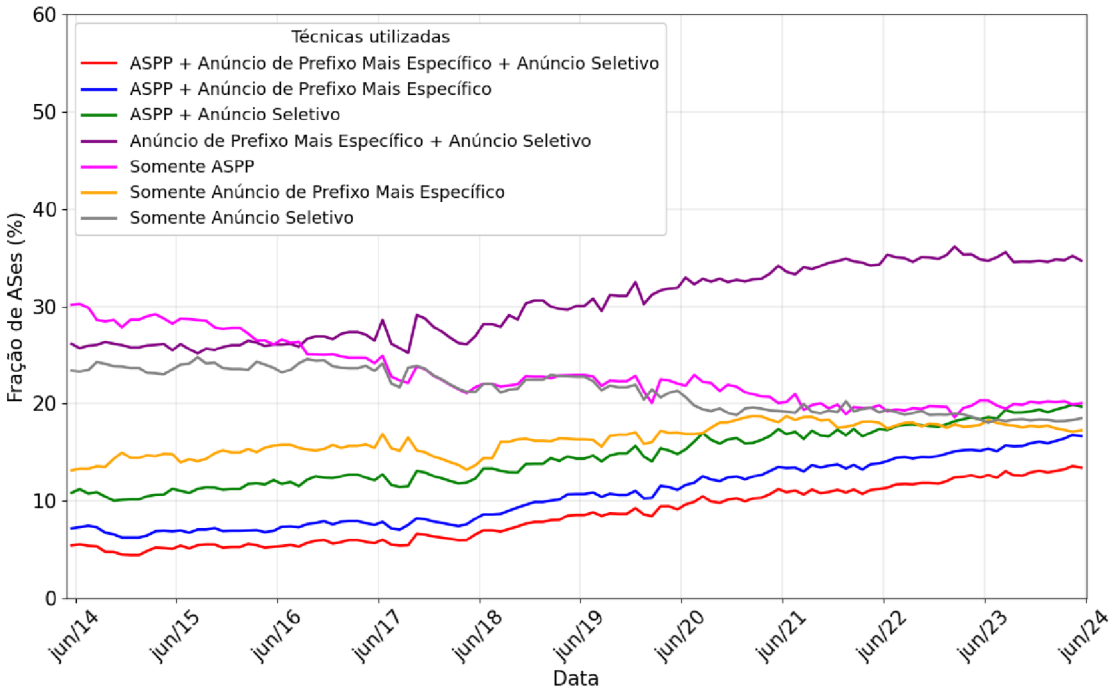


Figura 62: Usos simultâneo e exclusivo das técnicas AS-Path Prepend, Anúncio de Prefixo mais Específico e Anúncio Seletivo, de forma global - IPv6.

A adoção de técnicas de roteamento no IPv6 reflete uma transição para estratégias híbridas, com foco crescente em flexibilidade e especificidade, enquanto métodos mais simples e isolados perdem relevância ao longo do tempo. Os resultados revelam uma tendência crescente de adoção de estratégias híbridas, com destaque para a combinação de ”Anúncio de Prefixo Mais Específico”e ”Anúncio Seletivo”, que lidera em utilização.

O uso exclusivo das técnicas também apresenta padrões interessantes. No IPv4, a quantidade de ASes que utiliza apenas a técnica ASPP mantém percentuais elevados (22–25%), demonstrando que muitos ASes possuem confiança no uso dela. Em contrapartida, o uso exclusivo das outras duas técnicas, Anúncio Seletivo e Prefixo mais Específico, apresentam percentuais mais baixos, em torno de 12–15%, indicando que essas técnicas são frequentemente utilizadas em combinação com outras. No IPv6, o grupo dos ASes que usam ”Somente ASPP”apresenta declínio constante, indicando que os operadores estão priorizando soluções mais dinâmicas e adaptadas ao ambiente IPv6.

5.6.2 Proporção

Para compreender o comportamento dos ASes no uso das técnicas de engenharia de tráfego, realizamos uma análise quantitativa e visual utilizando dados de proporção de uso das três principais técnicas: ASPP, Anúncio de Prefixo Mais Específico e Anúncio Seletivo. Para isso, geramos gráficos de dispersão tridimensional (*scatter plot 3D*), posicionando cada ASN no gráfico conforme suas proporções de uso nas três técnicas, permitindo avaliar possíveis correlações e padrões de comportamento.

Na Figura 63, apresentamos a análise da proporção de uso das três técnicas para IPv4.

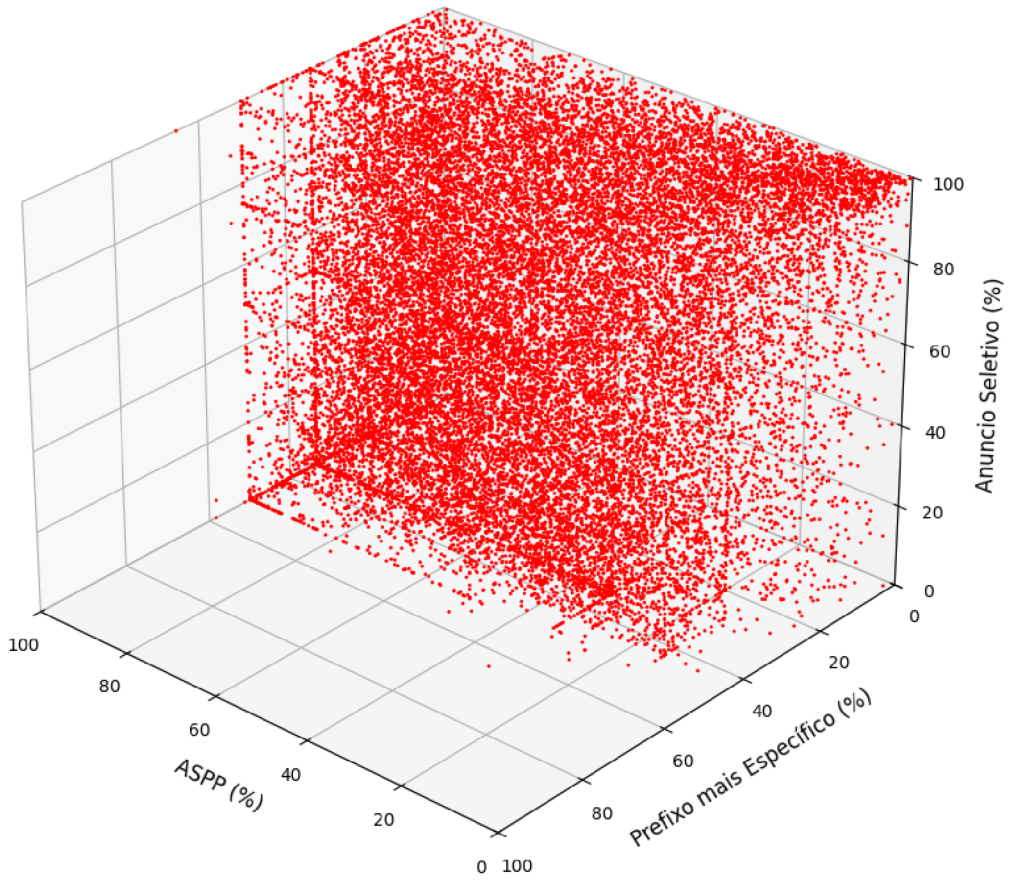


Figura 63: Análise da proporção de uso das 3 técnicas em IPv4.

Embora o ASPP seja a técnica mais utilizada individualmente, o Anúncio Seletivo também apresenta ampla adoção, possivelmente devido à sua eficácia em cenários específicos. Por outro lado, o menor número de ASNs que utilizam exclusivamente o Anúncio de Prefixo Mais Específico sugere que essa técnica é frequentemente usada em combinação com as demais.

Para o IPv6, a Figura 64 apresenta a análise da proporção de uso das três técnicas.

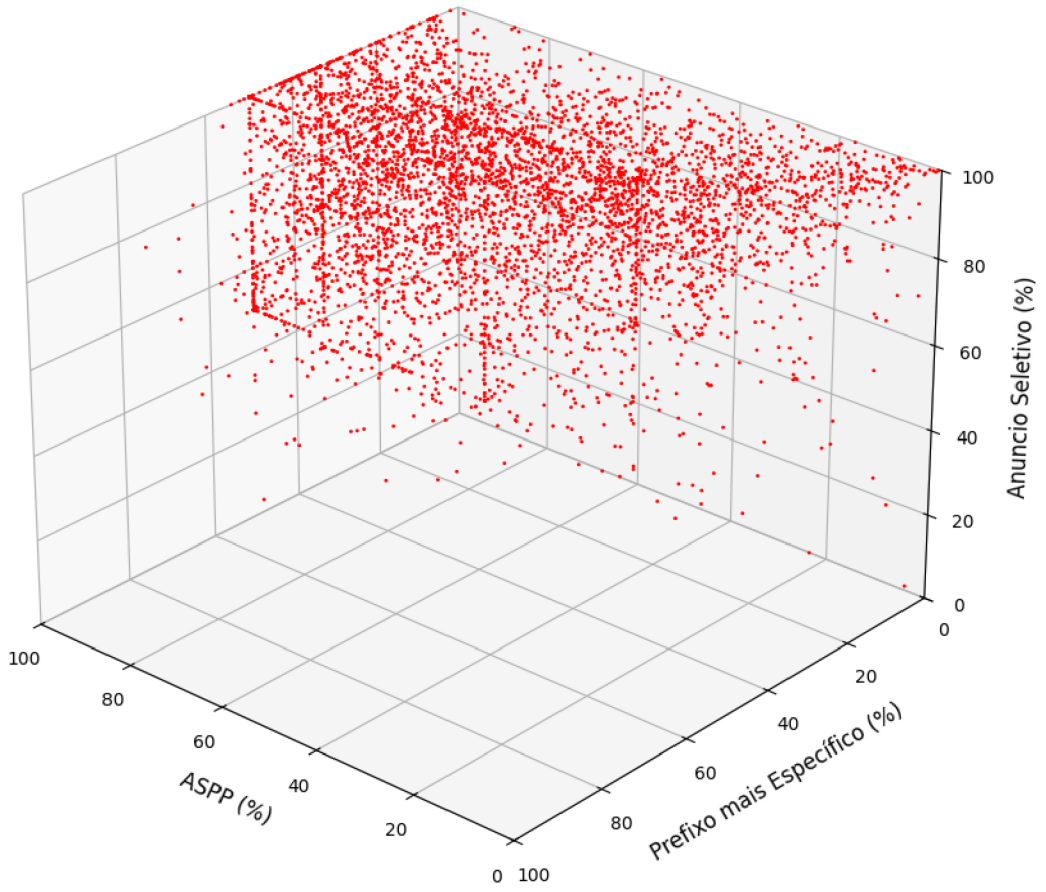


Figura 64: Análise da proporção de uso das 3 técnicas em IPv6.

A análise dos ASNs em IPv6 revelou que o Anúncio de Prefixo Mais Específico é utilizado de forma restrita, com proporções majoritariamente abaixo de 50%, enquanto o Anúncio Seletivo apresentou ampla adoção, com a maioria dos ASNs utilizando essa técnica em proporções próximas a 100%. Por outro lado, a técnica ASPP mostrou uma distribuição mais diversificada, variando amplamente entre 0% e 100%, sugerindo flexibilidade na sua aplicação para atender a diferentes necessidades de engenharia de tráfego.

Esses resultados indicam que as técnicas são utilizadas de forma complementar, com o Prefixo Mais Específico sendo mais conservador, o Anúncio Seletivo amplamente preferido, e o ASPP aplicado de forma adaptativa dependendo do cenário.

5.6.3 Intensidade

Não foi possível medir a correlação na intensidade de uso entre as técnicas devido à incompatibilidade nas métricas utilizadas para cada uma delas. O coeficiente de correlação de Pearson, que exige variáveis quantitativas contínuas em escalas comparáveis, não é aplicável nesse contexto, pois as metodologias diferem significativamente. Enquanto o Anúncio Seletivo utiliza a mediana da intensidade de propagação como métrica contínua,

técnicas como Anúncio Mais Específico e AS-Path Prepend baseiam-se em medições categóricas ou ordenadas, como o nível de desagregação dos prefixos ou o tamanho do prepend. Essas diferenças tornam impossível a aplicação de Pearson sem comprometer a validade dos resultados.

Para trabalhos futuros, seria relevante desenvolver ou adotar uma abordagem metodológica alternativa que permita comparar a intensidade de uso entre essas técnicas de forma consistente e estatisticamente robusta. Essa análise poderia fornecer uma visão mais profunda sobre como os ASes combinam essas técnicas para otimizar o roteamento e o gerenciamento de tráfego.

5.7 Correlação entre anúncios IPv4 e IPv6

Nesta análise, buscamos compreender a relação entre os Sistemas Autônomos (ASes) que anunciam prefixos IPv4 e IPv6, identificando padrões de comportamento e possíveis discrepâncias entre os dois protocolos. Utilizamos um conjunto de dados que contém o número de prefixos anunciados por cada ASN em cada protocolo, com o objetivo de verificar como os ASes distribuem seus anúncios entre IPv4 e IPv6, analisando se há correlação entre os dois e como essa distribuição se comporta na prática. Para isso, os dados de ambos os protocolos são combinados em uma única tabela, permitindo uma análise cruzada, sendo os valores ausentes tratados como zero.

Identificamos e removemos 8 outliers em cada um dos protocolos, considerando ASes que anunciam um número excessivo de prefixos (mais de 40 mil), a fim de melhorar a visualização dos dados e facilitar a interpretação dos resultados. A visualização gerada é um Scatter Plot onde o eixo X representa o número de prefixos IPv4 e o eixo Y representa o número de prefixos IPv6, com cada ponto no gráfico correspondendo a um ASN. Essa abordagem nos permite observar padrões gerais, como a existência de correlação entre os protocolos, além de destacar possíveis tendências ou discrepâncias.

Com essa análise, esperamos identificar a proporção de ASes que anunciam prefixos em ambos os protocolos, evidenciar a relação entre o número de prefixos anunciados e destacar comportamentos que priorizam significativamente um protocolo em detrimento do outro. Os dados ajustados, após a remoção dos outliers, são exibidos na Figura 65 abaixo e servirão como base para futuras análises, como o impacto da adoção do IPv6 e o comportamento de engenharia de tráfego em diferentes ASes.

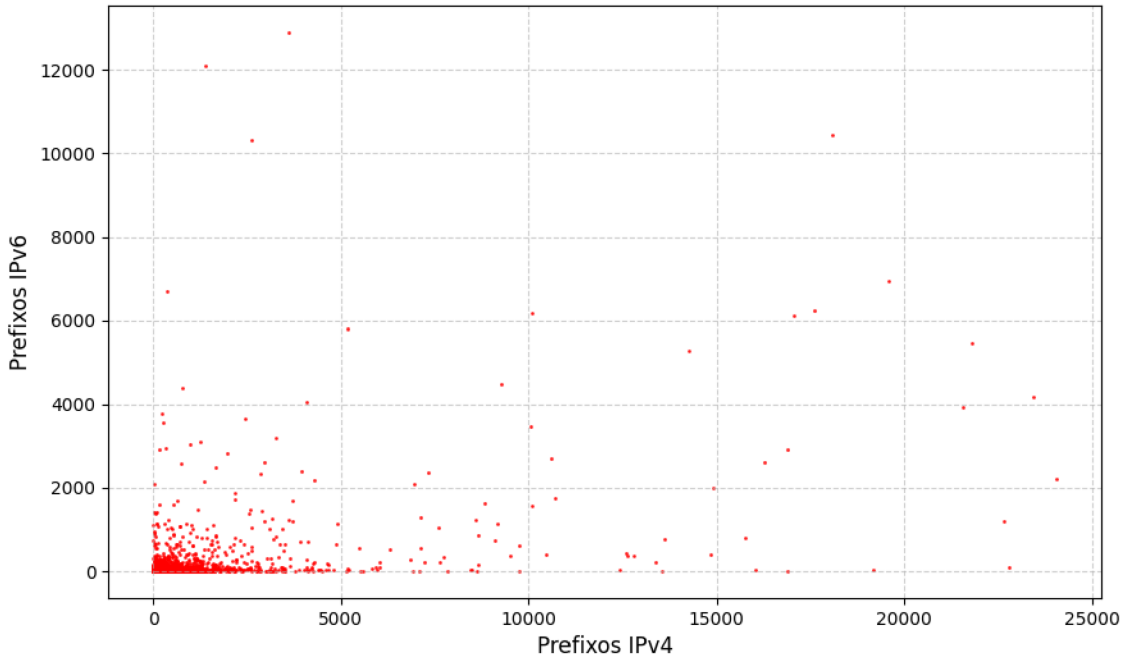


Figura 65: Correlação entre os prefixos anunciados em IPv4 e IPv6 ao longo dos 10 anos.

Apesar do crescimento e da adoção gradual do IPv6, ainda há uma preferência consolidada pelo uso do IPv4 para anúncios de prefixos. O gráfico Scatter Plot apresentado ilustra a relação entre o número de prefixos IPv4 e IPv6 anunciados por diferentes Sistemas Autônomos (ASes). Observamos que a maior parte dos pontos está concentrada próxima ao eixo $0, 0$, indicando que a maioria dos ASes anuncia poucos prefixos em ambos os protocolos. No entanto, a distribuição dos pontos mostra uma predominância de prefixos IPv4 em relação aos prefixos IPv6, evidenciando que os ASes que anunciam prefixos tendem a priorizar o IPv4.

Essa concentração próxima ao eixo $0, 0$ reflete a natureza altamente assimétrica da distribuição de prefixos, onde poucos ASes anunciam uma quantidade significativa de prefixos. Os pontos mais afastados na direção do eixo X (Prefixos IPv4) indicam ASes que anunciam uma quantidade elevada de prefixos nesse protocolo, enquanto os pontos mais afastados do eixo Y (Prefixos IPv6) são menos frequentes, reforçando a adoção desigual entre os dois protocolos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento constante da topologia da Internet e a necessidade de otimização do tráfego de entrada impulsionaram o desenvolvimento de diferentes estratégias de engenharia de tráfego. Neste trabalho, analisamos o uso das técnicas *AS-Path Prepend (ASPP)*, *Anúncio de Prefixo Mais Específico* e *Anúncio Seletivo* ao longo de 10 anos, buscando compreender como os Sistemas Autônomos (ASes) aplicam essas estratégias nos protocolos IPv4 e IPv6 e quais fatores influenciam suas decisões. A pesquisa utilizou dados coletados de diversos coletores BGP, permitindo uma visão ampla e detalhada sobre as políticas de engenharia de tráfego em diferentes regiões da IANA.

A análise revelou que o comportamento dos ASes varia significativamente de acordo com a infraestrutura disponível, as políticas regionais e o tipo de AS. No IPv4, observamos uma tendência de redução da desagregação de prefixos, possivelmente impulsionada pela escassez de endereços e pela necessidade de otimizar o uso dos prefixos existentes. Em contraste, no IPv6, a desagregação se mostrou significativamente maior, refletindo o espaço de endereçamento mais amplo e a flexibilidade oferecida por esse protocolo. Além disso, constatamos que o *AS-Path Prepend* continua sendo amplamente adotado de maneira estável ao longo do tempo, indicando sua importância como ferramenta de engenharia de tráfego. No entanto, a aplicação dessa técnica apresenta diferenças entre as regiões, sendo mais comum em locais com maior concentração de infraestrutura, como ARIN e RIPE NCC, e menos frequente em AFRINIC e LACNIC.

Um dos principais achados foi a predominância do uso combinado das técnicas *Anúncio Seletivo* e *Anúncio de Prefixo Mais Específico*, que juntas são utilizadas por mais de 30% dos ASes. Essa combinação reflete a busca por flexibilidade no controle de tráfego e seletividade nas políticas de roteamento. Por outro lado, o uso simultâneo das três técnicas ainda é raro, com menos de 5% dos ASes adotando essa abordagem, possivelmente devido à complexidade envolvida na coordenação desses mecanismos.

Em relação à proporção de uso, observamos que o *AS-Path Prepend* é aplicado em mais de 75% dos anúncios, com destaque para o uso de *prepends* de tamanho 1, exceto na região ARIN, onde *prepends* de tamanho 4 ou mais são mais comuns. Já o *Anúncio de Prefixo Mais Específico* é utilizado em menos de 25% dos anúncios na maioria das

regiões, com exceção do LACNIC, onde a desagregação é mais intensa. O *Anúncio Seletivo*, por sua vez, é aplicado em mais de 75% dos prefixos, com a maioria dos ASes priorizando a visibilidade e conectividade ao anunciar para muitos vizinhos.

A análise por tipo de AS revelou diferenças significativas. Os ISPs impulsionam o uso de *ASPP* e *Anúncio de Prefixo Mais Específico*, refletindo a necessidade de gerenciar grandes volumes de tráfego e otimizar rotas. Provedores de hospedagem preferem *prepends* de tamanho 1, indicando uma estratégia mais conservadora. Já os ASes governamentais apresentam maior uso de *Anúncio de Prefixo Mais Específico*, possivelmente devido à necessidade de controle mais granular sobre o tráfego.

Regionalmente, destacam-se tendências distintas. A região LACNIC lidera o crescimento no uso das técnicas, com aumento significativo na adoção de *Anúncio Seletivo* e *Anúncio de Prefixo Mais Específico*. Na RIPENCC, há uma preferência pelo uso de *ASPP*, com maior proporção de *prepends* de tamanho 1. Já a região ARIN utiliza mais *prepends* de tamanho 4 ou mais, refletindo uma estratégia de maior controle sobre o tráfego.

Ao comparar nossos resultados com trabalhos anteriores, percebemos que a utilização do *AS-Path Prepend* como estratégia de manipulação de tráfego já foi amplamente estudada, mas a relação entre essa técnica e o *Anúncio Seletivo* ainda recebe pouca atenção. Nossos resultados indicam que, apesar do aumento na adoção do *Anúncio Seletivo*, essa técnica ainda é aplicada de forma mais restrita, possivelmente devido às dificuldades operacionais de gerenciar seletividade de anúncios em larga escala. Além disso, identificamos uma correlação entre a intensidade do uso dessas técnicas e a categoria do AS (trânsito, conteúdo ou acessível), indicando que ASes de trânsito tendem a aplicar menos essas técnicas, enquanto ASes de conteúdo utilizam com maior frequência o *Anúncio de Prefixo Mais Específico* para controlar o tráfego de entrada.

Dentre as principais tendências observadas, destaca-se a predominância do IPv4 para anúncios de prefixos, apesar do avanço gradual do IPv6. Entretanto, a intensificação da adoção do IPv6 nas últimas décadas sugere que novas estratégias de engenharia de tráfego devem emergir para esse protocolo, especialmente diante do crescimento exponencial dos dispositivos conectados. Outro desafio identificado é a dificuldade em quantificar a intensidade de uso das técnicas, visto que a simples observação da presença de uma técnica não reflete necessariamente seu impacto na engenharia de tráfego. Isso ressalta a necessidade de novas métricas que permitam avaliar não apenas a adoção, mas a real influência dessas estratégias na propagação de rotas.

Como trabalhos futuros, pretende-se expandir essa análise para incluir a técnica de *Comunidades BGP*, permitindo uma visão mais abrangente das abordagens utilizadas para influenciar o tráfego de entrada. Além disso, a correlação entre a adoção dessas técnicas e fatores econômicos e regulatórios pode fornecer insights adicionais sobre as motivações por trás das escolhas dos ASes. A integração de modelos baseados em aprendizado de máquina pode ser explorada para prever padrões emergentes no uso das técnicas

e identificar tendências futuras na engenharia de tráfego. Também será relevante investigar como as grandes mudanças na interconectividade global, como a crescente adoção de redes definidas por software (SDN) e roteamento programável, impactarão as decisões de engenharia de tráfego nos próximos anos.

No contexto de divulgação científica, este trabalho já resultou em uma publicação na Escola Regional de Redes de Computadores (ERRC) 2024, apresentando à comunidade acadêmica os resultados obtidos até o momento. Além disso, há um planejamento para submissão dos resultados para a *ACM Internet Measurement Conference* (IMC) 2025, um dos eventos mais relevantes na área de análise de redes e medição da Internet. Essa submissão busca aprofundar as análises realizadas, destacando como as decisões dos ASes refletem não apenas fatores técnicos, mas também influências econômicas e estratégicas.

Por fim, os resultados deste estudo reforçam a importância contínua da engenharia de tráfego na adaptação das redes às exigências da Internet em constante evolução. A adoção de técnicas eficazes de roteamento não apenas otimiza a distribuição do tráfego, mas também impacta diretamente a escalabilidade e a estabilidade da rede global. Diante do crescimento da interconectividade e das crescentes demandas por redes resilientes e eficientes, a engenharia de tráfego continuará desempenhando um papel essencial no equilíbrio entre desempenho, custo e controle da propagação das rotas BGP. O monitoramento contínuo e o refinamento das estratégias utilizadas pelos ASes serão fundamentais para garantir que a Internet permaneça cada vez mais estável e operacional diante de novos desafios técnicos e políticos.

REFERÊNCIAS

[1] Barcellos, M. (2022). On the latency impact of remote peering. In *Passive and Active Measurement: 23rd International Conference, PAM 2022, Virtual Event, March 28–30, 2022, Proceedings*, volume 13210, page 367. Springer Nature.

[2] Blunk, L., Karir, M., and Labovitz, C. (2016). Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) Routing Information Export Format. RFC 8050.

[3] CAIDA (2021). Asrank: A ranking of the largest autonomous systems (as) in the internet. `https://asrank.caida.org/`. Accessed: (2024-08-28).

[4] Castellanos, L. and outros (2023). Detecting traffic engineering from public bgp data. *HAL Open Science*, N/A(N/A):1–12.

[5] Chang, R. K. and Lo, M. (2005). Inbound traffic engineering for multihomed ass using as path prepending. *IEEE network*, 19(2):18–25.

[6] Cymru, T. (2024). The bogon reference. `https://www.team-cymru.com/bogon-reference-bgp`. Accessed: (2024-08-28).

[7] Elwalid, A., Chiu, A., Xiao, X., i_widjaja@yahoo.com, and Awduche, D. O. (2002). Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. RFC 3272.

[8] Fortz, B., Rexford, J., and Thorup, M. (2002). Traffic engineering with traditional ip routing protocols. *IEEE communications Magazine*, 40(10):118–124.

[9] Fortz, B. and Thorup, M. (2002). Optimizing ospf/is-is weights in a changing world. *IEEE journal on selected areas in communications*, 20(4):756–767.

[10] Gamba, J., Fontugne, R., Pelsser, C., Bush, R., and Aben, E. (2017). Bgp table fragmentation: what & who? In *Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication*.

[11] Hawkinson, J. A. and Bates, T. J. (1996). Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System (AS). RFC 1930.

[12] Hinden, B. and Deering, D. S. E. (1998). Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. RFC 2460.

[13] IPinfo (2025). Ipinfo - ip address api, accurate geolocation data and ip to asn lookup. Acessado em: 24 jan. 2025.

[14] Jin, Y. (2020). Toposcope: A tool for inferring as relationships. `https://github.com/yuchenjin/TopoScope`.

[15] Jin, Y., Cabellos, A., and Barlet-Ros, P. (2020). Problink: A probabilistic approach for bgp hijacking detection. In *Proceedings of the 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 20)*, pages 159–174. USENIX Association.

[16] Kastanakis, S., Giotsas, V., Livadariu, I., and Suri, N. (2023). Replication: 20 years of inferring interdomain routing policies. In *Proceedings of the 2023 ACM on Internet Measurement Conference*, pages 16–29.

[17] LACNIC (2024). Lacnic statistics ftp directory. `https://ftp.lacnic.net/pub/stats/`. Accessed: 2024-07-17.

[18] Marcos, P., Prehn, L., Leal, L., Dainotti, A., Feldmann, A., and Barcellos, M. (2020). As-path prepending: there is no rose without a thorn. In *Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference*, pages 506–520.

[19] Mendonça, L. N. (2025). Analyzing inbound traffic engineering. `https://github.com/LeonardoNM1987/analyzing_inbound_traffic_engineering`. Accessed: (2025-02-03).

[20] Milolidakis, A., Bühler, T., Wang, K., Chiesa, M., Vanbever, L., and Vissicchio, S. (2023). On the effectiveness of BGP hijackers that evade public route collectors. *IEEE Access*, 11:31092–31110.

[21] Nemmi, E. N., Sassi, F., Morgia, M. L., Testart, C., Mei, A., and Dainotti, A. (2021). The parallel lives of autonomous systems. *Proceedings of the 21st ACM Internet Measurement Conference*.

[22] Postel, J. (1981). Internet Protocol. RFC 791.

[23] Rekhter, Y., Hares, S., and Li, T. (2006). A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 4271.

[24] Rekhter, Y., Moskowitz, B., Karrenberg, D., de Groot, G. J., and Lear, E. (1996). RFC 1918: Address Allocation for Private Internets. Internet Requests for Comments.

[25] Rekhter, Y., Ould-Brahim, H. H., and Fedyk, D. (2009). BGP Traffic Engineering Attribute. RFC 5543.

[26] Schlinker, B., Arnold, T., Cunha, I., and Katz-Bassett, E. (2019). Peering: Virtualizing bgp at the edge for research. In *Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies*, pages 51–67.

[27] Sommers, J. (2017). Pytricia: Patricia trie implementation for python. `https://github.com/jsommers/pytricia`. Accessed: (2024-08-06).

[28] Wang, J. H., Chiu, D. M., Lui, J. C., and Chang, R. K. (2007). Inter-as inbound traffic engineering via aspp. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 4(1):62–70.

[29] Xu, H., He, T., Dong, Y., Wang, S., and Ramakrishnan, K. K. (2021). Bgp data analysis: Exploring solutions for autonomous systems relationships inference. *Journal of Network and Systems Management*, 29(3):1–25.