

Análise da Evolução da Conectividade fim-a-fim da Internet de 2006 a 2013

Thiago B. Cardozo¹, Alex B. Vieira², Artur Ziviani¹, e
Ana Paula C. Silva³

¹Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC)

²Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

³Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Junho de 2014

Relatório Técnico LNCC 05/2014

Sumário

1	Introdução	2
2	Conectividade fim-a-fim da Internet - 2006 e 2011	3
2.1	Conjunto de dados	3
2.2	Metodologia de amostragem	4
2.3	Métricas de Interesse	5
2.4	Resultados Experimentais	6
2.4.1	Tamanho do caminho	6
2.4.2	Atraso dos caminhos	7
2.4.3	Diferença entre caminhos	8
2.4.4	Dispersão geográfica	9
2.4.5	Correlação entre as métricas	11
2.5	Conclusões do Capítulo	12
3	Conectividade fim-a-fim da Internet - 2008 a 2013	14
3.1	Conjuntos de dados	14
3.2	Metodologia de amostragem	15
3.3	Resultados experimentais	15
3.3.1	Tamanho do caminho	15
3.3.2	Atraso dos caminhos	16
3.3.3	Diferença entre caminhos	17
3.3.4	Dispersão geográfica	17
3.3.5	Correlação entre as métricas	19
3.4	Conclusões do Capítulo	21
4	Trabalhos relacionados	23
5	Discussão	25

Capítulo 1

Introdução

A Internet atualmente tem um papel crucial na infraestrutura de comunicação e colaboração internacional. Tal sistema está em contínua evolução ao longo dos anos, com muitos nós e enlaces sendo criados e suprimidos. Além disso, o desempenho fim-a-fim da rede na Internet é crítico para as comunicações e serviços *on-line* (Lee et al., 2010a). Do entretenimento caseiro a sistemas de negócios, as métricas da Internet, tais como atraso e contagem de saltos, impactam a satisfação dos usuários e o lucro das empresas. O objetivo deste trabalho é entender o comportamento da Internet nos últimos anos e analisar tendências, em particular como um conjunto de métricas relevantes mudaram nos últimos anos, para o melhor desenvolvimento de modelos de rede e sistemas.

Há vários estudos sobre a modelagem e medição da topologia da Internet (Haddadi et al., 2008; Oliveira et al., 2007; Zhou, 2006). Entretanto, a maioria deles se baseia em sondas enviadas por um período limitado de tempo para visualizar a topologia da Internet a partir de uma perspectiva de Sistemas Autônomos (AS), ignorando relações de conectividade fim-a-fim. Sobretudo, a maioria dos trabalhos anteriores que alegam caracterizar e modelar a dinâmica da Internet focam na evolução de propriedades topológicas, tais como distribuição de grau, coeficiente de clusterização ou diâmetro do grafo, ignorando métricas centradas no usuário, tais como latência fim-a-fim ou tamanho do caminho. Essas são métricas importantes consideradas neste estudo, dado que impactam a satisfação do usuário e possivelmente os custos de tráfego interdomínio.

Neste trabalho é estudada a evolução da conectividade fim-a-fim da Internet ao longo de anos recentes. Isso permite uma caracterização com granularidade mais fina, em contraste com a maioria dos estudos anteriores que focam em termos de Sistemas Autônomos (Dhamdhere e Dovrolis, 2011; Siganos et al., 2002). Métricas chaves ao longo de um período de seis anos são comparadas entre si. São considerados dois conjuntos de dados cobrindo o período de 2006 até 2013, incluindo a latência dos caminhos menores fim-a-fim, o número de saltos desses caminhos e a dispersão geográfica desses caminhos. Além disso, é utilizado um método baseado na distância de Levenshtein (1966b) —também conhecida com distância de edição (Wagner e Lowrance, 1975)— para caracterizar a diversidade de caminhos e medir o quão diferentes eles são nos dois períodos avaliados.

Capítulo 2

Conectividade fim-a-fim da Internet - 2006 e 2011

Neste capítulo, é estudada a evolução da conectividade fim-a-fim da Internet ao longo de anos recentes. Isso permite uma caracterização com granularidade mais fina, em contraste com a maioria dos estudos anteriores que focam em termos de Sistemas Autônomos (AS) (Dhamdhere e Dovrolis, 2011; Siganos et al., 2002). Métricas chaves de dois períodos distintos separados por cinco anos são comparadas entre si. Os resultados deste capítulo foram apresentados no XVIII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços 2013 (Cardozo et al., 2013).

São considerados dados de 2006 e 2011, incluindo a latência dos caminhos fim-a-fim, o número de saltos dos caminhos e a dispersão geográfica dos caminhos.

Na Seção 2.1 é descrita a origem dos dados usados, na Seção 2.2 é descrito como os dados foram obtidos, processados e quais as métricas calculadas. As métricas de interesse são descritas na seção 2.3. Os resultados e os seus significados são discutidos na Seção 2.4.

2.1 Conjunto de dados

Este trabalho conta com um conjunto de dados coletados pelo projeto CAIDA¹, que é uma organização empenhada em realizar medições na Internet. Para tal, foram espalhados em diversas instituições ao redor do mundo diversos coletores de dados chamados de monitores. Esses monitores diariamente fazem rastros de rota para milhares de endereços IP desde 1998. Os dados coletados são disponibilizados para o público. Esses dados registram resultados como os da ferramenta *traceroute*² de onde é possível retirar dados sobre caminhos fim-a-fim e o atraso da Internet. Esses dados registram resultados como os do *traceroute*, de onde é possível retirar dados sobre caminhos fim-a-fim e o atraso da Internet. São usados dados de um conjunto de monitores da América do Norte e da Europa já que a maioria dos monitores de 2006 se encontravam localizados nesses continentes.

¹www.caida.org/

²Ferramenta para o mapeamento do caminho entre duas máquinas

Os conjuntos de dados da CAIDA obviamente não fornecem o mapa completo da Internet. Apesar disso, esses dados ainda assim fornecem um ponto apropriado para basear a investigação com uma representativa distribuição do atraso na Internet e estão entre as maiores coleções disponíveis, sendo atualizados continuamente.

Foram adquiridos todos os rastros da rede (*network traces*) do projeto CAIDA realizados em todos os meses de 2006 (projeto Skitter) e de 2011 (projeto Ark). Em tais rastros, há 19 e 39 monitores rotulados como fonte em 2006 e em 2011, respectivamente. Desses, 13 e 18 fontes estão na América do Norte e 6 e 21 na Europa em 2006 e 2011, respectivamente.

2.2 Metodologia de amostragem

Antes da utilização dos dados, realizamos um processamento para a remoção de inconsistências. Neste trabalho, defini-se caminhos inconsistentes aqueles que estão incompletos e/ou com mais de trinta saltos e *loops*. Os conjuntos de dados são usados de duas formas. Primeiro, é processado um subconjunto dos dados disponíveis pela CAIDA no formato padrão de *traceroute* para calcular métricas que podem ser inferidas diretamente das sondas. Por exemplo, são caracterizados o número de saltos e o atraso de cada caminho. Tais métricas são discutidas mais adiante na Seção 2.3. Segundo, é montada uma visão parcial da Internet reconstruindo um grafo a partir de um subconjunto de rastros coletados da CAIDA. Isso permite a reconstrução de caminhos fim-a-fim entre dois pontos e também permite inferir novos caminhos fim-a-fim não presentes nos dados originais disponibilizados pela CAIDA. Neste caso, pode-se analisar a diversidade de caminhos entre dois pontos.

Foram selecionados aleatoriamente n rastros de rota únicos disponíveis nos dados originais da CAIDA. Espera-se que essas n medidas fim-a-fim únicas qualitativamente representem um conjunto de dados muito maior dado que *hosts* no mesmo bloco de endereçamento /24 estão inclinados a experimentar desempenho similar, como atraso na rede e perda de pacotes. Neste trabalho, foi escolhido $n = 200$ milhões como espaço amostral para aprimorar a acurácia da análise da conectividade fim-a-fim. Lee et al. (2010b) indica que uma amostra de tamanho $n = 50.000 \sim 60.000$ apresenta pequenos erros na estimação de média para um intervalo de confiança de 99%.

A visão parcial da Internet é representada por um grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, onde \mathcal{V} é o conjunto de nós encontrados em todos os rastros de rota selecionados e \mathcal{E} o conjunto das arestas entre um par de nós. \mathcal{G}_{2006} e \mathcal{G}_{2011} são referenciados como grafos que modelam a topologia da Internet nos anos 2006 e 2011, respectivamente. Após a construção dos grafos, verificou-se que ambos são conexos.

Na maioria dos casos, a caracterização é baseada nas propriedades encontradas nos K -menores caminhos da visão parcial da Internet. A importância dessa análise está relacionada ao fato da maioria dos protocolos de roteamento tenderem a seguir o caminho mais curto entre dois nós em uma rede (e.g. OSPF). Caminhos mais longos, apesar de existirem, são pouco usados na prática. São selecionados 10 origens aleatórias e 10.000 destinos para gerar os K -menores caminhos usados na caracterização.

Seja P_{st} o conjunto de todos os caminhos de s para t e c uma função de custo para cada caminho $p \in P_{st}$. O problema dos K -menores caminhos consiste na

determinação de um conjunto $\{p_1, \dots, p_k\}$ de caminhos entre um dado par de nós quando a função objetivo do problema dos caminhos mais curtos é considerada de tal forma que $c(p_k) \leq c(p)$ para qualquer $p \in P_{st} - P_{st}(k-1)$, onde $P_{st}(k) = \{p_1, \dots, p_k\}$ e $P_{st}(0)$ é um conjunto vazio. O caminho mais curto é o primeiro a ser determinado, seguido pelo segundo mais curto e assim por diante.

2.3 Métricas de Interesse

Este estudo se baseia nas métricas mais comuns para caracterizar a conectividade fim-a-fim. Por exemplo, é possível descrever um caminho da Internet em termos do seu tamanho (contagem de saltos) e latência (atraso do caminho). Também é caracterizada a diversidade dos caminhos na Internet. No que se segue, é formalizado o conjunto de métricas selecionadas para a análise da evolução da conectividade da Internet:

- *Tamanho do caminho* (ou número de saltos) é a distância entre dois *hosts*. São coletados o número de saltos de $n = 200$ milhões rastros de rota dos dados da CAIDA e de nossa visão parcial da rede reconstruída com $m = 100.000$ rastros de rota da CAIDA. Também é analisado o número de saltos dos K-menores caminhos obtidos da visão parcial da Internet.
- *Atraso do caminho* é o tempo de ida e volta (RTT) entre dois *hosts*. Um grande atraso pode indicar um grande caminho (alta contagem de saltos) ou um caminho congestionado. O atraso do caminho é analisado usando o RTT obtido de $n = 200$ milhões de rastros de rota da CAIDA. Também é usado o atraso inferido a partir da visão parcial ($m = 100.000$ rastros de rota da CAIDA) da Internet para correlacionar propriedades do caminho.
- *Diversidade de caminhos* é uma métrica que reflete o número de rotas alternativas disponíveis entre um par origem-destino. A diversidade de caminhos permite quantificar a riqueza da conectividade da topologia da Internet. As características da diversidade de caminhos são obtidas analisando as diferenças entre os K-menores caminhos, usando os grafos \mathcal{G}_{2006} e \mathcal{G}_{2011} .
- *Diferença entre caminhos*: a diferença entre dois caminhos que ligam dois pontos dados é quantificada usando a distância Levenshtein (distância de edição) Levenshtein (1966a); Wagner e Lowrance (1975). Em outras palavras, a diferença entre os caminhos é a quantidade mínima de operações necessárias para transformar um caminho em outro.
- *Dispersão geográfica do caminho* D_g de um caminho entre dois pontos é definida como a razão entre a distância geodésica total D_p , considerando a sequência de diferentes pontos intermediários que compõem um caminho fim-a-fim, e a distância geodésica direta real D_r entre os dois extremos do caminho, i.e.

$$D_g = \frac{|D_p - D_r|}{D_r}.$$

É esperado que quanto mais rica for a conectividade observada, menor será a dispersão geográfica, dado que mais caminhos diretos estão disponíveis.

Os K -menores caminhos da visão parcial da Internet (grafos \mathcal{G}_{2006} e \mathcal{G}_{2011}) também são usados para analisar a dispersão geográfica dos caminhos.

2.4 Resultados Experimentais

Nesta seção, são analisados os resultados da caracterização estudada usando as métricas apresentadas na Seção 2.3.

2.4.1 Tamanho do caminho

Como primeiro conjunto de resultados, foi analisado o tamanho dos caminhos entre dois extremos da amostra de $n = 200$ milhões de rastros de rota da CAIDA de 2006 para 2011. A Figura 2.1 mostra que a função de distribuição acumulada (*cumulative distribution function* - *CDF*) do número de saltos dos caminhos muda levemente de 2006 para 2011, com as curvas mantendo a mesma inclinação. Apesar de novos investimentos na infraestrutura da rede no intervalo de 5 anos, os caminhos fim-a-fim tiveram um aprimoramento marginal de um salto. Em ambos os casos, 80% dos caminhos têm cerca de 17 saltos. Resultados similares foram encontrados nas redes em termos de AS (Dhamdhare e Dovrolis, 2008).

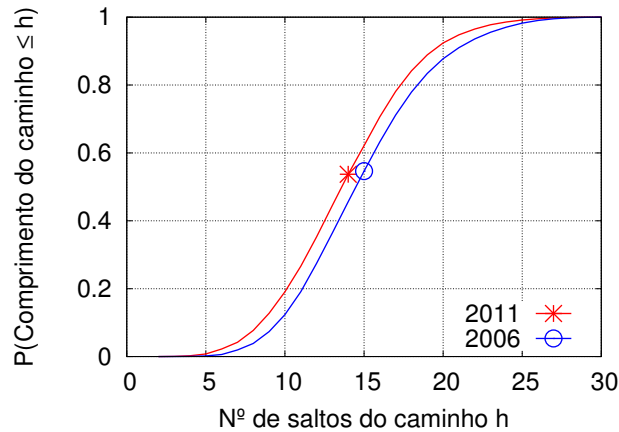


Figura 2.1: CDF - número de saltos.

Como a rede cresce e o comprimento dos caminhos se mantém inalterado, há o indício de que a rede está se tornando mais densa, o que é corroborado por investigações recentes (Labovitz et al., 2010a; Ager et al., 2012a). Em uma rede mais densa, espera-se ter uma conectividade mais rica, já que devem haver mais caminhos disponíveis entre dois extremos. De forma similar, em uma rede mais densa, intuitivamente, seriam esperados atrasos menores. Entretanto, isso não é comprovado experimentalmente com atrasos em realidade se tornando maiores entre 2006 e 2011 de maneira contra-intuitiva ao fato da rede estar se tornando mais densa, como será discutido em mais detalhes na Seção 2.4.2.

Também foi analisado o tamanho de todos os K -menores caminhos da visão parcial da rede. A Figura 2.2 mostra que os caminhos de 2011 são ligeiramente

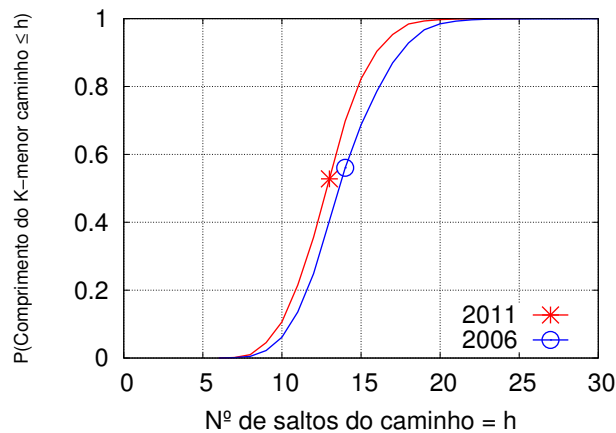


Figura 2.2: CDF - Número de saltos dos K-menores caminhos.

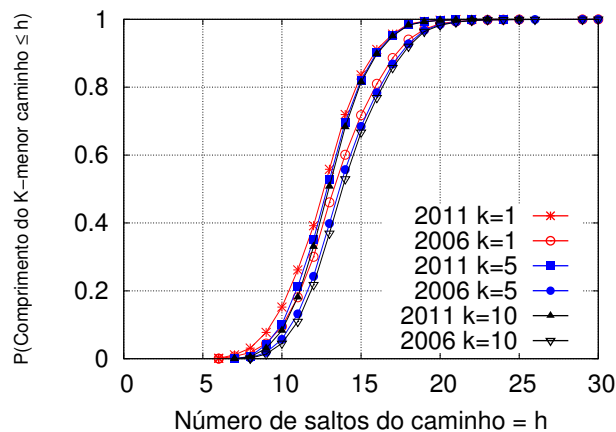


Figura 2.3: CDF - Comprimento dos K-menores caminhos.

mais curtos que os caminhos de 2006. Quase 80% dos caminhos não possuem mais que 16 saltos e não foi encontrado nenhum K -menor caminho com mais de 25 saltos em 2011.

Na Figura 2.3, é exibida uma visão mais próxima de cada K -menor caminho individual. O comportamento é praticamente o mesmo. Como esperado, o caminho $K = 1$ é o mais curto e o comprimento do caminho se mantém estável de acordo com o crescimento do K até ~ 10 , com os caminhos de 2011 sendo um pouco menores que os de 2006.

2.4.2 Atraso dos caminhos

A Figura 2.4 apresenta a CDF do atraso dos caminhos em escala logarítmica. O atraso dos caminhos na Internet está se tornando *pior* comparando 2011 com 2006. De fato, isso mostra que em 2006, cerca de 50% (mediana) dos caminhos apresenta um atraso de pelo menos 122 ms , enquanto em 2011 a mediana do

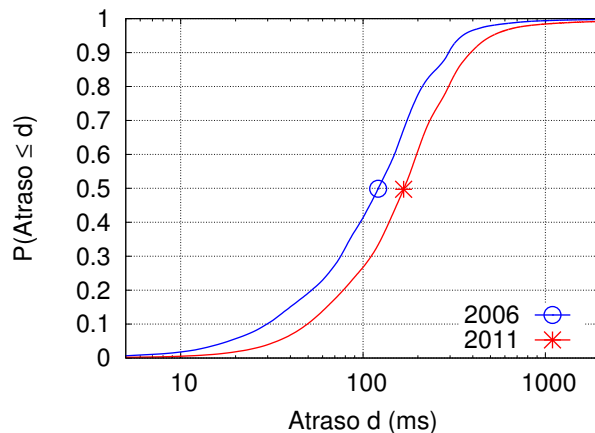


Figura 2.4: CDF - Atraso dos caminhos.

atraso cresceu cerca de 37% para quase 168 *ms*. Considerando o percentil 95%, o atraso aumentou de cerca de 352 *ms* em 2006 para cerca de 512 *ms* em 2011 (um aumento de 45% em cinco anos). Esse é um resultado contra-intuitivo aos estudos recentes que apontam a maior densidade da rede nos últimos anos (Labovitz et al., 2010a; Ager et al., 2012a).

Os resultados aqui discutidos reforçam que o desempenho da Internet está se tornando pior ultimamente, como mostrado por Lee et al. (2010b). Uma possível explicação pode ser o fenômeno conhecido como *bufferbloat*, recentemente relatado por Gettys e Nichols (2012), onde a *bufferização* exagerada de pacotes na rede cauda grande aumento na latência e no *jitter*. Além disso, nota-se que o número de redes virtualizadas está em franco crescimento. O uso pesado da rede em máquinas virtuais pode introduzir atrasos de até 100 *ms* ao RTT, como descoberto por Whiteaker et al. (2011). Como consequência, a latência geral da rede também aumenta.

2.4.3 Diferença entre caminhos

A Figura 2.5 mostra a CDF da diferença entre os K -menores caminhos entre dois extremos da rede considerada. A diferença entre dois caminhos é calculada com base na distância de Levenshtein. Os resultados mostram que a diferença entre caminhos está diminuindo durante este período analisado de 5 anos. Em 2011, menos de 10% dos caminhos apresentam uma diferença maior do que 50%, enquanto em 2006, esse número chega a 15% dos caminhos. Uma questão crucial que surge desse resultado é “*se a rede está ficando mais densa, por que os menores caminhos estão mais similares?*”. Uma explicação é que a diversidade cresceu em torno dos caminhos mais curtos disponíveis. Sendo assim, os caminhos compartilham muitos nós em comum, havendo sobreposições ao longo do caminho, tornando esses caminhos mais similares.

A Figura 2.6 mostra que conforme K aumenta, maior é a diferença entre os caminhos. Por exemplo, 80% das diferenças entre os caminhos de 2011 são menores do que 15% para $K = 2$, enquanto a diferença entre os caminhos é maior em 36% para $K = 10$. Portanto, protocolos de roteamento que consideram

diversidade de rotas, ou seja, mais caminhos distintos do que os mais curtos, podem utilizar melhor esta diversidade e obter maior tolerância a falhas, por exemplo.

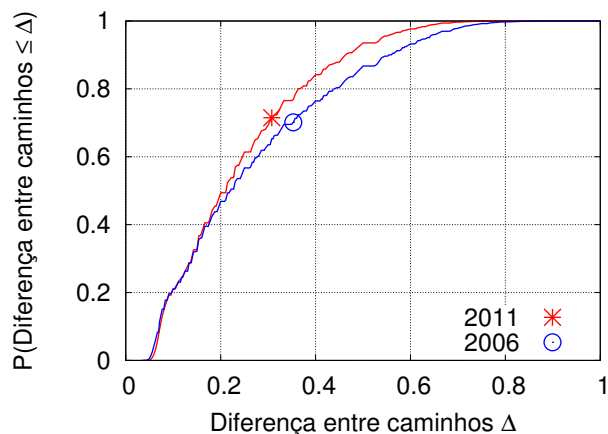


Figura 2.5: CDF - Diferença dos K-menores caminhos.

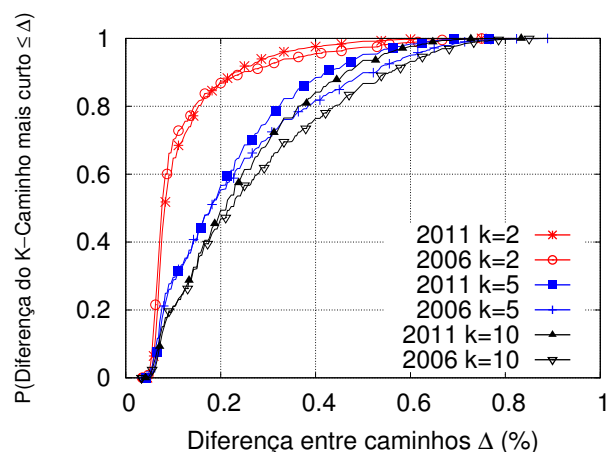


Figura 2.6: CDF - Diferença dos K-menores caminhos.

2.4.4 Dispersão geográfica

A localização geográfica dos *hosts* foi obtida utilizando uma base de dados gratuita disponibilizada pela MaxMind³. Essa base permite obter a localização geográfica de cada *host* fornecendo detalhes como a cidade sede, latitude e longitude.

A Figura 2.7 mostra que a maioria dos caminhos tem dispersão geográfica de 0 até 3, onde 0 é praticamente uma linha geodésica direta. Essa dispersão geográfica tende a ser relativamente pequena porque a maioria dos enlaces em

³<http://www.maxmind.com/>

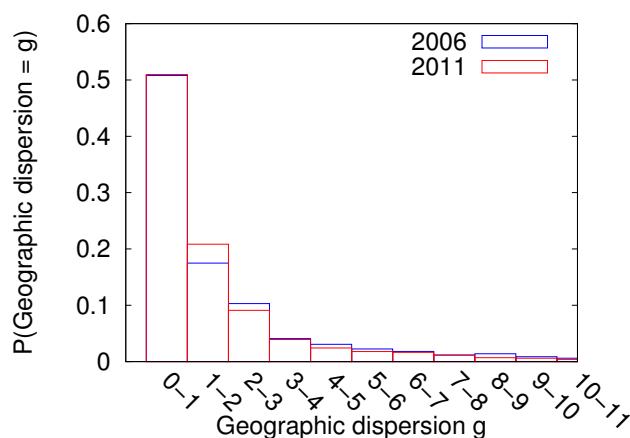


Figura 2.7: PDF - Dispersão geográfica dos K-menores caminhos.

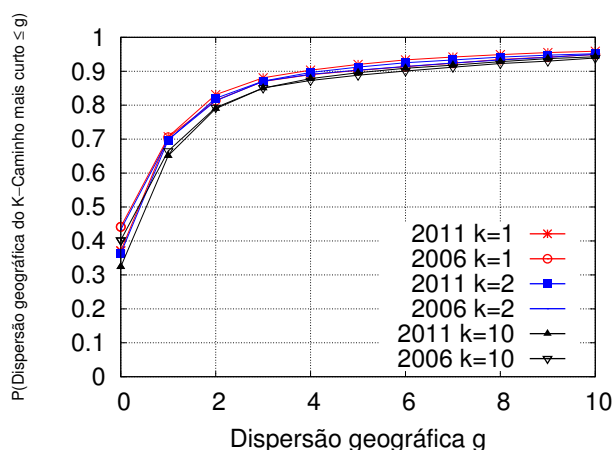


Figura 2.8: CDF - Dispersão geográfica dos K-menores caminhos (K variante).

um caminho tende a seguir uma linha reta. Além do mais, enlaces longos que podem ter maior impacto na dispersão geográfica (como cabos transoceânicos), ocorrem em caminhos longos. Então, um único enlace transoceânico entre todos os outros não impacta a dispersão geográfica geral.

Finalmente, dados de 2011 tem cerca de 10% (Figura 2.7) dos caminhos com dispersão geográfica maior que a de 2006. Isso pode sugerir que pequenos provedores de Internet estão mudando seus enlaces locais para enlaces de longa distância. A maioria dos operadores das grandes redes podem tipicamente desviar seu tráfego de rede por distâncias maiores por questões econômicas.

A Figura 2.8 apresenta a distribuição acumulada da dispersão geográfica para cada K -ésimo caminho. Nota-se que com o aumento de K para 10, a dispersão geográfica se mantém estável. Nesse caso, quase 90% dos caminhos tem dispersão menor que 4.

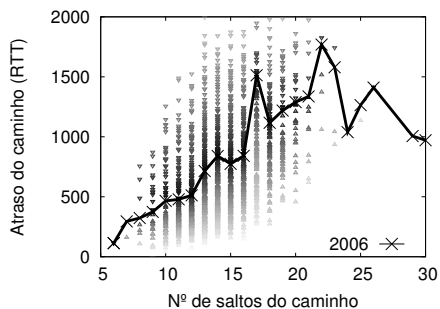


Figura 2.9: 2006

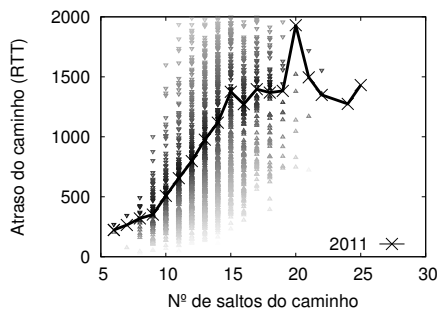


Figura 2.10: 2011

Figura 2.11: Atraso e comprimento dos K-menores caminhos.

2.4.5 Correlação entre as métricas

Para investigar mais profundamente a evolução recente da conectividade fim-a-fim da Internet, a correlação entre algumas métricas foi calculada. Em nossa análise, usamos o coeficiente de correlação de *Spearman*, que é mais indicado para relações não lineares dado que este avalia correlações entre valores ordenados. Assim, este coeficiente também lida melhor com valores discrepantes.

A Figura 2.11 mostra um gráfico de dispersão correlacionando o atraso do caminho com o seu comprimento (em número de saltos). É claramente notável a alta correlação entre os caminhos com comprimento menor que 20 para ambos os anos analisados. Foi encontrado uma correlação de Spearman de 0,8 para os dados de 2006 e de 0,88 para os dados de 2011.

Para caminhos com mais de 20 saltos, observa-se que a latência permanece razoavelmente estável. Isso pode ocorrer, pois, em caminhos longos, um número pequeno de caminhos dominam o atraso e, portanto, aumentar o caminho fim-a-fim com poucos enlaces de baixa latência não impacta significativamente a latência total. Sobretudo, essa porção da correlação (caminhos maiores que 20 saltos) representa uma pequena quantidade de caminhos. Vale ressaltar que, de acordo com a Figura 2.2, o número de caminhos com mais de 20 saltos é desprezível.

A correlação entre a dispersão geográfica e a dispersão do atraso também foi analisada. Define-se a dispersão do atraso como a razão entre o atraso medido e o atraso mínimo (i.e. apenas o atraso de propagação) esperado em um caminho usando um enlace de fibra ótica. De acordo com (Percacci e Vespignani, 2003a), a informação digital viaja através da fibra ótica em cerca de quase exatamente $2/3$ da velocidade da luz no vácuo. Assim, pode-se estimar o atraso total usando um cabo de fibra ótica conectando dois extremos diretamente. A Figura 2.12 mostra que a média da dispersão do atraso e a média da dispersão geográfica do caminho são altamente correlacionadas, especialmente para a maior porção dos caminhos (com baixa dispersão geográfica). O coeficiente de Spearman nesse caso é de 0,86 para 2006 e 0,88 para 2011.

Finalmente, analisamos a correlação entre a média do atraso do caminho e a média do atraso mínimo esperado em um enlace de fibra ótica. A Figura 2.13 mostra que, para ambos os casos de 2006 e de 2011, a correlação segue uma curva exponencial quando os valores do atraso são menores que 50 ms. Cami-

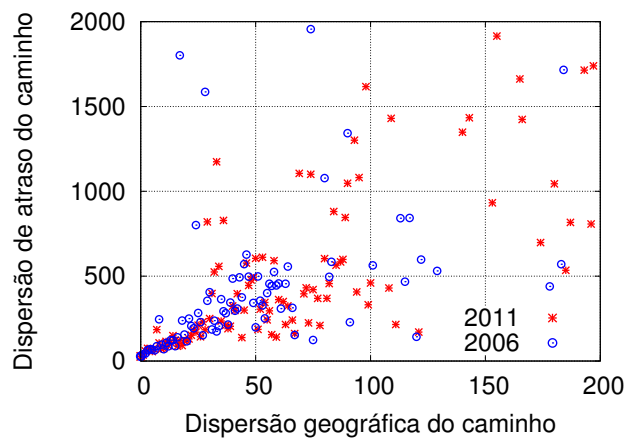


Figura 2.12: Dispersão do atraso e geográfica dos K-menores caminhos.

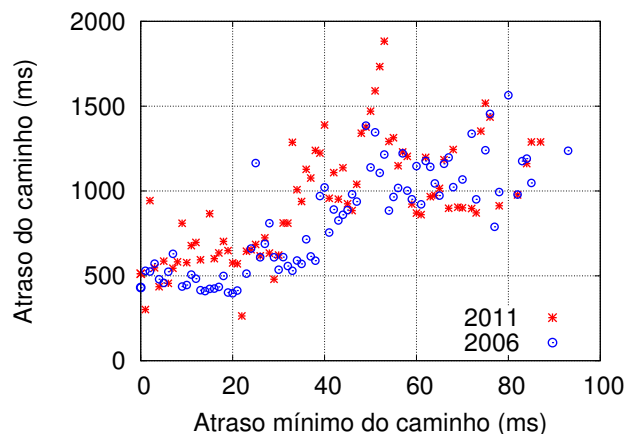


Figura 2.13: Atraso e o atraso mínimo dos K-menores caminhos.

nhos mais curtos podem ter seus enlaces em fibra local ou cabos. Na direção oposta, caminhos mais longos possuem tipos de enlaces que podem explicar a má correlação encontrada em caminhos mais longos com atraso. É possível que esses caminhos mais longos com atraso estejam conectados por um número menor de enlaces com alta latência e, como consequência, o atraso total do caminho não é proporcional ao atraso mínimo esperado. Observamos uma melhor correlação para 2006, com coeficiente de Spearman de cerca de 0,78 e uma correlação média para 2011, com coeficiente de Spearman de cerca de 0,67.

2.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foi caracterizada e analisada a recente evolução da conectividade fim-a-fim da Internet. Foram comparadas métricas de desempenho importantes entre dois períodos distintos separados por cinco anos. Foram analisados

dados de 2006 e 2011, incluindo a latência dos caminhos fim-a-fim, número de saltos, dispersão geográfica e diversidade de caminhos. Entender essa recente evolução da conectividade da Internet, assim como as tendências associadas, é importante em particular para o planejamento de enlaces inter-rede e para um melhor ajuste de protocolos de roteamento. Além disso, os resultados podem ser úteis para apoiar visões que alimentem o desenvolvimento de novos protocolos, especialmente protocolos de roteamento.

Alguns dos resultados contra-intuitivos encontrados indicam que o desempenho da Internet está piorando. Por exemplo, a distribuição do tamanho médio dos caminhos muda pouco de 2006 para 2011. Durante esse período, entretanto, era esperado que investimentos (novos equipamentos e enlaces) na rede tornassem os caminhos atuais mais curtos e com menos atraso. Entretanto, a análise também mostra que o atraso fim-a-fim se tornou claramente pior. Mais uma vez, novos equipamentos e links deveriam providenciar uma melhor conectividade com enlaces mais rápidos, resultando em uma experiência de usuário aprimorada. Contudo, nesse caso, é mostrado que o resultado oposto com atrasos mais perceptíveis está aumentando. Conjectura-se que os novos equipamentos na Internet não são corretamente configurados para usar gerenciamento ativo de fila. Isso leva ao fenômeno recentemente nomeado de *bufferbloat* (Gettys e Nichols, 2012), onde o excesso de *bufferização* de pacotes na rede causa alta latência e *jitter*.

Adicionalmente, mostrou-se que a diversidade de caminhos diminuiu, e similarmente, caminhos mais distintos ficaram mais similares. Esse resultado tem impacto direto nos algoritmos de roteamento que tentam explorar a diversidade de caminhos para a obtenção de maior tolerância a falhas. Esse resultado indica que os caminhos da Internet estão crescendo em torno do caminho mínimo, e como consequência, o impacto de novos enlaces é marginal na diferença geral entre dois caminhos fim-a-fim alternativos.

Finalmente, foi encontrado que o atraso está altamente correlacionado ao número de saltos na maior porção dos caminhos fim-a-fim. A dispersão geográfica tem alta correlação com o atraso do caminho, especialmente para valores baixos na dispersão geográfica (onde encontram-se quase todos os caminhos). Também é notado que o atraso dos caminhos tem uma correlação com padrão exponencial com o atraso mínimo esperado (para atraso abaixo de 50 *ms*). Esses padrões de correlação, para a grande porção de caminhos, indica que pode-se inferir métricas utilizando-se de uma métrica bem simples, como o tempo de ida e volta.

Capítulo 3

Conectividade fim-a-fim da Internet - 2008 a 2013

Neste capítulo é apresentado o estudo da evolução da conectividade fim-a-fim da Internet em um período de 6 anos entre 2008 e 2013. Essa é uma etapa fundamental, pois a análise permite detectar anomalias e comportamentos não óbvios que estimulam estudos que buscam obter melhor compreensão da evolução da rede e propor soluções para os problemas encontrados.

Na Seção 3.1 é descrita a origem dos dados usados, na Seção 3.2 é descrito como os dados foram obtidos, processados e quais as métricas calculadas. As métricas de interesse foram descritas na Seção 2.3. Os resultados e os seus significados são discutidos na Seção 3.3.

3.1 Conjuntos de dados

Este trabalho conta com um conjunto de dados coletados pelo projeto CAIDA¹, que é uma organização empenhada em realizar medições na Internet. Para tal, foram espalhados em diversas instituições ao redor do mundo diversos coletores de dados chamados de monitores. Esses monitores diariamente fazem rastros de rota para milhares de endereços IP desde 1998. Os dados coletados são disponibilizados para o público. Esses dados registram resultados como os da ferramenta *traceroute*² de onde é possível retirar dados sobre caminhos fim-a-fim e o atraso da Internet. São usados dados de um conjunto de monitores da América do Norte e da Europa dado que a maioria dos monitores se encontravam localizados nesses continentes nos períodos estudados.

Ao contrário dos dados coletados em 2006 e 2011 (Capítulo 2), aqui apenas usamos dados do Ark, que é uma evolução do Skitter que entrou em operação em 2007. As principais diferenças são o suporte ao IPv6 e a utilização de uma lista aleatória de destinos, ao contrário do Skitter que seguia sequencialmente a lista de IPs de destino.

Foram recuperados todos os rastros da rede (*network traces*) do projeto CAIDA para o primeiro e último mês de cada trimestre de 2008 até 2013. Para

¹<http://www.caida.org/>

²Ferramenta para o mapeamento do caminho entre duas máquinas

que o aumento no número de monitores em 2013 não impacte nos resultados, foram utilizados apenas os monitores localizados na Europa e América do Norte, pois são as regiões com mais monitores em 2008.

3.2 Metodologia de amostragem

Os conjuntos de dados usados para o intervalo de 2008 até 2013 seguem a mesma metodologia descrita na seção 2.2. A diferença é que aqui usamos os dados de 2008-2013 para gerar os grafos \mathcal{G}_i , onde $i = \{2008, 2009, \dots, 2013\}$.

3.3 Resultados experimentais

Neste capítulo, são analisados os resultados da caracterização estudada usando as métricas apresentadas na Seção 2.3 para os anos entre 2008 e 2013.

3.3.1 Tamanho do caminho

Como primeiro conjunto de resultados, foi analisado o tamanho dos caminhos da amostra de $n = 200$ milhões de rastros de rota da CAIDA de 2008 até 2013. A Figura 3.1 mostra que a CDF (Cumulative Distribution Function) do número de saltos dos caminhos se mantém estável de 2008 para 2013, com as curvas mantendo a mesma inclinação. Apesar de novos investimentos na infraestrutura da rede no intervalo de 6 anos, os caminhos fim-a-fim tiveram uma redução marginal de um salto. Em ambos os casos, 80% dos caminhos têm 17 saltos ou menos.

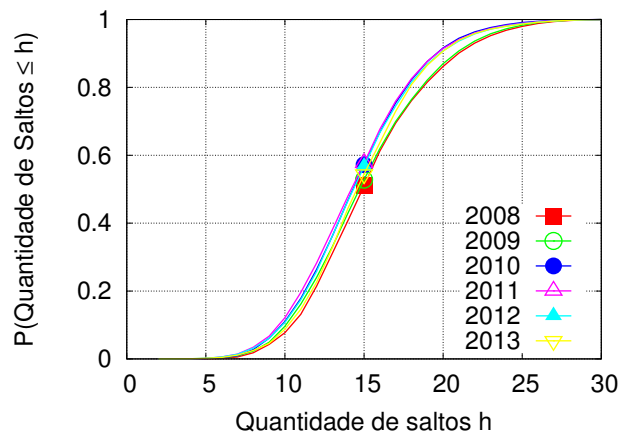


Figura 3.1: Tamanho dos caminhos (saltos)

Tabela 3.1: Percentis fig. 3.1

	75% (saltos)	95% (saltos)
2008	18	23
2009	18	23
2010	17	21
2011	17	22
2012	17	22
2013	17	22

Como a rede cresce e o comprimento dos caminhos se mantém praticamente inalterado, há o indício de que a rede está se tornando mais densa, o que é corroborado por investigações recentes (Labovitz et al., 2010b; Ager et al., 2012b). Em uma rede mais densa, espera-se ter uma conectividade mais rica, dado que devem existir mais caminhos disponíveis entre dois extremos. De forma similar, em uma rede mais densa, intuitivamente seriam esperados atrasos menores.

3.3.2 Atraso dos caminhos

A Figura 3.2 apresenta a CDF do atraso dos caminhos em escala logarítmica. O atraso dos caminhos na Internet se manteve estável de 2008 para 2013. A diferença de 2013 para 2008 é de cerca de 5% ms a mais. Com uma rede mais densa, conforme indicado pelo resultado em 3.1, era esperado que a latência diminuísse devido a maior riqueza de conectividade.

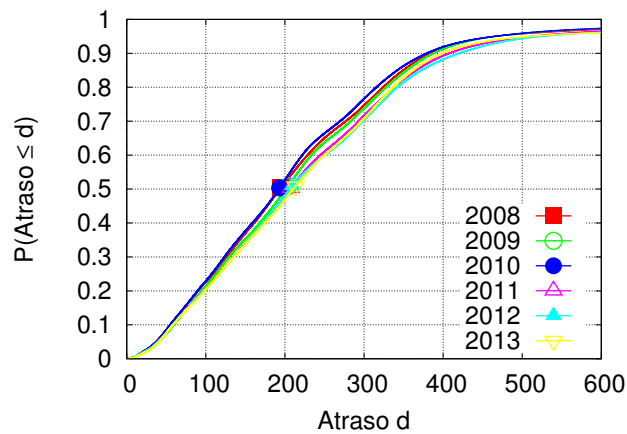


Figura 3.2: Atraso caminhos (ms)

Tabela 3.2: Percentis fig. 3.2

	75% (ms)	95% (ms)
2008	297,904	436,664
2009	301,823	438,957
2010	289,405	435,454
2011	309,413	465,186
2012	311,875	462,11
2013	308,646	432,44

3.3.3 Diferença entre caminhos

A Figura 3.3 mostra a CDF da diferença entre os K -menores caminhos entre dois extremos da rede considerada.

A diferença entre dois caminhos é calculada com base na distância de Levenshtein. Os resultados mostram que a diferença entre caminhos se manteve estável durante este período analisado de 6 anos, onde a diferença entre os caminhos é de cerca de 200% (Figura 3.3). Sendo assim, os caminhos compartilham muitos nós em comum, havendo sobreposições ao longo do caminho, tornando esses caminhos mais similares. Outra possibilidade é a prevalência de acordos financeiros entre provedores, que pode estar forçando o tráfego a passar por certos pontos específicos dentro dos ASs envolvidos.

Tabela 3.3: Coeficientes de Spearman fig. 3.3

	Dif. 95%
2008	2.15
2009	2.14
2010	2.15
2011	2.16
2012	2.16
2013	2.13

A Figura 3.4 mostra que conforme K aumenta, maior é a diferença entre os caminhos. Por exemplo, 80% das diferenças entre os caminhos de 2013 são menores do que 40% para $K = 2$, enquanto a diferença entre os caminhos é maior em 81% para $K = 10$. Portanto, protocolos de roteamento que consideram diversidade de rotas (e.g. (Wang e Gao, 2009)), ou seja, mais caminhos distintos do que os mais curtos, podem utilizar melhor esta diversidade e obter maior tolerância a falhas, por exemplo.

3.3.4 Dispersão geográfica

A localização geográfica dos *hosts* foi obtida utilizando uma base de dados gratuita disponibilizada pela MaxMind³. Essa base permite obter a localização geográfica de cada *host* fornecendo detalhes como a cidade, latitude, longitude e região política.

³<http://www.maxmind.com/>

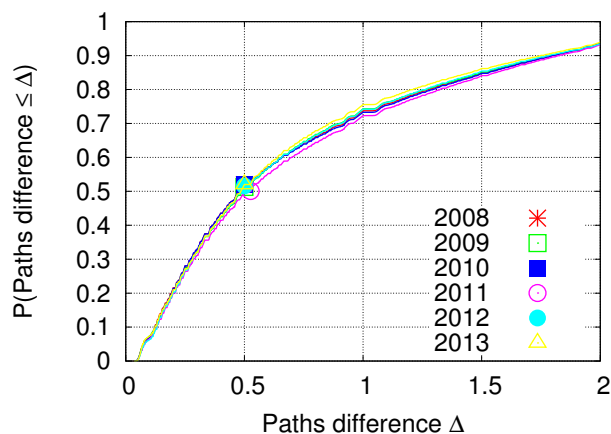


Figura 3.3: CDF - Diferença dos K-menores caminhos.

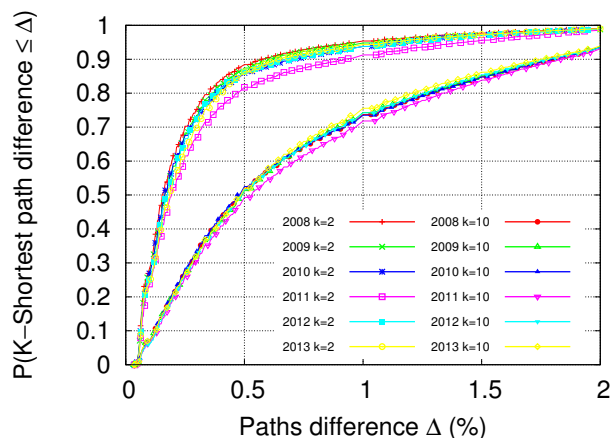


Figura 3.4: CDF - Diferença dos K-menores caminhos.

A Figura 3.5 mostra que a maioria dos caminhos tem dispersão geográfica de 0 até 3, onde 0 é uma linha geodésica direta. Enlaces longos, como cabos transoceânicos, podem ter maior impacto na dispersão geográfica. Então, um único enlace transoceânico entre todos os outros impacta a dispersão geográfica geral de todo o caminho.

Finalmente, dados de 2013 tem cerca de 7% (Figura 3.5) dos caminhos com dispersão geográfica maior que a de 2008. Isso pode sugerir que pequenos provedores de Internet estão mudando seus enlaces locais para enlaces de longa distância. A maioria dos operadores das grandes redes podem tipicamente desviar seu tráfego de rede por distâncias maiores por questões econômicas.

A Figura 3.6 mostra a CDF da dispersão geográfica para cada K -ésimo caminho. Nota-se que com o aumento de K para 10, a dispersão geográfica se mantém estável. Nesse caso, quase 90% dos caminhos tem dispersão geográfica menor do que 6.

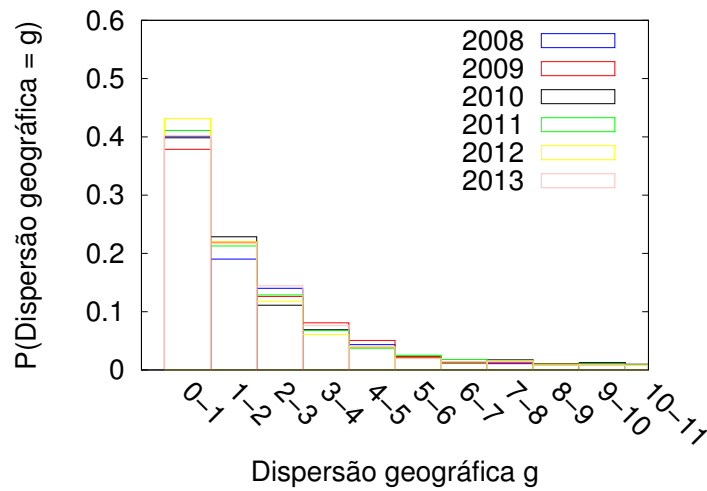


Figura 3.5: Histograma - Dispersão geográfica dos K-menores caminhos.

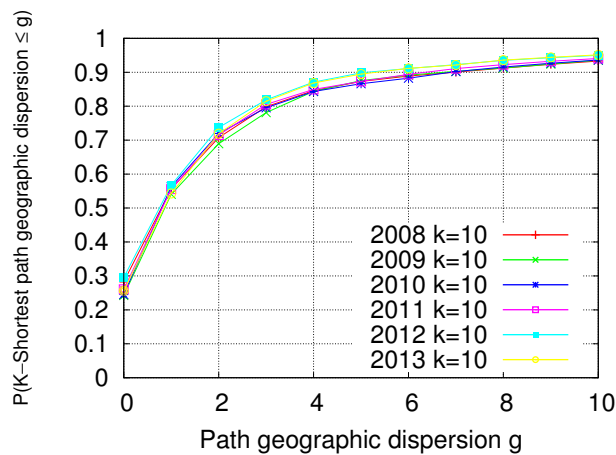


Figura 3.6: CDF - Dispersão geográfica dos K-menores caminhos (K variante).

3.3.5 Correlação entre as métricas

Para investigar mais profundamente a evolução recente da conectividade fim-a-fim da Internet, a correlação entre algumas métricas foi calculada.

Em nossa análise, usamos o coeficiente de correlação de Spearman (1904). O coeficiente de Spearman é uma medida não paramétrica que mede o quão relacionadas são duas variáveis. Como o método não utiliza os valores observados, mas apenas a ordem, há menor influência de pontos discrepantes. A variação do coeficiente fica entre -1 e 1, e quanto mais próximo desses dois valores, maior a correlação.

Primeiro foi analisada a correlação entre a dispersão geográfica e a dispersão. Define-se a dispersão do atraso ρ como a razão entre o atraso medido e o atraso mínimo (i.e. apenas o atraso de propagação) esperado em um caminho usando um enlace de fibra ótica. De acordo com (Percacci e Vespignani, 2003b), a

informação digital viaja através da fibra ótica em cerca de quase exatamente 2/3 da velocidade da luz no vácuo. Assim, pode-se estimar o atraso total usando um cabo de fibra ótica conectando dois extremos diretamente.

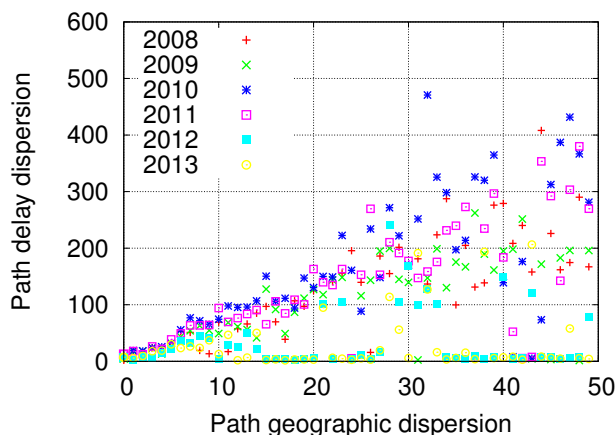


Figura 3.7: Dispersão do atraso e geográfica dos K-menores caminhos.

A Figura 3.7 mostra que a média da dispersão do atraso e a média da dispersão geográfica do caminho são altamente correlacionadas para 2008, especialmente para a porção dos caminhos com geodispersão entre 0 e 30. Para os anos de 2009 até 2013 ocorreu uma forte redução na correlação, como pode ser visto na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Coeficientes de Spearman fig. 3.7

	Spearman
2008	0.85
2009	0.55
2010	0.68
2011	0.68
2012	0.04
2013	0.05

Esse resultado mostra que quanto menos direto um caminho entre dois pontos for, maior será o atraso. Um ponto importante é que em 2013 ainda existem caminhos com elevada dispersão geográfica. Um dos principais motivos são as regras de roteamento BGP resultantes de acordos comerciais entre operadoras.

Finalmente, analisamos a correlação entre a média do atraso do caminho e a média do atraso mínimo esperado em um enlace de fibra ótica. A Figura 3.8 mostra que entre 2008 e 2011 há uma maior dispersão entre o atraso mínimo e o atraso real. Caminhos mais curtos podem ter seus enlaces em fibra local ou cabos.

Na direção oposta, caminhos mais longos possuem tipos de enlaces que podem explicar a má correlação encontrada em caminhos mais longos com atraso. É possível que esses caminhos mais longos com atraso estejam conectados por um número menor de enlaces com alta latência e, como consequência, o atraso total do caminho não é proporcional ao atraso mínimo esperado.

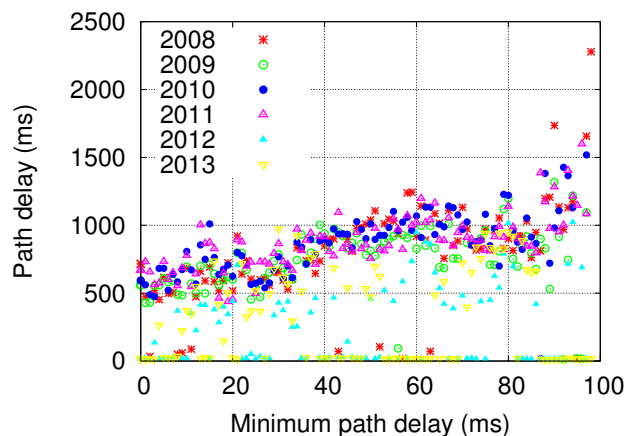


Figura 3.8: Atraso e o atraso mínimo dos K-menores caminhos.

Observamos uma correlação média para os anos 2008, 2010 e 2011 (Tabela 3.5). Houve uma forte redução na correlação em 2012, e nenhuma correlação em 2013.

Tabela 3.5: Coeficientes de Spearman fig. 3.8

	Spearman
2008	0.68
2009	0.48
2010	0.7
2011	0.72
2012	0.05
2013	0

3.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi caracterizada e analisada a recente evolução da conectividade fim-a-fim da Internet. Foram comparadas métricas de desempenho importantes entre dois períodos distintos separados por cinco anos. Foram analisados dados de 2008 até 2013, incluindo a latência dos caminhos fim-a-fim, número de saltos, dispersão geográfica e diversidade de caminhos. Entender essa recente evolução da conectividade da Internet, assim como as tendências associadas, é importante, por exemplo, para o planejamento de enlaces inter-rede e para um melhor ajuste de protocolos de roteamento.

Resultados anteriores (Labovitz et al., 2010a; Ager et al., 2012a) encontrados na literatura indicam que a rede está se tornando mais densa. Duas consequências esperadas a partir desse resultado são a maior diversidade de caminhos possíveis entre dois pontos da rede, e a redução do número de saltos desses caminhos. Estas características tornam a rede mais robusta e resiliente a eventuais falhas que venham a ocorrer. Os resultados encontrados indicam que os caminhos entre dois pontos na rede estão são bastante diversificados, mas a diversidade não aumentou com o tempo. Entre 2008 e 2013, a diferença entre

caminhos disponíveis entre dois pontos foi de cerca de 200%. Outros resultados também indicam que os caminhos entre dois pontos não estão diminuindo de tamanho, mantendo uma média de 17 saltos entre os pontos fim-a-fim.

Este estudo mostrou que apesar métricas estudadas mudaram pouco nos últimos anos. Isso mostra que a Internet, apesar de funcionar sobre tecnologias com mais de 30 anos, tem bastante resiliência frente aos novos elementos não previstos em sua concepção, como o crescente aumento no número de usuários e tráfego de peso como o de multimídia.

Capítulo 4

Trabalhos relacionados

A caracterização da evolução e o comportamento da conectividade da Internet atraiu diversos esforços de pesquisa na última década. A maioria desses trabalhos foca em como a Internet mudou na conectividade em nível de AS, focando na caracterização de propriedades topológicas, sem focar em medidas fim-a-fim.

Siganos et al. (2002) mostraram que o crescimento de ambos o número de nós e arestas no nível de AS foi exponencial entre 1997 e 2001. Esse resultado, juntamente com a observação de que a Internet segue uma estrutura “small world”, indica a densificação da rede. Características importantes encontradas foram que o grau de um nó cresce em proporção ao grau atual, ou seja quanto maior o grau maior será o crescimento, e que novas conexões preferem nós com alto grau de conectividade.

Mais recentemente, (Dhamdhere e Dovrolis, 2011), quase uma década após o trabalho de Sigamos et al. (2002), estudaram como a evolução do ecossistema da Internet ocorreu de 1998 até 2010. Foi mostrado que o crescimento da rede no nível de AS agora é linear, e que novos *links* estão mais associados a ASs existentes do que a novos. Outro resultado é que atualmente o tamanho médio dos caminhos se mantém praticamente constante. Um aspecto chave estudado em nossa análise, porém pouco explorado nesses trabalhos, é como essas mudanças topológicas afetam a diversidade de caminhos.

Lee et al. (2010a) apresentam resultados que mostram aparente aumento na latência da rede de 2004 para 2009. Enquanto nós obtemos o atraso diretamente dos *logs* (Seção 3.1 e 2.1) e a partir de caminhos reconstruídos a partir de um grafo (Seção 2.3), Lee et al. (2010a) utilizam um algoritmo chamado “path stitching” (Lee et al., 2010c). Esse algoritmo reconstrói caminhos entre ASs utilizando dados de tabelas BGP. O RTT é então calculado a partir desses caminhos. O atraso médio encontrado para 2004 foi de 166ms e 213ms para 2009. Esse atraso foi atribuído ao crescimento do número de ASs ao redor do mundo, muitos dos quais não existiam em 2004, o que causou maior distribuição geográfica das amostras.

Em Schwartz et al. (2010), foi estudada a simetria, estabilidade e diversidade das rotas da Internet em 2006 e depois em 2009. O estudo utiliza dados coletados em um período de 96 horas pela projeto DIMES (Shavitt e Shir, 2005), que consiste em uma plataforma de medição distribuída baseada em computação voluntária. Para a análise foram selecionados cerca de 100 pares de nós para 2006 e 2009. De acordo com este trabalho, 25% dos pares de nós em ambos

os anos possuem exatamente uma rota dominante, e cerca de 30% dos pares utilizaram mais de 10 rotas diferentes. Os resultados mostraram que as rotas fim-a-fim da Internet são mais diversas em 2009 do que em 2006, mas que os caminhos são relativamente estáveis em ambos os períodos. Foi encontrado que o tipo de rede age como definidor do comportamento, onde redes acadêmicas são mais estáveis que as comerciais. A explicação dada para esse comportamento foi o aumento de balanceadores de carga junto com o aumento da topologia da rede, além do uso de *tunneling* que resulta em rotas mais estáveis.

Capítulo 5

Discussão

O entendimento da evolução da Internet é claramente importante para o planejamento de novos enlaces e ajustes de protocolos de roteamento. Assim, nesse trabalho nós caracterizamos e avaliamos as principais mudanças da conectividade fim-a-fim da Internet nos últimos anos. Nós avaliamos essa evolução em dois períodos diferentes, um separado por 5 e o outro separado por 6 anos no tempo. Inicialmente, nós analisamos dados de 2006 e 2011, incluindo a latência dos caminhos fim-a-fim, número de saltos, dispersão geográfica e diversidade de caminhos. A seguir, apresentamos resultados para a comparação entre os anos 2008 e 2013.

Ao avaliar o período 2006-2011, encontramos resultados contra-intuitivos que indicam que o desempenho da Internet está piorando. Por exemplo, a distribuição do tamanho médio dos caminhos muda pouco de 2006 para 2011. Durante esse período, entretanto, era esperado que investimentos (novos equipamentos e enlaces) na rede tornassem os caminhos atuais mais curtos e com menos atraso. A análise também mostra que o atraso fim-a-fim se tornou claramente pior. Mais uma vez, novos equipamentos e links deveriam providenciar uma melhor conectividade com enlaces mais rápidos, resultando em uma experiência de usuário aprimorada.

Ao avaliar o período 2008 a 2013, verificamos que a latência fim-a-fim não apresenta diferença significativa. Os resultados encontrados indicam também que os caminhos entre dois pontos na rede estão são bastante diversificados, mas a diversidade não aumentou com o tempo. Entre 2008 e 2013, a diferença entre caminhos disponíveis entre dois pontos foi de cerca de 200%. Outros resultados também indicam que os caminhos entre dois pontos não estão diminuindo de tamanho, mantendo uma média de 17 saltos entre os pontos fim-a-fim.

Uma causa da diferença dos resultados encontrados para os dois períodos avaliados pode ser a mudança de metodologia de coleta de dados da Internet. No ano de 2007, as coletas realizadas pelo CAIDA mudaram de plataforma de medição, passando do Skitter para o Ark. Uma das mudanças mais críticas foi a mudança da lista de IPs de destino, que passou de fixa para aleatória. Talvez também tenham ocorrido mudanças na estrutura da sonda, o que poderia alterar como os roteadores se comportam ao recebê-las.

Para ambos os períodos, este estudo mostrou que apesar dos esperados investimentos na infra-estrutura da Internet, as métricas estudadas mudaram pouco nos últimos anos. Isso pode ser um indicativo da resiliência da rede.

Referências Bibliográficas

- Ager, B., Chatzis, N., Feldmann, A., Sarrar, N., Uhlig, S., e Willinger, W. (2012a). Anatomy of a large european IXP. In *Proc. of the ACM SIGCOMM*, Helsinki, Finland.
- Ager, B., Chatzis, N., Feldmann, A., Sarrar, N., Uhlig, S., e Willinger, W. (2012b). Anatomy of a large european IXP. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, SIGCOMM '12, pages 163–174, New York, NY, USA. ACM.
- Cardozo, T., da Silva, A. P. C., Vieira, A. B., e Ziviani, A. (2013). Evolução da conectividade fim-a-fim da internet. In *XVIII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços – WGRS – SBRC*.
- Dhamdhere, A. e Dovrolis, C. (2008). Ten Years in the Evolution of the Internet Ecosystem. In *Proc. of the Internet Measurement Conference (IMC)*, Vouliagmeni, Greece.
- Dhamdhere, A. e Dovrolis, C. (2011). Twelve years in the evolution of the internet ecosystem. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 19(5):1420–1433.
- Gettys, J. e Nichols, K. (2012). Bufferbloat: Dark buffers in the Internet. *Communications of the ACM*, 55(1):57–65.
- Haddadi, H., Uhlig, S., Moore, A., Mortier, R., e Rio, M. (2008). Modeling internet topology dynamics. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):65–68.
- Labovitz, C., Iekel-Johnson, S., McPherson, D., Oberheide, J., e Jahanian, F. (2010a). Internet inter-domain traffic. In *Proc. of the ACM SIGCOMM*, New Delhi, India.
- Labovitz, C., Iekel-Johnson, S., McPherson, D., Oberheide, J., e Jahanian, F. (2010b). Internet inter-domain traffic. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 40(4):75–86.
- Lee, D., Cho, K., Iannaccone, G., e Moon, S. (2010a). Has Internet Delay gotten Better or Worse? In *Proc. of the 5th International Conference on Future Internet Technologies (CFI)*, Seoul, Korea.

- Lee, D., Cho, K., Iannaccone, G., e Moon, S. (2010b). Has Internet delay gotten better or worse? In *Proc. of the 5th International Conference on Future Internet Technologies (CFI)*, Seoul, Korea.
- Lee, D. K., Jang, K., Lee, C., Iannaccone, G., e Moon, S. (2010c). Path stitching: internet-wide path and delay estimation from existing measurements. In *Proceedings of the 29th conference on Information communications, INFOCOM'10*, pages 201–205, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- Levenshtein (1966a). Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics Doklady*, 10:707–710.
- Levenshtein, V. (1966b). Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics Doklady*, 10:707–710.
- Oliveira, R., Zhang, B., e Zhang, L. (2007). Observing the evolution of Internet AS topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(4):313–324.
- Percacci, R. e Vespignani, A. (2003a). Scale-free behavior of the Internet global performance. *The European Physical Journal B*, 32:411–414.
- Percacci, R. e Vespignani, A. (2003b). Scale-free Behavior of the Internet Global Performance. *The European Physical Journal B*, 32:411–414.
- Schwartz, Y., Shavitt, Y., e Weinsberg, U. (2010). On the Diversity, Stability and Symmetry of End-to-End Internet Routes. In *Proc. of the Global Internet (GI)*, San Diego, CA, USA.
- Shavitt, Y. e Shir, E. (2005). DIMES: let the Internet measure itself. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 35(5):71–74.
- Siganos, G., Faloutsos, M., e Faloutsos, C. (2002). The Evolution of the Internet: Topology and Routing. Technical report, Univ. of California, Riverside.
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, 15:72–101.
- Wagner, R. A. e Lowrance, R. (1975). An Extension of the String-to-String Correction Problem. *Journal of the ACM*, 22(2):177–183.
- Wang, F. e Gao, L. (2009). Path Diversity Aware Interdomain Routing. In *IEEE INFOCOM*, pages 307–315.
- Whiteaker, J., Schneider, F., e Teixeira, R. (2011). Explaining packet delays under virtualization. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 41(1):38–44.
- Zhou, S. (2006). Understanding the Evolution Dynamics of Internet Topology. *Physical Review E*, 74(1):016124.