

# Caracterização da Rede de Sincronização na Internet

Cristina Duarte Murta , Pedro Rodrigues Torres Jr.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná  
Departamento de Informática  
Caixa Postal 19081 – 81531-990 Curitiba, PR

**Resumo.** Manter a sincronização de relógios é uma tarefa importante e difícil em sistemas distribuídos. O Network Time Protocol – NTP – é um protocolo criado para distribuir informação de tempo em uma rede heterogênea e grande como a Internet. Este artigo apresenta uma caracterização de uma rede de sincronização do NTP com milhares de nodos, incluindo centenas de servidores Stratum 1. Diversos aspectos que definem a qualidade do tempo estampado pelo NTP são analisados, bem como as características topológicas da rede. Os resultados são comparados com caracterizações anteriores apresentadas na literatura, mostrando a evolução da sincronização via NTP nos últimos quinze anos.

**Abstract.** Keeping clock synchronization is an important and difficult task in distributed systems. Network Time Protocol (NTP) was created to distribute information of time in a heterogeneous and large network such as the Internet. This paper presents a characterization of a NTP network composed by thousand of nodes, including hundreds of Stratum 1 servers. Many aspects that define the quality of the NTP timestamps are analyzed, as well as the topological characteristics of the network. The results are compared to previous characterizations found in the literature, showing the evolution of the NTP network and synchronization in the last fifteen years.

## 1. Introdução

Sincronização é um aspecto essencial na infra-estrutura de muitos sistemas. Inúmeras atividades nas áreas industrial, comercial, financeira, de saúde, transporte, lazer, serviços e outras requerem sincronização para execução de tarefas e registro de tempo de ocorrência de eventos. Tarefas como processamento de transações, escalonamento e controle de processos, autenticação, operações financeiras, processos industriais, diagnóstico de faltas, investigação de crimes e assinatura digital são exemplos de atividades que podem requerer registro de tempo confiável.

No âmbito dos sistemas computacionais, vários programas e aplicações dependem da sincronização correta dos relógios. Por exemplo, sistemas de gerenciamento de arquivos tais como o NFS e o AFS, servidores de banco de dados e de e-mail, sistemas de *back-up*, programas de agendamento de tarefas tais como o `cron` e o `at`, e ferramentas de geração automática de código executável como o `make` dependem das estampas de tempo para tomar decisões. Sistemas de caches na Web verificam a validade de um documento com base em sua estampa de tempo, também presente em eventos SNMP. A estampa de tempo em pacotes é fundamental em estudos e medições em redes, bem como em alguns

sistemas criptográficos e protocolos de segurança dependentes do tempo, tal como Kerberos. Enfim, cada vez mais processos operando em sistemas distribuídos dependem de registro de tempo confiável. A falta de sincronização pode levar a falha na execução correta das operações, perda de dados, problemas de segurança e perda de credibilidade de sistemas e empresas. No entanto, cada sistema pode ter necessidades específicas quanto à resolução, precisão, exatidão ou outras propriedades dos relógios do sistema.

Sincronizar relógios é um problema difícil porque o tempo é um alvo móvel e, além disso, observa-se uma necessidade crescente de sincronização com exatidão em escalas de tempo cada vez menores. Muitas tarefas tais como o registro da criação de um arquivo ou da entrada de um funcionário em uma empresa podem ser facilmente executadas com exatidão em uma escala de tempo grande como dia, hora e minuto. No entanto, outras aplicações podem requerer exatidão em escala de segundo ou inferior (*ms*, *μs*, *ns*). À medida que os computadores ficam mais rápidos e executam mais tarefas por unidade de tempo, os eventos ocorrem em escalas de tempo cada vez menores e os registros de estampa de tempo requerem exatidão e precisão cada vez maiores.

O *Network Time Protocol* (NTP) [Mills 1992] é o protocolo padrão para sincronização de relógios de computadores conectados na Internet. O NTP é um protocolo dinâmico e flexível, capaz de construir e manter uma rede de sincronização com características de uma rede *peer-to-peer*, o que torna o processo confiável e robusto mesmo quando executado em uma rede como a Internet. O principal produto do NTP é a estampa de tempo gerada para cada sistema que executa o protocolo.

Este artigo apresenta uma caracterização de uma rede de sincronização do NTP. A caracterização é baseada em dados coletados recentemente por um robô que percorreu a rede NTP acessível a partir de um determinado ponto da Internet. O objetivo deste estudo é analisar a qualidade da manutenção de tempo na rede NTP, bem como alguns aspectos da topologia da rede. Algumas caracterizações foram feitas anteriormente, entre 1989 e 1999 [Mills 1990, Guyton and Schwartz 1994, Mills et al. 1997, Minar 1999]. No entanto, nos últimos seis anos, a Internet cresceu e evoluiu em vários aspectos, desde o número de usuários e máquinas, até a infra-estrutura da rede. Assim, consideramos oportuno fazer uma caracterização da rede NTP atual e comparar nossos resultados com os resultados de caracterizações anteriores, discutindo a evolução da qualidade da sincronização na Internet.

Os resultados apresentam evidências de uma evolução substancial na qualidade da sincronização provida pelo NTP ao longo dos anos. Esta evolução é devida em parte à evolução da infra-estrutura da Internet, também demonstrada nos resultados. O estudo inicial da topologia da rede NTP indica que ela pode ser caracterizada pelo modelo livre de escala, cuja assinatura é a grande variabilidade na distribuição das conexões [Faloutsos et al. 1999]. Além disso, a carga sobre os nodos principais da rede (servidores stratum 1) aumentou consideravelmente nos últimos anos, enquanto foi observada uma diminuição na porcentagem deste tipo de servidor na rede.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta alguns conceitos relacionados ao tempo, à manutenção do tempo em relógios e sincronização. A Seção 3 descreve aspectos do protocolo NTP essenciais ao entendimento do trabalho. A Seção 4 descreve os procedimentos e eventos relacionados à coleta de dados e organização

dos dados para a análise. A Seção 5 apresenta os resultados da análise dos dados e a comparação com os trabalhos anteriores. Finalmente, a conclusão finaliza o trabalho.

## 2. Tempo, Relógios e Sincronização

A medição do tempo no mundo é feita por instituições internacionais e é conhecida como *Coordinated Universal Time* ou UTC. Esta é a referência padrão para o tempo. A unidade padrão de tempo é o segundo e o dispositivo utilizado medir o tempo é o relógio. O objetivo do NTP é sincronizar os relógios dos computadores em relação ao UTC.

Um relógio é formado por três mecanismos: um oscilador, um contador de oscilações que registra continuamente o número de ciclos do oscilador, e um mecanismo para mostrar, gravar ou exibir o resultado. Um oscilador é um mecanismo que gera uma frequência precisa, cujo erro é normalmente expresso em PPM (partes por milhão). O contador converte o número de ciclos contados no oscilador em unidades de tempo conhecidas, tais como segundos, minutos, horas. Cada resultado, ou seja, cada valor do contador é uma estampa de tempo (*timestamp*).

Sincronização é a coordenação de eventos em relação ao tempo. Há dois propósitos para a sincronização. O primeiro propósito é permitir e assegurar que eventos ocorram em uma determinada seqüência, ou em um tempo pré-definido. Neste caso a sincronização é necessária para disparar eventos e registrar sua ocorrência para que, posteriormente, seja possível fornecer prova de quando os eventos ocorreram e em que seqüência. O segundo propósito é recuperar a informação registrada, relativa a eventos ocorridos, sempre que necessário. Esta tarefa é possível apenas se estampas de tempo exatas e precisas estão disponíveis. Por exemplo, muitas vezes é necessário ter uma seqüência de eventos organizada em ordem cronológica.

Vários conceitos são relacionados à sincronização de relógios e manutenção de tempo. Exatidão (*accuracy*) é o grau de conformidade de uma medida de tempo em relação ao valor verdadeiro ou referência padrão, neste caso conhecida como a hora certa (UTC). Resolução ou precisão é a unidade da menor estampa de tempo que um relógio pode gerar, seja minuto, segundo, ou unidades menores. A diferença de tempo entre dois relógios é denominada *time offset* e a diferença de frequência é denominada *frequency offset*. A estabilidade de um relógio é uma medida das flutuações de frequência do oscilador. Sincronizar relógios significa coordená-los em relação ao tempo e a frequência.

Uma das propriedades mais importantes de um relógio é a monotonicidade, que significa que o tempo é sempre crescente, ou seja, duas leituras consecutivas de um relógio devem prover tempo maior para a segunda leitura do que o tempo fornecido na primeira leitura, ou no máximo igual, dependendo da resolução. Relógios baseados em osciladores precisos sempre mantêm esta propriedade. No entanto, relógios implementados em software podem facilmente ter sua estampa de tempo alterada para um tempo no passado. Muitas aplicações e protocolos podem não ser programados para esta situação, causando erros de software, o que torna a monotonicidade uma propriedade extremamente importante. Em várias situações, a monotonicidade é mais importante do que a exatidão.

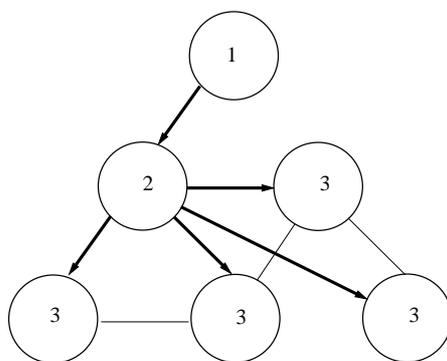
## 3. O Protocolo NTP

O *Network Time Protocol* [Mills 1992] é um protocolo cujo objetivo é sincronizar relógios de computadores em rede. O protocolo NTP foi desenvolvido para realizar a

sincronização de forma precisa e robusta, mesmo quando usado em redes como a Internet. A estampa de tempo produzida pelo NTP (*NTP timestamp*) é o principal produto do protocolo, e é obtida a partir de quatro medidas realizadas por seus algoritmos, o *offset*, o RTT (*round-trip delay*), o *jitter* e a dispersão, todos em relação ao relógio de referência selecionado. O NTP provê sincronização com o tempo UTC, compensando, por meio de técnicas estatísticas, o atraso de transmissão observado na Internet.

A rede NTP é organizada hierarquicamente, de acordo com o modelo cliente/servidor e com o conceito de *stratum*. Na raiz da árvore de uma sub-rede NTP estão os computadores stratum 1 ou servidores primários, que sincronizam seus relógios diretamente em alguma fonte externa confiável, como relógios atômicos, por exemplo. Diversas tecnologias tais como rádio, GPS e CDMA têm sido utilizadas como base para a sincronização global em redes. Computadores que sincronizam seus relógios com servidores stratum 1 são denominados stratum 2 ou servidores secundários. Esse modelo se estende até o stratum 16, que representa os nodos folha da hierarquia. Servidores que sincronizam seus relógios com servidores de stratum  $n$  recebem valor de stratum  $n + 1$ . O valor do stratum representa, assim, o número de nodos (*hops*) até a raiz da árvore.

A Figura 1 [Mills 1991] apresenta de forma esquemática uma sub-rede NTP. Os números em cada nodo representam o valor do stratum do nodo. Cada servidor na sub-rede de sincronização é configurado com um outro servidor denominado par (*peer*) de sincronização. As linhas em destaque representam uma sincronização ativa e a direção do fluxo da informação de tempo. As linhas mais finas representam caminhos nos quais a informação de tempo é trocada entre os pares mas não necessariamente utilizada para sincronização dos relógios locais.



**Figura 1. Estrutura hierárquica do NTP [Mills 1991].**

A estrutura da rede NTP permite que os nodos criem associações, independente do seu stratum, com clientes e servidores tendo papéis dinâmicos, o que caracteriza o NTP como uma rede *peer-to-peer*. Esta característica facilita a auto-manutenção da rede e aumenta a confiabilidade da sincronização e a tolerância a falhas. Além disso, o estabelecimento de várias associações permite ao protocolo selecionar a melhor fonte de tempo como origem da sincronização. Como as conexões são dinâmicas, a rede pode ser automaticamente reorganizada caso ocorra algum problema com a fonte inicialmente escolhida.

Diversos servidores NTP podem ser utilizados no processo de sincronização de um computador. O processo de sincronização de um servidor começa com a troca de estam-

pas de tempo entre o servidor e, possivelmente, vários pares na sub-rede de sincronização para determinar o RTT entre os pares e o *offset* dos relógios. Os pares calculam independentemente estas métricas, em um processo simétrico e continuamente repetido. Os valores coletados são filtrados e posteriormente processados por um algoritmo que seleciona o par capaz de prover a informação de tempo mais exata e confiável dentre os vários pares que podem ser adequados para a sincronização.

Dentre as métricas utilizadas para seleção do par de sincronização estão o stratum e o RTT. Ao utilizar o valor do stratum, o NTP pode optar preferencialmente por um par de sincronização mais confiável, isto é, mais próximo da fonte primária do tempo. O atraso total de ida e volta (*round-trip delay* ou RTT) para a raiz da árvore, medida conhecida como distância de sincronização, é também uma variável importante na definição da fonte de sincronização. O NTP é um protocolo complexo. Além dessas características, o NTP provê métodos de autenticação para se proteger de interferências acidentais ou maliciosas.

#### 4. Coleta e Organização dos Dados

Para realizar este estudo implementamos um *spider*, similar ao utilizado no estudo realizado em 1999 [Minar 1999], mas adaptado para reconhecer endereços IPv4 e IPv6. Genericamente, um *spider*, também conhecido como robô, é um programa que realiza consultas a um grande número de *hosts* na Internet para coletar informações. O *spider* NTP implementado é um programa que faz consultas a *hosts* na rede virtual NTP, pesquisando e armazenando informações específicas do protocolo NTP que estão disponíveis.

O ponto de partida para as consultas é uma lista pública de servidores NTP [NTP 2005]. A consulta a servidores desta lista revela novos nodos da rede, e o processo se repete com o envio de novas consultas a estes nodos, ampliando a quantidade de informação coletada. O *spider* NTP implementado contém um filtro para evitar consultas em servidores que não possuem um endereço IP público, endereços estes conhecidos como *bogus*. O filtro também permite adicionar entradas para evitar consultas em determinadas redes.

O *spider* foi executado a partir de uma única máquina, um computador Pentium 4 CPU 2.80GHz, com 512MB de memória RAM, sistema operacional Debian GNU/Linux, conectado à rede gigabit do Ponto de Presença da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa no Paraná, PoP-PR/RNP. O PoP-PR está conectado ao backbone da RNP e a outros backbones comerciais com enlaces de alta velocidade.

Cada endereço IP identificado na rede NTP é denominado *host* NTP ou simplesmente *host* neste trabalho. Cada *host* NTP que executa um *daemon* NTP, ou seja, possui uma implementação do protocolo NTP executando em sua porta padrão, é denominado servidor. Um par (*peer*) se refere a uma instalação do protocolo em um processador remoto, conectado por um caminho na rede. Um servidor é uma referência a uma instalação local do protocolo. Assim, os nomes servidor e par podem se referir a um mesmo *host*, ou seja, uma máquina pode ser servidor e par ao mesmo tempo, dependendo do ponto de referência.

O NTP define quatro classes de variáveis [Rybaczuk 2005]. As variáveis do sistema são informações do ambiente local de uma máquina, relativas ao sistema operacional e ao relógio local. As variáveis dos pares são variáveis que representam o estado do protocolo em cada par de sincronização. Variáveis dos pacotes são aquelas que fazem parte

das mensagens do NTP. E, finalmente, os parâmetros, que são constantes utilizadas nas implementações do protocolo. As mesmas variáveis podem ser comuns a duas ou mais classes. Em particular, variáveis de origens distintas podem ter o mesmo nome.

A coleta de dados teve como ponto de partida um conjunto inicial de 263 servidores públicos stratum 1 e 2, cujos endereços estão disponíveis em [NTP 2005]. A primeira coleta de dados ocorreu no período de 30/08 a 05/09/2005. Nesta etapa, o *spider* NTP executou o seguinte comando para cada endereço IP:

```
./ntpdc -n -c sysinfo -c peers -c monlist <endereço IP>
```

Foram obtidos 1.278.834 endereços IPs únicos, já excluindo os endereços eliminados pelo filtro. Destes, apenas 148.157 *hosts* responderam de alguma forma à consulta feita.

Uma segunda consulta foi realizada no período de 26 a 30/09/2005. Nesta etapa todos os 1.278.834 *hosts* identificados anteriormente foram novamente consultados, para verificação dos dados, utilizando o seguinte comando de consulta:

```
./ntpq -n -c associations -c ``readvar 0`` -c allreadvar
```

O comando `readvar 0` retorna os valores das variáveis do próprio *host*, enquanto a opção `allreadvar` retorna os dados de todas as associações de um *host*. Esta opção foi implementada no `ntpq`. Nesta etapa foram descobertos 11.985 novos endereços a partir das informações dos pares associados, totalizando 1.290.819 endereços IPs únicos, dos quais apenas 148.307 responderam às consultas. Após uma avaliação dos dados coletados, foram excluídos 1056 *hosts* que apresentaram problemas nos resultados das consultas, tais como registros mal formados ou truncados. Restaram, portanto, 147.251 *hosts* com informações úteis para a análise, ou seja, que responderam apropriadamente às consultas. Os dados somam 870 Mbytes.

Cada *host* NTP identificado foi consultado em relação a dados de seu próprio sistema, armazenados nas variáveis de sistema definidas pelo protocolo, as associações que o *host* mantinha com outros nodos da rede, e as variáveis do pares do *host*, utilizadas nos algoritmos do NTP. Os dados coletados foram agrupados em dois grandes grupos. O primeiro grupo contém informações de todas as variáveis dos sistemas consultados, ou seja, informações locais de cada servidor. O segundo grupo contém informações das variáveis dos pares associados a esses servidores.

Um dos problemas principais deste tipo de coleta de dados é a segurança. As consultas podem ser confundidas com acessos indevidos, embora não sejam, pois o protocolo NTP permite este tipo de consulta. Para minimizar este problema, antes de iniciarmos a coleta dos dados construímos uma página Web<sup>1</sup> com versões em inglês e português, contendo diversas informações sobre o estudo realizado, como os endereços de origem das consultas, o período de realização do estudo, o tipo de consulta executado, o endereço de contato dos autores, dentre outras informações. Uma entrada reversa no DNS sobre o domínio utilizado (`ntpsurvey.arauc.br`) foi adicionada, para permitir que os administradores de rede localizassem a página Web quando notassem o acesso a algum nodo de sua rede, obtendo informações sobre tal acesso.

Durante a coleta dos dados foram reportados cerca de dez incidentes de segurança.

---

<sup>1</sup><http://www.ntpsurvey.arauc.br>

Ano	Referência Bibliográfica	Tamanho da Rede	Respostas
1989	[Mills 1990]	8.455	946
1993	[Guyton and Schwartz 1994]	15.000	7.251
1995	[Mills et al. 1997]	—	38.722
1999	[Minar 1999]	647.401	175.527
2005	Este artigo	1.290.819	147.251

**Tabela 1. Crescimento da rede NTP ao longo do tempo.**

A maioria das mensagens foi enviada para o endereço de contato dos prefixos IP listados no sistema *whois directory service*. Apenas duas comunicações foram feitas diretamente para o endereço de contato listado na página anunciada. Um único administrador insistiu em não querer mais receber qualquer acesso em sua rede, e então os endereços de sua rede foram adicionados ao filtro do *spider* NTP. Aparentemente, a maioria dos incidentes reportados foram gerados por ferramentas automáticas, como o IDS (*Intrusion Detection and Prevention System*). Os detalhes da coleta de dados estão descritos em [Torres-Júnior. 2006].

## 5. Resultados

Esta seção descreve os resultados da caracterização da rede de sincronização do NTP. Vários resultados são comparados com dados publicados em estudos anteriores. No nosso conhecimento, este é o quinto estudo sobre a rede de sincronização do NTP no período entre 1989 e 2005. As publicações anteriores e suas respectivas datas estão citadas na Tabela 1. A coluna “Ano” desta tabela refere-se ao ano da coleta de dados, não ao ano da publicação. Várias tabelas apresentadas nesta seção utilizam o ano da coleta de dados como referência para a respectiva publicação, segundo a relação apresentada na Tabela 1.

Muitos dados obtidos da coleta foram plotados na forma de curvas de frequência cumulativa (CDF) ou complemento da frequência cumulativa (CCDF). Em especial, os gráficos de complemento da frequência cumulativa são úteis para avaliar valores extremos na distribuição dos dados. Para avaliar a dispersão de um conjunto de dados em torno da média utilizamos o coeficiente de variação (COV), definido como a razão entre o desvio padrão e a média.

### 5.1. Tamanho da Rede de Sincronização

A Tabela 1 apresenta dados sobre o crescimento da rede de sincronização NTP, publicados em estudos anteriores, bem como os resultados obtidos pela caracterização apresentada no presente artigo. A coluna “Tamanho da Rede” indica o número de *hosts* que foram descobertos, enquanto a coluna “Respostas” indica o número de *hosts* que efetivamente responderam às consultas do protocolo NTP.

O tamanho da rede NTP cresceu cerca de três ordens de grandeza desde o primeiro estudo. Comparando com o último estudo, realizado em 1999, o crescimento foi de quase 100%. No entanto, neste mesmo período, a fração de *hosts* que respondeu às consultas diminuiu de 27% para 11% do total de *hosts* descobertos. Ainda assim, consideramos que a quantidade de dados para essa análise é suficiente para o estudo.

Stratum	1	2	3	4	5	6	7 – 10	11	12–16
Fração (%)	0,38	20,60	58,98	17,73	1,28	0,23	0,21	0,41	0,18

**Tabela 2. Distribuição dos servidores por stratum.**

Cerca de 89% dos *hosts* descobertos não puderam ser alcançados ou não responderam às consultas por várias razões. Por exemplo, alguns *hosts* podem ter seu acesso bloqueado por um *firewall*. Com a popularização da rede e o aumento de incidentes de segurança, muitos administradores têm optado por evitar manter disponível algum serviço público, pois a possibilidade de acesso pode aumentar a vulnerabilidade do sistema. Além disso, cada endereço IP foi consultado apenas uma vez, e as consultas ou as respostas podem ter sido perdidas devido a falhas ou a congestionamento na rede, uma vez que elas são implementadas com o protocolo UDP. Outro motivo pode ser atribuído ao fato de que muitos dos *hosts* listados podem ter sido adicionados pelo *spider* por terem feito uma consulta a um servidor NTP, mas esses *hosts* não mantêm um *daemon* NTP executando continuamente. Uma outra explicação sugere que alguns servidores podem não ser capazes de responder às consultas executadas, possivelmente devido a diferenças entre as versões do protocolo e do programa de consulta.

## 5.2. Caracterização da Hierarquia da Rede de Sincronização

A principal característica da topologia da rede NTP é a hierarquia dos servidores, definida pelo stratum. A Tabela 2 mostra a frequência de servidores por stratum. A maior parte dos servidores atua como stratum 2, 3 e 4, sendo os servidores stratum 3 os mais comuns. Em números absolutos, temos 533 servidores stratum 1, 28.687 servidores stratum 2 e 82.145 servidores stratum 3. Este resultado é explicado pela forma como estão distribuídos os servidores NTP na Internet. Servidores stratum 1, que sincronizam seus relógios diretamente com uma fonte de tempo precisa e confiável, são fonte de sincronização para servidores stratum 2, que estão localizados normalmente no núcleo da rede. Estes servidores, por sua vez, são consultados por diversos servidores stratum 3 localizados nas bordas, que distribuem a informação de tempo para as redes locais. Resultado similar foi observado em [Minar 1999].

Notamos uma quantidade considerável de servidores stratum 11 na Tabela 2. Uma análise mais detalhada indica que muitos administradores configuram o servidor local como relógio de referência, atribuindo valor 10 ao stratum. Dos 569 servidores stratum 11, 505 possuem o relógio de referência configurado com o endereço de *loopback* (127.127.x.x). Essa configuração permite que outros *hosts* utilizem este servidor como fonte de sincronização quando servidores de stratum menor estão indisponíveis.

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos servidores por stratum ao longo dos anos. Em todas as caracterizações realizadas, a porcentagem de servidores stratum 1 é pequena mas, ainda assim, podemos observar uma sensível diminuição nesta porcentagem nos últimos anos. Esta tendência pode ter duas explicações. A primeira explicação refere-se ao custo de aquisição e à dificuldade de manutenção de um servidor stratum 1. A segunda explicação é devida a um modelo de crescimento e evolução da Internet denominado “livre de escala” [Barabási and Albert 1999, Barabási 2002], e suas derivações [Pastor-Satorras and Vespignani 2004, Dorogovtsev and Mendes 2003]. Um dos princípios deste modelo indica que os nodos se conectam preferencialmente a nodos

Stratum	1993	1995	1999	2005
1	0,91	1,58	0,55	0,38
2	20,36	31,84	15,29	20,60
3	46,53	47,28	48,61	58,98
4	27,60	16,17	21,84	17,73
5	0,52	2,27	4,06	1,28
6	0,08	0,43	0,94	0,23
7 a 15	0,50	0,43	0,55	0,80
16	3,50	0	2,77	0

**Tabela 3. Evolução da distribuição (%) de servidores por stratum ao longo do tempo.**

já bastante conectados, um fenômeno denominado *rich-get-richer*. Este modelo relaciona o tempo de vida de um nó da rede ao número de conexões para o nó. Nós altamente conectados (*hubs*) não morrem e raramente perdem suas conexões. Segundo este modelo, o surgimento de novos servidores stratum 1 seria desencorajado, pois, pelo menos a princípio, eles teriam poucos clientes. É importante ressaltar que o pequeno número de servidores stratum 1 reforça a grande importância do comportamento desses servidores para a rede de sincronização do NTP.

Observa-se também, ainda na Tabela 3, que a quantidade de servidores stratum 3, que era próxima dos 47% nos estudos anteriores, aumentou para quase 59%. Este dado pode ser uma evidência de que, frente à necessidade crescente de sincronização com exatidão, mais sistemas autônomos estão procurando sincronizar suas máquinas com servidores NTP mais próximos da raiz.

### 5.3. Caracterização da Qualidade da Sincronização

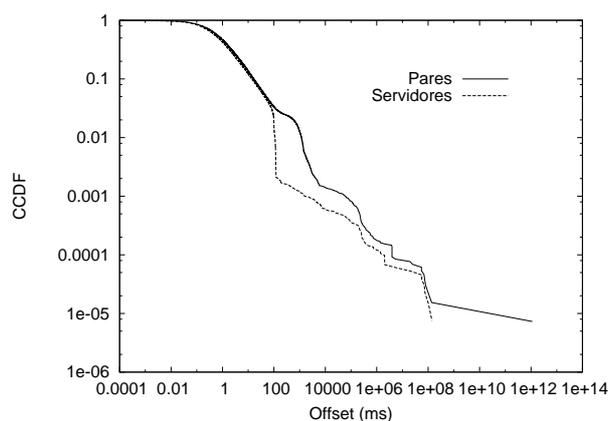
Nesta seção são discutidas métricas que caracterizam a qualidade da sincronização obtida e mantida pela rede NTP. O NTP calcula as métricas *clock offset*, distância de sincronização (RTT) e dispersão, e se baseia nestas medidas para selecionar o melhor relógio para a sincronização de um servidor. Todas estas medidas são relativas a um relógio de referência. Os resultados destas medidas são discutidos nas subseções a seguir.

#### 5.3.1. Análise do *Offset*

O *clock offset*, ou simplesmente *offset*, é o valor do ajuste necessário ao relógio local para colocá-lo em fase com o relógio de referência, ou seja, é a diferença entre esses relógios. O *clock offset* é o indicador mais importante da qualidade da sincronização. Quanto menor o *offset*, melhor é a sincronização.

Duas medidas de *offset* foram extraídas dos dados. A primeira medida é o *offset* da variável do sistema, fornecida por cada servidor, e representa o *offset* utilizado para fazer o ajuste no relógio local. A segunda informação de *offset* é obtida nas variáveis dos pares de sincronização e representa o valor de *offset* coletado mais recentemente.

As curvas do complemento da frequência cumulativa dos valores absolutos dos *offsets* dos servidores e dos pares são apresentadas na Figura 2. Podemos observar que



**Figura 2. Complemento da frequência cumulativa dos *offsets* em relação aos pares e aos servidores.**

Ano	<i>offset</i> > 128 ms	Mediana	Média
1995	9,9%	20,1	28,7
1999	3,0%	1,8	8,2
2005	0,2%	0,7	7,0

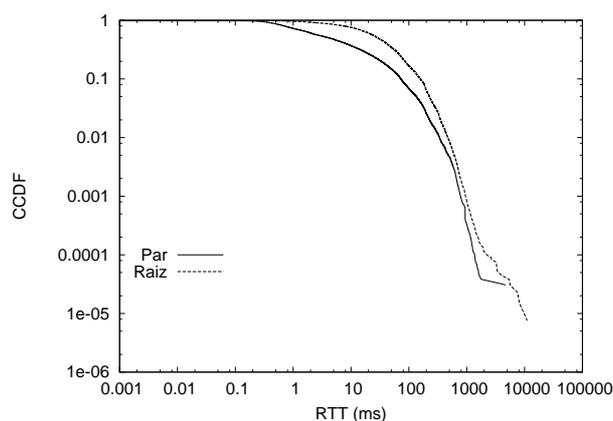
**Tabela 4. Evolução da métrica *offset* ao longo do tempo.**

as curvas estão sobrepostas até o valor *offset* de aproximadamente 100 ms, ponto em que se observa uma queda abrupta na curva de *offset* dos servidores. A partir deste ponto as duas curvas se distinguem, sendo o *offset* do conjunto de servidores menor do que o *offset* dos pares. O NTP define um limite superior de 128 ms para o ajuste do relógio. Uma vez que o relógio do *host* foi sincronizado com o relógio de referência, dificilmente o *offset* ultrapassará este limiar, mesmo em condições de congestionamento na rede e outros atrasos. Uma amostra que excede esse valor é descartada, isto é, não é considerada pelos algoritmos de ajuste de relógio. Porém, se o *offset* permanecer acima do limiar por um longo tempo, em geral 900 s, o relógio local é atualizado para o tempo indicado pelo relógio de referência.

Os valores de *offset* apresentam grande variabilidade. A cauda longa à direita, observada em ambas as curvas, indica que uma pequena porção dos *hosts* apresenta uma grande diferença em relação aos relógios de seus pares e servidores, podendo esta diferença chegar a horas e mesmo dias. No entanto, apenas 0,2% dos dados apresenta valores de *offset* maiores que 128 ms.

A Tabela 4 apresenta a evolução dos valores de *offset* nos últimos dez anos. Esta tabela mostra a fração de servidores com *offset* maior que 128 ms, bem como a mediana e a média dos valores de *offset* menores que 128 ms. A comparação com estudos anteriores revela melhoria considerável na qualidade da manutenção de tempo. Uma fração cada vez maior de servidores faz ajustes cada vez menores em seus relógios. Este valores demonstram que a sincronização mantida pela rede NTP atual é significativamente melhor do que no passado.

Embora os valores dos ajustes nos relógios sejam cada vez menores, estes ajustes podem ser feitos com atraso no relógio, o que viola a condição de monotonicidade,



**Figura 3. Complemento da frequência cumulativa do RTT para o par de sincronização e para a raiz.**

Ano	Mediana	Média	COV
1995	118	186	—
1999	32	33	3,48
2005	4,2	29	2,69

**Tabela 5. RTT (ms) para o par de sincronização em diversos estudos.**

implícita em muitos sistemas que consultam a estampa de tempo. Quase 50% dos valores de *offset* são negativos, o que significa que cerca de metade dos ajustes de relógios são para um tempo no passado.

### 5.3.2. Distância para o Par de Sincronização e a Raiz

A métrica de distância entre dois nodos da rede é o RTT. O protocolo NTP calcula a distância entre cada par de sincronização e a distância para a raiz, que representa o valor acumulado do RTT para a origem da referência de tempo primária na sub-rede de sincronização. O RTT é uma medida importante para a sincronização via NTP, uma vez que a exatidão da estampa de tempo de um servidor depende de um RTT pequeno para seu par de sincronização e para a raiz. Em particular, o NTP assume que o caminho de rede entre *hosts* é simétrico. Esta premissa pode inserir um erro que será tanto menor quanto menor for o RTT.

A Figura 3 apresenta o complemento da frequência cumulativa dos valores do RTT para o par de sincronização e para a raiz, obtidos dos dados coletados. Podemos observar que a distância para a raiz é maior do que a distância para o par de sincronização, o que indica que a maior parte dos *hosts* sincroniza com pares fisicamente próximos. Cerca de 5,6% dos servidores apresenta distância para a raiz acima de 500 ms e 0,4% tem distância para a raiz acima de 10 segundos. Cerca de 0,8% dos servidores tem distância para o par de sincronização acima de 500 ms. Estes números sugerem que uma pequena porcentagem dos *hosts* sincroniza com pares distantes, via caminhos longos ou congestionados.

Comparações da média e da mediana do RTT para o par de sincronização e para a raiz, em diversos estudos, são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 5 e 6. Os

Ano	Mediana	Média	COV
1993	100	160	1,05
1999	47	84	1,86
2005	30	64	1,81

**Tabela 6. Distância para a raiz (tempo em ms) em diversos estudos.**

Stratum	1993		1999		2005	
	média	COV	média	COV	média	COV
1	105	1,06	80	2,34	55	1,74
2	42	1,76	29	3,52	24	2,79
3	36	1,72	15	4,47	18	4,83
4	42	0,45	12	3,17	17	3,47
5	50	0,38	3	5,33	9	8,89

**Tabela 7. RTT (ms) para o par de sincronização por stratum em diversos estudos.**

resultados indicam um melhoramento significativo na latência dos caminhos da rede NTP e, portanto, da Internet. Esta melhoria na infra-estrutura da rede pode explicar a melhoria na exatidão dos relógios dos servidores, demonstrada na seção anterior.

### 5.3.3. Distância para o Par de Sincronização por Stratum

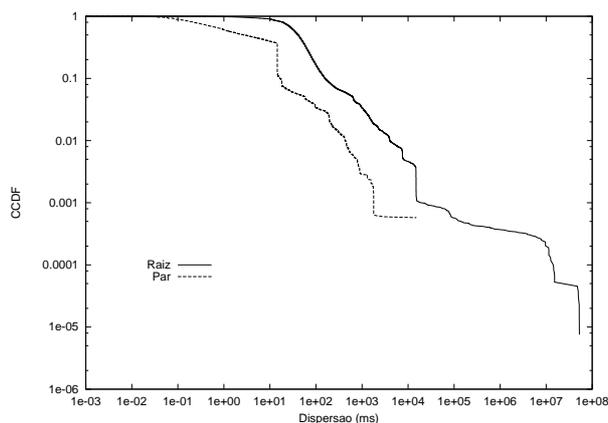
A Tabela 7 apresenta valores de RTT para o par de sincronização, classificando os resultados de acordo com o stratum do par de sincronização. Podemos observar que os maiores RTTs são para servidores cujos pares de sincronização são stratum 1, em todos os estudos realizados. Os valores de RTT para servidores nos demais níveis são significativamente menores.

Este resultado demonstra o arranjo hierárquico do NTP no ambiente real, com servidores stratum 1 mais distantes, seguidos por servidores de strata maiores, que estão mais próximos dos pares de sincronização. A diminuição do RTT médio para servidores de strata 1 e 2 ao longo do tempo também indica um melhoramento na infra-estrutura da rede. Os valores maiores para o coeficiente de variação (COV) nos últimos dois estudos podem ser uma evidência da heterogeneidade dos sistemas e redes que compõem a Internet. As redes ficaram mais rápidas, porém mais heterogêneas.

### 5.3.4. Dispersão para a Raiz e para o Par de Sincronização

O protocolo NTP também calcula a dispersão para raiz e para o par de sincronização. A dispersão indica o erro máximo em relação à fonte de referência (raiz ou par), e é medida em segundos. O gráfico da Figura 4 apresenta o complemento da função cumulativa das variáveis dispersão para raiz e dispersão para o par de sincronização. A dispersão para raiz é maior do que a dispersão para o par, pois é o erro acumulado no caminho entre o servidor e a raiz.

A dispersão para raiz apresenta uma cauda longa, composta por aproximadamente



**Figura 4. Dispersão para a raiz e o par de sincronização.**

3% do conjunto de dados. A maior dispersão encontrada é de cerca de 16 horas. Uma comparação com outros estudos também revela uma melhoria nesta métrica. No estudo de 1999, a maior dispersão tinha valor superior a um ano. A cauda também era composta por cerca de 3% do conjunto de dados. Eliminando a cauda de ambos os conjuntos de dados, os valores da mediana e da média para a dispersão, nos estudos de 1999 e 2005, são, respectivamente, 39 e 88, e 40 e 74 ms. Observamos uma diminuição nos valores da média mas não da mediana. Este resultado pode indicar que, embora haja uma diminuição no valor do erro medido pela dispersão, há um limite inferior dado pelo valor da mediana. Este limite pode estar relacionado à qualidade dos osciladores dos relógios utilizados nos computadores.

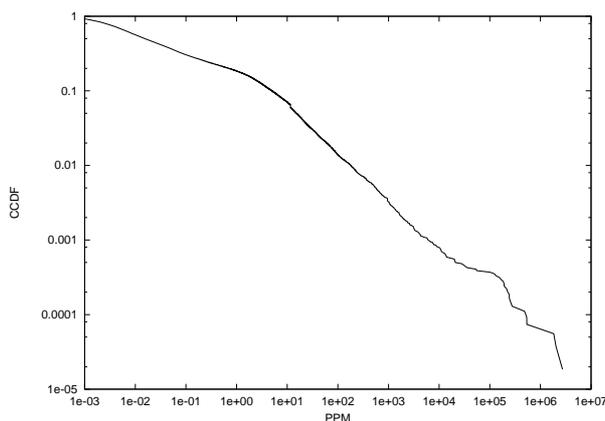
### 5.3.5. Estabilidade dos Relógios

Muitos fatores influenciam a qualidade do oscilador de um computador, como temperatura, umidade, regulação da fonte, vibração, dentre outros. A variável de sistema *stability* é uma medida disponível no conjunto de variáveis locais e permite uma análise da qualidade dos osciladores. A estabilidade dos relógios é calculada como a média exponencial da diferença das frequências e é dada em PPM. O NTP procura compensar o erro dos osciladores.

O gráfico da Figura 5 mostra a estabilidade dos relógios medida nos servidores. A mediana apresentou um valor de 0,015 PPM e 75% dos dados têm um valor menor que 0,239 PPM. Cerca de 3% dos *hosts* apresentam, provavelmente, problemas em seus osciladores, o que eleva a média para 228 PPM. Eliminando esses dados, a média cai para 2,32 PPM, com desvio padrão igual a 9,6 PPM. Esta média equivale a uma alteração de 200 ms por dia.

## 5.4. Aspectos da Topologia da Rede

A topologia da rede NTP pode ser caracterizada de três maneiras. A primeira é a quantidade de associações configurada em um servidor. O NTP utiliza um algoritmo para rejeitar uma origem de tempo ruim e, dinamicamente, seleciona o melhor par de sincronização em um conjunto de pares disponíveis. Manter mais de uma associação, além de garantir



**Figura 5. Estabilidade dos relógios.**

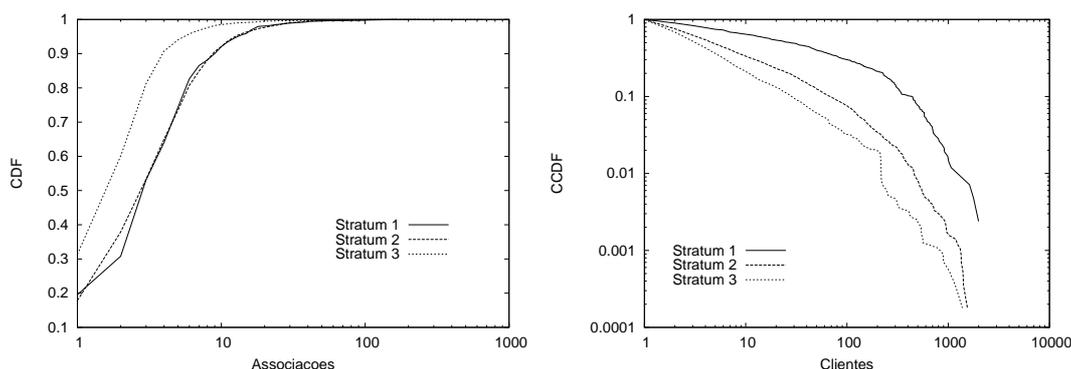
redundância, possibilita que o NTP utilize métodos estatísticos para escolher a origem do tempo com maior confiabilidade.

Para a análise da distribuição do número de associações por servidor pesquisamos, no banco de dados, a quantidade de endereços de origem distintos nas associações de um servidor, considerando servidores com stratum 1, 2 e 3. O gráfico à esquerda da Figura 6 apresenta esta distribuição, com escala logarítmica no eixo  $x$ . Verifica-se que os servidores stratum 1 e 2 apresentam distribuições similares para a quantidade de associações. Em ambos os casos, 20% dos servidores possui apenas uma associação e 50% possui até três associações. Para os servidores stratum 3, 31% possui apenas uma associação e 75% possui até três associações. A baixa conectividade da maioria dos servidores é surpreendente quando verificamos a quantidade de servidores stratum 2 e 3 disponíveis na rede.

Em todos os casos analisados há uma fração pequena porém não desprezível de servidores com muitas associações. Há servidores que mantêm dezenas, ou mesmo centenas de associações. Este quadro está de acordo com o modelo de desenvolvimento da topologia da Internet denominado “livre de escala”, que tem como critério essencial a conexão preferencial [Barabási and Albert 1999, Pastor-Satorras and Vespignani 2004, Dorogovtsev and Mendes 2003]. Este critério indica que novos nodos tendem a se conectar em vértices já extremamente conectados. Este modelo tem como consequência uma distribuição muito variável em relação aos graus dos nodos [Faloutsos et al. 1999], como mostram os gráficos da Figura 6.

Uma segunda maneira de caracterizar a topologia da rede NTP é avaliar o número de pares que utilizam um determinado servidor. Para isso, verificamos, para cada endereço de servidor conhecido, quantas vezes este endereço apareceu como endereço de origem no conjunto de pares, e denominamos clientes esta quantidade. O gráfico à direita da Figura 6 apresenta este resultado, e demonstra uma carga maior nos servidores stratum 1, seguido da carga nos servidores stratum 2 e 3. Cerca de 50% dos servidores stratum 1 analisados possui pelo menos 27 clientes. Possuem mais de 400 clientes cerca de 10% dos servidores stratum 1, 1,3% dos servidores stratum 2 e 0,3% dos servidores stratum 3. Este quadro também confirma o modelo livre de escala proposto para a Internet.

A terceira maneira de caracterizar a topologia da rede NTP é avaliar a carga dos servidores NTP. Um método simples para calcular a carga de servidores stratum  $n$  é di-



**Figura 6. Distribuição das associações por stratum (esquerda) e dos clientes por stratum (direita).**

Stratum	1993	1995	1999	2005
1	22,36	20,17	28,03	53,45
2	2,29	1,48	3,18	2,86
3	0,59	0,34	0,45	0,30
4	0,02	0,14	0,19	0,07

**Tabela 8. Índice de carga por stratum em vários estudos.**

vidir a quantidade de servidores stratum  $n + 1$  pela quantidade de servidores stratum  $n$ . A Tabela 8 apresenta este resultado para os diversos estudos e mostra um aumento considerável na utilização de servidores stratum 1. Este resultado é explicado pela diminuição do número de servidores stratum 1 apesar do aumento do tamanho da rede.

### 5.5. Síntese dos Resultados

A análise dos resultados revela que, embora a rede tenha crescido substancialmente em termos do número de nodos ou *hosts*, o acesso a estes nodos se tornou mais difícil devido a procedimentos de segurança implementados nos sistemas, o que dificulta também a caracterização das redes. A rede alcançada é apenas parte de uma rede muito maior.

Em relação à arquitetura do NTP, observamos que há uma porcentagem menor de servidores stratum 1, e estes servidores apresentam atualmente uma carga bem maior do que a observada no passado. Observamos também um crescimento significativo da fração de servidores stratum 3, o que pode ser uma evidência de uma procura maior por fontes de sincronização mais exatas.

A análise dos valores de atualização dos relógios (*offset*) ao longo do tempo revela que a rede está substancialmente melhor sincronizada atualmente. O *offset* médio é de 7 ms e a mediana é de 0,7 ms. A análise do tempo de ida e volta na rede (RTT), medida fundamental nos algoritmos do NTP, revela queda significativa neste valor, resultado que contribui para o bom desempenho do protocolo.

Embora a arquitetura do NTP defina o conceito de stratum e seu papel hierárquico na rede NTP, nenhum aspecto do protocolo interfere nas relações quantitativas observadas, tais como número de servidores por stratum, número de associações e número de clientes de cada servidor. Estes valores são definidos por outras forças que modelam a

rede. Os resultados quantitativos da caracterização da topologia mostram grande variação na distribuição das conexões dos nodos, evidenciando características do modelo livre de escala, que é utilizado atualmente para modelar redes complexas.

## 6. Conclusões

Este artigo apresentou uma caracterização de uma rede de sincronização do protocolo NTP, com milhares de nodos e centenas de servidores stratum 1. Os resultados foram comparados com caracterizações apresentadas na literatura nos últimos quinze anos. A análise dos dados revela uma evolução importante na qualidade da sincronização.

A análise da topologia confirma teorias e modelos recentes sobre o desenvolvimento da Internet. Em especial, a grande variabilidade do número de conexões entre os nodos e a diminuição da porcentagem de servidores stratum 1, acompanhada de um aumento considerável na carga destes servidores, estão de acordo com os princípios desta teoria.

Dentre as possibilidades de prosseguimento deste trabalho estão o mapeamento visual da rede e o estudo da topologia a partir de métricas obtidas com algoritmos de grafos aplicados à análise da topologia de redes. Estes algoritmos permitem encontrar os agrupamentos na rede, identificar componentes conectados, medir o menor caminho e a largura da rede, métricas utilizadas atualmente para a caracterização de redes grandes e complexas.

## Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro do CNPq e da CAPES, e o apoio técnico da equipe do POP-PR.

## Referências

- Barabási, A. and Albert, R. (1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286.
- Barabási, A.-L. (2002). *Linked: The New Science of Networks*. Perseus Publishing.
- Dorogovtsev, S. and Mendes, J. (2003). *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW*. Oxford University Press.
- Faloutsos, M., Faloutsos, P., and Faloutsos, C. (1999). On Power-law Relationships of the Internet Topology. In *Proc. ACM SIGCOMM'99*.
- Guyton, J. D. and Schwartz, M. F. (1994). Experiences with a Survey Tool for Discovering Network Time Protocol Servers. *Usenix Summer 1994 Technical Conference*.
- Mills, D. L. (1990). On the Accuracy and Stability of Clocks Synchronized by the Network Time Protocol in the Internet System. *ACM Computer Communication Review*, 20(1):65–75.
- Mills, D. L. (1991). On the Chronometry and Metrology of Computer Network Timescales and their Application to the Network Time Protocol. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 21(5):8–17.
- Mills, D. L. (1992). RFC 1305: Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation.

- Mills, D. L., Thyagarajan, A., and Huffmann, B. (1997). Internet Timekeeping around the Globe. <http://www.eecis.udel.edu/~mills/database/papers/survey5.ps>.
- Minar, N. (1999). A Survey of the NTP Network. <http://www.media.mit.edu/~nelson/research/ntp-survey99/>.
- NTP (2005). NTP (Network Time Protocol) Public Services Project. <http://ntp.isc.org>.
- Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. (2004). *Evolution and Structure of the Internet : A Statistical Physics Approach*. Cambridge University Press.
- Rybaczyk, P. (2005). *Expert Network Time Protocol: An Experience in Time with NTP*. Apress.
- Torres-Júnior., P. R. (2006). Coleta de Dados da Rede NTP. <http://www.ntpsurvey.arauc.br>.