

Caracterização de Tráfego Diferenciado na Universidade do Minho

Magda Silva, Solange Lima, Paulo Carvalho, Alexandre Santos, Vasco Freitas

Universidade do Minho, Departamento de Informática, 4710-059 Braga
e-mail: a15881@correio.ci.uminho.pt, {solange,pmmc,alex,vf}@di.uminho.pt

Palavras Chave: Qualidade de serviço, DiffServ, classificação de tráfego, caracterização de tráfego, processos fractais, auto-semelhança.

Resumo

Neste artigo estabelece-se um critério para a classificação de tráfego de rede, baseado no modelo DiffServ e nos requisitos de QoS das aplicações, e estudam-se as propriedades estatísticas das classes resultantes à luz da teoria dos fractais. Para tal, são utilizadas amostras de tráfego real, recolhidas num router de backbone da Universidade do Minho em períodos de diferente utilização da rede. Para as várias classes e períodos de actividade, foram estimados os valores do parâmetro de Hurst como forma de quantificar a auto-semelhança ou burstiness do tráfego.

1 Introdução

A última década tem sido marcada por um grande desenvolvimento das comunicações fixas e móveis, que assumem, cada vez mais, um papel fundamental na nossa sociedade. Quer no âmbito das redes locais, quer das redes alargadas de banda estreita ou larga, as tecnologias subjacentes têm evoluído tomando como principal linha directora a integração de serviços. A integração visa a adopção de uma infra-estrutura de comunicação capaz de agregar os serviços actuais, por exemplo, serviço de voz, fax, dados, videoconferência, bem como serviços emergentes como a televisão interactiva, video-a-pedido, ou ainda outros serviços que surgirão no futuro. A integração de serviços, do ponto de vista tecnológico, constitui um grande desafio a nível da concepção, construção, operação e gestão da infra-estrutura de transporte e dos sistemas de comunicações envolvidos. Esse desafio advém, em particular, dos requisitos tão variados que o tráfego a agregar impõe. Enquanto, por exemplo, o tráfego resultante do envio de um e-mail é sensível a perdas e muito tolerante a atrasos, um serviço de voz é muito sensível a atrasos e algo tolerante a perdas. Os

requisitos de largura de banda também podem ser muito distintos, variando desde alguns Kbps para voz até vários Mbps para aplicações multimedia.

Esta diversidade de requisitos vai obrigar a que a rede efectue um tratamento diferenciado do tráfego, por forma a ser oferecida uma QoS (*Quality of Service*) adequada. Apesar do aparecimento de tecnologia específicas orientadas a oferecer QoS diferenciada ao nível de cada conexão, por exemplo o ATM, toda a pilha protocolar TCP/IP tem vindo a evoluir no sentido de vir a proporcionar uma integração de serviços o mais abrangente possível. Acredita-se, portanto que o *Internet Protocol* pelas suas características, evolução, maturidade e abrangência seja o nível de convergência protocolar de eleição.

O *Internet Engineering Task Force* (IETF) tem avançado com várias propostas para oferecer QoS na *Internet*. Uma das soluções mais promissoras é a arquitectura de Serviços Diferenciados ou *DiffServ* [2, 13], pela sua simplicidade e capacidade de coexistência com a actual pilha protocolar TCP/IP. A sua filosofia baseia-se no estabelecimento ou criação de um número limitado de classes de serviço com diferentes objectivos de QoS associados. O tráfego que circula na *Internet* será classificado, marcado e agregado de acordo com a classe de serviço pretendida. O tráfego agregado sofre depois um tratamento diferenciado adequado, atendendo à sua marcação.

A evolução tecnológica dos sistemas de comunicação e a heterogeneidade dos serviços disponíveis despertou também um interesse renovado na análise e caracterização do tráfego de rede, no sentido de compreender o comportamento do tráfego actual e validar a adequação dos modelos existentes e dos pressupostos em que se baseiam. Conseguir modelar adequadamente fontes de tráfego é o primeiro passo para a obtenção de modelos de simulação que traduzam a dinâmica e o comportamento real dos sistemas e redes de comunicação.

O interesse na caracterização e modelação de tráfego intensificou-se quando, num estudo apresentado por Leland [23], foram identificadas propriedades fractais no tráfego de rede, directamente ligadas à *burstiness* do mesmo e que têm implicações tanto a nível da concepção e dimensionamento de sistemas de rede, como a nível do controlo e gestão de tráfego. Apesar de existirem numerosos estudos sobre a caracterização de tráfego de rede, pouco se conhece sobre os efeitos que terá a agregação do tráfego em classes. Haverá uma particular classe responsável pelas características referidas em [23]? O tratamento diferenciado incrementa ou reduz a *burstiness*?

Compreender as características e propriedades estatísticas do tráfego segundo a nova perspectiva de agregação em classes, é pois relevante e constitui o principal objectivo deste estudo.

A parte inicial do estudo consistiu em recolher amostras de tráfego real num router de backbone Cisco, localizado no Departamento de Informática da Universidade de Minho, utilizando o Netflow.

Após o estabelecimento de um critério de classificação de tráfego baseado no modelo

DiffServ, todas as amostras são analisadas à luz desse critério. Posteriormente, são estudadas as características temporais de cada classe de tráfego usando o pacote de software *Mathematica*.

O restante documento começa por apresentar o conceito e necessidade de QoS e introduzir o modelo *DiffServ*, modelo este em que assenta parte do estudo realizado. Em seguida, são descritos os fundamentos em que a caracterização de tráfego diferenciado se baseia. Começa-se por explicar o critério de análise das características temporais que foi adoptado, descreve-se o procedimento seguido na recolha e processamento de amostras de tráfego, bem como o critério de classificação usado na divisão do tráfego em classes. O documento termina com a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

2 Qualidade de Serviço (QoS)

A crescente implantação das tecnologias de comunicação de banda larga e o aumento exponencial do uso da *Internet* tem potenciado o aparecimento de aplicações mais exigentes em relação aos recursos de comunicação de que necessitam e aos requisitos de Qualidade de Serviço (QoS). Enquadram-se nesta descrição as aplicações de tempo real de vídeo e audio, multicast ou unicast, que coexistem com outras menos exigentes ou tolerantes como as aplicações TCP/IP clássicas. A sensibilidade à perda de pacotes, ao débito obtido, ao atraso ou ao *jitter*, são aspectos diferenciadores destas aplicações.

O serviço de melhor-esforço (*best effort*) em que a *Internet* actual se baseia, não oferecendo garantias de QoS nem métodos consistentes de diferenciar o tráfego, torna-se insuficiente para abarcar a heterogeneidade de requisitos presente na *Internet*. Além disso, os fornecedores de serviços de telecomunicações têm preocupações e pressões acrescidas sobre a QoS disponibilizada nas suas infraestruturas, motivados não só pelas necessidades/exigências dos utilizadores como pela necessidade de otimizar e rentabilizar a utilização dos recursos de rede. A diferenciação do tráfego possibilita também uma taxação diferenciada, consoante a QoS fornecida.

Face a este panorama, novas arquitecturas de serviço que permitam garantir QoS às aplicações numa infraestruturas idêntica à *Internet* actual têm sido propostas. São exemplos as arquitecturas *Intserv* [3] e *DiffServ* [13, 2] propostas pelo IETF.

A solução para o problema da QoS na *Internet* não será certamente uma única, estando previsto que coexistam diversas estratégias e tecnologias. Na avaliação das vantagens de cada estratégia são ponderados aspectos como as alterações que requerem às infraestruturas já existentes, o grau de garantia de QoS que oferecem, o grau de utilização dos recursos e a escalabilidade da solução. Neste contexto, o *DiffServ* é uma das estratégias que tem merecido especial atenção na comunidade científica pelo compromisso que estabelece entre os aspectos referidos. O presente estudo assenta numa proposta de diferenciação de tráfego que se baseia no modelo *DiffServ*, sucintamente descrito na secção seguinte.

2.1 O modelo DiffServ

No modelo *DiffServ* os diferentes fluxos de tráfego são agregados/agrupados consoante os seus requisitos de QoS num pequeno número de Classes de Serviço (CoS). Cada classe possui um nível de QoS associado e define um serviço de rede a prestar. O tráfego é classificado e marcado usando um campo específico do cabeçalho IP, o *DS-field*¹ [13], que irá identificar a CoS do pacote e o tratamento que este deverá receber em cada nó da rede (*Per-Hop-Behaviour*) [9, 8]. Numa perspectiva mais alargada, define-se como *Per-Domain-Behaviour* [14] o tratamento que um conjunto de pacotes com a mesma marca (*traffic aggregate*) irá receber ao longo de um domínio DS.

Com o objectivo de garantir uma maior escalabilidade, as tarefas mais complexas deste modelo - classificação e o condicionamento de tráfego - devem ser realizadas na periferia das redes, simplificando o interior (*core*) da mesma. A classificação tem como objectivo fazer a selecção dos pacotes, com base em vários campos do cabeçalho (*Multi-field Classification*), tais como os endereços IP, as portas origem e destino, protocolo, etc., ou com base no campo *DS-Field*, no caso dos pacotes já estarem marcados (*Behaviour Agregate Classification*). Consoante a classificação efectuada, os pacotes são colocados na fila de espera correspondente à classe respectiva. O condicionamento de tráfego, efectuado por entidades de marcação, medição, policiamento e *shaping*, visa assegurar que o tráfego que entra num domínio *DiffServ* esteja em conformidade com o perfil negociado.

Os routers do *core* têm essencialmente de fazer a classificação *behaviour aggregate* e o encaminhamento dos pacotes de acordo com a QoS inerente à classe a que pertencem. Diversos mecanismos de escalonamento de tráfego e gestão de filas de espera orientados a classes foram já definidos [7, 6].

Até ao momento, o IETF normalizou duas classes de serviço, ou mais correctamente, dois *Per Hop Behaviours (PHB)*: o *Expedited Forwarding PHB* [9] e o *Assured Forwarding PHB Group* [8] (EF e AF PHBs), para além do BE. O EF PHB permite prestar um serviço com baixa probabilidade de perda, reduzido atraso e *jitter*, com uma largura de banda garantida. É um serviço orientado a aplicações com elevada exigência de QoS. É um serviço que pode simular ligações ponto-a-ponto ou linhas dedicadas fim-a-fim. O grupo AF PHB é constituído por quatro classes, que representam 4 níveis de garantia de encaminhamento dos pacotes, com três níveis de precedência de rejeição por classe, que determinam quais os pacotes que preferencialmente são descartados em caso de congestão. Este serviço não oferece garantias de limite no atraso e *jitter*. No entanto, garante uma largura de banda mínima a cada classe e a possibilidade de partilha de recursos excedentes entre classes AF. O nível de garantia de encaminhamento do tráfego AF depende directamente da quantidade de recursos alocados à classe a que o pacote pertence, do nível de congestão da rede e do valor de rejeição do pacote. Este PHB Group é orientado a aplicações com diferentes níveis de tolerância a atrasos e perdas que requerem um serviço com mais garantias que o BE.

¹O octeto *Type of Service (TOS)* do IPv4 ou o octeto *Traffic Class* do IPv6.

3 Caracterização de tráfego de rede

Conhecer as características e perfil de tráfego de rede torna-se essencial por vários aspectos, como sejam:

- permitir o dimensionamento adequado dos sistemas de rede envolvidos;
- obter estimativas de avaliação de desempenho dos sistemas e da própria comunicação fim-a-fim;
- ajudar nas tarefas de engenharia e controlo de tráfego;
- facilitar o estabelecimento de contratos de serviço realistas;
- permitir um bom funcionamento da rede, através de uma alocação de recursos adequada.

Esta tarefa nem sempre é fácil, dado que o comportamento do tráfego nem sempre é linear, aliás, raramente segue padrões bem determinados. Desta forma, neste estudo, foram implementados testes de análise com base na teoria de séries temporais fractais, dado que vários estudos recentes na área da caracterização e modelação de tráfego de redes, apontam para a presença de auto-semelhança nesse tráfego. Esta característica, própria de processos fractais, tem implicações directas nos aspectos acima enumerados, nomeadamente no comportamento das filas de espera e na natureza da congestão [5].

3.1 Propriedades fractais do tráfego de rede

A presença de auto-semelhança (*self-similarity*) em tráfego de rede, traduz-se num conjunto de propriedades das quais a dependência de longo-alcance (*Long-Range Dependence - LRD*) e as variâncias de decaimento lento sejam talvez as mais populares e fáceis de interpretar. A presença destas propriedades faz com que os modelos matemáticos tradicionais utilizados para previsão estatística² não sejam indicados para descrever de uma forma realista o tráfego de rede com comportamento fractal, uma vez que exibem memória curta ou dependência de curto-alcance e não conseguem reproduzir a *burstiness* existente no tráfego.

Existem, então várias propostas de novos modelos representativos: fracional ARIMA, fracional Gaussian noise, mapas caóticos não lineares e mais recentemente, modelos multifractais. A implementação destes modelos depende directamente do chamado parâmetro de auto-semelhança ou parâmetro de Hurst, H .

O que é então a auto-semelhança? Rudemente falando, auto-semelhança traduz-se na invariância da estrutura dos dados independentemente da escala a que são

²São exemplo os modelos baseados em processos de Poisson, Markov, Moving Average (MA), Auto-Regressive (AR) ou Auto-Regressive Moving Average (ARMA).

observados. Na perspectiva do tráfego de rede, a auto-semelhança traduz-se numa nova noção de *burstiness*: não existe uma duração natural para um *burst*; a estrutura *bursty* do tráfego mantém-se em várias escalas de tempo. Além disso, o aumento do número de fontes de tráfego activas podem intensificar o grau de *burstiness* [23].

Matematicamente, identifica-se de forma distinta, auto semelhança em processos estocásticos discretos e em processos estocásticos contínuos no tempo, havendo no entanto um relacionamento estrito entre os dois tipos de processos. Este relacionamento é importante se se considerar que uma rede é um sistema em contínuo funcionamento, do qual é apenas possível obter uma amostragem de observações de instantes de tempo e não de todo o processo em si.

Suponha-se então a existência de um processo estocástico discreto ($X_t : t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) estacionário de 2ª ordem, ou seja, um processo em que:

- a) a média $\mu = E[X(t)]$ é constante;
- b) a variância $\sigma^2 = E[(X(t) - \mu)^2]$ é constante;
- c) com função de covariância,

$$\gamma(t_1, t_{1+k}) = E[(X(t) - \mu)(X(t+k) - \mu)] = \gamma(k); \quad (1)$$

- d) e função de autocorrelação,

$$\rho(t_1, t_{1+k}) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} = \rho(k). \quad (2)$$

Diz-se então que o processo $X(t)$ acima considerado é **exactamente auto-semelhante de 2ª ordem** com parâmetro de Hurst H , com $\frac{1}{2} < H < 1$ se $\forall k \geq 1$:

$$\gamma(k) = ((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}) \frac{\sigma^2}{2}. \quad (3)$$

Se se considerar $X^{(m)}$ o **processo agregado** a $X(t)$, tal que para $k = 1, 2, 3, \dots$ e $m = 1, 2, 3, \dots$:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-m+1}^{km} X_i, \quad (4)$$

verifica-se que $X^{(m)}$ é também um processo estacionário de 2ª ordem e para todo o $m > 1$,

$$\rho(k) = \rho(k)^{(m)}, \quad (5)$$

o que significa que a estrutura de correlação do processo é preservada durante o tempo agregado.

Diz-se que o processo estocástico discreto $(X_t : t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ estacionário de 2ª ordem é **assintoticamente auto-semelhante de 2ª ordem** com parâmetro de Hurst H , com $\frac{1}{2} < H < 1$ se $\forall k \geq 1$:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \gamma(k) = ((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}) \frac{\sigma^2}{2}. \quad (6)$$

Neste tipo de processos a estrutura de correlação é preservada assintoticamente ao longo do tempo.

Considere-se agora o processo estocástico contínuo $(Y_t : t \in T), T \subseteq R$. Diz-se que $Y(t)$ é **auto-semelhante** com parâmetro de auto-semelhança H^3 se para todo $a > 0$ e $t \geq 0$ se tem:

$$Y(t) \stackrel{d}{=} a^{-H} Y(at). \quad (7)$$

Tem-se assim que, para $a > 1$, ou seja, quando há um aumento na escala de tempo, o valor de $Y(at)$ é normalizado de forma a ser comparado com o valor da $Y(t)$ através de um factor de contração a^{-H} . Para $a < 1$, $Y(at)$ é normalizado através de um factor expansão a^{-H} . Desta forma, uma variação na escala temporal implica uma variação na escala dimensional. H mantém-se constante à medida que a varia.

Diz-se que $(Y_t : t \in T), T \subseteq R$ é um **processo estocástico com incrementos estacionários**⁴, se a $Y(t)$ estiver associado o processo estacionário de 2ª ordem $(X_t : t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, tal que

$$X(t) = Y(t) - Y(t-1). \quad (8)$$

Prova-se que, sendo $Y(t)$ um processo H_{sssi} , então

- a) $0 < H \leq 1$;
- b) $Y(0) = 0, a.s.$;

³Denota-se por H_{ss} .

⁴Denota-se por H_{sssi} .

c) tem uma função de covariância da forma

$$\begin{aligned} \gamma(Y(t_1), Y(t_2)) = \\ \frac{1}{2}(|t_1|^{2H} + |t_2|^{2H} - |t_1 - t_2|^{2H}) \text{Var}Y(1). \end{aligned} \quad (9)$$

Mais ainda, $\forall t \in R$

a) $E[Y(t)] = 0$, se $0 < H < 1$;

b) $Y(t) = tY(1)$, se $H = 1$.

Verifica-se também que $X(t)$ satisfaz:

$$X \stackrel{d}{=} m^{1-H} X^{(m)} \quad (10)$$

Desta maneira demonstra-se que $X^{(m)}$ se relaciona com $X(t)$ através do factor de reescalonamento $m^{(1-H)}$. Assim, dependendo da forma como o processo discreto $X(t)$ satisfaz a equação (10) ($\forall m \geq 0$, ou apenas quando $m \rightarrow \infty$), diz-se que $X(t)$ é **exactamente auto-semelhante** ou **assintoticamente auto-semelhante**. Note-se que no caso dos incrementos seguirem uma distribuição Gaussiana, esta definição coincide com a definição de auto-semelhança de 2ª ordem.

Dado que a variância de uma amostra com média \bar{X} de tamanho m satisfaz $\text{var}(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{m}$, segue-se que

$$\text{var}(X^{(m)}) = \sigma^2 m^{2H-2}. \quad (11)$$

Quando as variáveis da amostra são independentes e $H = \frac{1}{2}$, então:

$$\text{var}(X^{(m)}) = \sigma^2 m^{-1}. \quad (12)$$

Se $\frac{1}{2} < H < 1$, então

$$\text{var}(X^{(m)}) = \sigma^2 m^{-\beta}, \quad (13)$$

com $0 < \beta < 1$ e $H = 1 - \frac{\beta}{2}$, que denota uma certa dependência na estrutura das amostras que causa a convergência lenta de $\text{var}(X^{(m)})$, à taxa de $m^{-\beta}$. Esta propriedade é conhecida como **decaimento lento das variâncias**.

Tal como foi referido anteriormente, a dependência de longo-alcance é uma propriedade que por vezes está presente no tráfego. Este tipo de processos caracteriza-se

pelo facto de um determinado acontecimento no estado de tempo presente influenciar de alguma forma o comportamento do processo num estado de tempo no futuro.

Considere-se então $(X_t : t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ um processo estocástico estacionário de 2ª ordem, com média μ e variância σ^2 , função de autocovariância $\gamma(k)$ e função de autocorrelação $\rho(k)$. Diz-se que $X(t)$ tem **dependência de longo alcance** se para $0 < H < 1$ e $H \neq \frac{1}{2}$, se tem:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\rho(k)}{H(2H-1)k^{2H-2}} = 1 \quad (14)$$

Em particular, para $\frac{1}{2} < H < 1$, o processo tem uma função de autocorrelação $\rho(k)$ com decaimento hiperbólico, tendo-se para $c > 0$ constante e $\beta = 2 - 2H$, $0 < \beta < 1$:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\rho(k)}{ck^{-\beta}} = 1 \quad (15)$$

Verifica-se também que o decaimento da função de autocorrelação é de tal forma lento que é não somável. Diz-se que um processo $X(t)$ tem **dependência de curto-alcance** se a função de autocorrelação é somável e exhibe um decaimento exponencial.

O facto de um processo ter dependência de longo-alcance não implica que ele seja auto-semelhante e vice-versa. Esta equivalência verifica-se caso o processo seja assintoticamente auto-semelhante de 2ª ordem com a restrição de $\frac{1}{2} < H < 1$.

Por outro lado, a dependência de longo alcance manifesta-se também na densidade espectral dado que se comporta como uma lei de potência perto da origem. Assim, se $0 < \lambda < 1$, C representa uma função de variação lenta para zero e $f(\lambda) = \sum_k \rho(k) e^{ik\lambda}$ denota a função de densidade espectral, tal que:

$$f(\lambda) \sim \lambda^{-\gamma} C(\lambda). \quad (16)$$

A presença de dependência de longo alcance implica que $f(0) = \sum_k \rho(k) = \infty$, ou seja, uma densidade espectral que tende para ∞ à medida que a frequência λ se aproxima de 0 (*ruído $\frac{1}{f}$*). A presença de dependência de curto alcance manifesta-se por uma função de densidade espectral positiva e finita para $\lambda = 0$.

3.2 Métodos de análise utilizados

No início do século XX, Harold E. Hurst realizou um estudo intensivo sobre as cheias do rio Nilo. Durante esse estudo, Hurst desenvolveu um método de análise que ficou conhecido como o método R/S (*Range Statistical Analysis*). Com o decorrer da

sua análise, Hurst reparou que o valor estimado pelo método de R/S não diferia muito de amostra para amostra. Assim, conseguiu estabelecer um padrão entre o parâmetro estimado (hoje conhecido por parâmetro de Hurst, H) e o relacionamento entre as variáveis consideradas.

Verifica-se que $0 < H < 1$. Se $H = \frac{1}{2}$, então as variáveis consideradas são independentes. Se $\frac{1}{2} < H < 1$, então existe uma persistência no comportamento que se estende infinitamente. Se $0 < H < \frac{1}{2}$, então verifica-se um comportamento de anti-persistência. Em [10], Mandelbrot estabelece um relacionamento entre H e a dimensão fractal.

3.2.1 Estimar H

Existem vários métodos para a estimação do parâmetro de Hurst [16, 19, 20, 21, 22, 23, 12]. A maioria são métodos gráficos (tal como o teste das variâncias, a análise R/S, o método do periodograma, etc ...), excepto o estimador de Whittle. Assim, para além da probabilidade de erro que um método gráfico pode induzir, tem-se a limitação de se trabalhar com amostras de dados finitas (o que implica não se poder verificar através da definição matemática se uma dada amostra é auto-semelhante ou não).

Note-se que, segundo Molnar [12], diferentes métodos podem induzir diferentes estimativas de H . O método das variâncias é dos mais usados. Contudo, não deve ser aplicado a amostras de pequena dimensão (menos de 10000 pontos). Verifica-se também que, por vezes, uma divisão da amostra ou uma alteração na escala de tempo (ou seja, da agregação da amostra) pode levar a estimativas bastante distintas de H . Em geral, considera-se também o método R/S como um método bastante robusto, no entanto, quando é necessária uma análise mais refinada aconselha-se o uso do método do periodograma.

Para além dos problemas inerentes à estimação do parâmetro de auto-semelhança, existe por vezes uma interpretação errada de H . Na verdade, nem sempre se pode concluir directamente se os dados analisados pertencem realmente a um processo auto-semelhante ou se as características que apresentam derivam de outras propriedades, tal como a não estacionariedade. Assim, o mais correcto é referir que um dado conjunto de dados apresenta um comportamento auto-semelhante numa dada escala de tempo.

3.2.2 Prova pictórica

A prova pictórica é um método bastante simples de obter uma primeira indicação sobre a natureza do tráfego. Conforme se pode observar pelas Figuras 1,2 e 3, existe uma semelhança entre os gráficos para diferentes níveis de agregação, o que revela a persistência de uma estrutura em várias escalas de tempo (auto-semelhança).

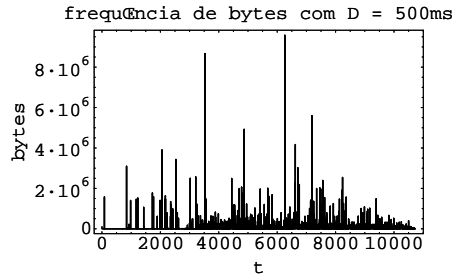


Figure 1: Tráfego numa escala de agregação com um intervalo de tempo de 500 mseg.

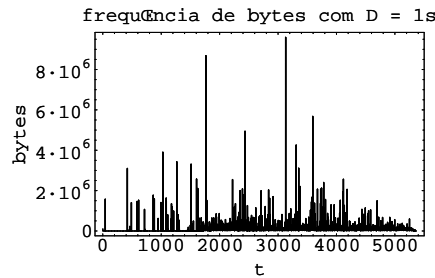


Figure 2: Tráfego numa escala de agregação com um intervalo de tempo de 1 seg.

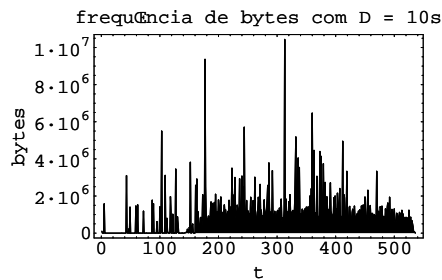


Figure 3: Tráfego numa escala de agregação com um intervalo de tempo de 10 seg.

No presente estudo as amostras foram sujeitas à prova pictórica de auto-semelhança (de que as Figuras 1,2 e 3 são exemplo), foi obtido o seu gráfico de autocorrelação em diferentes escalas de agregação de tempo e foi realizado o teste das variâncias. Este teste trata-se de um processo heurístico fiável para amostras de grande dimensão. A ferramenta de trabalho usada para a implementação dos algoritmos necessários e desenho dos gráficos foi o *Mathematica*.

Para uma melhor compreensão da análise realizada, apresenta-se resumidamente o teste das variâncias.

3.2.3 O teste das variâncias

Este teste baseia-se numa importante propriedade dos processos auto-semelhantes: o decaimento lento das variâncias do processo da série agregada. Assim, para a implementação deste método começa-se por calcular o processo agregado $X^{(m)}$, e faz-se a construção do gráfico $\text{Log}_{10}(\text{Var}(X_t^{(m)}))$ como função de $\text{Log}_{10}(m)$, onde

m corresponde à agregação da escala de tempo. Após o desenho do gráfico, é feita a aproximação aos pontos obtidos através de uma recta. Se o valor do declive da recta (β) estiver entre -1 e 0, então é sugerida a existência de auto-semelhança com parâmetro de Hurst $H = 1 - \frac{\beta}{2}$.

3.3 Colheita e preparação das amostras

Todas as amostras de tráfego estudadas provêm do router externo do Departamento de Informática da Universidade do Minho. A ferramenta utilizada para a sua colecta foi o NetFlow [18, 17]. O NetFlow considera que um fluxo é definido como uma sequência de pacotes unidirecional entre os sistemas de origem e destino. Assim, considera-se que um fluxo fica identificado através de:

- endereço IP de origem,
- endereço IP de destino,
- porta de origem,
- porta destino,
- protocolo,
- tipo de serviço (TOS),
- interface de entrada.

Quando o primeiro pacote de um novo fluxo chega ao *router* é submetido a um teste de admissão. Se preencher os requisitos necessários para a sua plena identificação, então é criada uma nova entrada em *cache*. Os pacotes seguintes pertencentes ao mesmo fluxo são contabilizados com base na informação já existente em *cache*. A exportação dos fluxos em *cache* para um *host* pré-definido, pode acontecer por várias razões:

- a) quando um fluxo permanece inactivo por um tempo específico (por defeito o valor é de 15 segundos);
- b) quando um fluxo está activo por mais de um limite de tempo (por defeito o valor é de 30 minutos);
- c) quando um fluxo termina;
- d) quando a *cache* enche, os fluxos mais antigos são despejados segundo um critério pré-definido.

Os fluxos que expiram são agrupados e exportados ou a cada segundo ou quando o número de fluxos agrupados atinge um limite máximo.

As recolhas de amostras de tráfego foram feitas em dias diferentes e em vários horários. Os períodos horários foram escolhidos por forma a reflectir períodos típicos de actividade ou utilização (alta, média e baixa) da rede, tendo-se:

- a) período de baixo tráfego (das 2h às 3h);
- b) período de médio tráfego (das 13h às 14h e das 22h às 23h);
- c) período de alto tráfego (das 10h às 11h e das 15h às 16h).

Cada amostra de tráfego tem a duração de uma hora, sendo constituída pela concatenação de doze amostras sequenciais de períodos de cinco minutos. Depois de concatenadas, estas são ordenadas pelo campo correspondente ao tempo de criação do fluxo no *router*. Após a ordenação as amostras são submetidas a várias *scripts* de triagem, desenvolvidas em *perl*, onde são separadas por classe de serviço (segundo a classificação estabelecida em 3.4), interface de saída, e por intervalos de tempo⁵. Tem-se então no final os seguintes tipos de amostras:

- a) tráfego global do *router* - amostras do **tipo 1**;
- b) tráfego global do *router* separado por intervalos de tempo - amostras do **tipo 2**;
- c) tráfego separado por interface de saída e classe de serviço - amostras do **tipo 3**;
- d) tráfego separado por interface de saída e classe de serviço, por intervalos de tempo - amostras do **tipo 4**;

Após o processo de triagem foram obtidas cerca de 150 amostras. Em cada amostra, é estudado o tráfego na perspectiva de volume de pacotes e de volume de *bytes*, ordenado sequencialmente no tempo.

3.4 Critério de classificação do tráfego

Estabelecer um critério de classificação de tráfego, por questões de ordem técnica e sobretudo económica, é uma tarefa necessariamente subjectiva. Por exemplo, o cliente A pode estar disposto a pagar mais do que o cliente B por um serviço de maior qualidade, apesar do tipo de tráfego gerado por ambos ser idêntico.

Tecnicamente, em determinadas situações é mesmo impossível a aplicação de qualquer critério. Dado que a identificação do tráfego à entrada da rede se baseia em

⁵É calculado o intervalo de tempo existente entre o primeiro e o último fluxo da amostra, intervalo de tempo esse que se subdivide em subintervalos de tempo constantes (10 seg, 1 seg, 500 mseg, 100mseg). De seguida, a cada subintervalo de tempo associa-se o somatório do número de pacotes e de número de *bytes* dos fluxos ocorridos durante esse período.

vários campos dos cabeçalhos TCP/UDP/IP de cada pacote, o uso de portas transientes pelas aplicações, a fragmentação dos pacotes de rede e o uso de encriptação podem impossibilitar esta tarefa. Assim, é mandatório que a classificação preveja estas circunstâncias⁶.

Dada a impossibilidade de normalizar esta tarefa na Internet, vários critérios de classificação de tráfego podem ser definidos. Estes devem, no entanto, ser suficientemente genéricos com vista a facilitar a sua adopção e implementação. A maioria dos critérios sugere a utilização de classes distintas para o tráfego UDP e TCP, de modo que as aplicações não adaptativas no compitam com as adaptativas pelos mesmos recursos. Outros vão mais longe, sugerindo classes distintas para os fluxos TCP *long lived* e *short lived*, bem como para os fluxos UDP consoante a variabilidade das taxas de transmissão e tamanho dos pacotes [1]. A classificação com base nos requisitos de QoS das aplicações, como seja a sensibilidade a perdas e/ou atraso, é outra das sugestões [15].

Tendo em conta os aspectos acima referidos e os valores recomendados para o campo TOS [4] no caso das aplicações clássicas, o critério de classificação apresentado estabelece uma proposta de agregação de tráfego que possa ser mapeada numa arquitectura de QoS baseada em classes. Embora a arquitectura *DiffServ* seja tomada como referência, não existe um mapeamento directo entre as classes definidas e os PHBs normalizados, já que tal envolve, por exemplo, as políticas de serviço definidas e contratadas. Nesta fase, a classificação proposta também não diferencia aplicações específicas ou proprietárias unicast/multicast⁷.

Assim sendo, as classes resultantes de tráfego são:

- **classe 1** - nesta classe está englobado tráfego TCP com sensibilidade a atrasos, por exemplo tráfego TELNET, SSH e FTP control.
- **classe 2** - esta classe inclui tráfego TCP que requer alto débito e é sensível a perdas. São exemplo protocolos de aplicações que envolvem transferências de grandes quantidades de dados, tais como SMTP, FTP data, transferências de zona DNS, POP, IMAP ou NNTP.
- **classe 3** - esta classe incorpora tráfego UDP genérico, nomeadamente TFTP, DNS, POP, IMAP e HTTP/UDP.
- **classe 4** - nesta classe estão inseridos protocolos de encaminhamento e de gestão, que usem TCP ou UDP.

⁶O uso de portas transientes pelas aplicações pode envolver a necessidade de uma análise do tráfego nos canais de controlo associados, que geralmente usam portas bem conhecidas. As dificuldades colocadas pela encriptação simplificam-se se forem usadas versões modificadas do *Encapsulating Security Payload* (ESP), que não codifiquem as portas protocolares. Finalmente, em [11] é indicado que enquanto a fragmentação do tráfego UDP está em crescimento, o tráfego TCP praticamente não é fragmentado, provavelmente devido à utilização de técnicas de *MTU path discovery* e do tamanho dos pacotes por defeito ser relativamente pequeno. Segundo [11] cerca de 85% do tráfego na Internet TCP.

⁷A complexidade a introduzir nas regras de filtragem de tráfego para a sua identificação e diferenciação seria elevada face ao reduzido volume de tráfego em causa.

- **classe 5** - esta classe inclui, na sua maioria, tráfego HTTP. Esta classe contempla ainda, em reduzido volume, outro tráfego TCP não incluído nas classes 1, 2 e 4.

Para diminuir o número de classes este tráfego poderia, eventualmente, ser agrupado com o da classe 2. Neste estudo optou-se por não o fazer, devido à grande diferença dos volumes de tráfego HTTP e outro tráfego TCP⁸ e à diferença dos seus níveis de interactividade.

- **restante** - o tráfego correspondente a aplicações que usam portas transientes (de difícil classificação) ou que usam portas UDP não cobertas pelas classes 3 e 4, fica alocado a esta classe de natureza não especificada. Segundo [11] o tráfego mais significativo nestas condições corresponde a Real Audio e jogos *online*. Outro tráfego com características de tempo real unicast/multicast fica também englobado nesta classe, e será matéria de análise futura.

Conforme referido, não existe um mapeamento directo entre as classes definidas e os PHBs *DiffServ*. No entanto, um possível mapeamento seria: classes 1 e 5 suportadas por PHBs AF de mais alta prioridade; classe 4 por EF PHB; classes 2 e 3 poderiam ser suportadas por PHBs AF de menor prioridade ou BE. A classe Restante carece de maior estudo e diferenciação.

A nível prático, foi criada uma *script* em *perl*, que permite a triagem do tráfego de uma dada amostra pelas cinco classes propostas. É de salientar que a ferramenta é suficientemente genérica para se adaptar a alterações do número e/ou estrutura das classes.

4 Resultados obtidos

4.1 Análise do volume de dados

Numa primeira abordagem ao estudo dos dados amostrais foi analisado o volume do tráfego correspondente a cada classe e a cada interface de saída do router, por amostra. O resultado global obtido por classe encontra-se esquematizado na Tabela 1.

Da análise da tabela observa-se que a classificação proposta é bastante abrangente, uma vez que só cerca de 3% do volume de tráfego em bytes e 4% em pacotes foram atribuídos a “restante” no processo de classificação. Constata-se também que as classes com maior volume de tráfego são as classes 5 e 2, correspondentes a tráfego WWW e *bulk transfer*, respectivamente. Nesta tabela é possível também verificar uma certa correlação existente entre o número de bytes e de pacotes, mais evidente numas classes do que em outras. Por exemplo, enquanto na classe 5 essa relação é

⁸Se analisados conjuntamente, as características do tráfego HTTP tenderiam a diluir as do outro tráfego.

classe	volume bytes	volume pacotes
1	2.31 %	2.37 %
2	26.40 %	18.95 %
3	1.67 %	5.94 %
4	0.01 %	0.04 %
5	67.04 %	68.41 %
restante	2.67 %	4.27 %

Table 1: Volume total de tráfego por classe.

evidente, a classe 2 denota a existência de pacotes de maior dimensão. Na classe 3 verifica-se o contrário.

4.2 Estimativas do parâmetro H

Até ao momento foram analisadas várias amostras de tráfego por interface de saída e por classe (enunciadas em 3.3 como amostras do tipo 4) e aplicados os seguintes testes:

- prova pictórica;
- gráficos de autocorrelação;
- teste das variâncias.

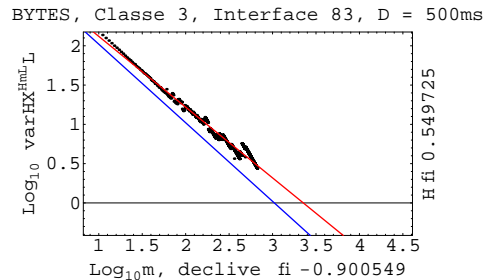


Figure 4: Gráfico do teste das variâncias para uma amostra da classe 5, cujo o valor da estimação de H é de 0.59.

A realização das provas pictóricas sugere a presença de auto-semelhança num grande número de amostras, reforçado pelos resultados obtidos pelos testes das variâncias (de que é exemplo a Figura 4). Outro aspecto importante é a semelhança existente entre os resultados obtidos da análise do volume de tráfego em *bytes* de cada classe e o volume correspondente em pacotes.

Os resultados obtidos por aplicação do teste das variâncias são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

classes	a)	b)	c)	d)
1	76.5%	0%	17.6%	5.9%
2	50.0%	6.7%	30.0%	13.3%
3	40.9%	18.2%	22.7%	18.2%
4	91.7%	8.3%	0%	0%
5	17.2%	6.9%	20.7%	55.2%

Table 2: Percentagem de amostras tal que: a) $H < 0.45$, b) $0.45 \leq H \leq 0.5$, c) $0.5 < H < 0.7$, d) $H \geq 0.7$.

classes	a)	b)	c)	d)
1	99.29%	0%	0.63%	0.08%
2	37.46%	3.29%	43.74%	15.50%
3	36.96%	30.35%	18.98%	13.71%
4	98.85%	1.15%	0%	0%
5	4.91%	6.62%	7.46%	81.01%

Table 3: Volume de tráfego correspondente às amostras que apresentaram: a) $H < 0.45$, b) $0.45 \leq H \leq 0.5$, c) $0.5 < H < 0.7$, d) $H \geq 0.7$.

A Tabela 2 ilustra a percentagem de amostras das várias classes que exibem um valor de H contido nos intervalos definidos. Note-se que um valor de H superior a 0.5 indica a presença de auto-semelhança no tráfego. Quanto maior for H , maior o grau de auto-semelhança, ou seja, mais *bursty* é o tráfego. A Tabela 3 representa o volume de tráfego correspondente às mesmas amostras, para os mesmos intervalos de H .

A análise destas tabelas evidencia comportamentos bastantes diferentes para cada classe. A classe 5 (tráfego HTTP) é, sem dúvida, a que exibe o maior grau de auto-semelhança, ou *burstiness*. Os testes realizados apresentam parâmetros $H > 0.5$ na grande maioria das suas amostras, cerca de 76%. Será interessante observar que desses 76%, a maioria das amostras tem um $H > 0.7$. Mais ainda, verifica-se que a maior parte do volume de tráfego da classe 5, reside nessas mesmas amostras.

As Tabelas 4 e 5 reforçam estes resultados e estendem a análise para os diferentes períodos de actividade definidos. É notório que H aumenta com a utilização crescente da rede, atingindo valores elevados para cargas média/altas.

período	$0.5 < H < 0.7$	$H \geq 0.7$
Alto	14.3%	78.6%
Médio	33.3%	66.7%
Baixo	22.2%	11.1%

Table 4: Percentagem de amostras da classe 5 cuja a estimativa do parâmetro $H > 0.5$.

período	$0.5 < H < 0.7$	$H \geq 0.7$
Alto	3.98%	95.54%
Médio	1.59%	98.41%
Baixo	25.60%	14.34%

Table 5: Percentagem de volume de tráfego da classe 5 associado às amostras cuja a estimativa do parâmetro $H > 0.5$.

Em contrapartida a classe 4, cujas amostras registam um volume de tráfego reduzido, apresenta estimativas de H bastante baixas, onde nenhuma amostra apresenta um valor de H superior a 0.5. Em geral, observa-se que as amostras cujo volume de tráfego é mais elevado, são aquelas que têm uma estimativa de um H mais elevado, consistente com [23]. Exceptua-se a classe 1 que se comporta de maneira oposta o que pode levar a pensar que a *burstiness* do tráfego também poderá estar associada ao tipo de aplicação considerada. Este comportamento têm ainda de ser verificado para um maior leque de amostras.

Em relação ao comportamento do tráfego nos diferentes períodos de utilização da rede, e para as classes consideradas, verifica-se que: (i) embora apenas 50% das amostras avaliadas em períodos de médio e alto tráfego apresentem um valor de $H > 0.5$, cerca de 90% do volume de tráfego total reside nessas amostras. (ii) em período de baixo tráfego existe uma diminuição drástica quer no número de amostras com $H > 0.5$, quer no volume de tráfego associado a essas amostras.

Quanto às funções de autocorrelação, verifica-se que para cerca de 50% das amostras do período de médio e alto tráfego, os gráficos de autocorrelação decaem “suavemente” para zero, sugerindo que a soma dos valores da função é infinita (próprio de processos auto-semelhantes). Praticamente todas as amostras que evidenciam essa propriedade, independentemente da classe associada, têm um parâmetro H superior a 0.5.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

Neste estudo são investigadas as propriedades estatísticas de amostras reais de tráfego, após a aplicação de um critério de classificação que divide o tráfego em diversas classes de serviço. Esse critério toma como referência a classificação *multi-field* da arquitectura *DiffServ* e os possíveis requisitos das várias aplicações. Os resultados obtidos mostram que o critério de classificação estabelecido é bastante abrangente em relação ao total de tráfego colectado e a classificar.

A análise estatística efectuada assenta essencialmente na teoria dos fractais. Para as várias classes de tráfego e diferentes períodos de actividade, foram estimados os valores de H como forma de quantificar a auto-semelhança ou *burstiness* do tráfego.

Os resultados evidenciam que as classes 2 e 5 (*bulk transfer* e tráfego HTTP) são as que mais contribuem para a carga total em cada interface. Além disso, conclui-se

que os testes empregues para verificação de auto-semelhança apresentam resultados consistentes entre si. Também a análise do volume de *bytes* e volume de pacotes mostra resultados equivalentes.

Relativamente às estimativas de H , a classe 5 é claramente a que evidencia maior *burstiness*, seguida das classes 2 e 3. É interessante notar que H aumenta com a utilização crescente da rede. Este efeito, se bem que notório, não se verifica para todas as classes, levantando a questão da influência do tipo de aplicação neste parâmetro.

Presentemente, estão a ser analisadas mais amostras para uma maior consolidação de resultados. Como trabalho futuro, pretende-se contemplar os seguintes pontos:

- implementação do método R/S e do método do periodograma;
- adopção de um modelo matemático para geração de tráfego sintético;
- aplicação de teste estatísticos não fractais a classes que não evidenciem esta característica.

References

- [1] A. Bak, W. Burakowski, F. Ricciato, S. Salsano, and H. Tarasiuk. Traffic Handling in AQUILA QoS IP Networks. *QoFIS2001*, page 243...260, September 2001.
- [2] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. An Architecture for Differentiated Services. Technical report, IETF RFC 2475, 1998.
- [3] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview. Technical report, IETF RFC 1633, 1994.
- [4] Alistair Croll and Eric Packman. *Managing Bandwidth: Deploying QoS in Enterprise Networks*. Prentice Hall, 2000.
- [5] A. Erramilli and W. Willinger. Experimental Queueing Analysis with Long-Range Dependent Packet Traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(2), April 1996.
- [6] R. Makkar et al. Empirical Study of Buffer Management Scheme for DiffServ AF PHB. *ICCCN2000*, 2000.
- [7] Sally Floyd. Several notes on CBQ. <http://www.aciri.org/floyd/cbq.html>.
- [8] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski. Assured Forwarding PHB Group. Technical report, IETF RFC 2597, 1999.
- [9] V. Jacobson, K. Nichols, and K. Poduri. An Expedited Forwarding PHB. Technical report, IETF RFC 2598, 1999.

- [10] Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, 1977.
- [11] S. McCreary. Trends in Wide Area IP Traffic Patterns. <http://www.caida.org/outreach/papers/AIX0005/>.
- [12] S. Molnár and A. Vidács. How to Characterize Bursty Traffic? *COST 257, TD(98)003, Rome*, January 1998.
- [13] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. Technical report, IETF RFC 2474, 1998.
- [14] K. Nichols and B. Carpenter. Definition of Differentiated Services Per Domain Behaviors and Rules for their Specification. Technical report, IETF RFC 3086, 2001.
- [15] G. Quadros, A. Alves, E. Monteiro, and F. Boavida. An Approach to Support Traffic Classes in IP Networks. *QoFIS2000*, page 285...299, September 2000.
- [16] O. Rose. Estimation of the Hurst Parameter of Long-Range Dependent Time Series. 1996.
- [17] Cisco Systems. NetFlow Aggregation.
- [18] Cisco Systems. NetFlow Flow Collector. <http://www.iagu.on.net/software/netflow-collector>.
- [19] Murad S. Taqqu and Vadim Teverovsky. Semi-Parametric Graphical Estimation Techniques for Long-Memory Data. *Lecture Notes in Statistics*, 115:420..432, 1996.
- [20] Murad S. Taqqu and Vadim Teverovsky. On Estimating the Intensity of Long-Range Dependence in Finite and Infinite Variance Time Series. In *A Practical Guide To Heavy Tails: Statistical Techniques And Applications*, page 177..217. Birkhauser, Boston, 1998.
- [21] Murad S. Taqqu, Vadim Teverovsky, and Vern Paxton. Self-Similarity and Heavy Tails: Structural Modeling of Network Traffic. In *A Practical Guide To Heavy Tails: Statistical Techniques And Applications*, page 27..53. Birkhauser, Boston, 1998.
- [22] Murad S. Taqqu, Vadim Teverovsky, and Walter Willinger. Estimators for Long-Range Dependence: An Empirical Study. *Fractals*, 3:785..788, 1995.
- [23] Murad S. Taqqu, Walter Willinger, Will E. Leland, and Daniel V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. *SIGCOMM'93*, 1993.