

# *Modelli di traffico per reti di telecomunicazioni*

*Pier Luigi Conti, Livia De Giovanni, Maurizio Naldi*

# Motivazioni

*Una rete di telecomunicazioni è costituita da apparati (computer, telefoni, palmari) che generano e terminano traffico (sorgenti o origini e destinazioni), apparati di instradamento del traffico e apparati di trasmissione (collegamenti trasmissivi).*

*Nelle reti a pacchetto le informazioni corrispondenti alla codifica numerica di applicazioni sono trasferite da sorgente a destinazione nella forma di pacchetti. I pacchetti sono instradati da sorgente a destinazione attraverso apparati di instradamento (router o switch) e collegamenti trasmissivi. Gli apparati di instradamento sono dotati di buffer per memorizzare pacchetti che richiedono trasmissione contemporanea sullo stesso collegamento. I collegamenti sono caratterizzati da una capacità trasmissiva (Mbit/s).*

*La progettazione e il dimensionamento degli apparati di instradamento e dei collegamenti trasmissivi influenza le prestazioni (Qualità del Servizio) della rete, espresse dalla probabilità di perdita di pacchetto e dal ritardo di trasmissione di pacchetto.*

*Una corretta progettazione e dimensionamento degli apparati richiede lo studio e la definizione di modelli statistici per il traffico (a pacchetto) offerto alla rete.*

## *Il traffico*

*La maggior parte delle comunicazioni avviene attraverso la rete Internet, nell'ambito della quale la comunicazione ha luogo attraverso il protocollo IP (Internet Protocol). In tale rete gli apparati che generano e terminano traffico sono gli host identificati da un indirizzo IP (computer, palmari, dispositivi capaci di utilizzare il protocollo IP), mentre gli apparati di instradamento del traffico sono i router (switch).*

*La componente maggiore del traffico Internet è relativo al WWW (World Wide Web). Il WWW è una ragnatela di dispositivi di memorizzazione di informazioni (host server). Altri dispositivi (host client) richiedono mediante un opportuno programma (browser) ai server di ricevere le informazioni. Tali informazioni vengono trasmesse dal server al client mediante il protocollo HTTP (Hyper Text Transfer Protocol).*

*Gli host trasmettono/ricevono informazione numericamente codificata che può essere esaminata a diversi livelli: sessione, pagina (per traffico WWW), connessione (TCP Transmission Control Protocol), pacchetto (datagramma IP).*

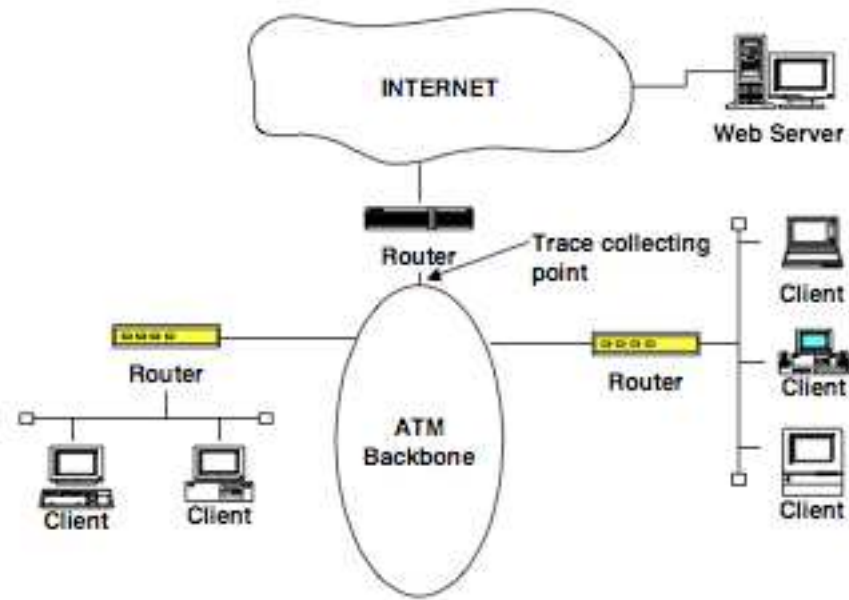
## Motivazioni

*Nel traffico a pacchetto misurato si è rilevata la presenza di 'memoria lunga' (autocorrelazione a istanti di tempo lontani). Tale autocorrelazione influenza negativamente le prestazioni della rete, e va pertanto inserita nei modelli di traffico al fine di consentire una corretta progettazione degli apparati di instradamento e dei collegamenti. Con riferimento alla progettazione dei collegamenti trasmissivi il problema è ulteriormente complicato dal fatto che il traffico Origine-Destinazione, fondamentale per la progettazione, non è osservabile.*

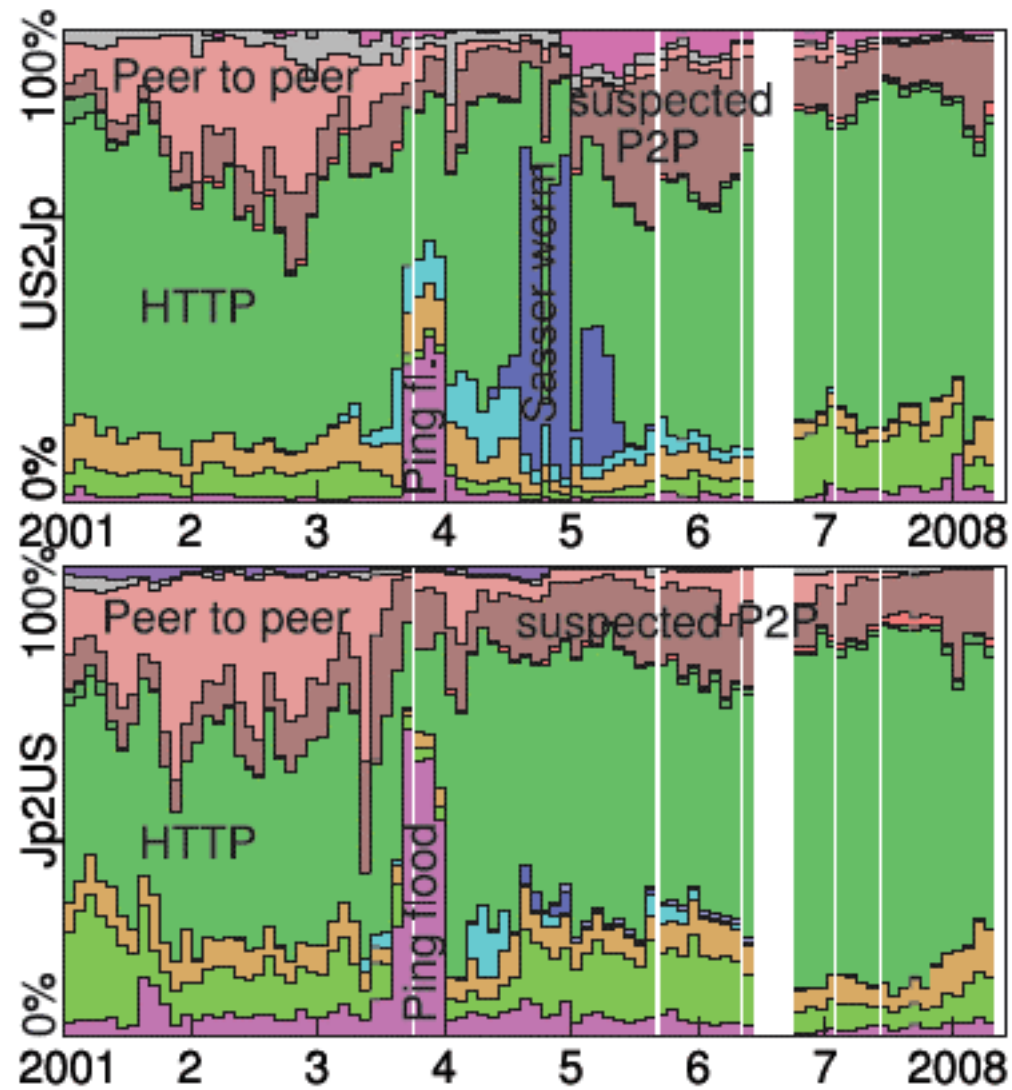
*L'idea su cui si basa la definizione di modelli è di fornire una spiegazione "fisica" della presenza di 'memoria lunga' tramite risultati limite per processi ad alta variabilità. Il risultato principale, in questa direzione, è che la sovrapposizione di sorgenti ON-OFF con varianza infinita o heavy-tail (rispetto alla durata dell'ON e/o dell'OFF) dà origine a un traffico a 'memoria lunga'.*

*Vengono presentate tecniche di rilevazione e stima di 'memoria lunga' nel traffico a pacchetto, modelli di traffico con 'memoria lunga', metodi di stima del traffico Origine-Destinazione in presenza di 'memoria lunga' e informazione incompleta.*

# *Rete Internet*



# *Il traffico*



## *Il traffico*

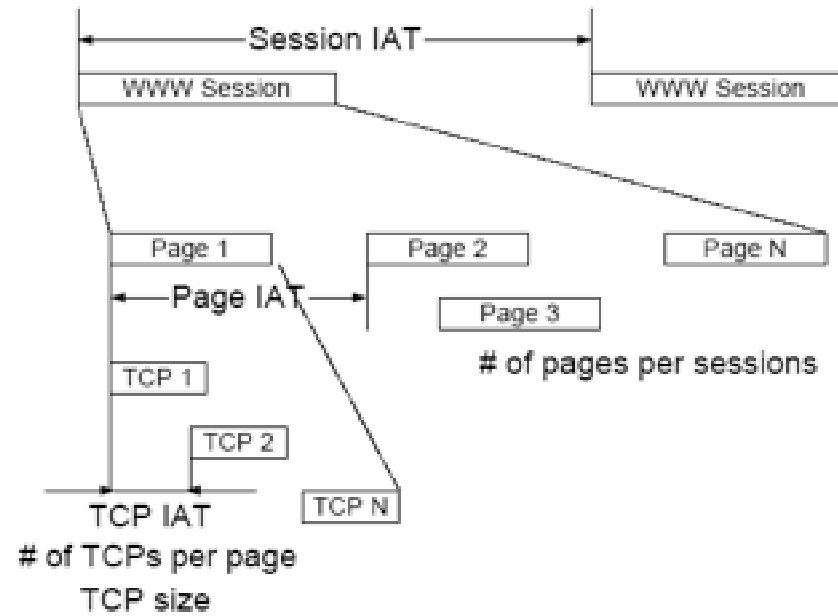
*Le quantità di interesse sono:*

- Sessione (necessità di convenzioni su inizio/fine sessione): durata, tempo inter-arrivo*
- Pagina (per traffico WWW): tempo inter-arrivo richiesta di pagine, numero di oggetti per pagina, dimensione degli oggetti (in byte)*
- Connessione: numero di segmenti TCP (differenza HTTP 1.0 e 1.1), dimensione dei segmenti TCP (in byte)*
- Pacchetto: numero di pacchetti (o byte o bit) per unità di tempo*

*I punti di misura sono:*

- Client, Server, router*

# *Il traffico*





# *Il traffico*

*Prime misure di traffico (byte/pacchetti IP per unità di tempo) esaminate da Bellcore su tracce relative a 4 anni (1989-1992):*

*Local Area Network:*

*- le tracce di traffico aggregato mostrano memoria lunga (auto-similarità) su scale temporali di 10 ms ai 100 s (Leland et al., 1994).*

*Wide Area Network*

*- il processo di arrivi di sessioni è Poisson (Paxson 95)*

*- le tracce di traffico aggregato relativo a connessioni HTTP mostrano memoria lunga (auto-similarità) su scale temporali a partire da centinaia di ms.*

*Questi risultati sono robusti rispetto al mix di traffico (valgono per tracce che contengono da 0% di pacchetti WWW nel 1990, al 10% nel 1994 al 32% nel 1997 a 60% nel 2010)*

## Memoria Lunga e Auto-similarità (1/4)

- Processo a parametro continuo  $t$  auto-simile – invariante in distribuzione per riscalature spazio-tempo - ( $0 < H < 1$ , parametro di Hurst di autosimilarità):

$$\{Z(t); t \geq 0\} \stackrel{d}{=} \{c^{-H} Z(ct); t \geq 0\} \quad \forall c > 0$$

- Processo (debolmente) stazionario a parametro discreto  $\{U_j; j \geq 1\}$  è Long Range Dependence (LRD, Long Memory),  $r_k$  coefficiente di autocorrelazione di lag  $k$ :

$$r_k \approx k^{-(1-\alpha)} \quad k \rightarrow \infty \quad (0 < \alpha < 1)$$

- Se il processo originario  $\{Z(t); t \geq 0\}$  è auto-simile con incrementi stazionari è possibile scrivere ( $H = (\alpha + 1)/2$ ,  $r_k$  coefficiente di autocorrelazione del processo  $X_j = (Z_j - Z_{j-1})$   $j = 1, 2, \dots$ ):

$$r_k = \frac{1}{2} \left[ (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right] \approx k^{2(H-1)} = k^{-(1-\alpha)} \quad k \rightarrow \infty$$

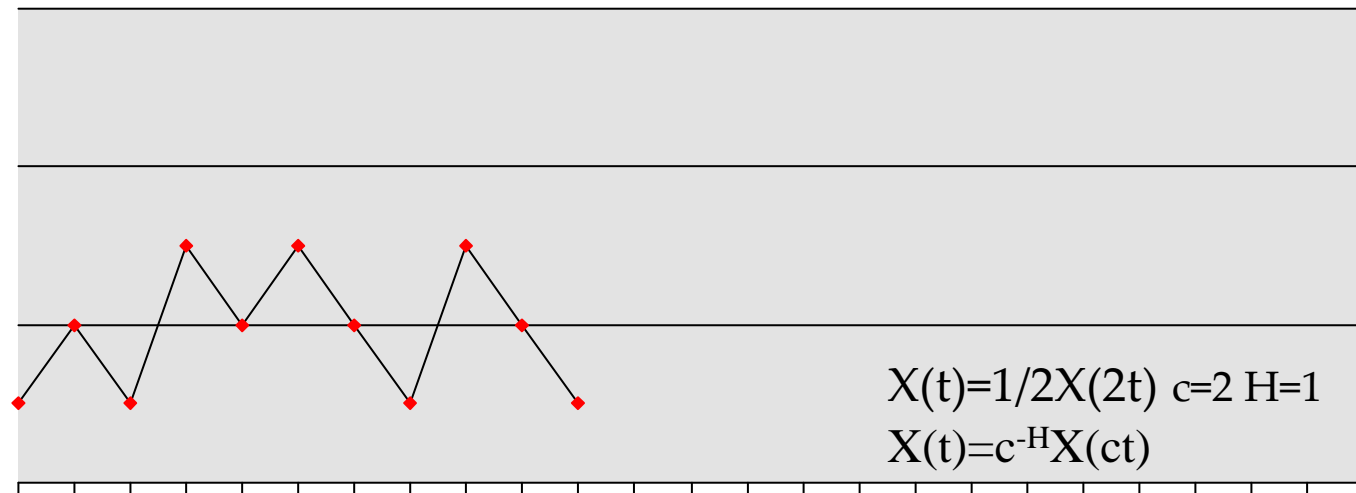
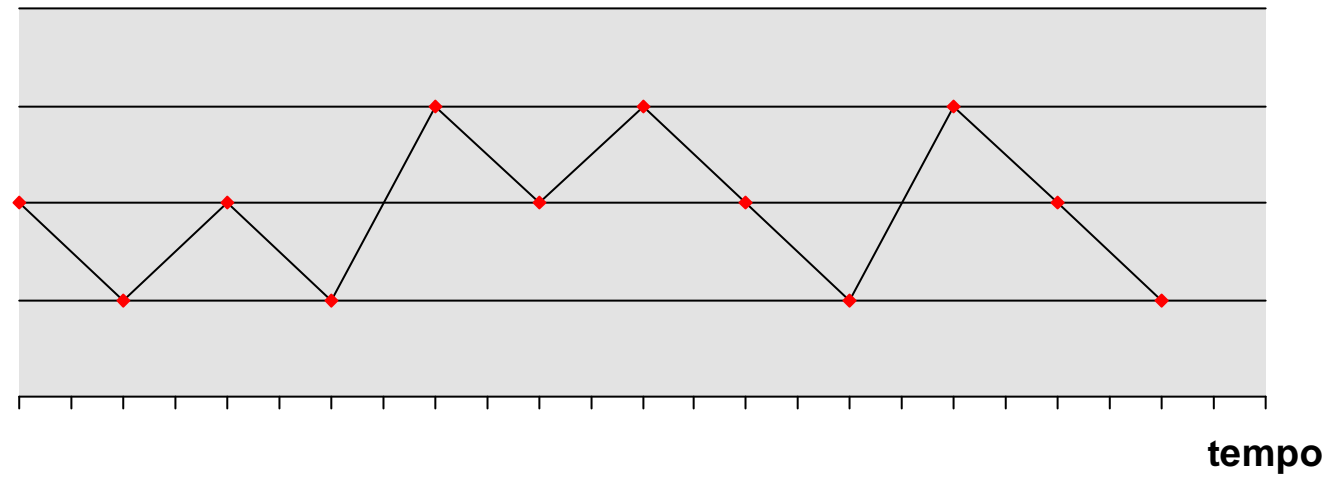
## *Memoria Lunga e Auto-similarità (2/4)*

- *A partire dal processo originario  $\{X_j, j \geq 1\}$  è possibile definire un processo aggregato (o mediato)  $\{X_j^{(m)}; j \geq 1\}$  ottenuto mediando gli  $X_j$  su blocchi adiacenti di numerosità  $m$ :*

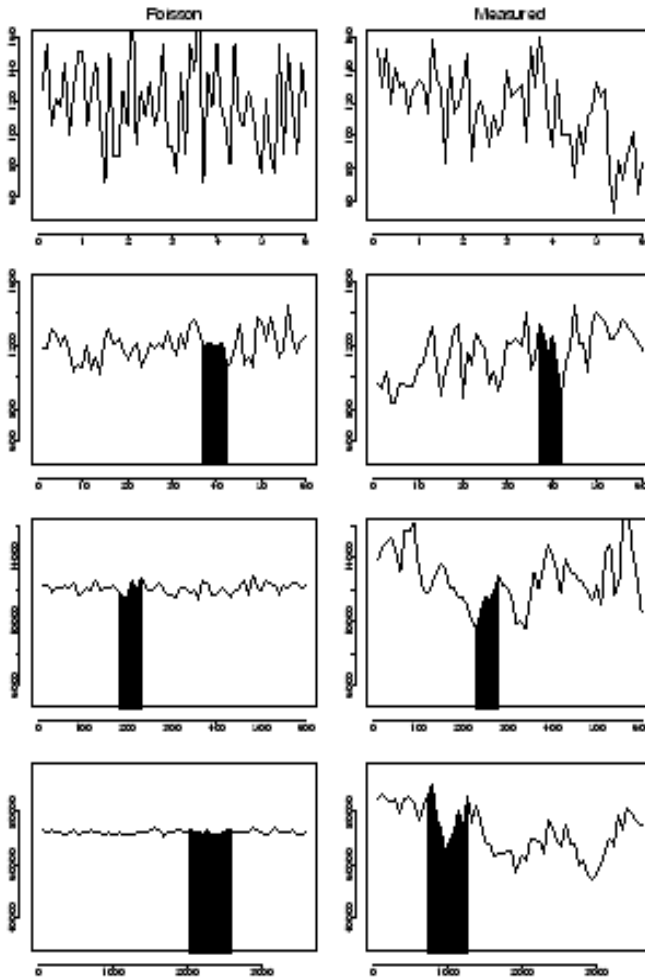
$$X_j^{(m)} = m^{-1} \sum_{k=(j-1)m+1}^{jm} X_k \quad \forall j \geq 1$$

- *La funzione di autocorrelazione  $r_k^{(m)}$  del processo mediato del processo  $\{X_j; j \geq 1\}$  degli incrementi (stazionari) di un processo autosimile è tale che  $r_k^{(m)} = r_k$*

## *Memoria Lunga e Auto-similarità (3/4)*



## Memoria Lunga e Auto-similarità (4/4)



*numero di pacchetti IP per 100 ms intervalli di 6 s*

*numero di pacchetti IP per 1s intervalli di 60 s  
(asse Y moltiplicato per 10)*

*numero di pacchetti IP per 10 s intervalli di 600 s  
(asse Y moltiplicato per 10)*

*numero di pacchetti IP per 60 s intervalli di 3600 s  
(asse Y moltiplicato per 6)*

## *Genesi Memoria Lunga in telecomunicazioni (1/2)*

*Il comportamento di una sorgente  $\{W(t), t \geq 0\}$  è un processo di rinnovo alternato:  $W(t)=1$  o  $0$  se il tempo  $t$  è un periodo di attività o di silenzio (OFF). In attività il tasso di trasmissione di pacchetti è costante.*

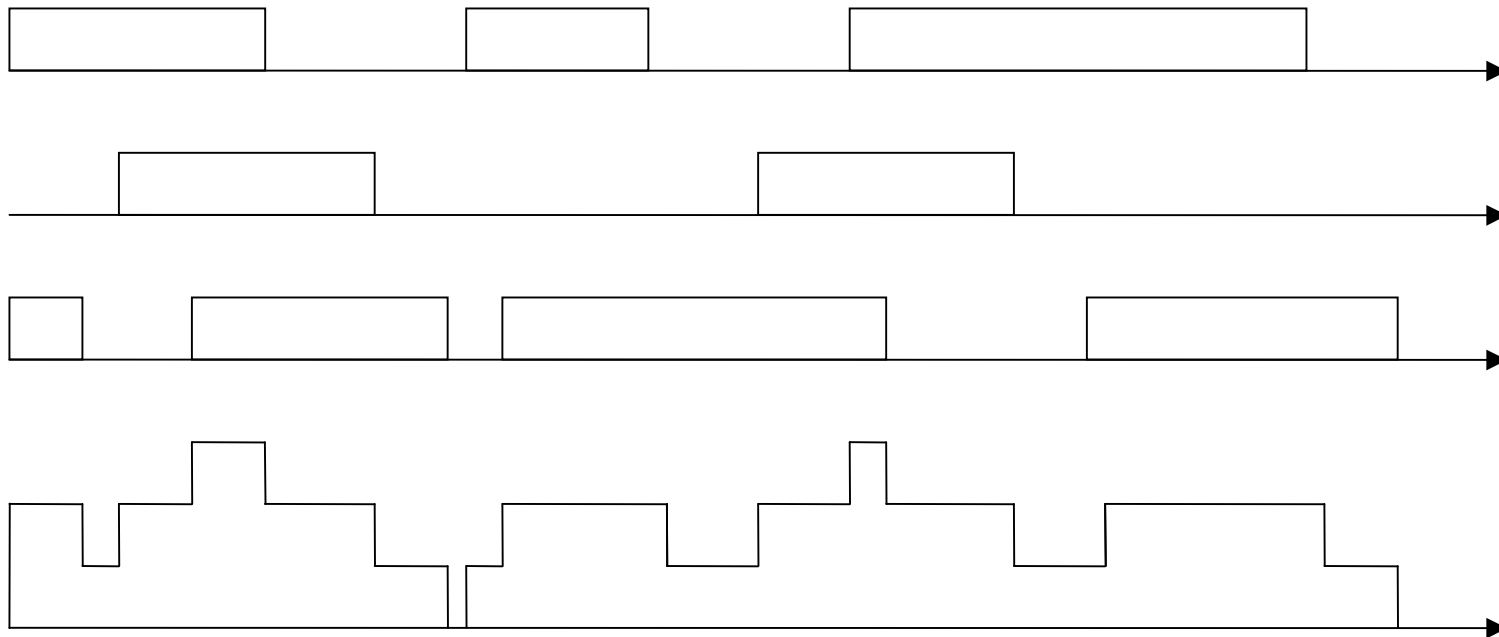
*Le durate degli ON e degli OFF sono variabili aleatorie indipendenti a varianza infinita (heavy-tail):*

$$P(X \geq x) = (1 - F(x)) \approx \text{const. } x^{-\alpha}, \quad 1 < \alpha_{\text{ON}} < 2 \text{ e/o } 1 < \alpha_{\text{OFF}} < 2.$$

*La sovrapposizione di  $m$  di tali sorgenti genera un processo di arrivi di pacchetti  $W^{(m)}(t)$  gaussiano auto-simile ( $H = 1/2 \cdot (3 - \min(\alpha_{\text{ON}}, \alpha_{\text{OFF}}))$ ) (Taqqu et al. 1997). Relazione heavy-tail/long memory.*

## *Genesi Memoria Lunga in telecomunicazioni (2/2)*

*L'alta variabilità (heavy-tail) delle durate dei periodi di ON e di OFF provoca persistenza rispetto a durate di tipo esponenziale (senza memoria)*



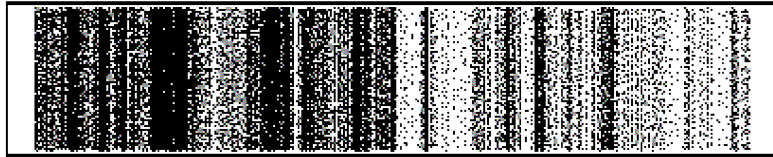
## *Inferenza e Memoria Lunga (1/2)*

*Verifica strutturale. Stima di  $H=1/2 \cdot (3 - \min(\alpha_{ON}, \alpha_{OFF}))$  tramite stima di  $\alpha_{ON}, \alpha_{OFF}$ . Misure a livello sorgente/destinazione. (Willinger et alii, 1997, 1998).*

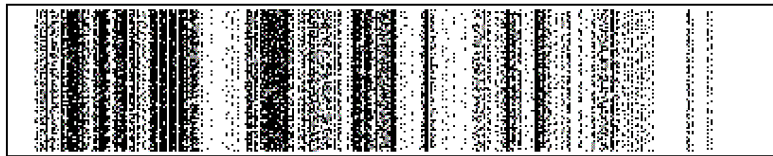
- *LAN (Local Area Networks)*
  - *Sorgenti sono realmente ON/OFF (diagrammi “texture”)*
  - *Le durate degli ON e degli OFF sono heavy-tail*
- *WAN (Wide Area Networks)*
  - *Il processo di arrivi di sessioni Telnet, FTP, SMTP e di connessioni HTTP è Poisson omogeneo nell’ora (test  $\chi^2$  e Kolmogorov-Smirnov)*
  - *le relazioni di traffico (pacchetti IP per unità di tempo) individuali presentano un carattere ON/OFF con distribuzione heavy-tail (Willinger et alii, 1998, 1997, Crovella Bestavros 1995, Barford and Crovella 1998)*



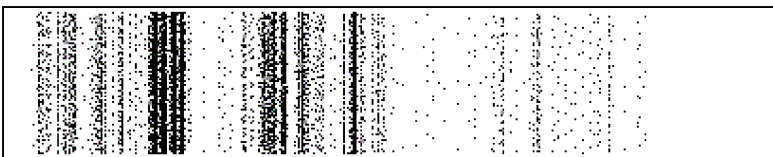
*diagrammi texture (pacchetti  
nel tempo per 1 h, risoluzione 1 s)*



*Sorgente A*



*Sorgente A - Destinazione B*



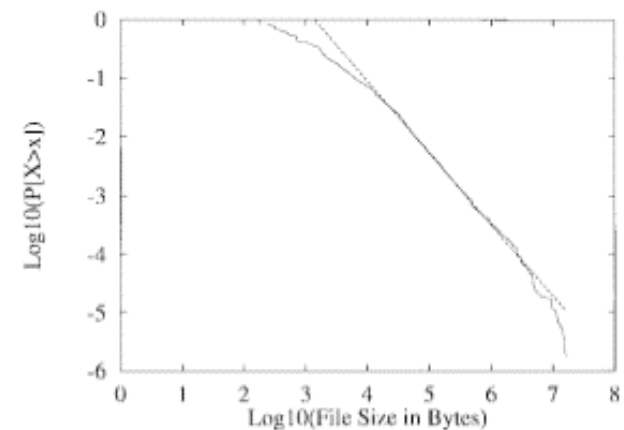
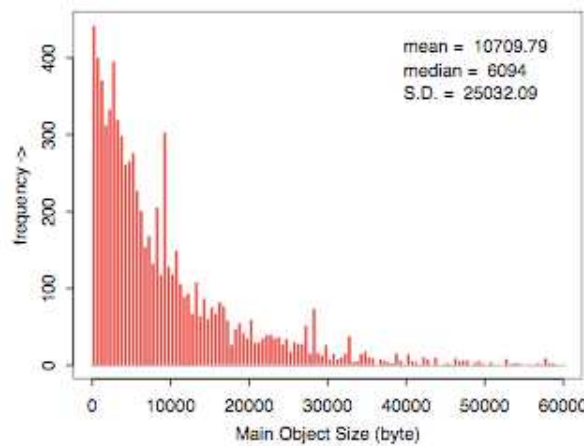
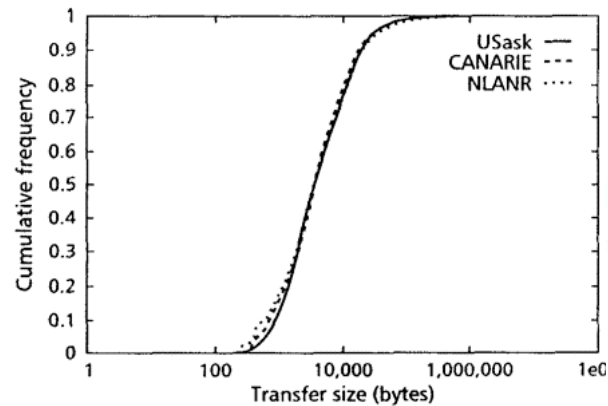
*Sorgente A - Destinazione C*



*Sorgente A - Destinazione D*

*Dimensione degli oggetti (durata dell'ON): Pareto, Lognormale, Iperesponenziale. Tali distribuzioni sono heavy-tail (varianza infinita)*

$$P(X \geq x) = (1 - F(x)) \approx \text{const. } x^{-\alpha}, \quad 1 < \alpha < 2.$$



*Tempo interarrivo delle richieste (durata OFF): Gamma, Iperesponenziale, Weibull (Deng 1996). Tali distribuzioni sono heavy-tail (varianza infinita).*

$$P(X \geq x) = (1 - F(x)) \approx \text{const. } x^{-\alpha}, 1 < \alpha < 2 .$$

Parameters		Mean	Median	S.D.	Best-fit
Request size		360.4	344	106.5	LN
Object size	Main	10710	6094	25032	LN
	In-line	7758	1931	126168	LN
Parsing time		0.13	0.06	0.187	G
Number of In-line objects		5.55	2	11.4	G
In-line Inter-Arrival time		0.86	0.17	2.15	G
Viewing (OFF) time		39.5	11.7	92.6	W
Number of Web-requests	Non-cached	12.6	5	21.6	LN
	Cached	1.7	1	1.7	GM

## *Inferenza e Memoria Lunga (2/2)*

*Verifica non strutturale. Misure a livello aggregato  $W^{(m)}(t)$ . Rilevazione auto-similarità tramite stima diretta di  $H$  (Willinger et al., 1995; De Giovanni et al. 2002).*

- Stimatore di Whittle approssimato “aggregato” (Taqqu) e stimatore di Whittle “locale” (Robinson) basati sulla approssimazione della funzione di log-verosimiglianza per processi gaussiani.*
- Stimatore basato su rappresentazione wavelet del processo (Abry e Veitch). I coefficienti della trasformata wavelet con frequenza fissata costituiscono un processo stazionario a media zero di variabili incorrelate.*
- Stimatore wavelet-Whittle (Taqqu 2008).*

## *Implicazioni di auto-similarità*

*La caratteristica di memoria lunga del traffico a livello di pacchetto ha conseguenze su:*

- la definizione del modello del traffico (gaussiano, stazionario, a memoria lunga)*
- inferenza sul modello (stima e le proprietà dei parametri del modello)*
- la valutazione delle prestazioni della rete, in particolare probabilità di perdita di pacchetto e ritardo di trasmissione di pacchetto (Norros 2000 in Park 2000, Conti et al. 2002), che riguardano gli apparati di instradamento (teoria delle code)*
- la progettazione e il dimensionamento della rete (collegamenti trasmissivi) basata su stima di matrici di traffico Origine-Destinazione (Vardi 1996, Cao et al. 2000, Conti et al. 2010). Con riferimento alla progettazione dei collegamenti trasmissivi il problema è ulteriormente complicato dal fatto che il traffico Origine-Destinazione, fondamentale per la progettazione, non è osservabile.*

## *Il traffico O-D*

*In una rete di telecomunicazioni sono presenti  $Z$  nodi,  $M$  collegamenti trasmissivi tra i nodi ed  $N=Z(Z-1)$  coppie origine-destinazione (O-D).*

*Il traffico (misurato in pacchetti o byte o bit/sec) relativo alle coppie O-D è indicato con il vettore aleatorio  $X$  a  $N$  componenti. Il traffico relativo ai collegamenti trasmissivi è indicato con il vettore aleatorio  $Y$  a  $M$  componenti.*

*Il traffico relativo alle coppie origine-destinazione non è osservabile. E' invece osservabile il traffico sui collegamenti trasmissivi.*

*Problema: stimare i parametri delle variabili aleatorie relative al traffico O-D a partire da realizzazioni delle variabili aleatorie relative al traffico sui collegamenti trasmissivi.*

*Scale temporali dai 60 secondi*

3 relazioni (unidirezionali) origine-destinazione (a, b) (b, c) (a, c)  
 2 collegamenti trasmissivi (1) e (2).

$A$ : matrice di *routing* (instradamento)

$Y_j$ : traffico sul collegamento ' $j$ '

$X_i$ : traffico sull'origine-destinazione ' $i$ '

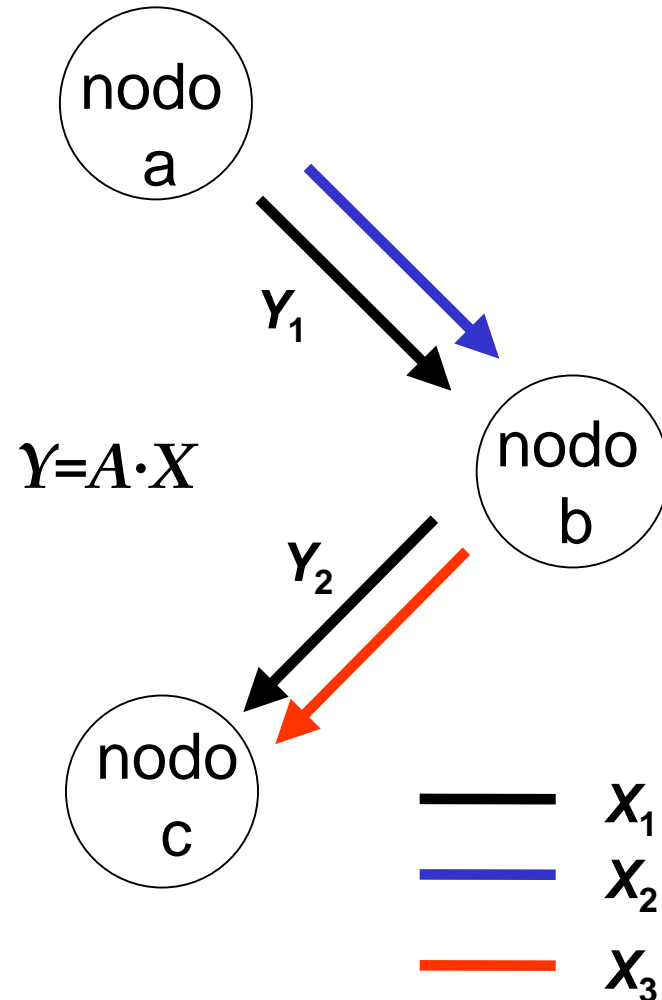
1 (a, c) 2 (a, b) 3 (b, c)

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

		(a, c)	(a, b)	(b, c)
$A_{2,3}$	(1)	1	1	0
	(2)	1	0	1

$$Y_1 = X_1 + X_2$$

$$Y_2 = X_1 + X_3$$



## Il traffico O-D

Fissato il tempo 't' risulta:

$\underline{X}^{(t)}$ : v.a. N-plo  $(X_1^{(t)}, X_2^{(t)}, \dots, X_N^{(t)})$  Normale a componenti indipendenti 'traffico al tempo t' relativo alle N coppie O-D ( $t=1, \dots, T$ ).

$\underline{Y}^{(t)}$ : v.a. M-plo  $(Y_1^{(t)}, Y_2^{(t)}, \dots, Y_M^{(t)})$  Normale 'traffico al tempo t' relativo agli M collegamenti trasmissivi ( $t=1, \dots, T$ ).

$\underline{Y}^{(t)} = A \cdot \underline{X}^{(t)}$  ( $t=1, \dots, T$ ) A matrice di routing (instradamento)  $M \times N$ .

Fissata la O-D 'i' risulta:

$X_i$  v.a. a T componenti  $(X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(T)})$  è un processo aleatorio gaussiano in tempo discreto stazionario a memoria lunga ( $H_i = H$  parametro di Hurst uguale per tutte le O-D)



## *Il traffico O-D - Network Tomography*

*Stimare il parametro  $\underline{\theta} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2, H)$  del vettore aleatorio  $X$  relativo al traffico O-D a partire da  $T$  realizzazioni del vettore aleatorio  $Y$  relativo al traffico sui collegamenti trasmissivi ( $M \times T$  dati).*

*Modello non identificabile come conseguenza dell'informazione incompleta. (( $2M+1$ ) parametri di  $Y$  espressi in funzione di ( $2N+1$ ) parametri di  $X$ ,  $M < N$ ).*

*Condizioni sulla topologia, restrizione sui parametri (relazione media-varianza)*

# *Il traffico O-D - Network Tomography*

- 1. Parametro  $\underline{\theta}$  stimato massimizzando la verosimiglianza di  $\underline{X}$   
 $L_{\underline{X}}(\underline{\theta})=f(\underline{X}^{(1)}, \underline{X}^{(2)}, \dots, \underline{X}^{(T)}; \underline{\theta})$  tramite condizionamento a  $\underline{Y}^{(t)}$   $t=1, \dots, T$   
(algoritmo Expectation Maximization) in assenza di memoria lunga (Vardi 1996, Cao et al. 2000) e in presenza di memoria lunga (Conti, De Giovanni, Naldi, 2010)*
- 2. Parametro  $\underline{\theta}$  stimato massimizzando la verosimiglianza di  $\underline{Y}$   
 $L_{\underline{Y}}(\underline{\theta})=f(\underline{Y}^{(1)}, \underline{Y}^{(2)}, \dots, \underline{Y}^{(T)}; \underline{\theta})$  utilizzando la relazione  $\underline{Y}^{(t)} = A \cdot \underline{X}^{(t)}$*
- 3. Parametro  $\underline{\theta}$  stimato massimizzando la pseudo-verosimiglianza di  $\underline{Y}$  ottenuta come prodotto di verosimiglianze a coppie dei vettori  $\underline{Y}_i$*

## Simulazione

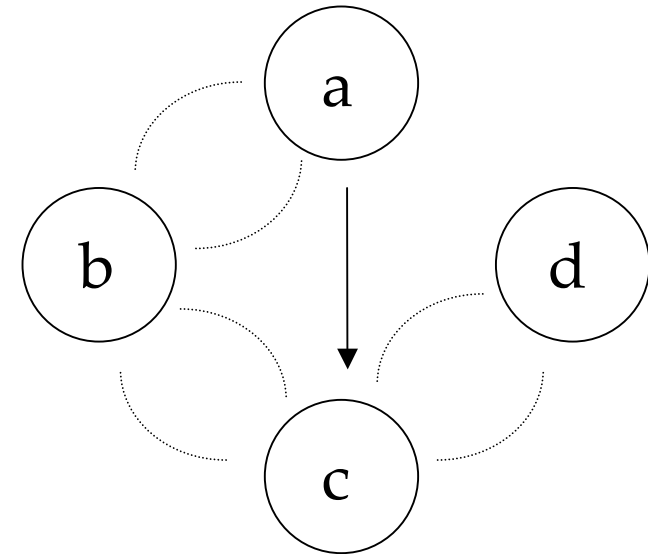
*Il traffico relativo ad ogni coppia O-D è a memoria lunga ed è generato con il metodo esatto di Choleski.*

*Il traffico (valore medio) per ogni origine è distribuito secondo una legge di Zipf.*

*Il traffico per relazione (valore medio) è proporzionale al traffico originato dalla destinazione.*

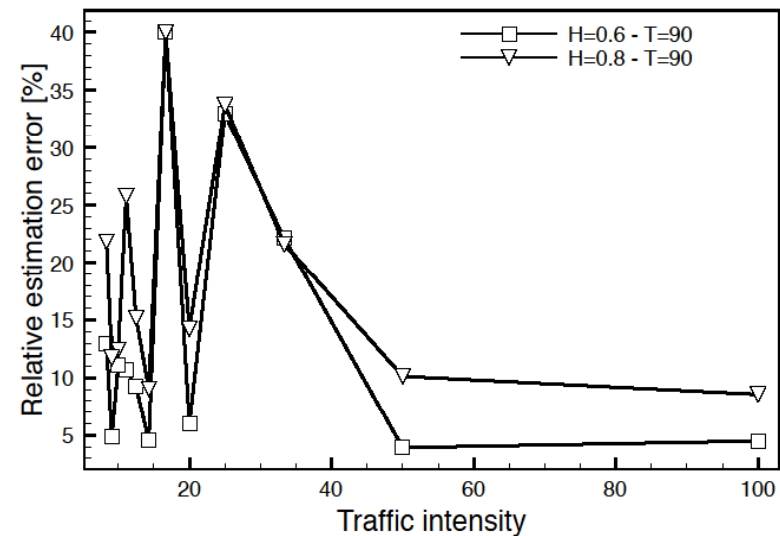
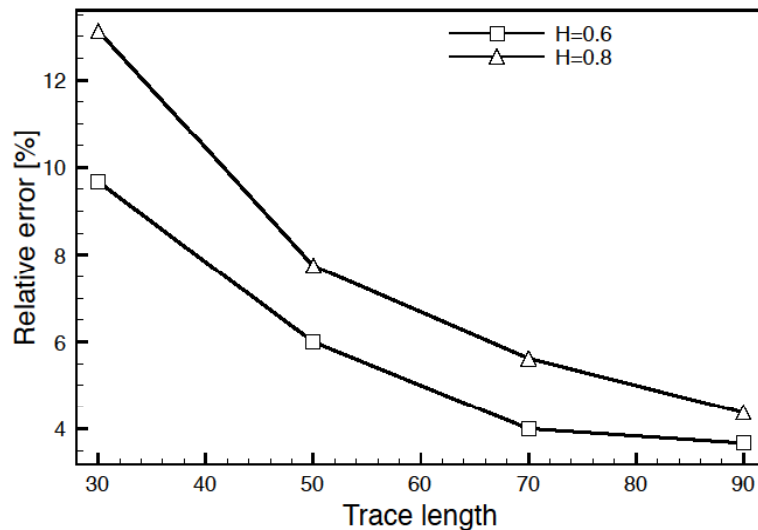
*Il coefficiente di variazione per ogni coppia O-D è uguale a quello di tutte le altre coppie O-D.*

*4 nodi, 12 OD, 7 collegamenti unidirezionali*

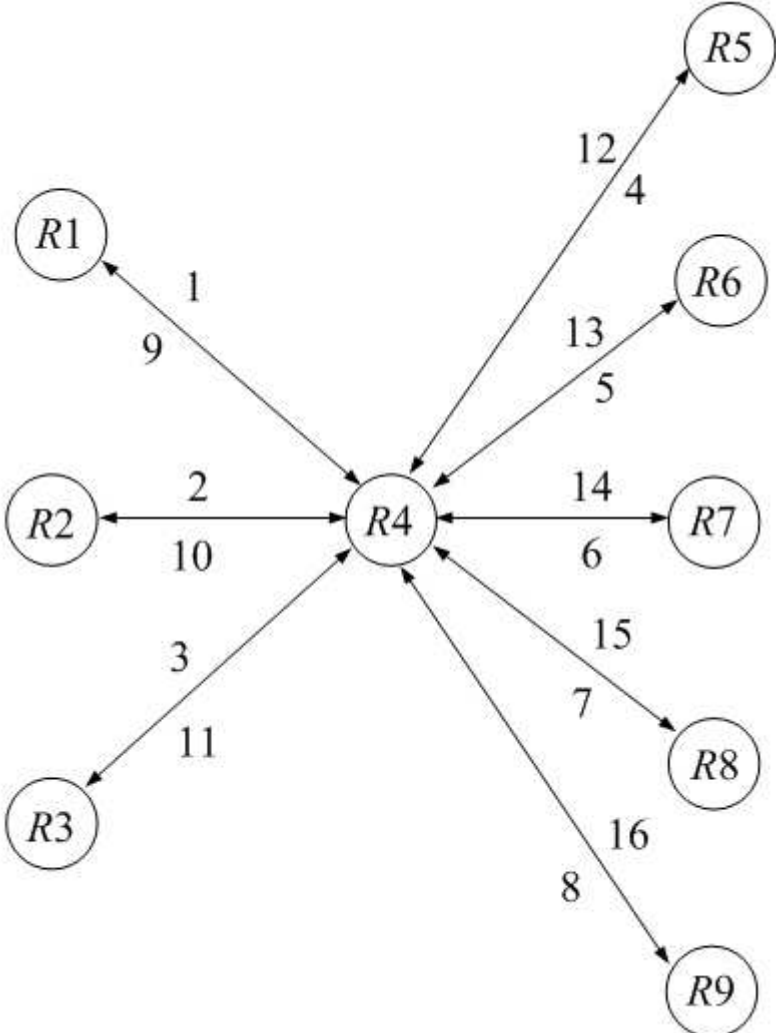


# Simulazione

*L'errore percentuale sulla stima dei parametri ottenuti mediante verosimiglianza su  $Y$  è dell'ordine del 10-15% uniformemente migliore dell'errore relativo alla stima ottenuta mediante verosimiglianza su  $X$  (algoritmo EM) con e senza long memory del traffico O-D.*



*Dati reali (Tiscali)*



## *Dati reali*

*Traffico: byte/minuto*

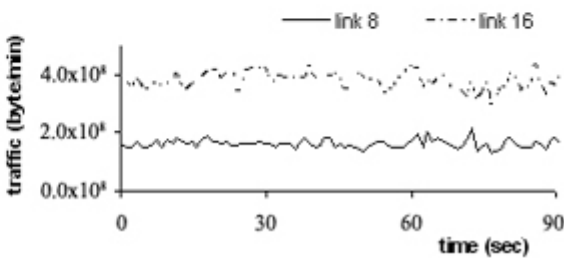
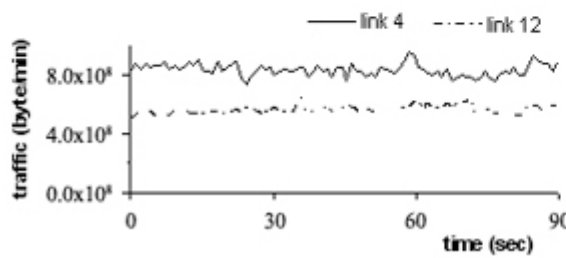
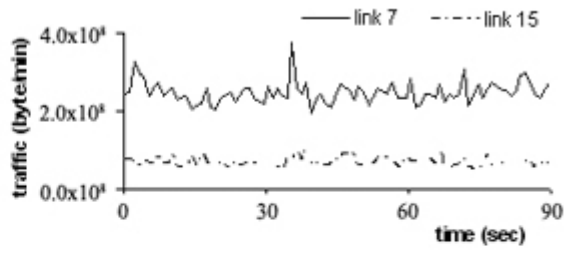
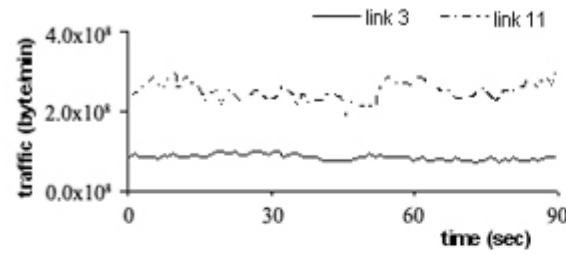
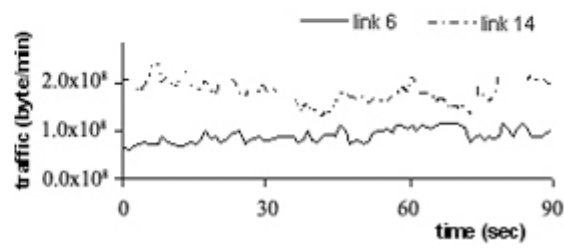
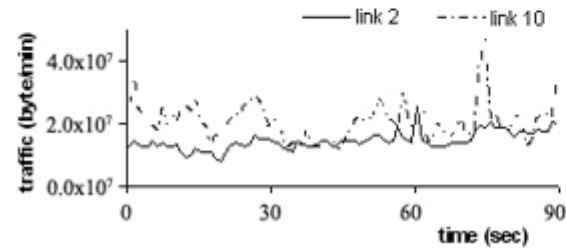
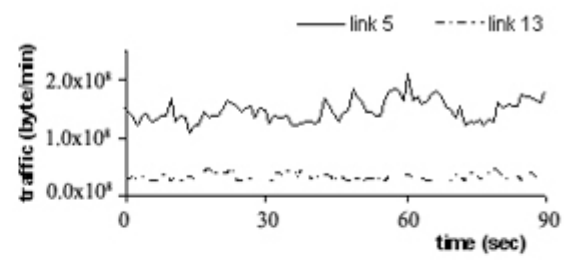
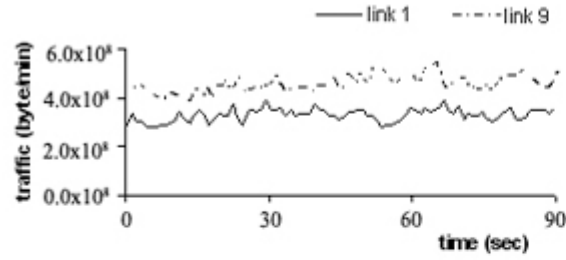
*Verifica assunzioni modello (Juva et al. 2006 rete Funet)*

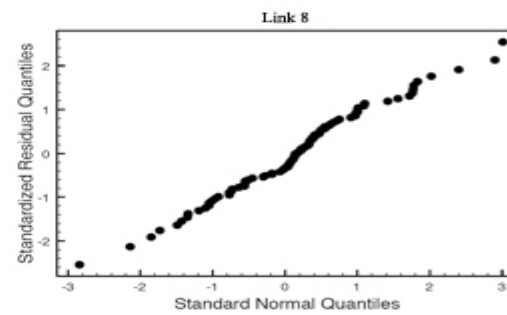
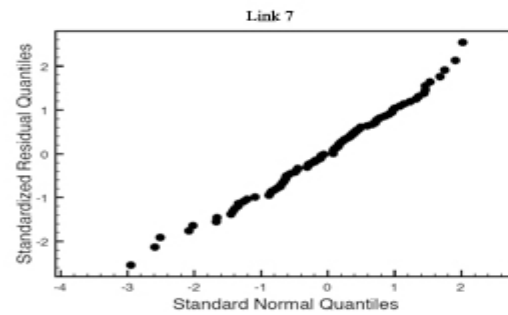
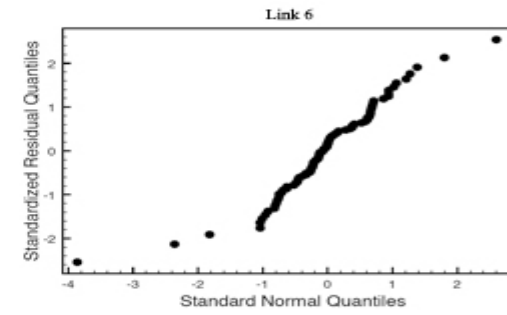
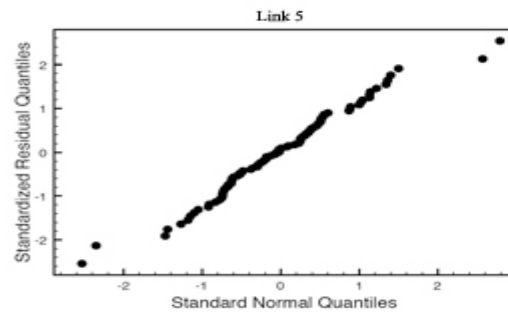
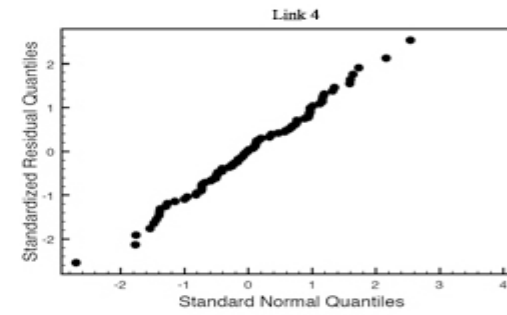
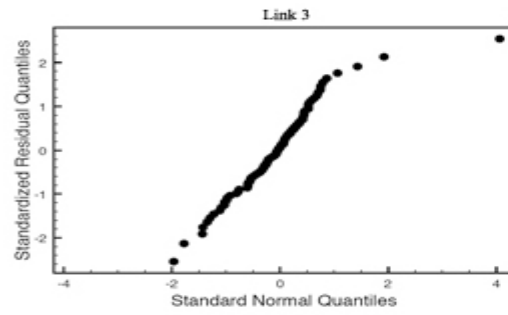
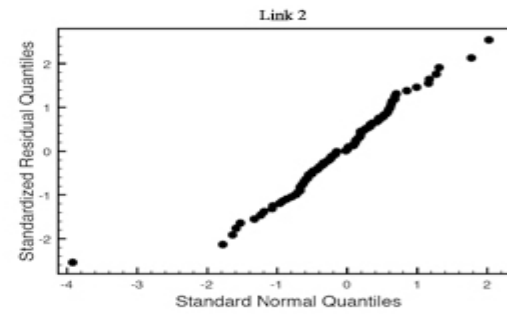
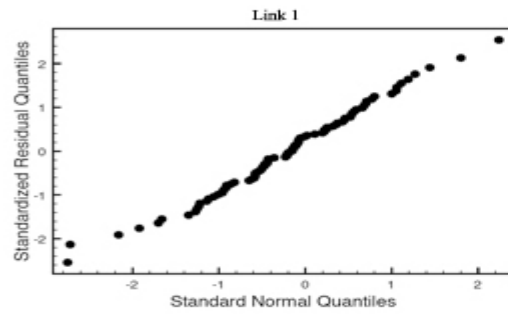
*Processo del traffico O-D*

- Gaussiano*
- Stazionario*
- A memoria lunga*
- O-D indipendenti*
- Relazione media varianza*

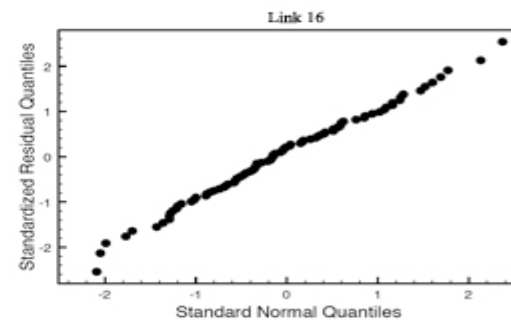
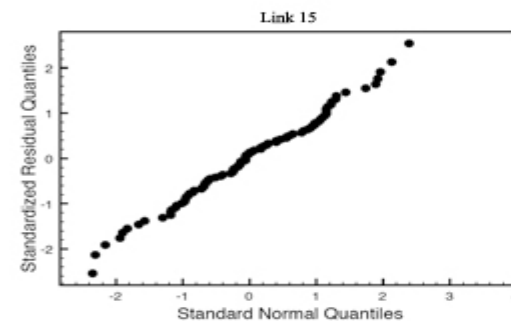
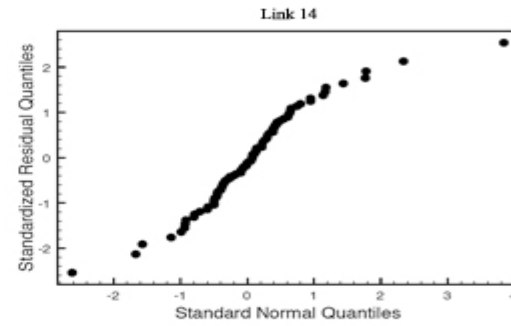
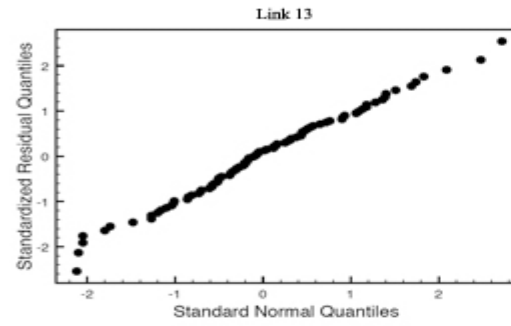
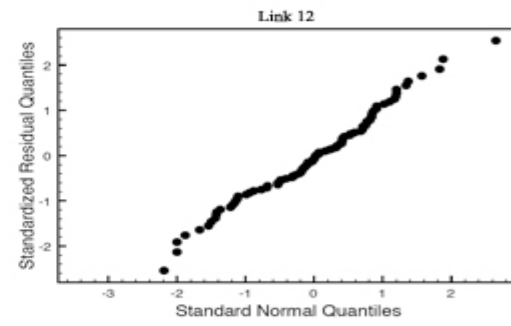
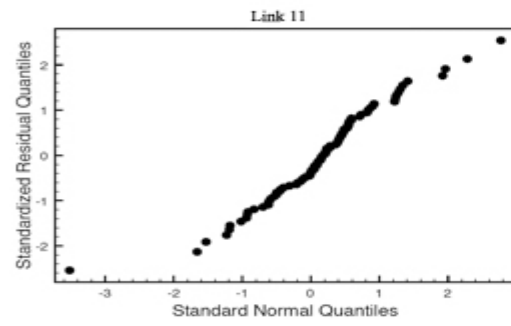
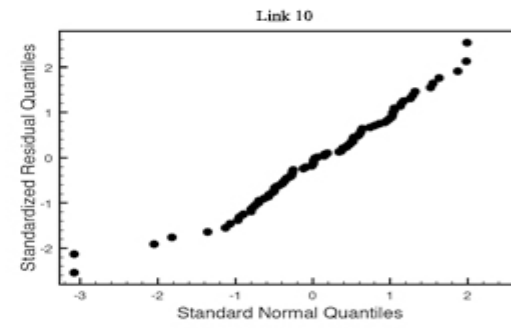
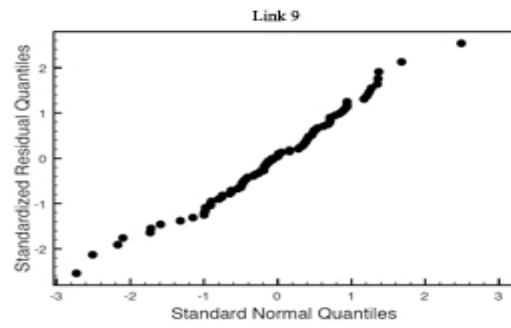
*Strumenti*

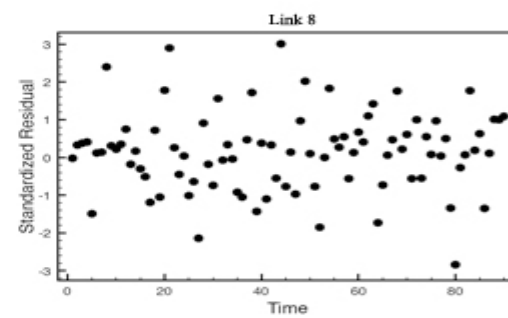
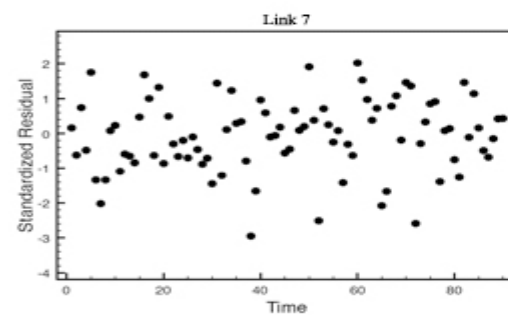
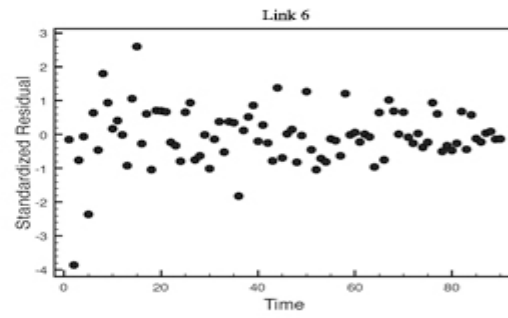
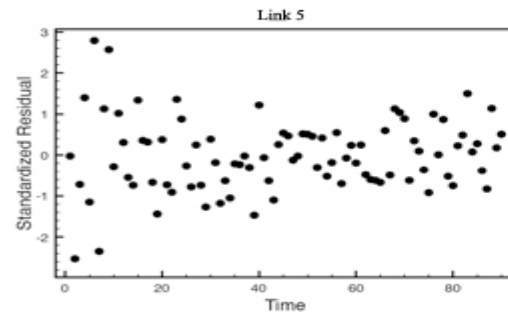
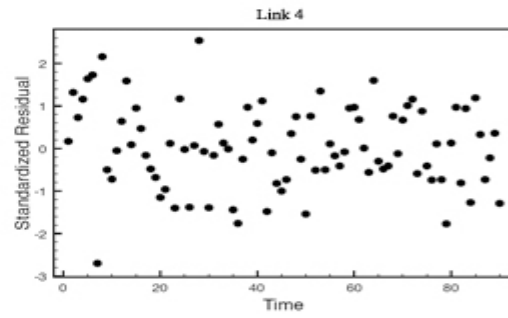
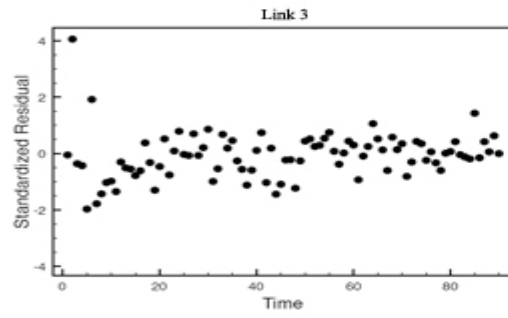
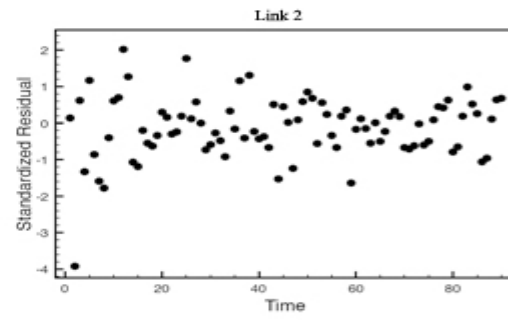
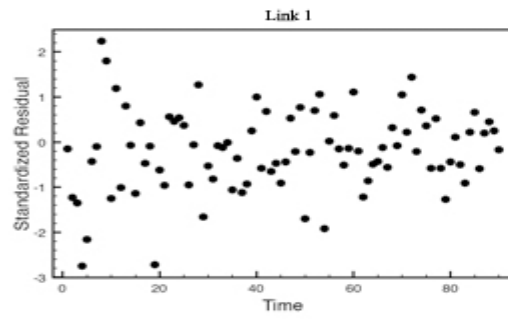
*QQ plot, residui standardizzati, stimatore di Whittle, correlazione traffico  
between O-D, minimi quadrati*

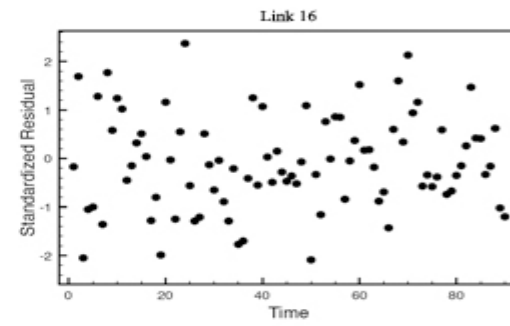
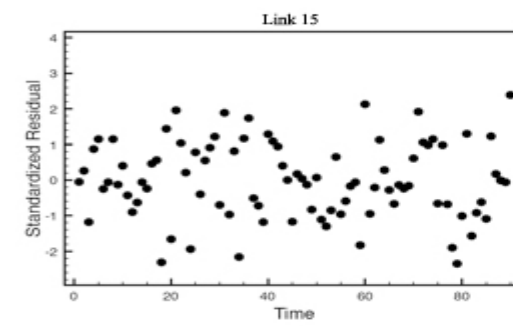
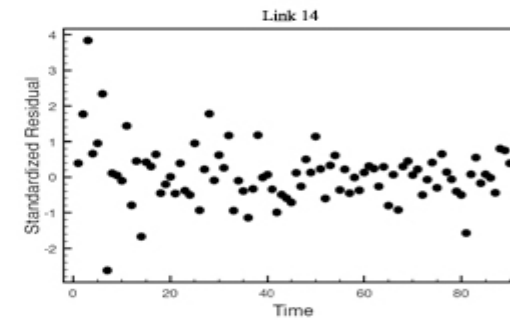
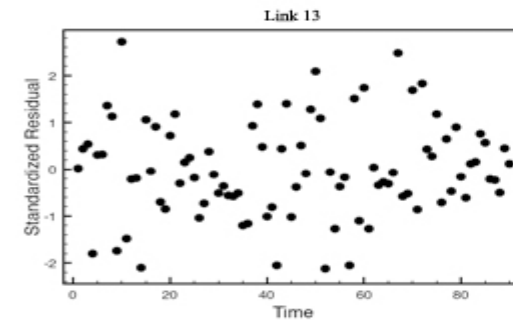
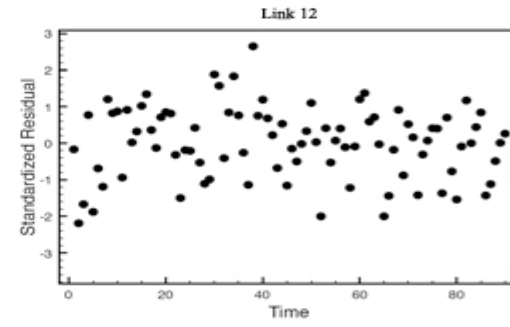
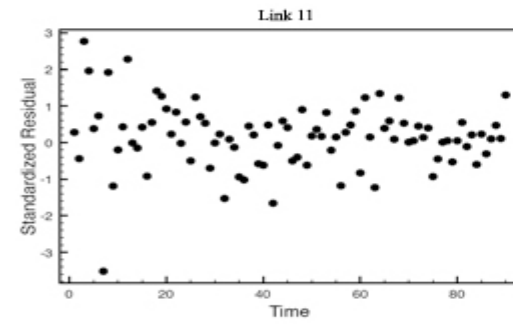
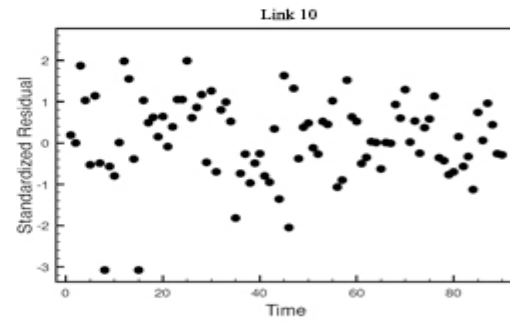
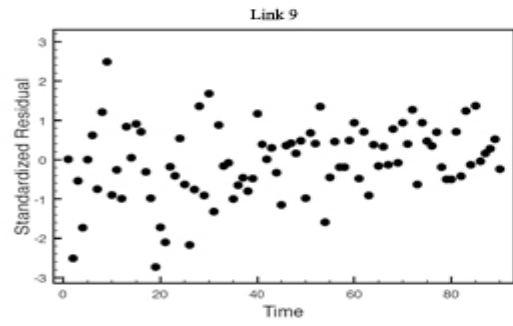


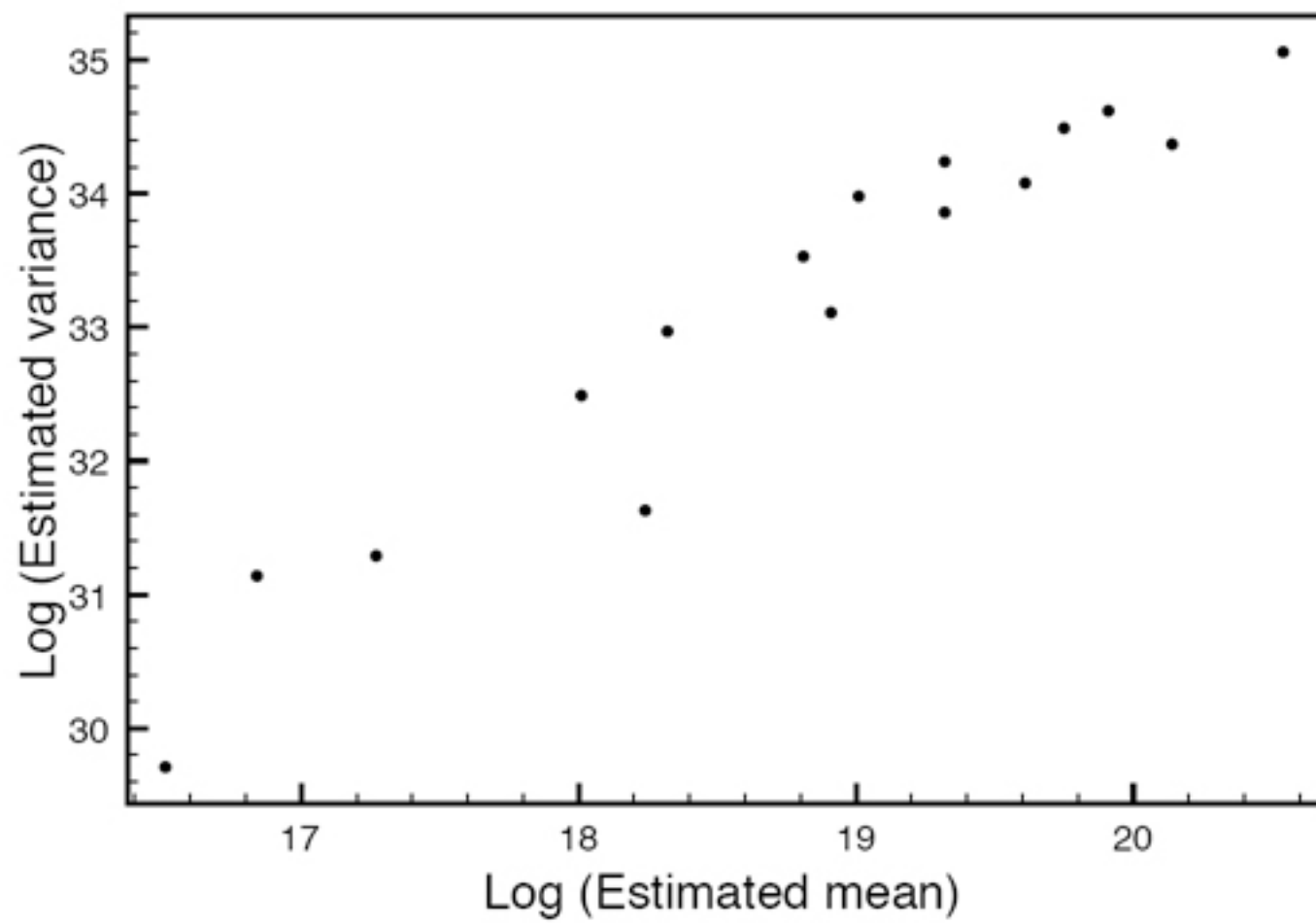




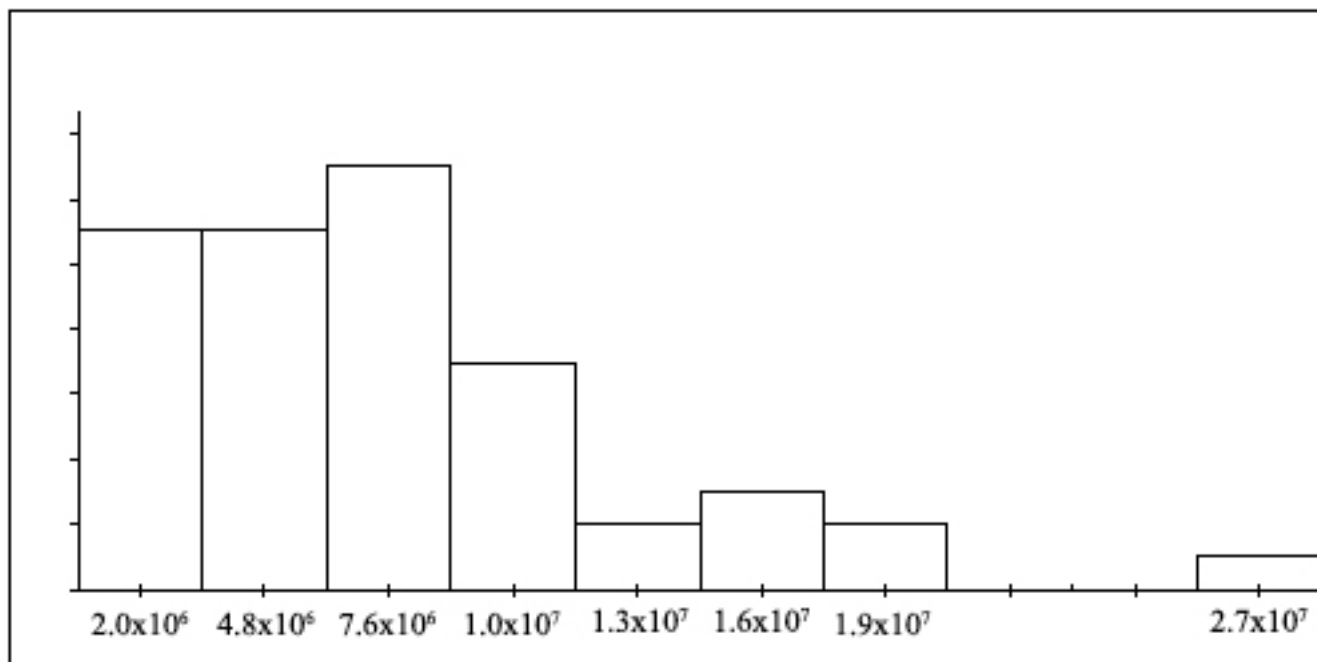








## *Dati reali*



*Stima valori medi del traffico O-D. Il valore di H risulta 0.65*

## Conclusioni

*Conoscenze significative, sia sperimentali che teoriche, sono state prodotte negli ultimi dieci anni sul traffico a pacchetto, mostrando l'inadeguatezza di modelli classici come quello di Poisson*

*Molto lavoro, in primo luogo sperimentale (misure) occorre per mettere a fuoco gli effetti dei protocolli e delle loro interazioni (nuove politiche di instradamento, scheduling dei pacchetti nei buffer, controllo di congestione) e dei nuovi servizi di comunicazione*

*Crescente dispersione nella dimensione degli oggetti, maggiore numero di oggetti per pagina*

*Omogeneità di  $H$  per le diverse O-D*

*Stazionarietà di  $H$  nel tempo*

## *Riferimenti*

- W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson: *On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic*, IEEE Transactions on Networking, Vol. 2, No. 1, 1994.
- V. Paxson, S. Floyd : *Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3, No. 3, 1995.
- Taqqu M., Willinger W., Sherman R. (1997) *Proof of a fundamental result in self similar traffic modeling*. Computer Communications Review, 27, 5-23, 1997.
- W. Willinger, V. Paxson, M.S. Taqqu: *Self-Similarity and Heavy Tails: Structural Modeling of Network Traffic*, in A Practical Guide to heavy tails: statistical techniques and applications, Birkhauser, Boston, 1998.
- R. H. Riedi, M. S. Crouse, V. J. Ribeiro, R. G. Baraniuk: *A Multifractal Wavelet Model with Application to Network Traffic*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 45, No. 3, 1999.
- P. Abry, D. Veitch: *Wavelet analysis of long range dependent traffic*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, n. 1, 1998.
- M.E. Crovella, A. Bestavros: *Explaining World Wide Web traffic self similarity*, ACM Sigmetrics, pp. 166-169, 1996.

## *Riferimenti*

- K. Park and W. Willinger eds.: *Self-similar network traffic and performance evaluation*, John Wiley, 2000.
- Vardi: *Network Tomography: estimating source destination traffic intensities from link count*. Journal of the American Statistical Association, 1996.
- Cao, Davis, Vander, Yu: *Time-Varying Network Tomography: router link data'* Journal of the American Statistical Association, 2000
- Dempster, Laird, Rubin (1977). *Maximum Likelihood from incomplete data via the EM algorithm*. Journal of the Royal Statistical Society Series B, 1997.
- Hosoya (1997). *A limit theory for long range dependence and statistical inference on related models*. The Annals of Statistics, 1997.
- Lindsay : *Composite likelihood methods*. Contemporary mathematics, 1998.
- Conti, De Giovanni, Naldi: *Blind Maximum Likelihood Estimation of Traffic Matrices under Long Range Dependent Traffic*. Computer Networks, 2010.
- Willinger, Taqqu, Sherman, Wilson: *Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level*. IEEE Trans. Netw. 5, 1997.



