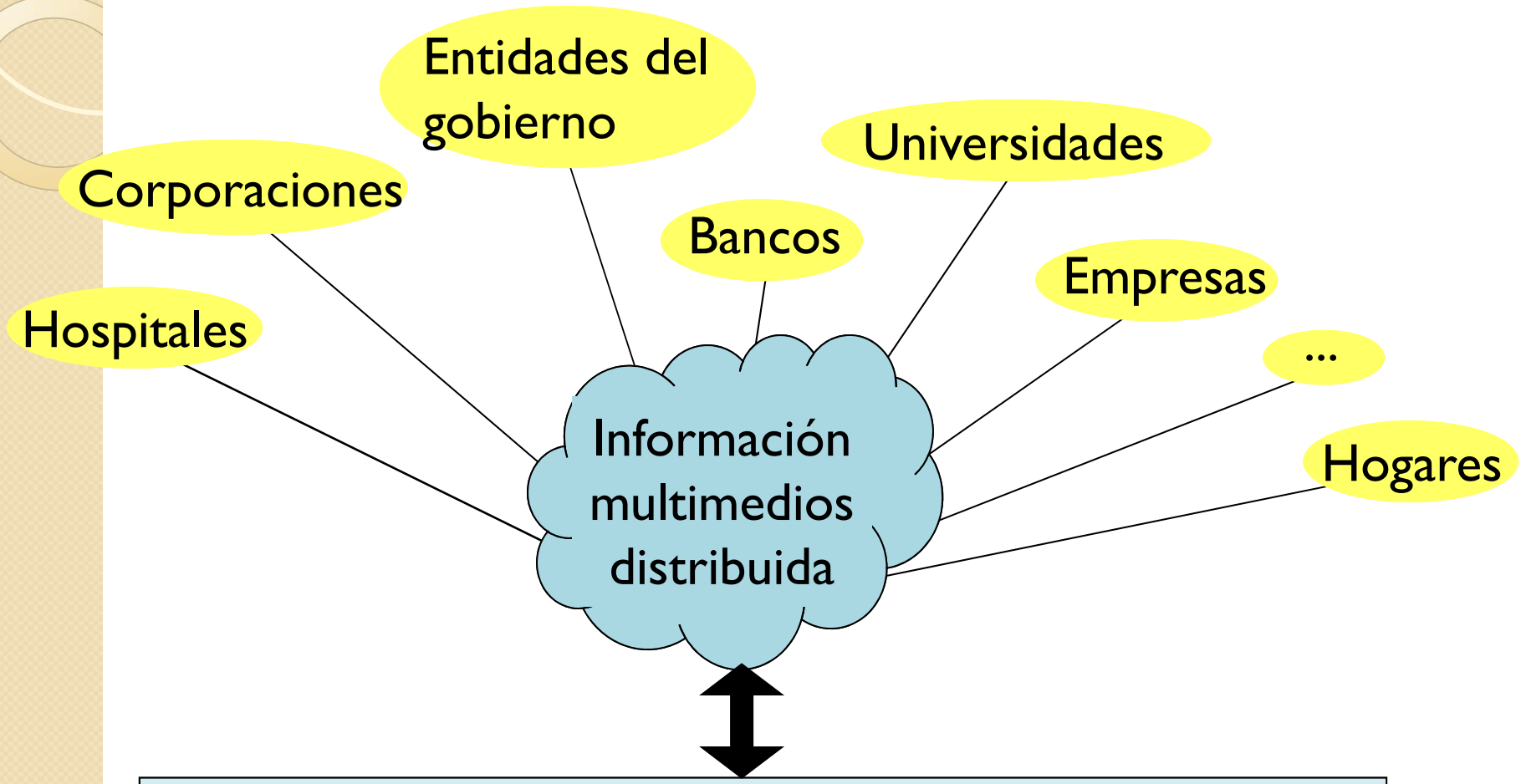
Hacia una Teoría de Internet

Marco Aurelio Alzate Monroy
Universidad Distrital F.J.C.

COLCOM
CONGRESO COLOMBIANO DE COMUNICACIONES IEEE
Popayán - Colombia, Septiembre 25 y 26 de 2008

El papel de las redes de telecomunicaciones



Las redes de comunicaciones proporcionan la infraestructura que transporta los flujos de información entre puntos remotos

Funciones de la red de comunicaciones

Aplicaciones Basadas en Información Multimedios Distribuida

Las tecnologías de redes proporcionan mecanismos para compartir los recursos entre las distintas aplicaciones

Recursos de Transmisión de Bits

Tecnologías de Servicios de Información

Interfaces de usuario, transductores, servidores, navegadores, generación y reproducción de señales multimedios, almacenamiento, ...

- Conmutación
- Señalización
- Multiplexación
- Enrutamiento

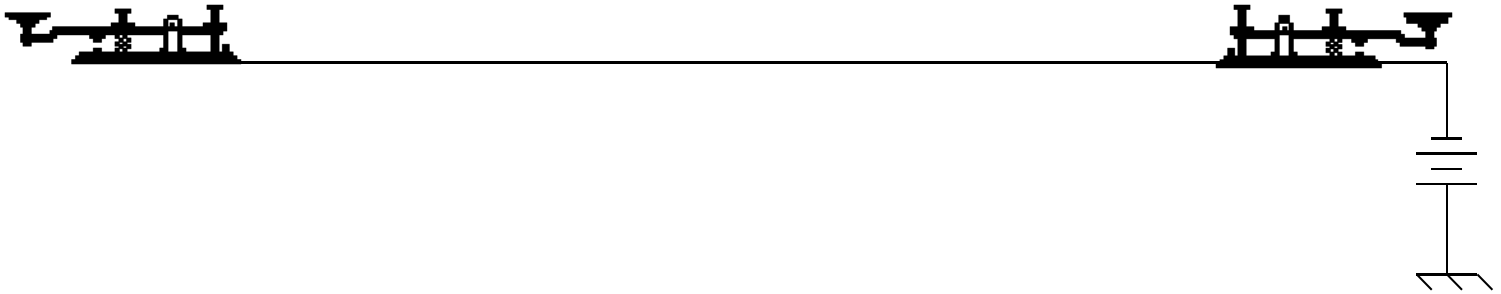
Tecnologías de Transmisión

WDM, SDH, xDSL, Cable, Satélite, medios inalámbricos fijos o móviles, ...

Tecnologías de las redes de comunicaciones

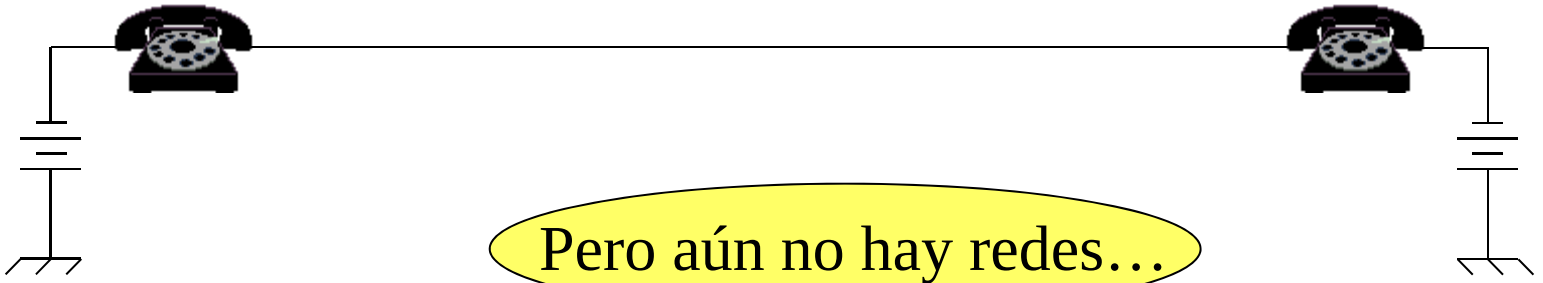
A lo largo de la historia, las cuatro funciones básicas han encontrado solución de acuerdo con “la última tecnología” de cada época:

1837: El telégrafo

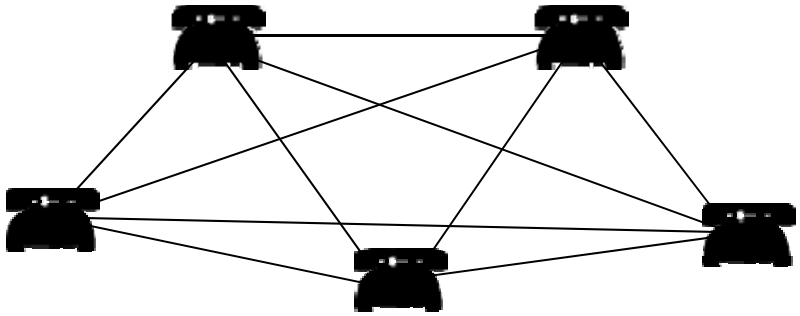


Si se pueden transmitir pulsos, ¿porqué no otras señales?

1876: El teléfono

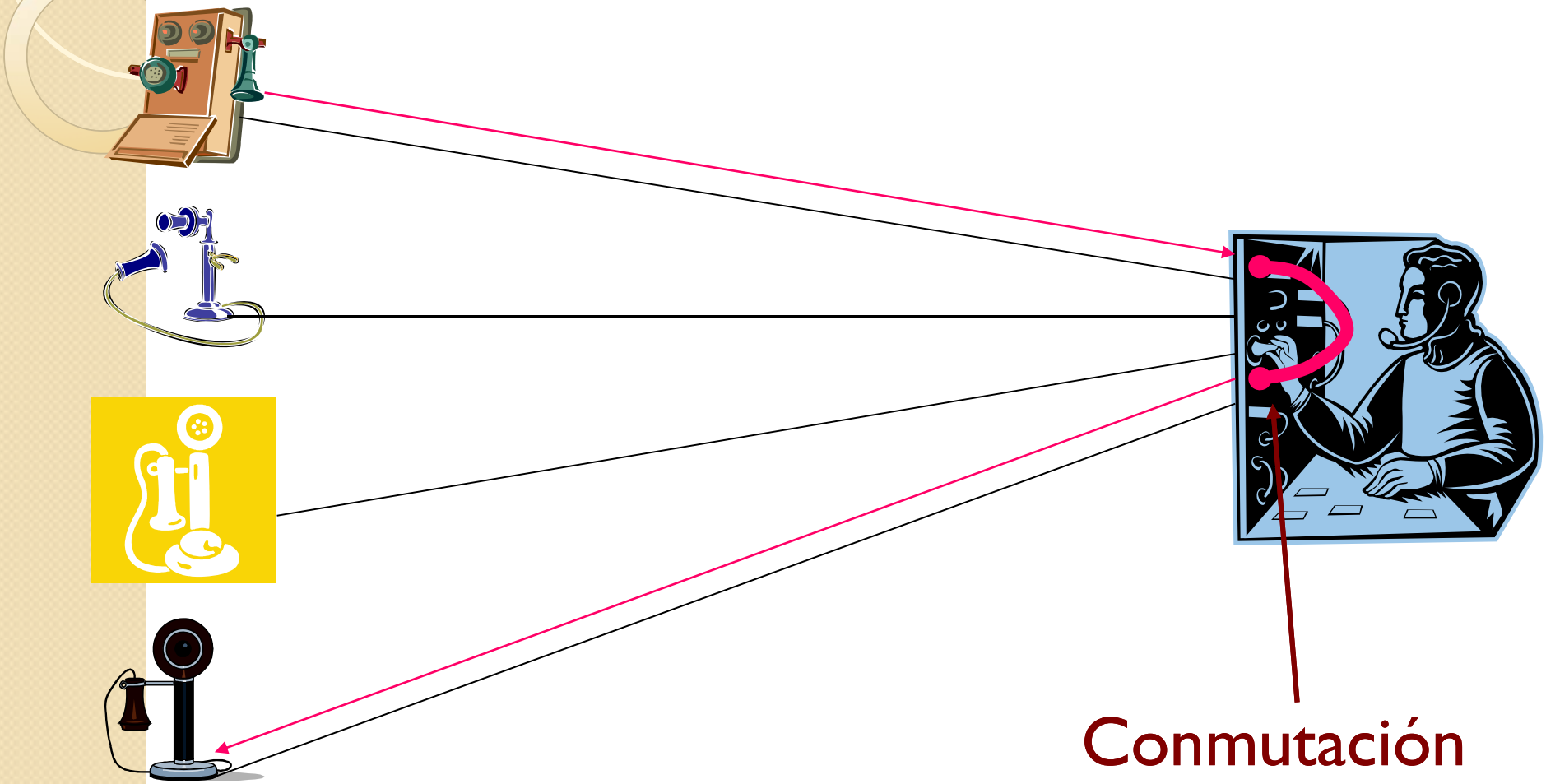


Proporcionar conectividad



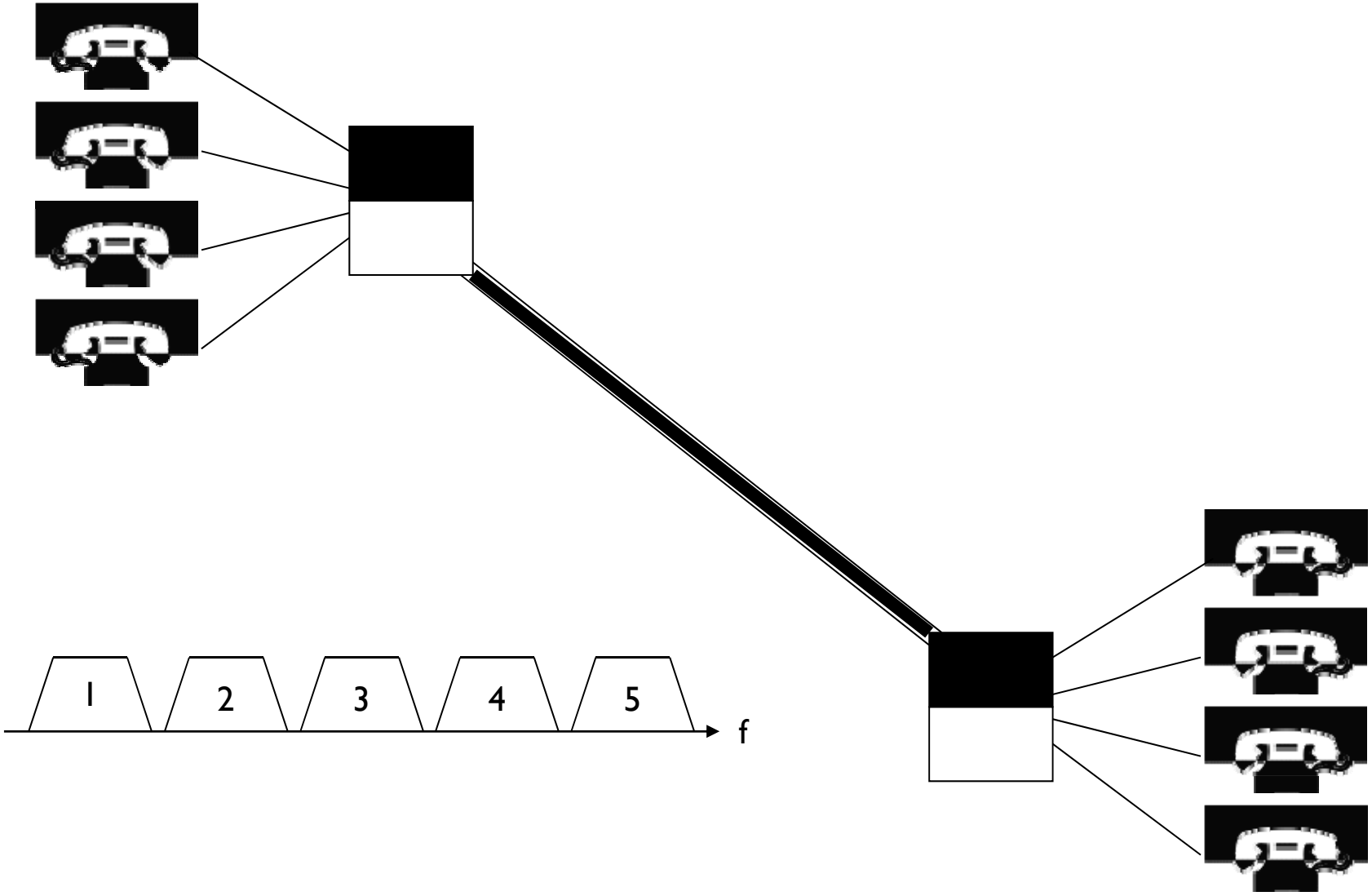
Número de puntos, n	Número de enlaces, $\frac{n(n-1)}{2}$
5	10
10	45
100	4.950
1000	499.500
10000	49'995.000

Primera función : Conmutación

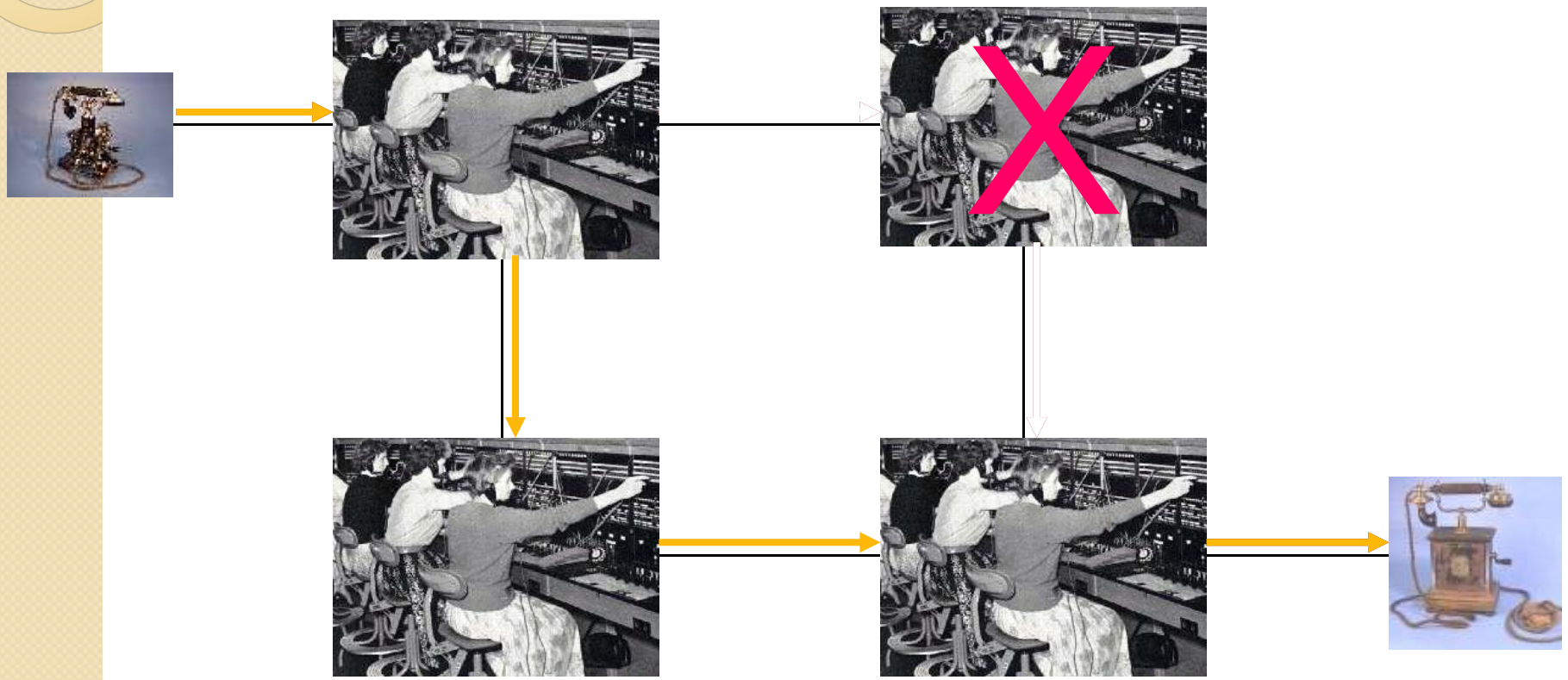


+ Segunda Función: Señalización…

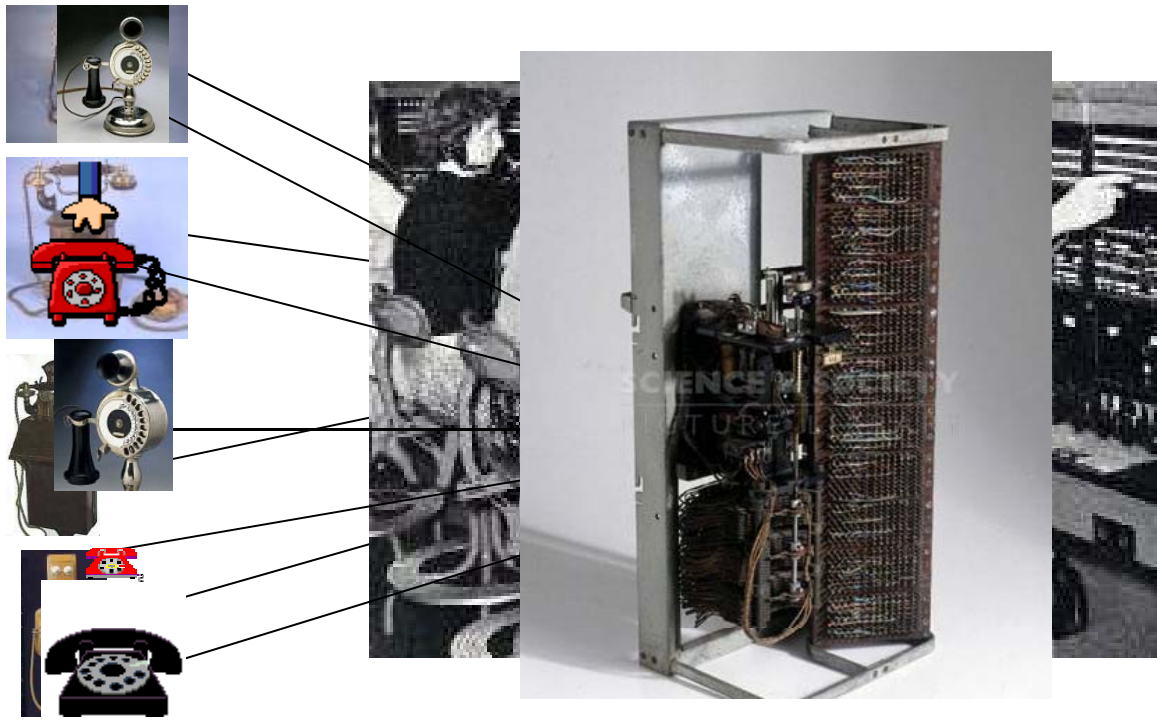
Tercera función : Multiplexación



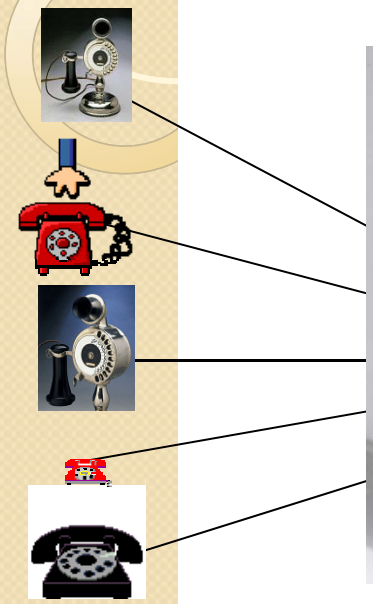
Cuarta función : Enrutamiento



Conmutación automática



De 1905 a 1980

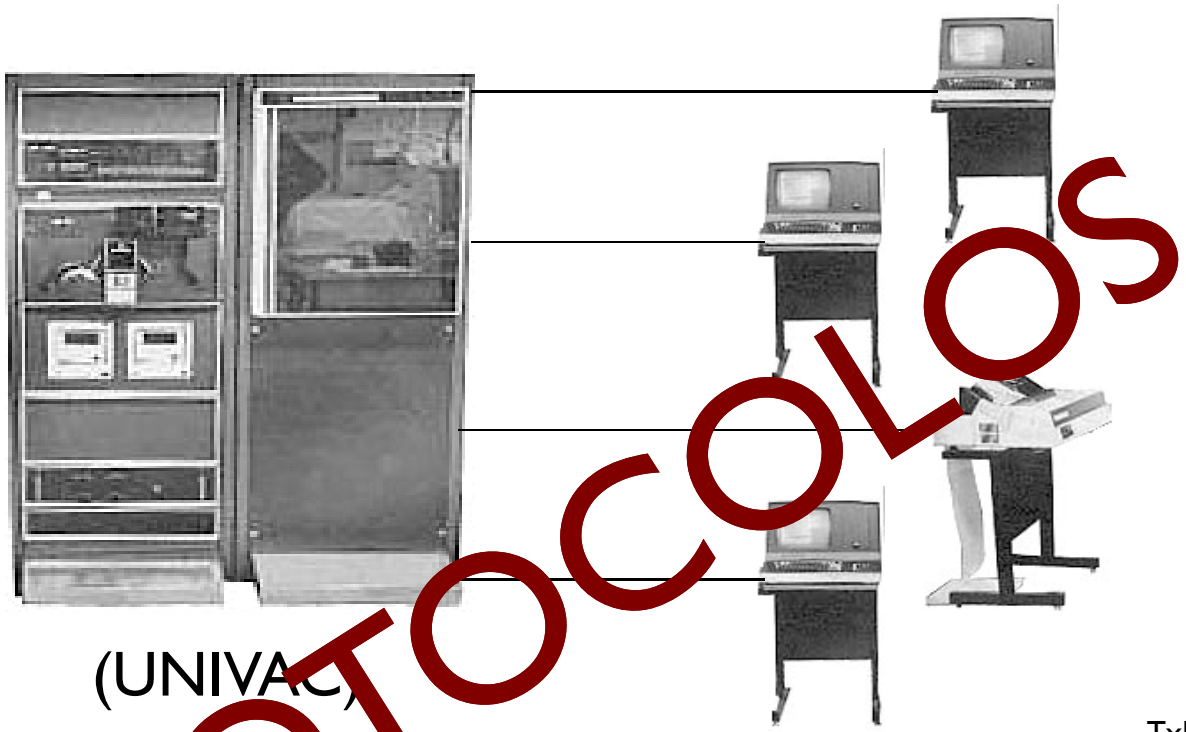


- Conmutación electromecánica
- Circuitos Físicos
- Señalización E&M con el usuario y entre centrales
- Enrutamiento jerárquico

- Conmutación digital (Control por Programa Almacenado (SPC))
- Canales TDM (codificación PCM)
- Señalización DTMF con el usuario y CAS entre centrales
- Enrutamiento alterno

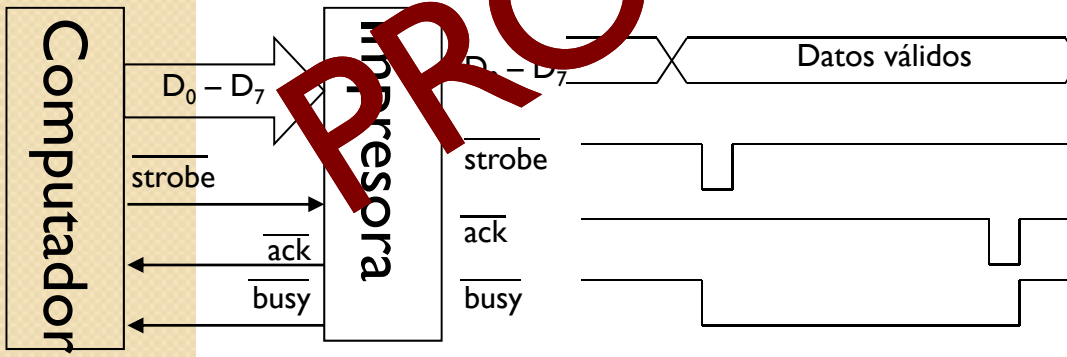
…Esencialmente la misma funcionalidad!

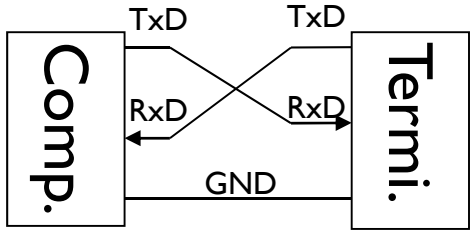
Transmisión de datos

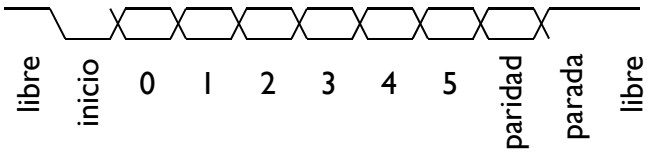


(UNIVAC)

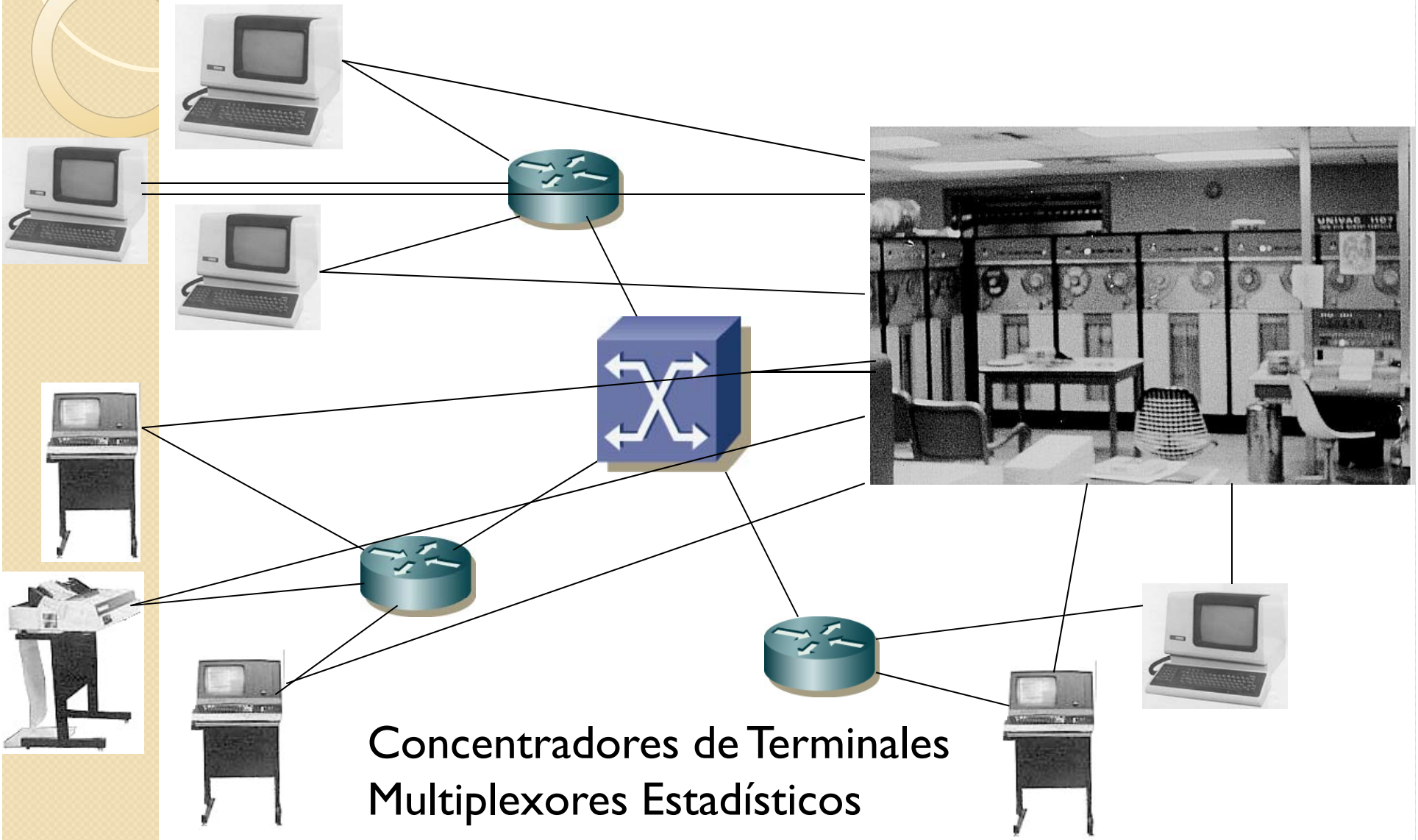
PROTOCOLOS





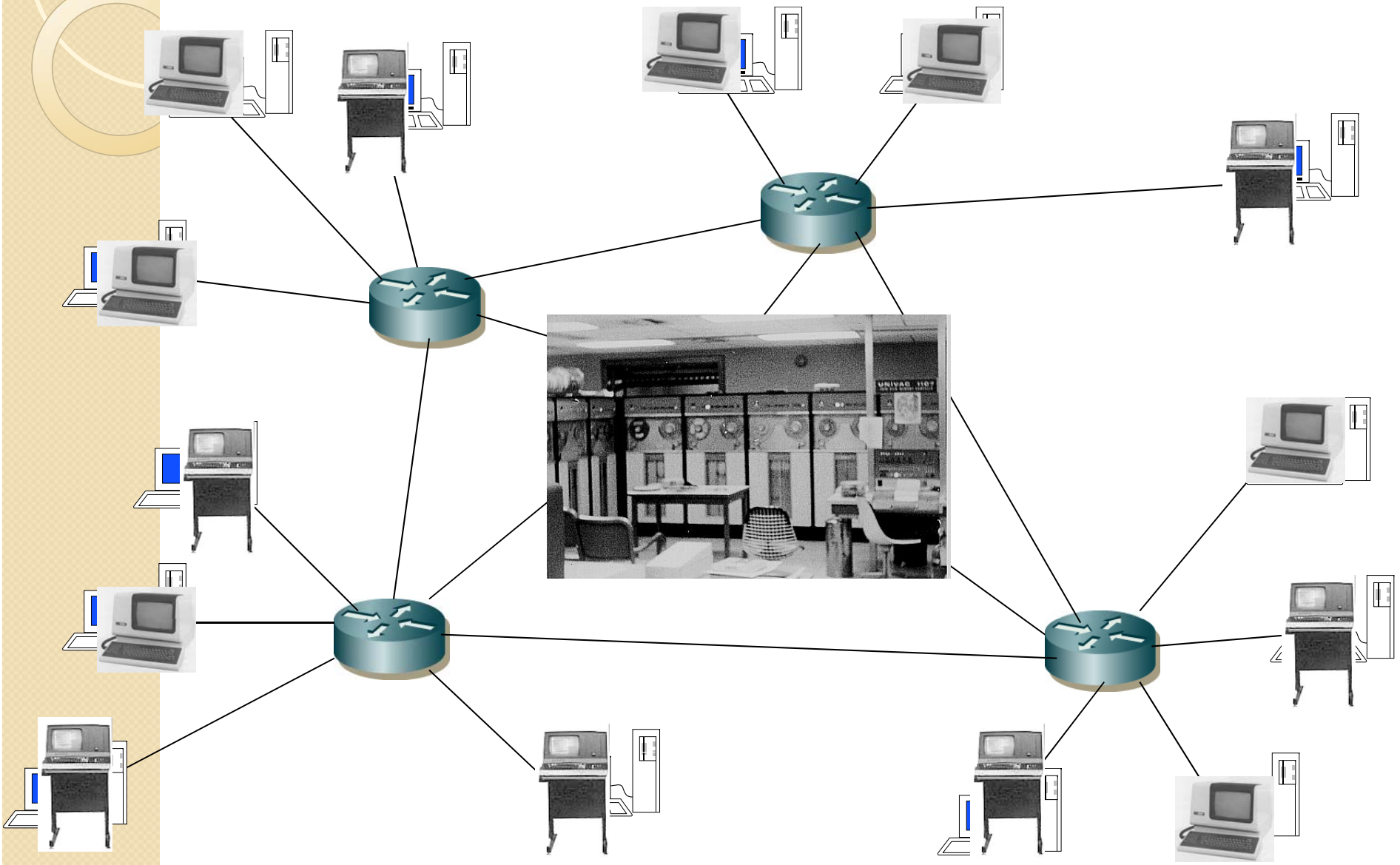


Procesadores de comunicaciones



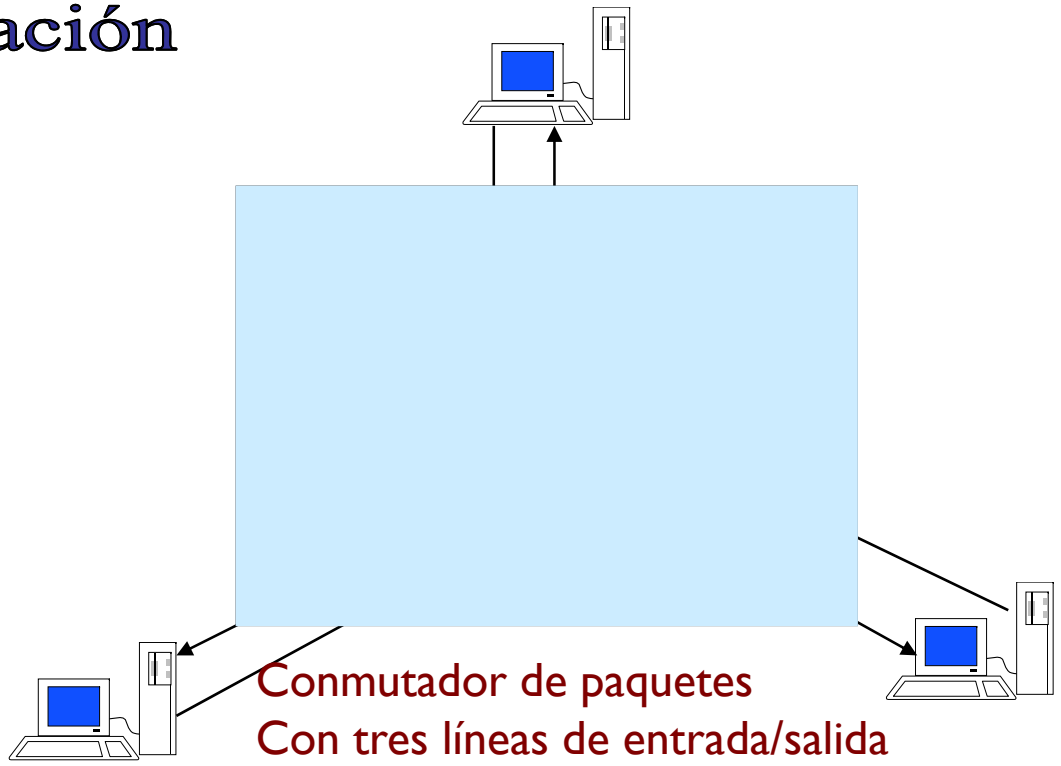
Concentradores de Terminales
Multiplexores Estadísticos

La inteligencia a la periferia



Otra vez, cuatro funciones

1. Conmutación

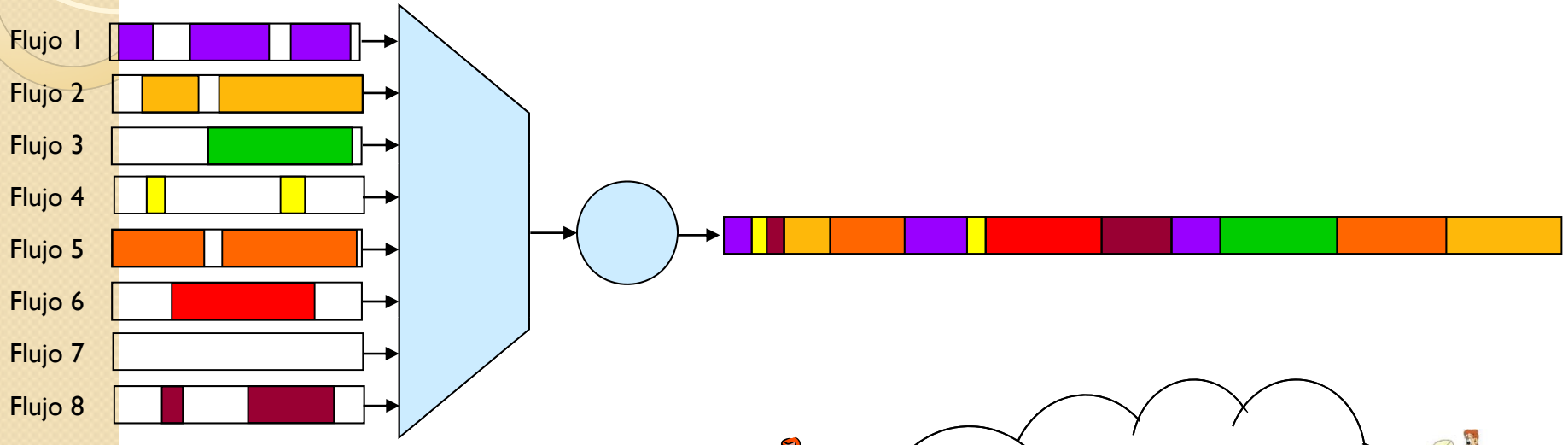


2. Señalización

Encabezado de Control	Mensaje de Usuario

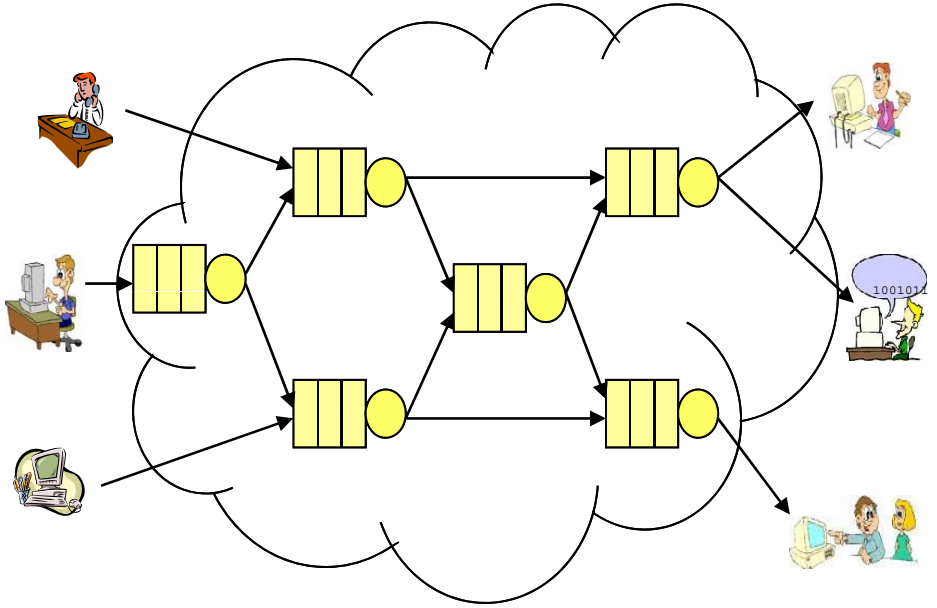
Otra vez, cuatro funciones

3. Multiplexación



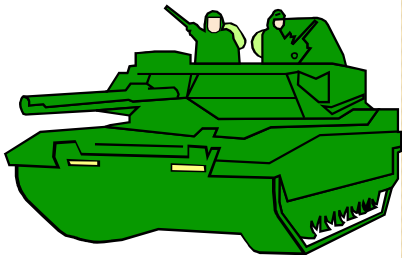
4. Enrutamiento

- Datagramas
- Circuitos virtuales



Grandes redes conmutadas

ARPA – Advanced Research Project Agency
Department of Defense



Arpanet

- Objetivo fundamental : Desarrollar una técnica efectiva para la utilización de las redes existentes interconectadas
- Siete objetivos secundarios (J. McQuillan and D. Walden, "The ARPA Network Design Decisions", Comp. Nets., Vol. 1, No. 5, August 1977, pp. 243-289.), **por orden de importancia**:
  - Los servicios de comunicación no deben suspenderse aún ante fallas en nodos o subredes aisladas
  - Debe soportar múltiples clases de servicios de comunicación
  - Debe permitir la inclusión de una gran variedad de redes
  - Debe permitir la administración distribuida de los recursos
  - Debe ser eficiente
  - Debe permitir la interconexión fácil de nuevos computadores
  - Debe permitir la contabilidad de la utilización de los recursos

⇒ IP

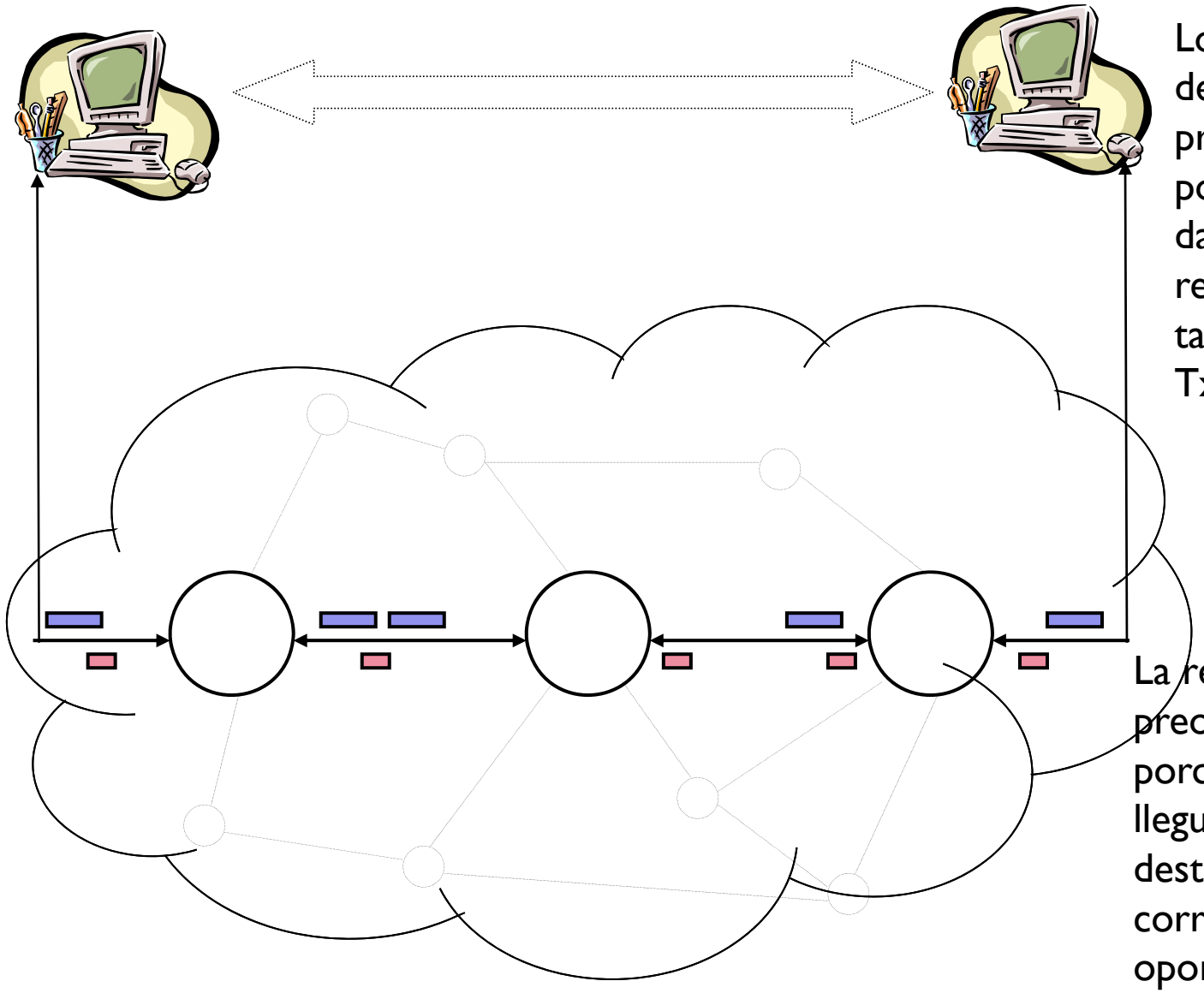
Redes Públicas de Tx de Datos

Simplemente, una permutación de prioridades:

- Debe permitir la administración distribuida de los recursos
- Debe permitir la contabilidad de la utilización de los recursos
- Debe permitir la inclusión de una gran variedad de redes
- Debe permitir la administración distribuida de los recursos
- Debe ser eficiente
- Debe soportar múltiples clases de servicios de comunicación
- Debe permitir la interconexión fácil de nuevos computadores
- Los servicios de comunicación no deben suspenderse aún ante fallas en nodos o subredes aisladas

⟹ X.25

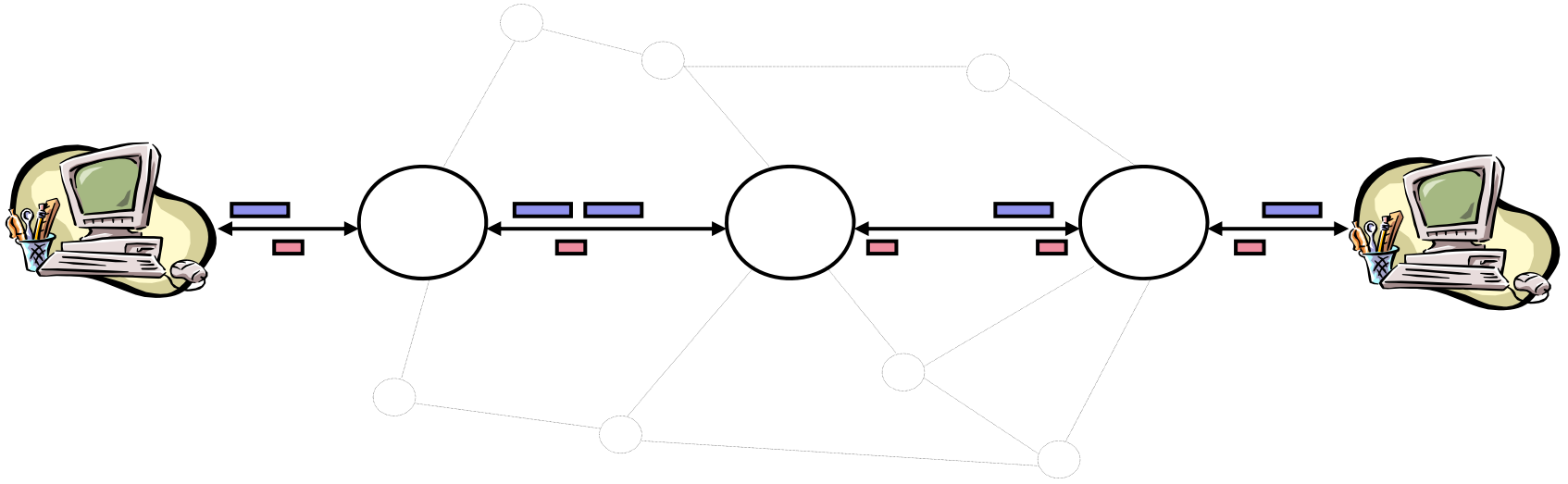
Diferenciación de funciones

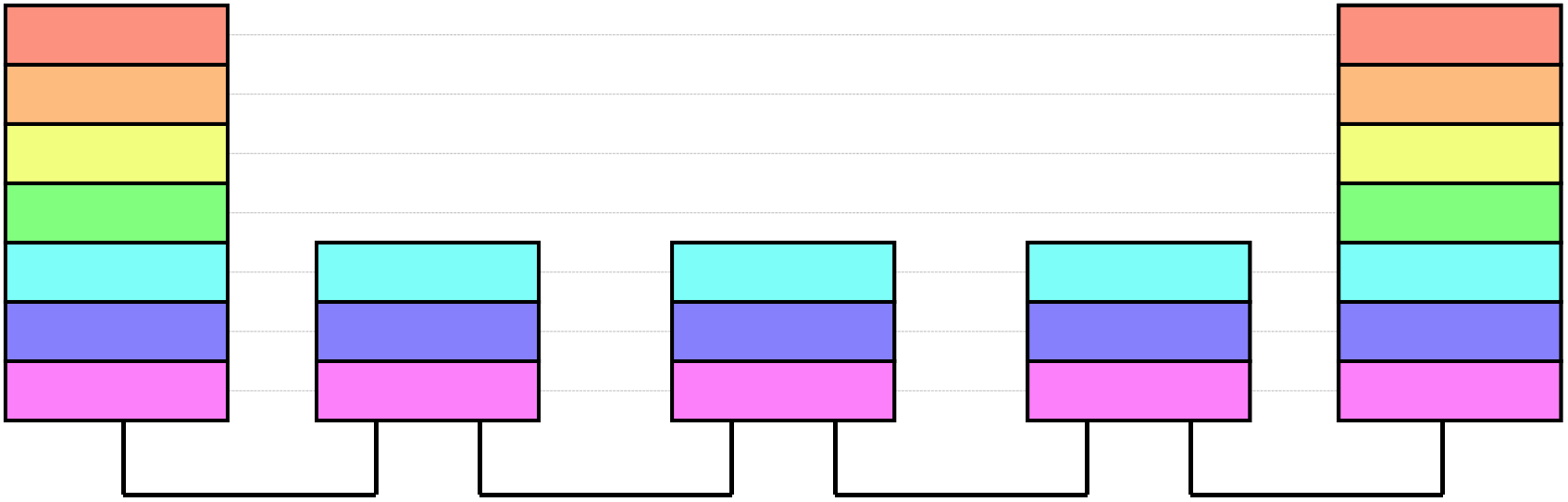


Los usuarios se deben preocupar porque los datos sean reconocibles tanto para el Tx como el Rx

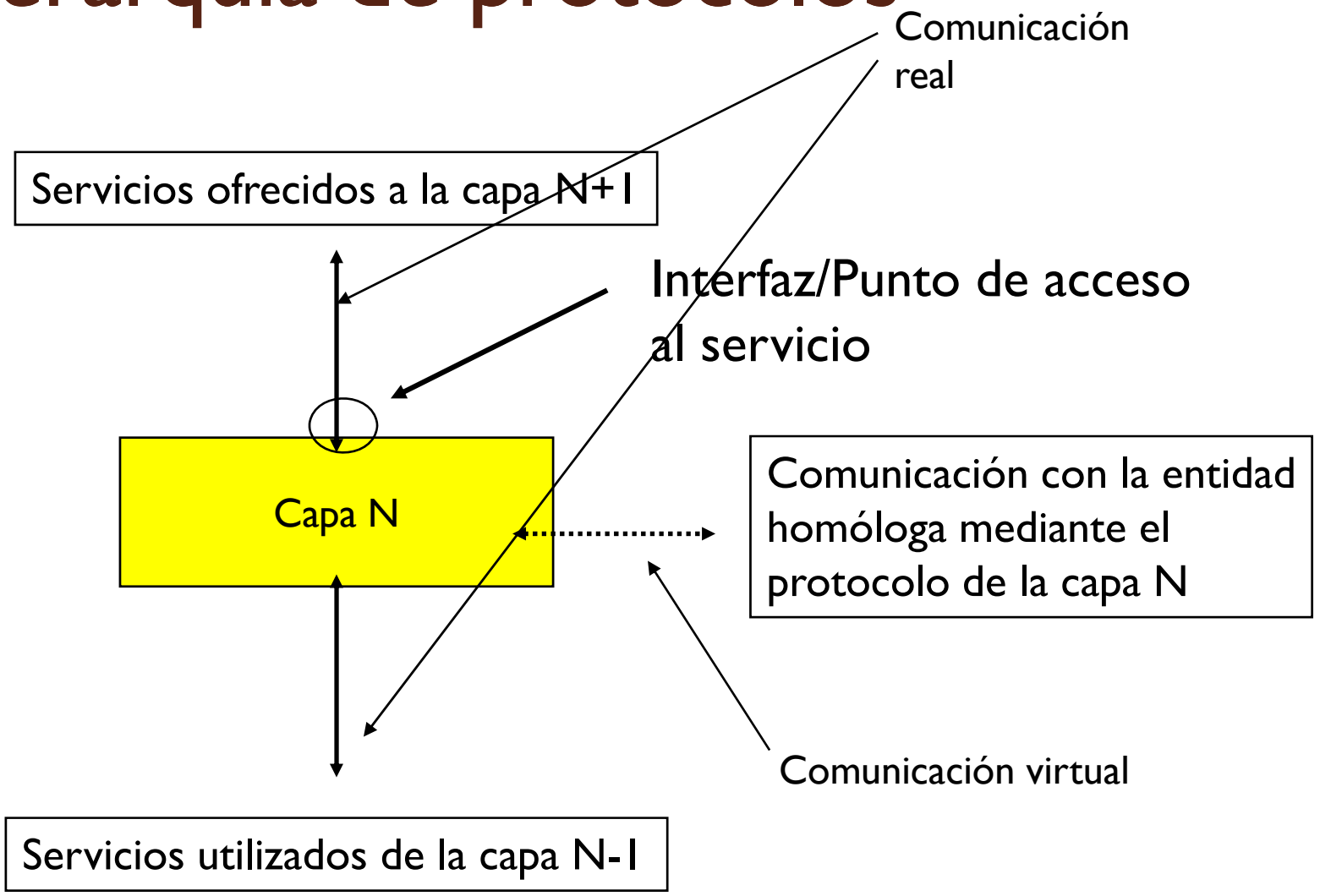
La red se debe preocupar porque los datos lleguen a su destino en forma correcta y oportuna

Arquitecturas de redes

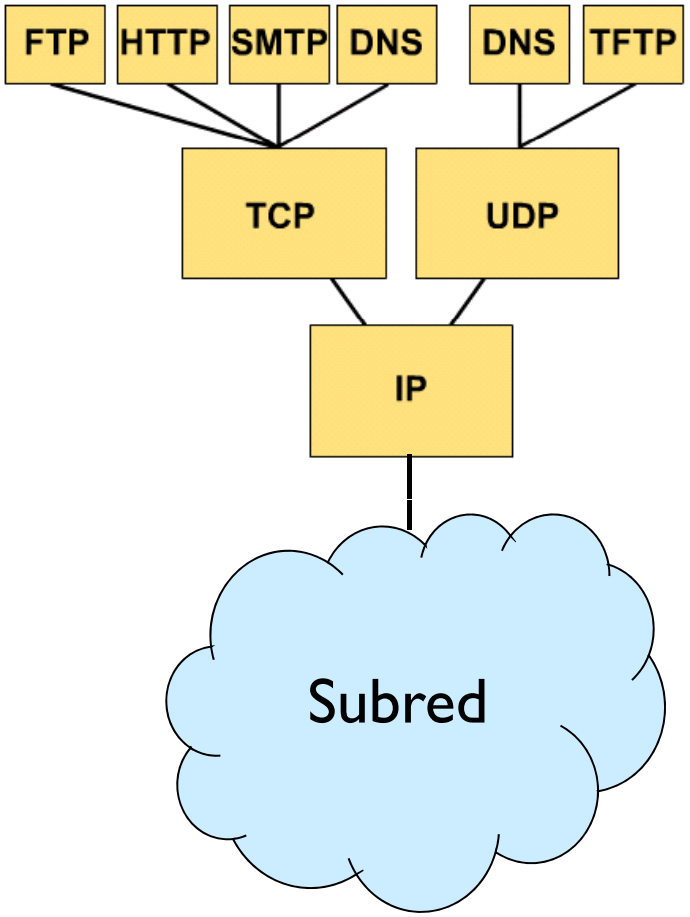




Jerarquía de protocolos

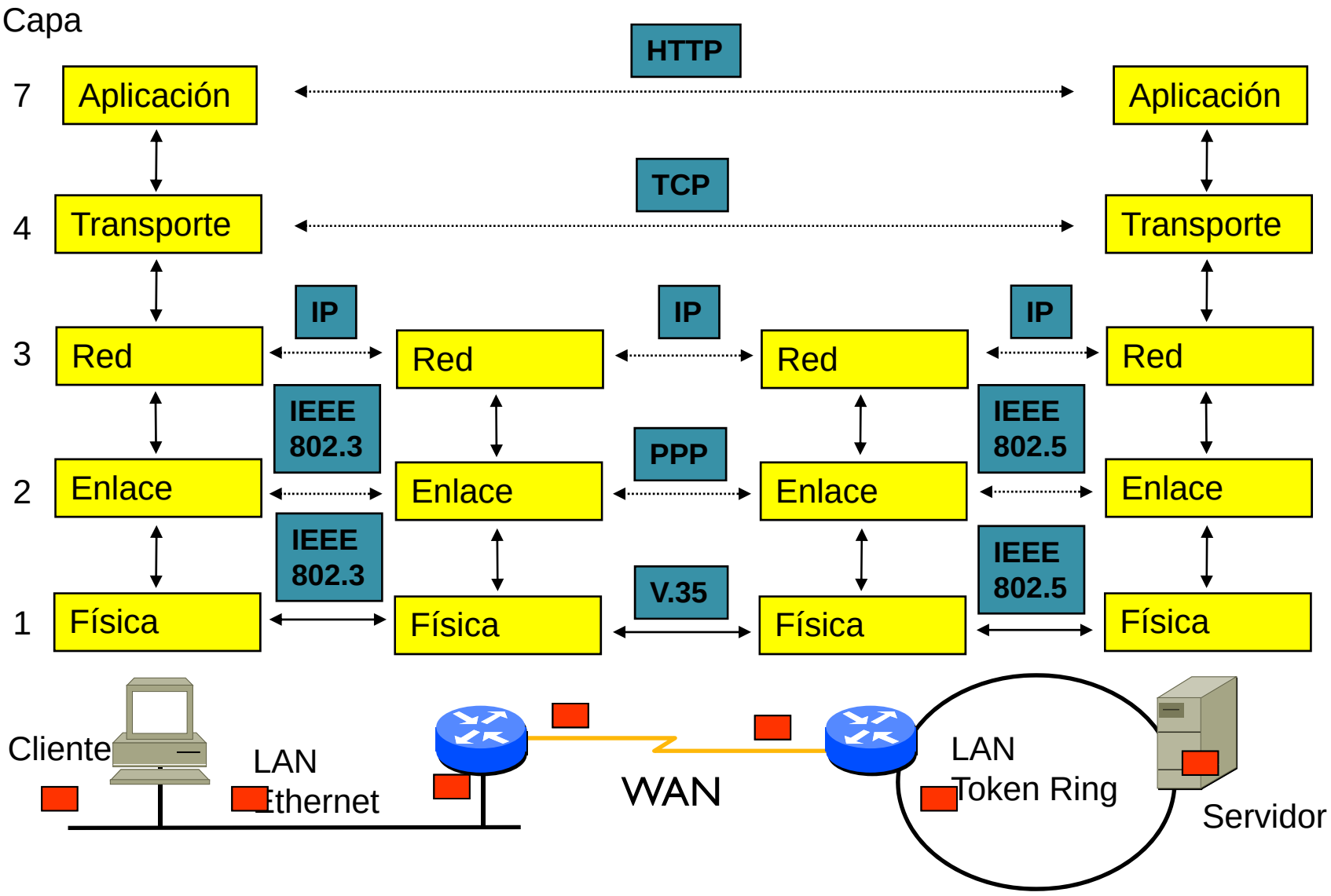


TCP/IP

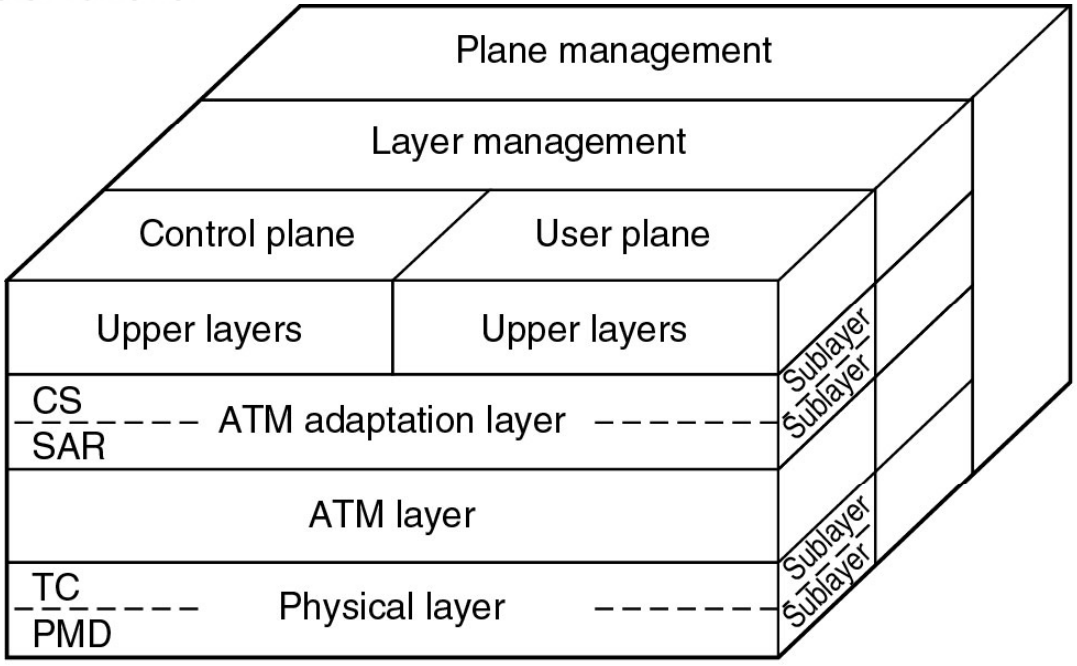

FTP
HTTP
SMTP
DNS
DNS
TFTP
TCP
UDP
IP
Subred

Aplicación
Transporte
Internet
Acceso a la red

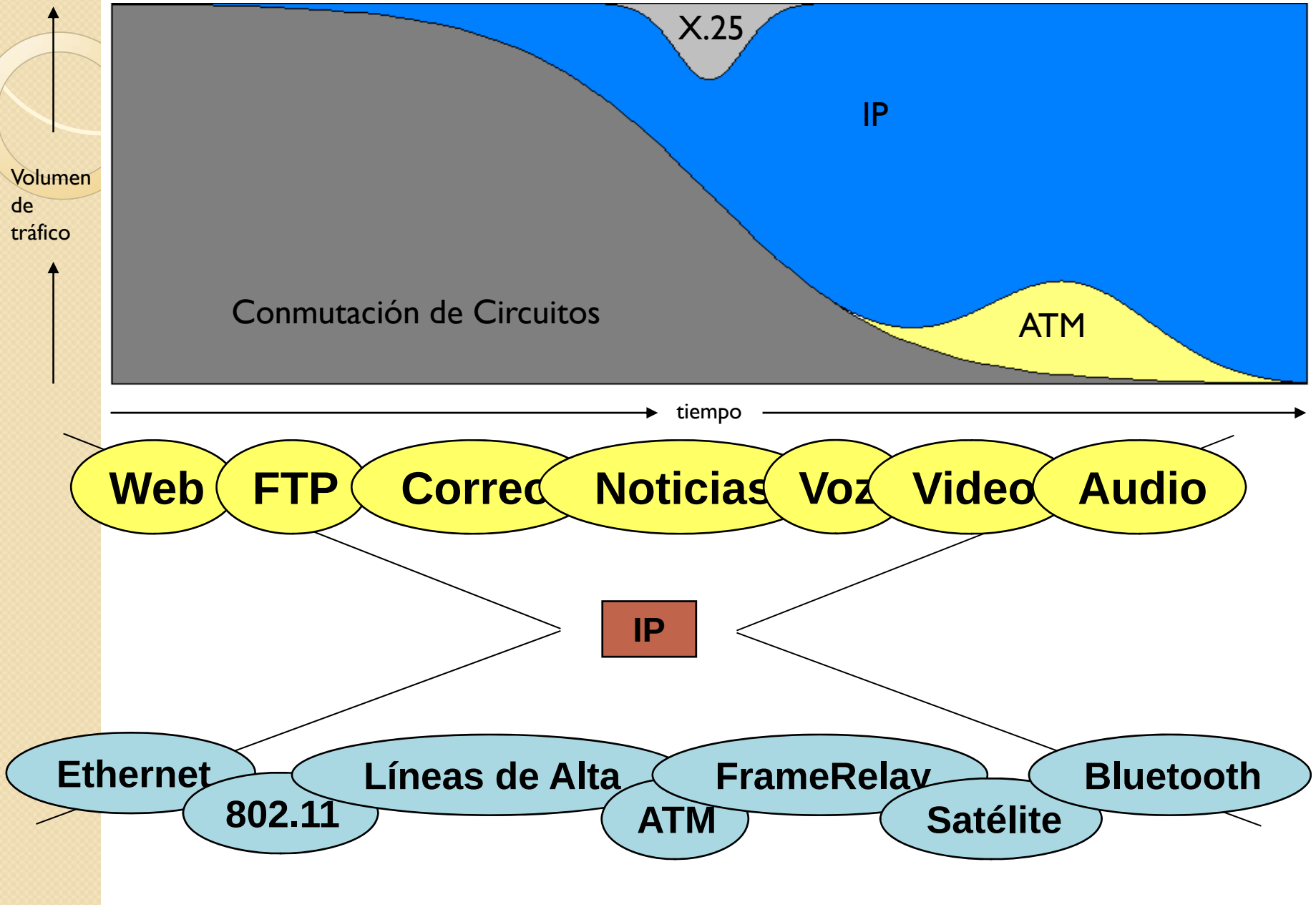
Ejemplo


Capa
HTTP
7
Aplicación
Aplicación
TCP
4
Transporte
Transporte
IP
IP
IP
3
Red
Red
Red
Red
IEEE 802.3
PPP
IEEE 802.5
2
Enlace
Enlace
Enlace
Enlace
IEEE 802.3
V.35
IEEE 802.5
1
Física
Física
Física
Física
Cliente
LAN Ethernet
WAN
LAN Token Ring
Servidor

Arquitecturas de red



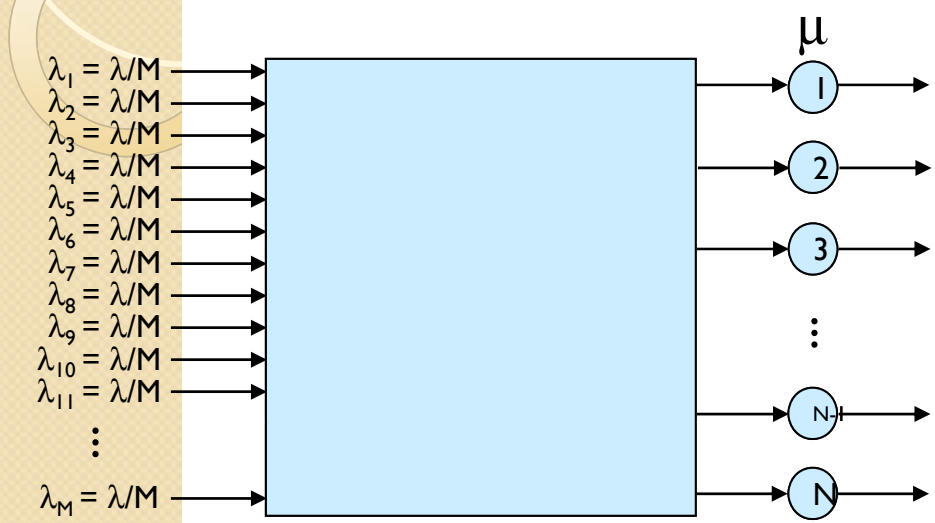
Robustez de IP →Internet

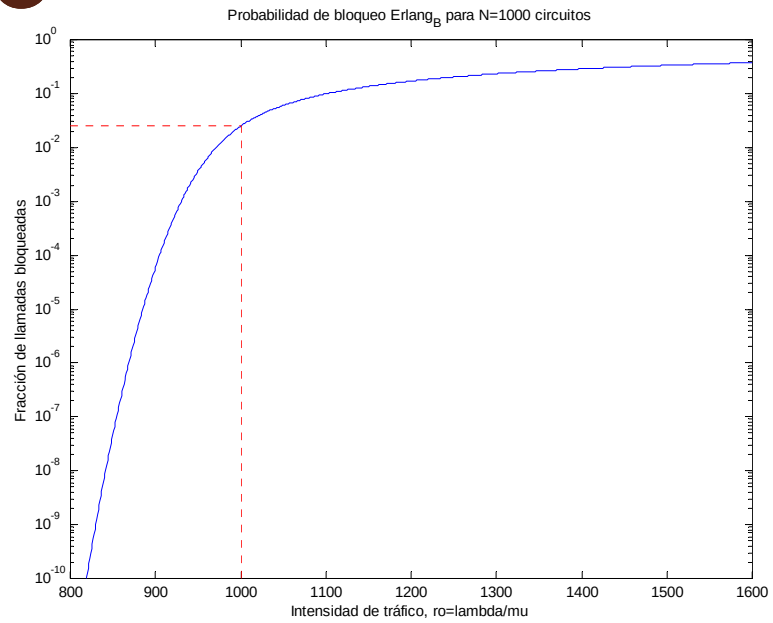


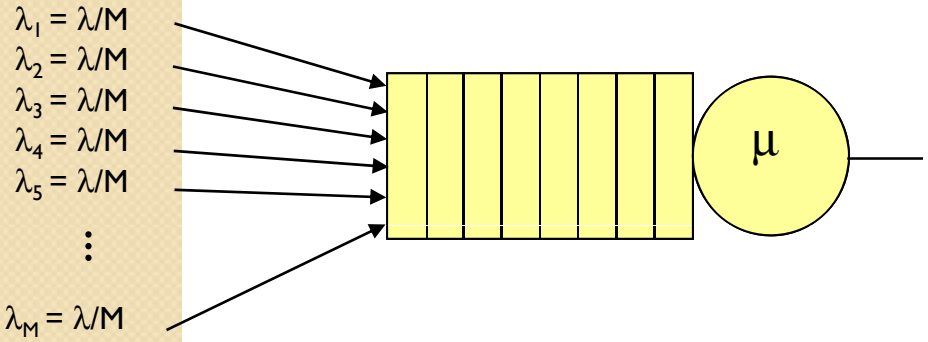
"Teoría de Internet"

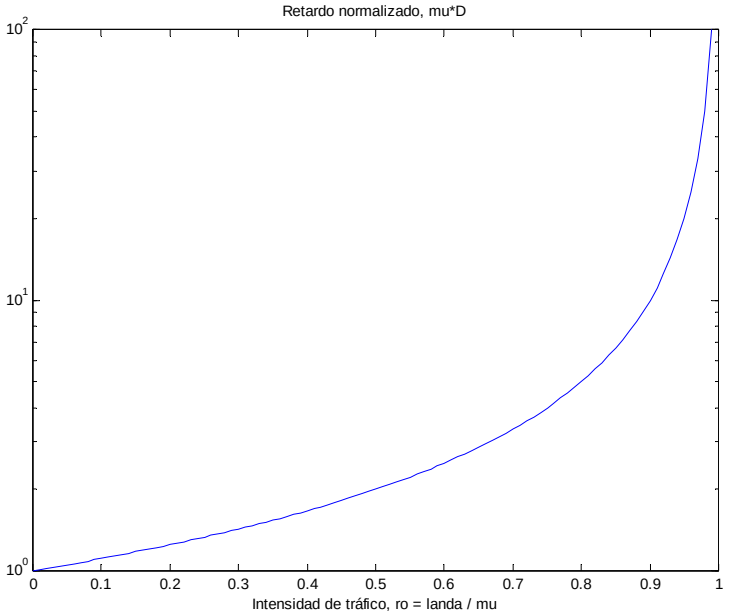
- Carpenter. Architectural principles of the internet (RFC 1958), 1996
- Carpenter. Internet transparency (RFC 2775), 2000
- Clark. The design philosophy of the DARPA internet protocols, 1988
- Saltzer and Clark. End-to-end arguments in system design, 1984
  - La funcionalidad la deben proporcionar los extremos, no la red

Métodos de diseño

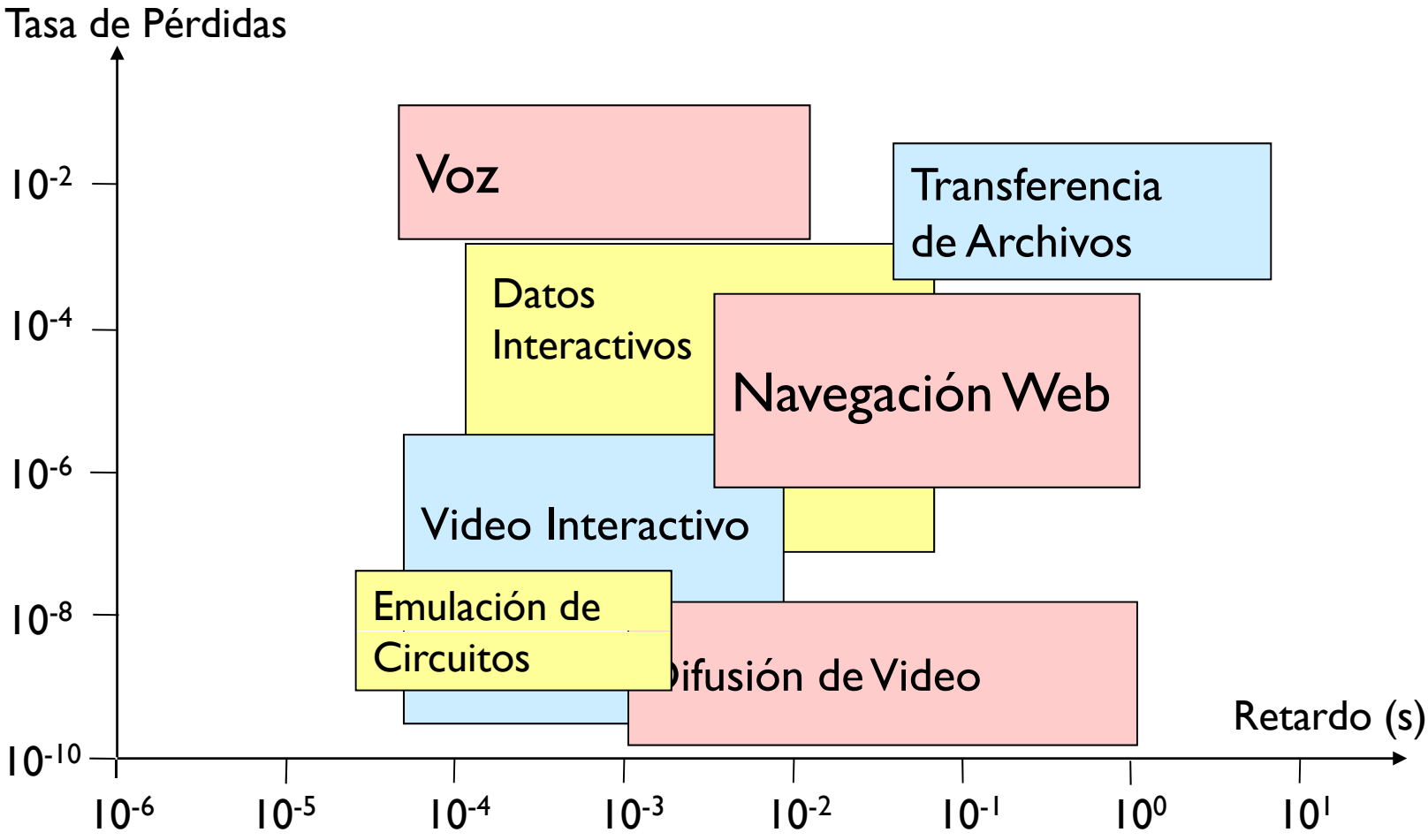




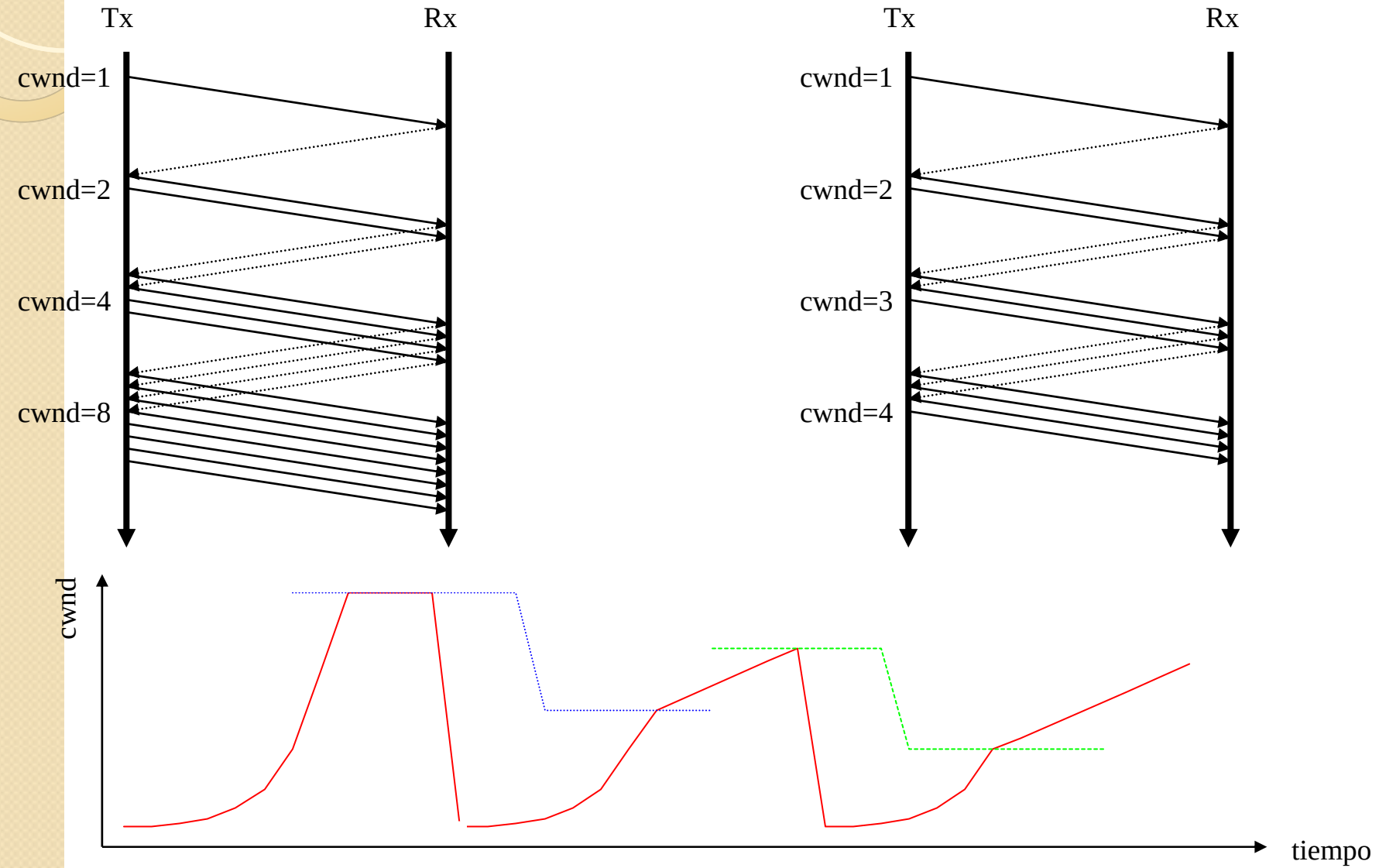




Diferentes QoS para distintas aplicaciones

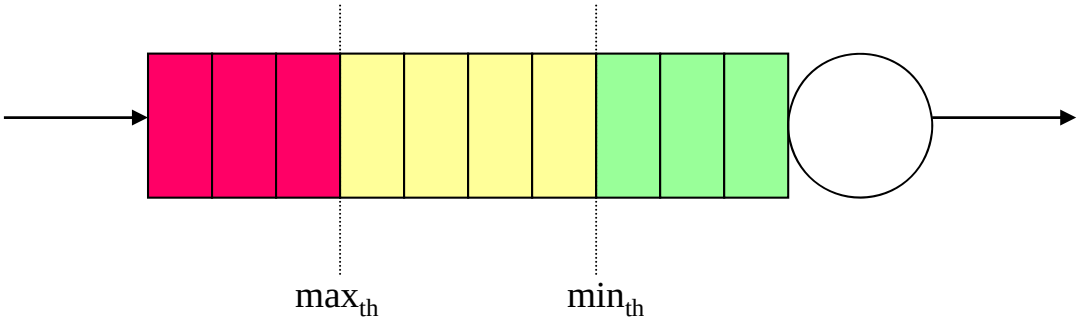


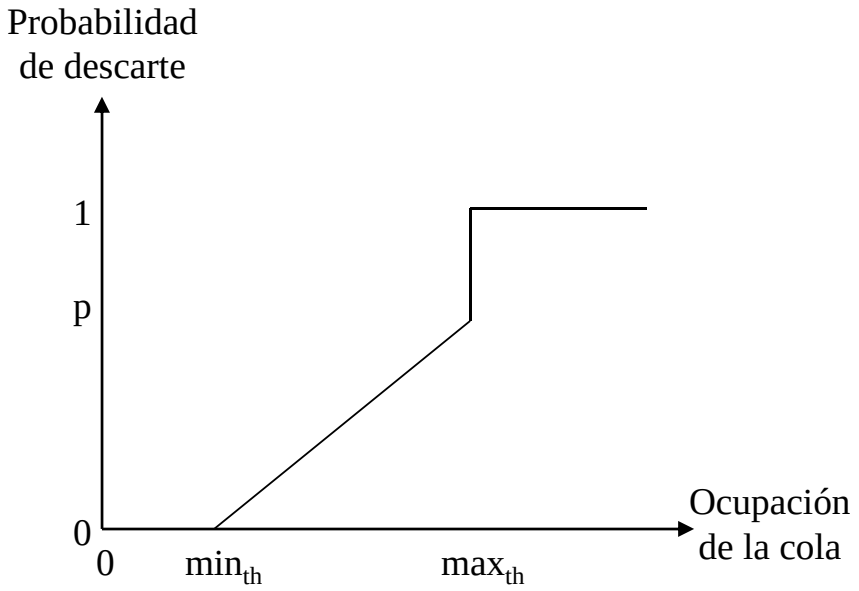
Adaptar la tasa de Tx : TCP



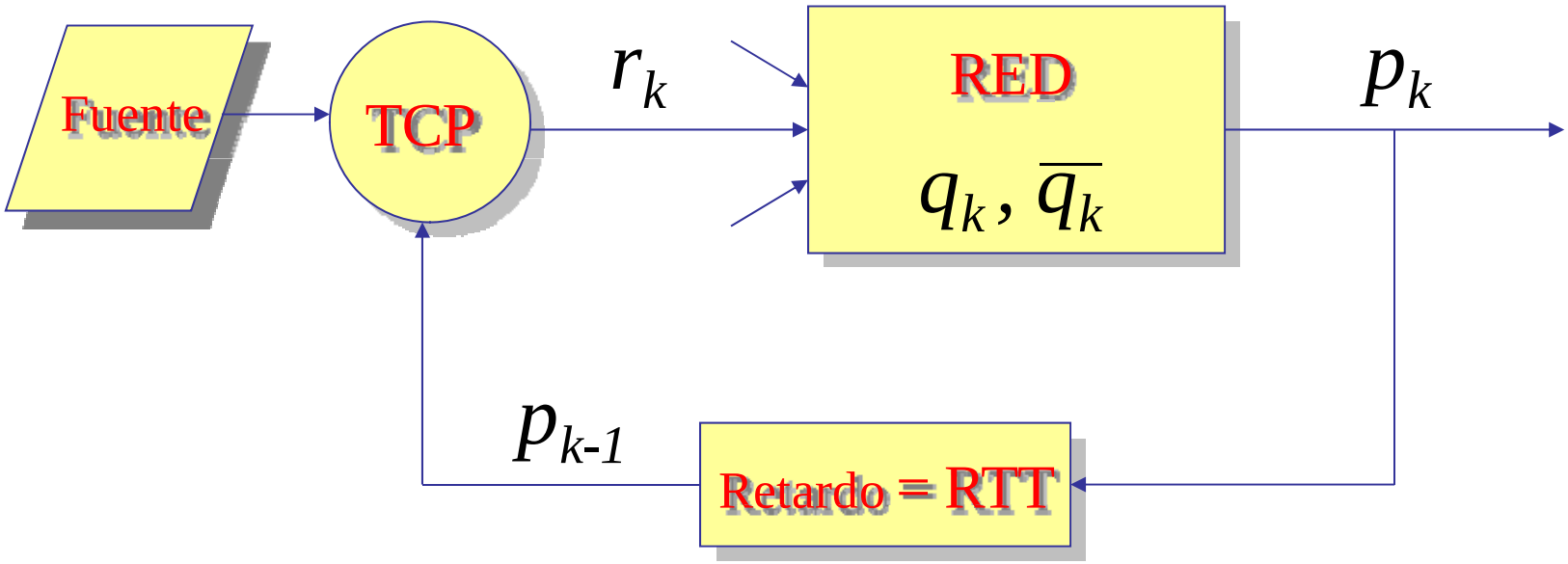
Estabilizar las colas

RED : Detección Temprana Aleatoria





Realimentación



TCP:

$$r_k = \frac{M}{RTT}\frac{K}{\sqrt{p_{k-1}}}$$

M: Tamaño del paquete
RTT: Round Trip Time
p_k : Probabilidad de pérdida
B: Tamaño del buffer
n : Número de flujos TCP
R_0 : Mínimo RTT (propagación y transmisión)
C : Capacidad de los enlaces
K : Constante (1.25)

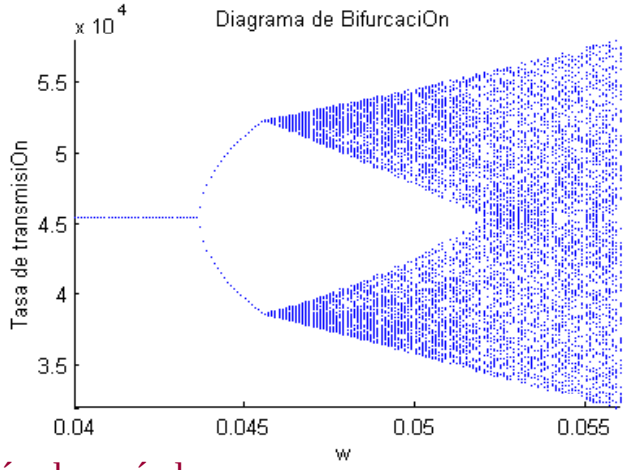
RED:

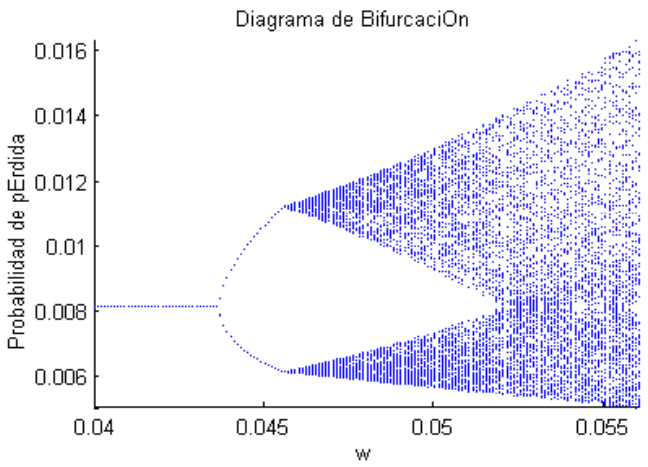
$$q_k = \left(\frac{nr_k}{M}RTT - \frac{C}{M}R_0, B, 0\right)$$

$$\overline{q}_k = (1-w)\overline{q}_{k-1} + wq_k$$

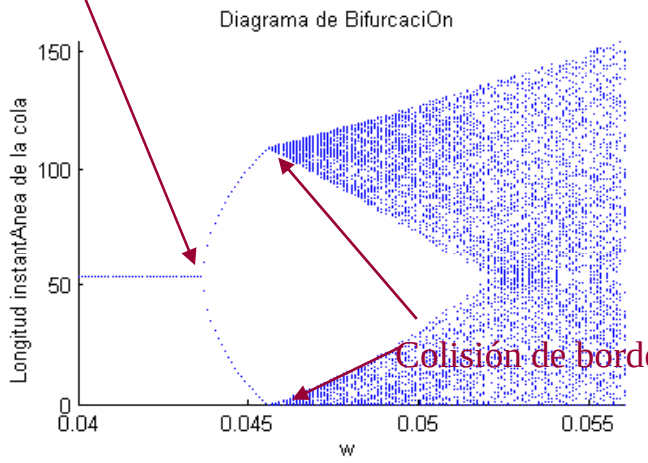
$$p_k = \begin{cases} 0 & 0 \le \overline{q}_k < \min_{th} \\ \dfrac{\overline{q}_k - \min_{th}}{\max_{th} - \min_{th}} p_{\max} & \min_{th} \le \overline{q}_k < \max_{th} \\ 1 & \max_{th} \le \overline{q}_k \le B \end{cases}$$

Dinámica no lineal de los protocolos : Potencialmente caóticas

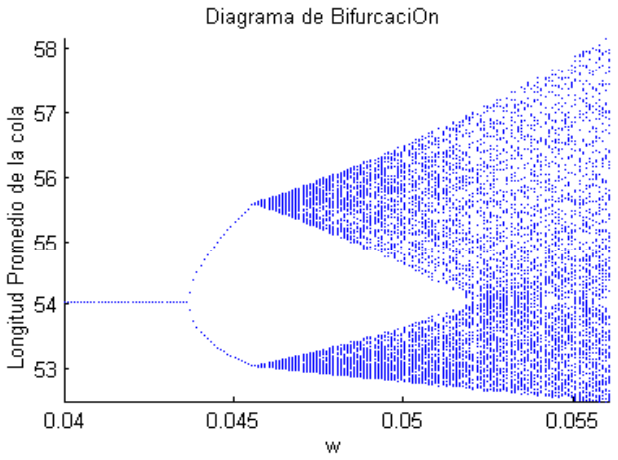




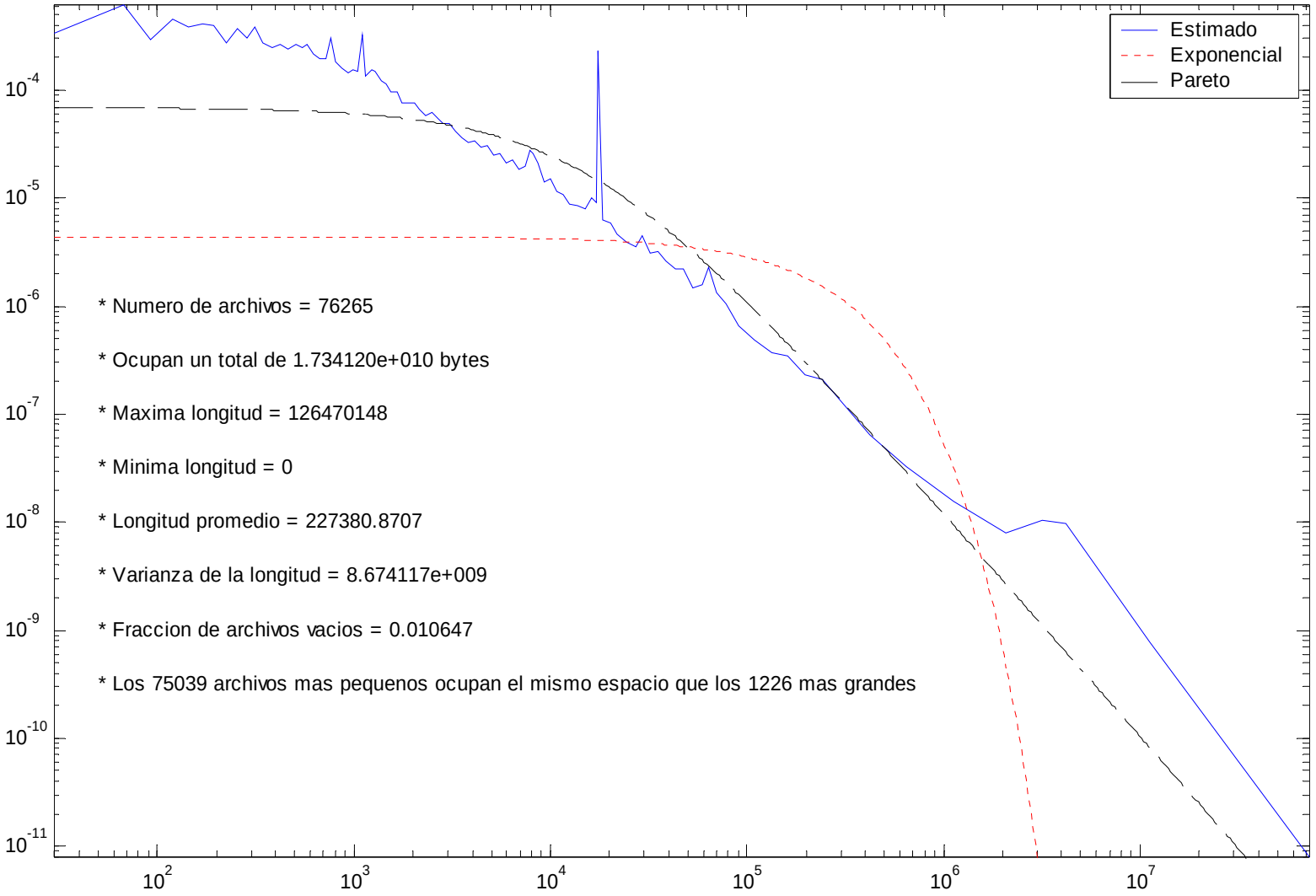
Duplicación de período



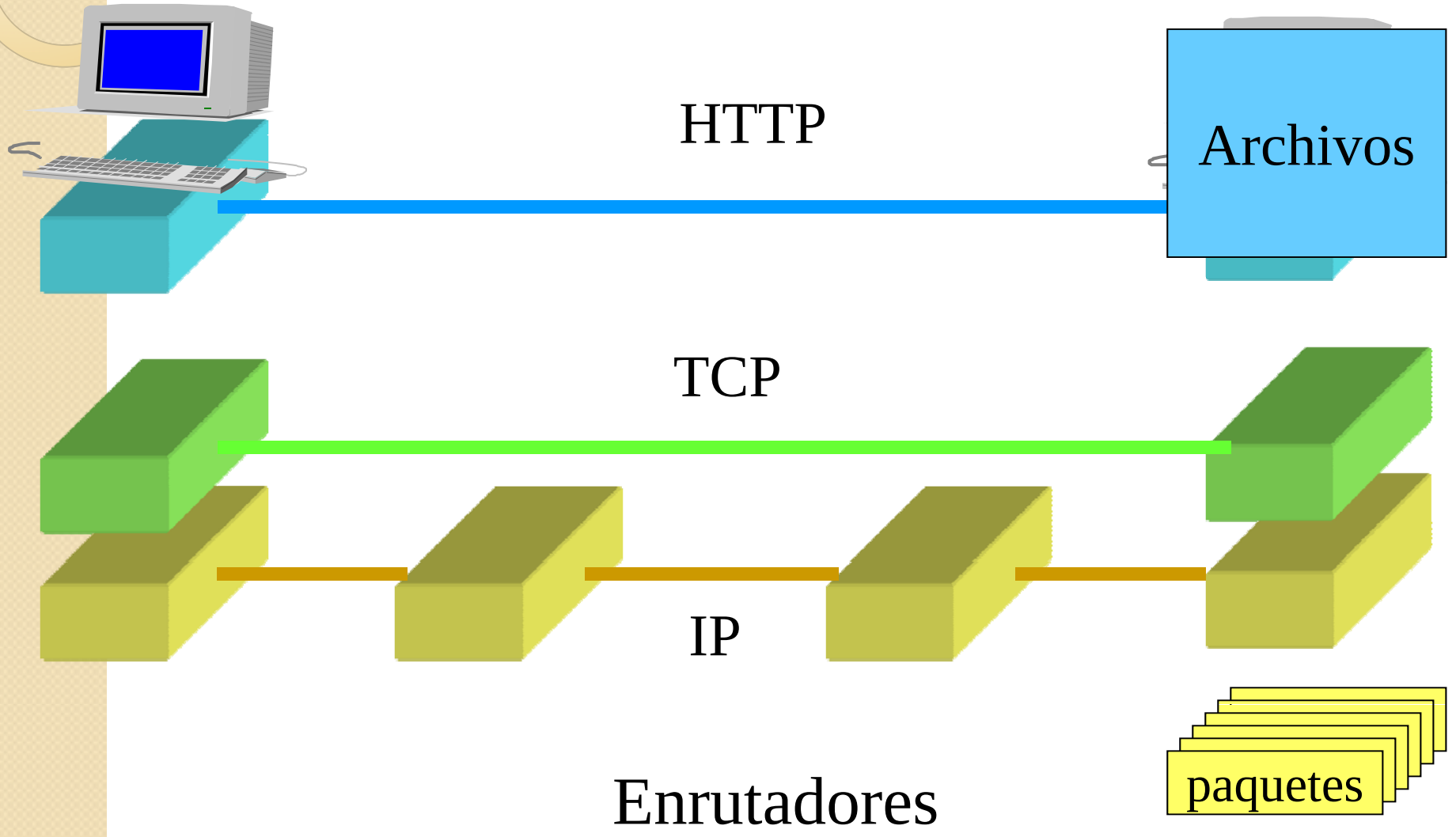
Colisión de borde



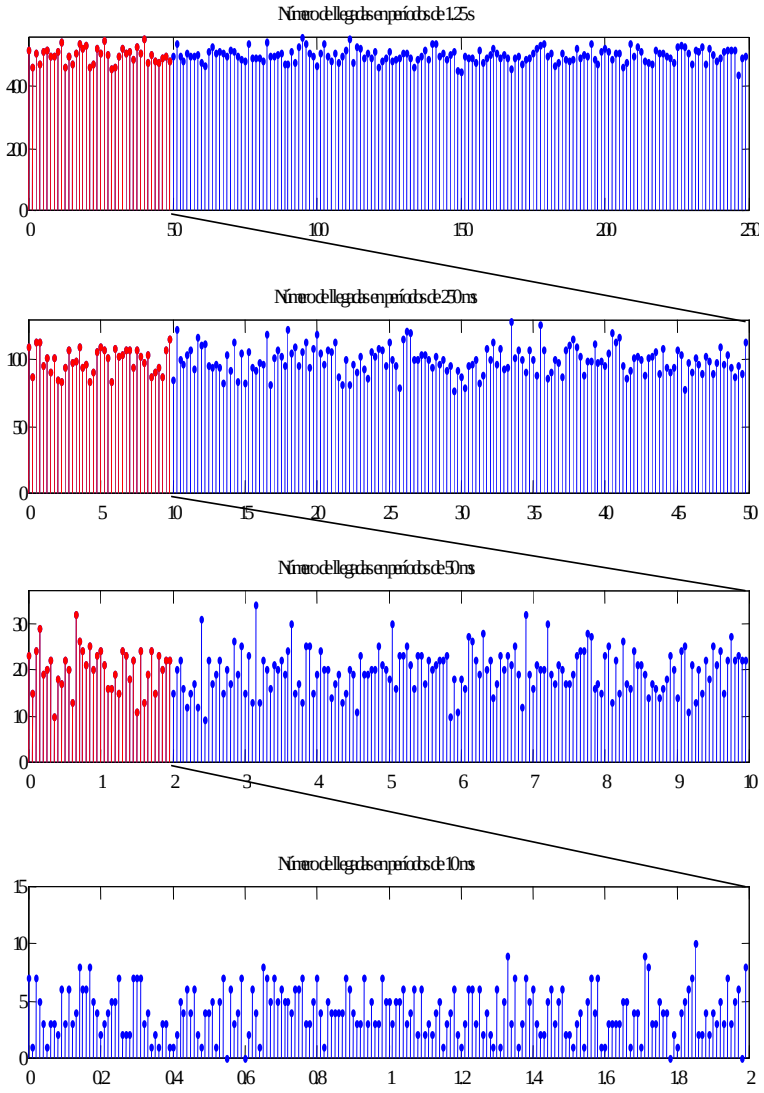
Distribución de los Archivos

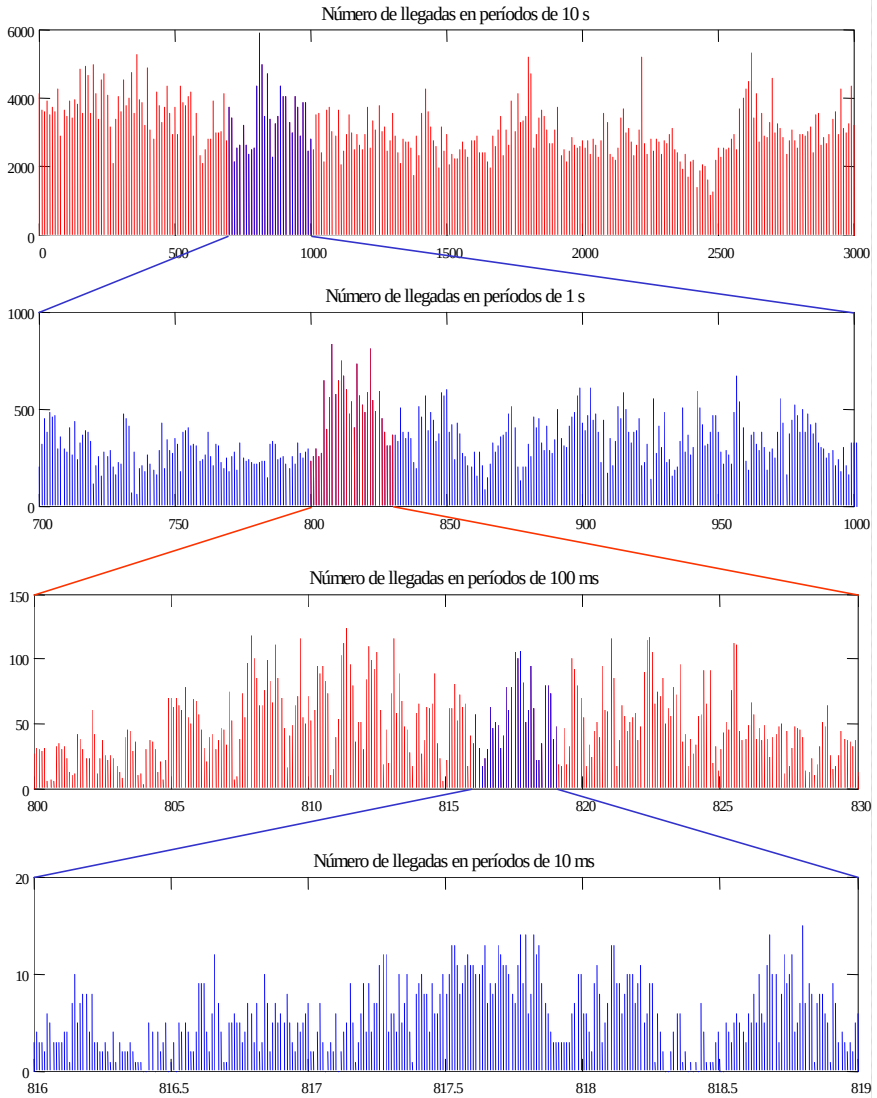


Determina el tráfico de paquetes

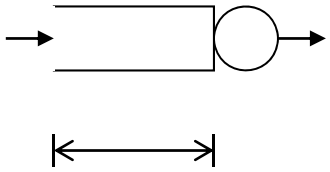


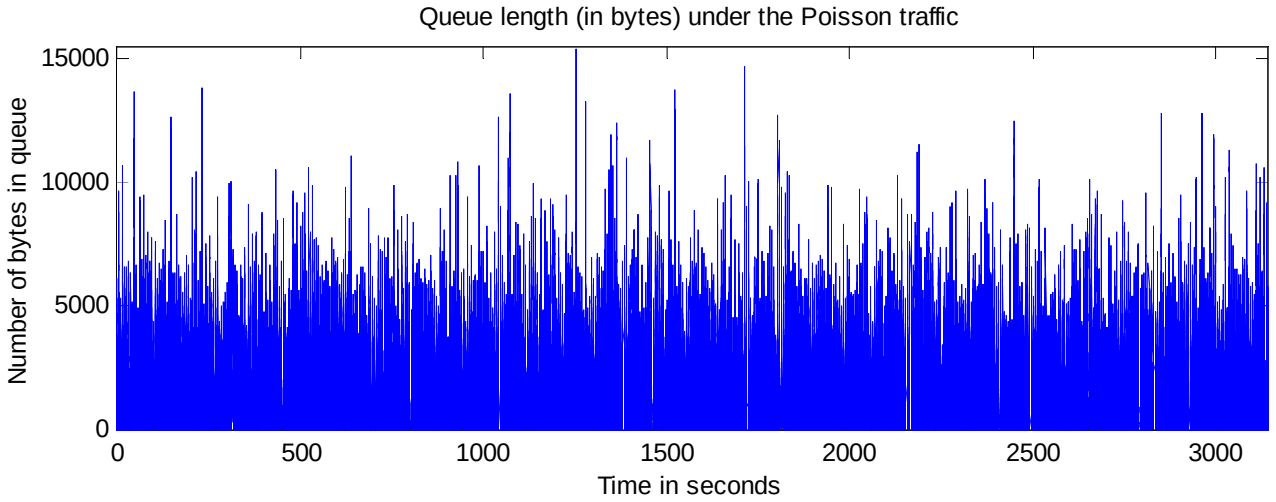
El tráfico en Internet es Fractal

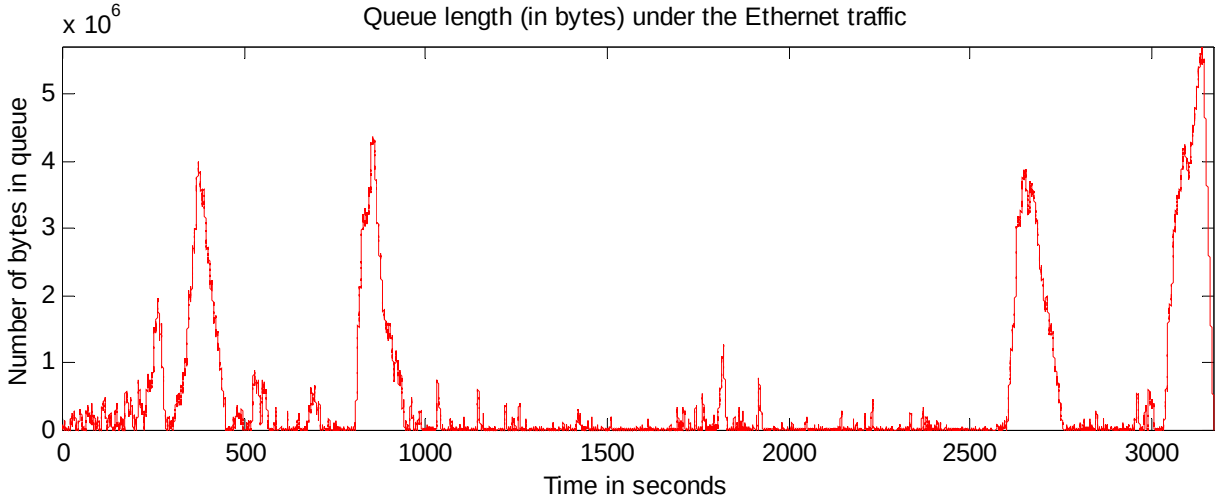




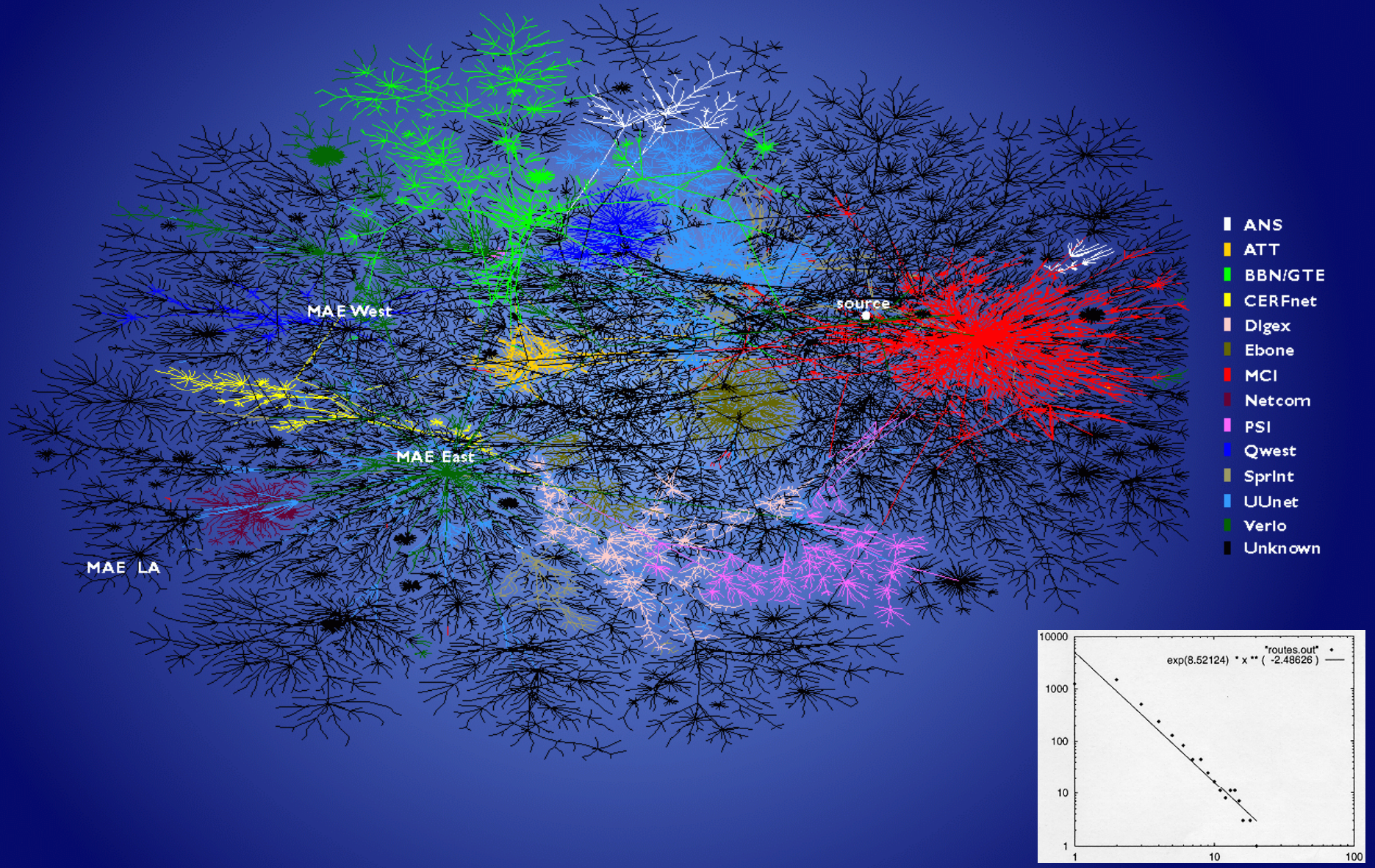
Efectos en el desempeño





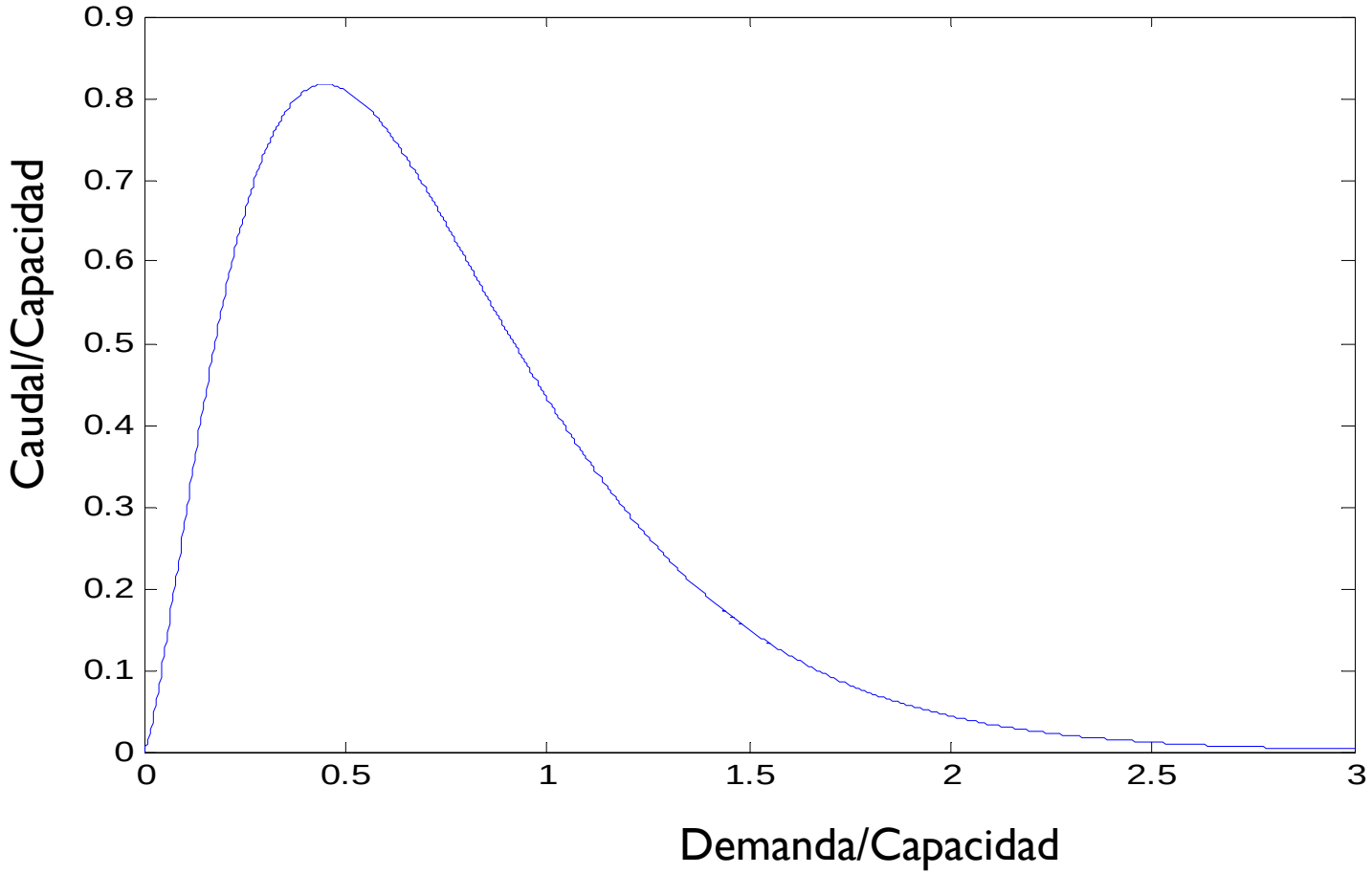


Un Instante de Conectividad en Internet



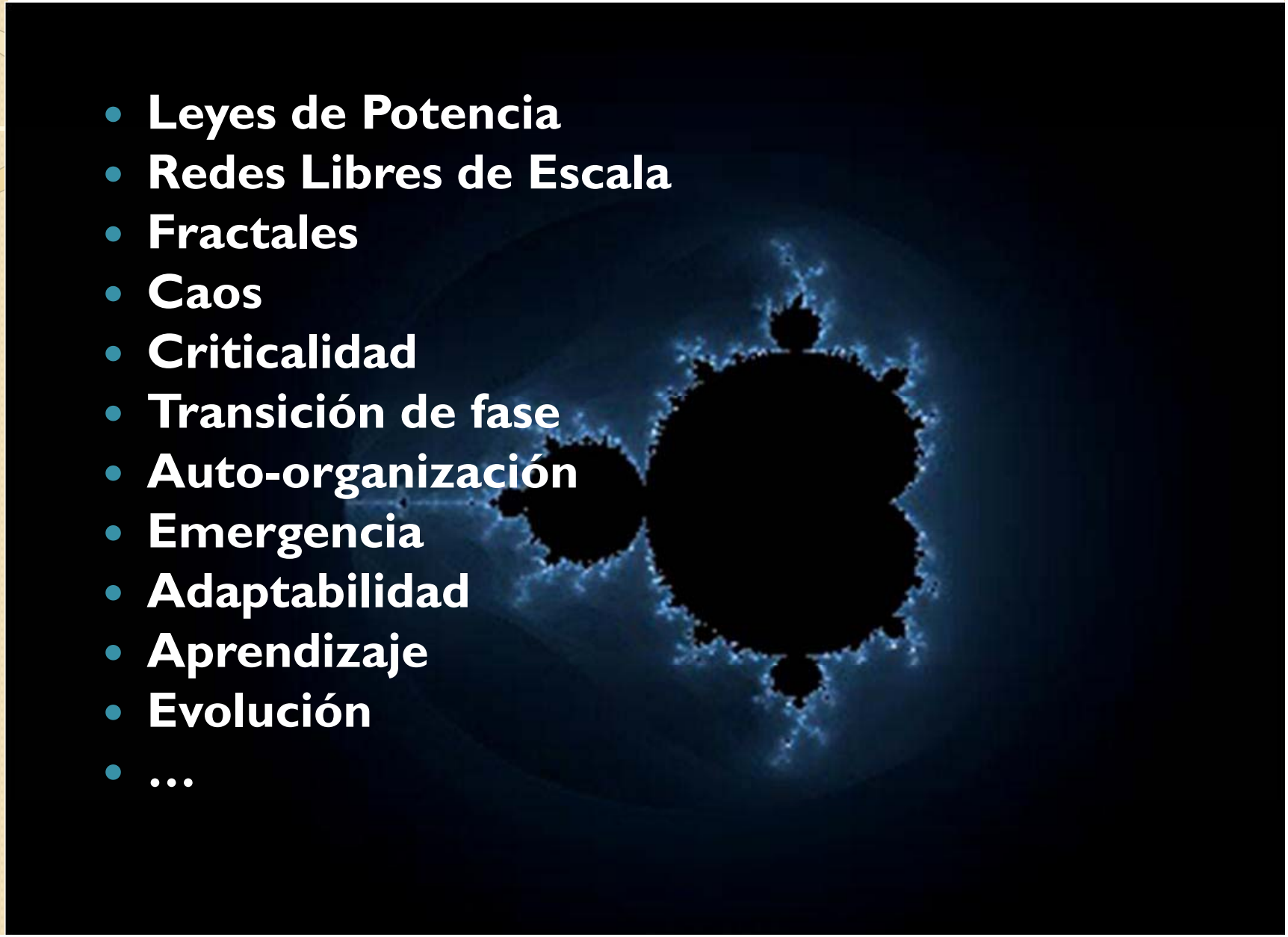
Algunos ISP backbones se han coloreado por separado. K. C. Claffy , proyecto Caida.

Los usuarios se auto-organizan al borde de la congestión

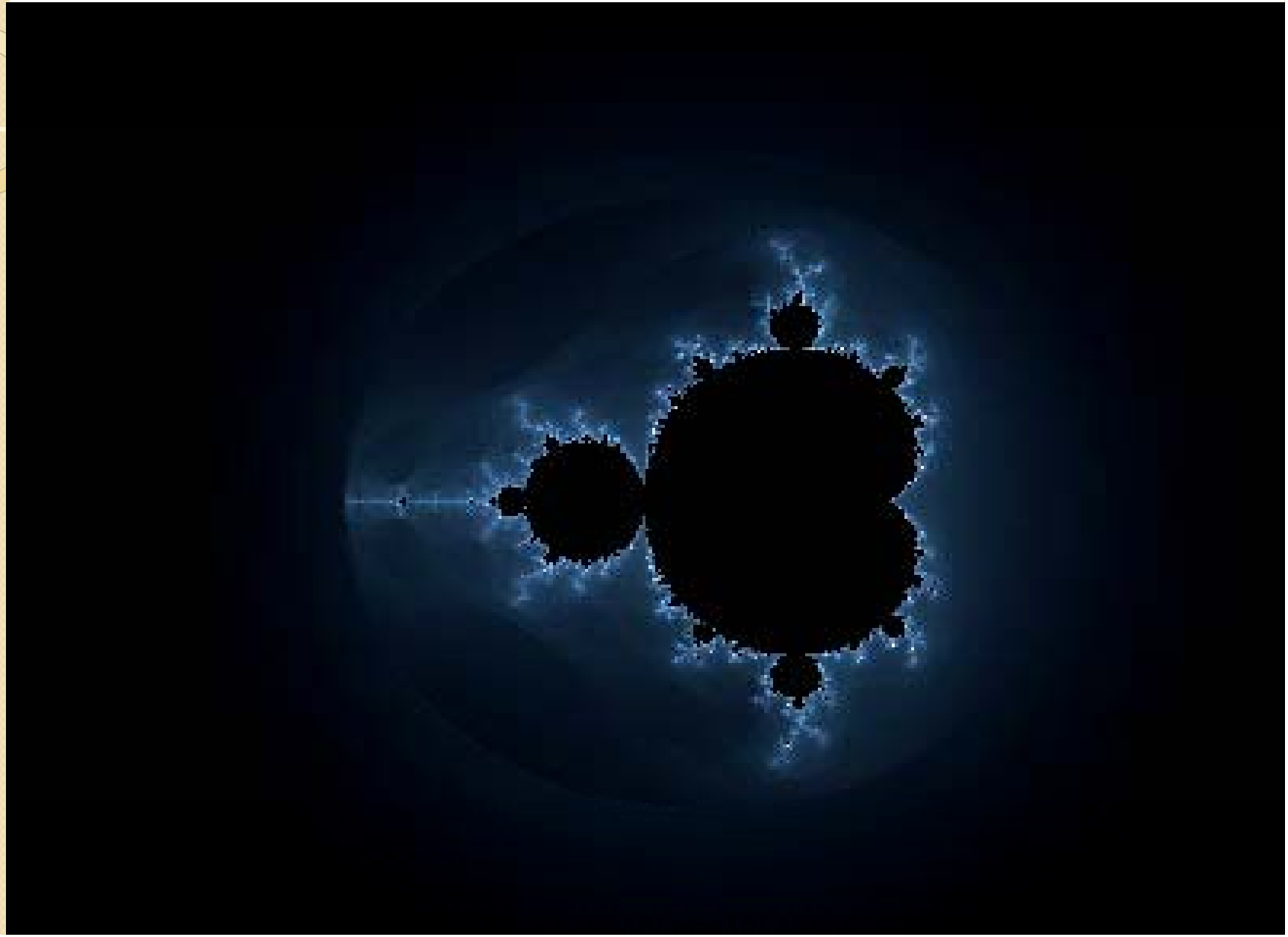


Complejidad

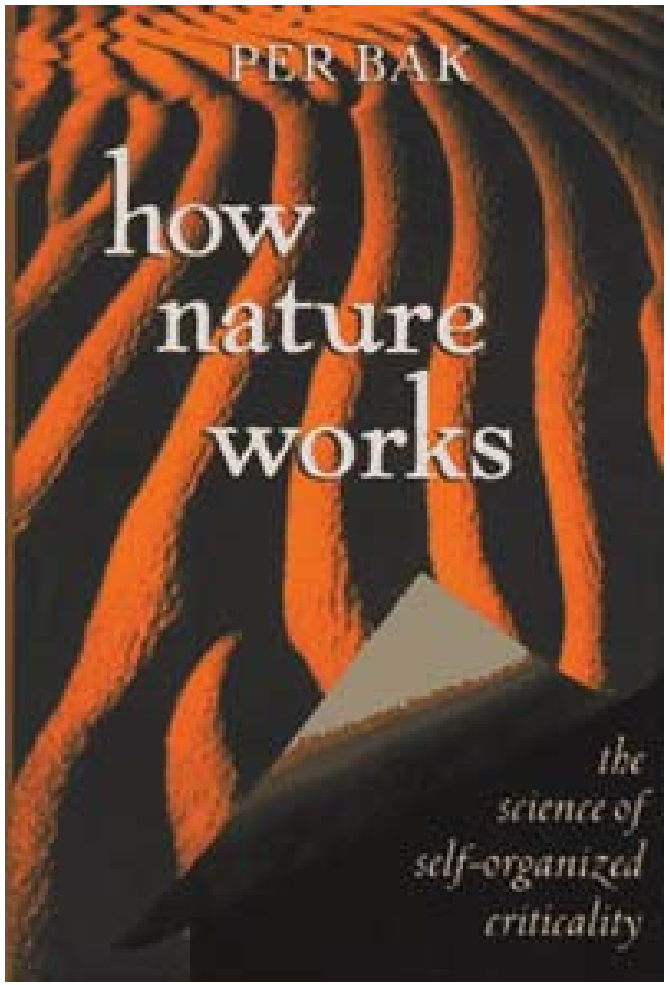
- Leyes de Potencia
- Redes Libres de Escala
- Fractales
- Caos
- Criticalidad
- Transición de fase
- Auto-organización
- Emergencia
- Adaptabilidad
- Aprendizaje
- Evolución
- …



Complejidad



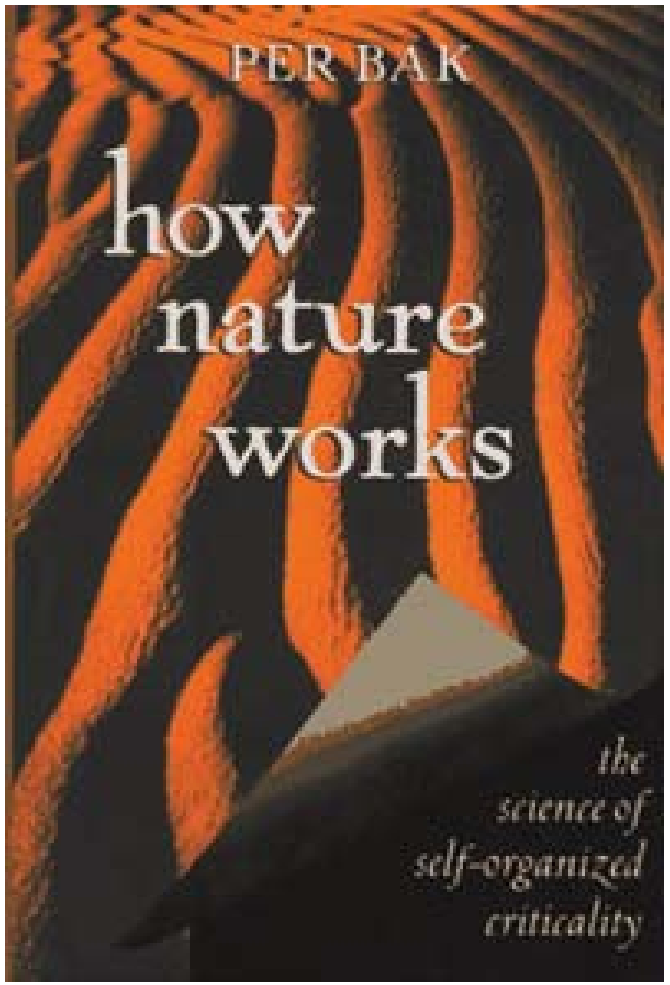
Un Modelo Explicativo: SOC Self-Organized-Criticality



"¿No será que la abundancia de fractales en la naturaleza tiene una explicación única y simple?"

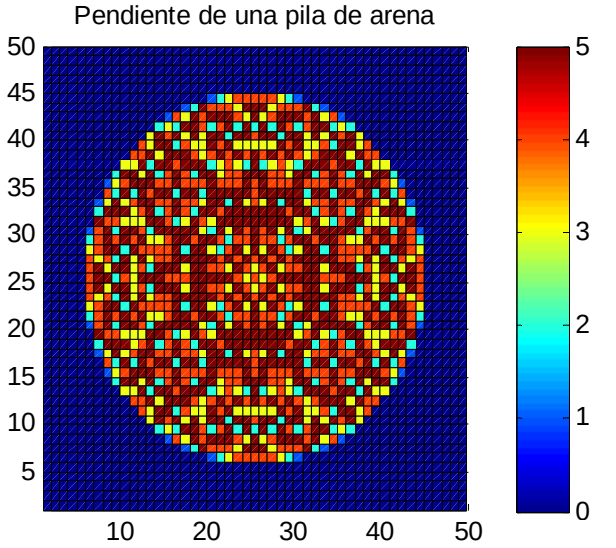
Per Bak (1947-2002)

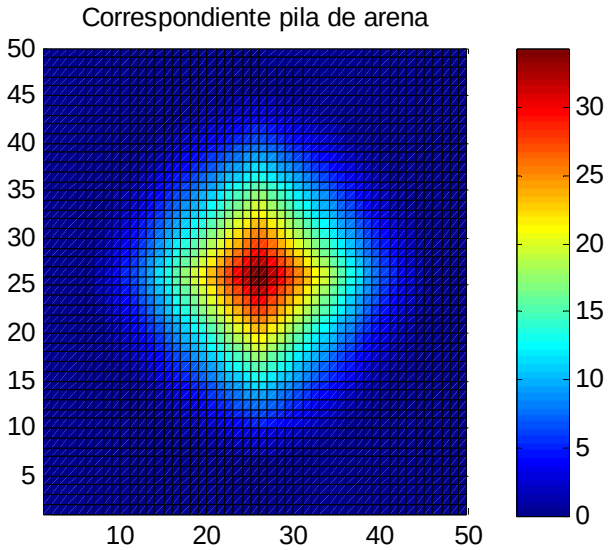
Un Modelo Explicativo: SOC Self-Organized-Criticality



- Un concepto de la mecánica estadística
- La complejidad surge como una característica emergente en sistemas homogéneos con interacciones locales simples
- Los fenómenos de invarianza en la escala (como fractales y leyes de potencia) emergen en el punto crítico entre fases
- Los sitemas complejos se auto-organizan en ese punto crítico

Una pila de arena



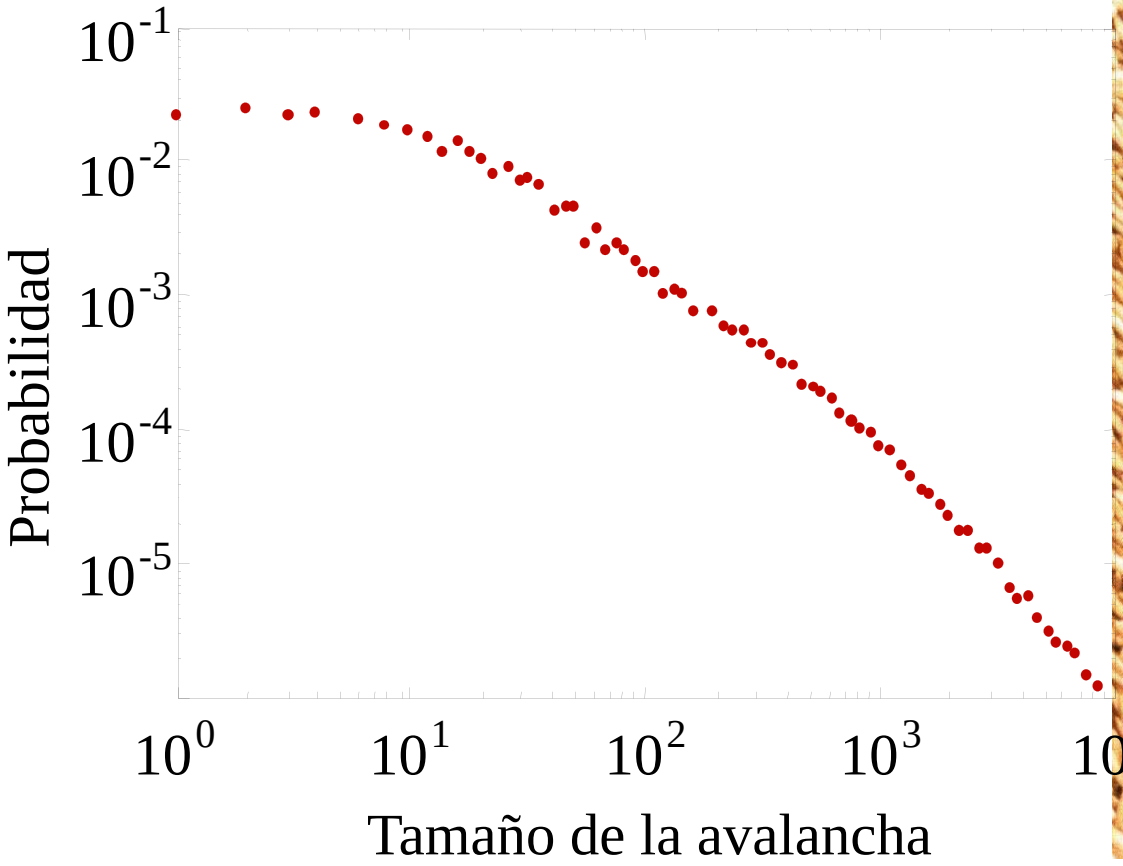


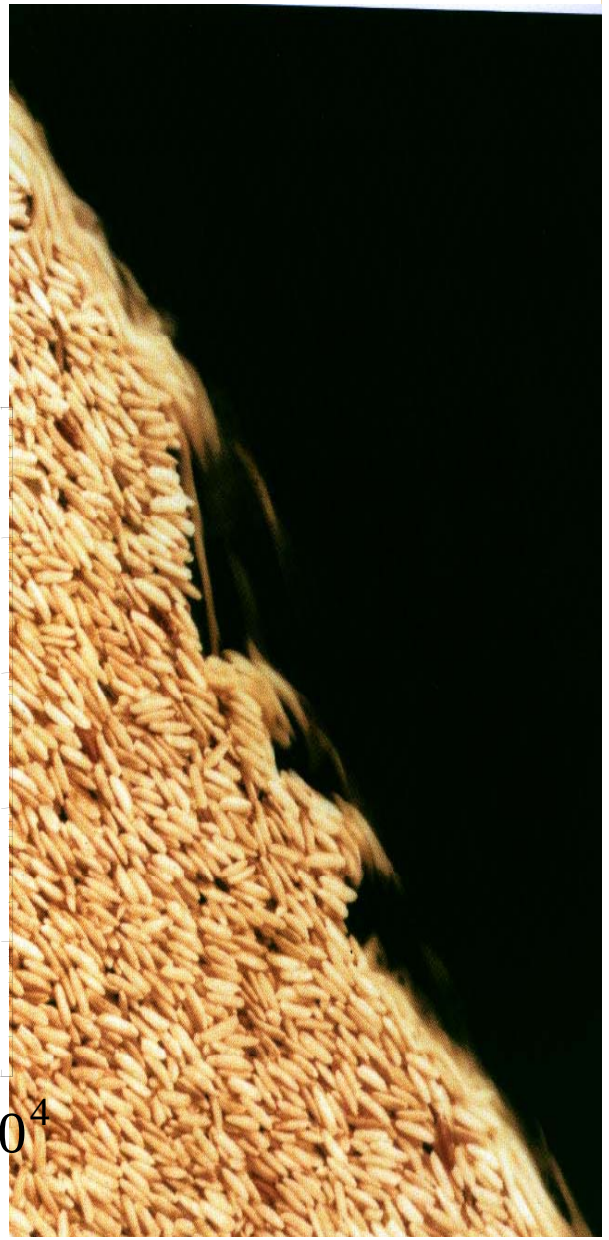
- Añada un grano de arena en el medio de una grilla NxN
- Si la pendiente es mayor a 5 granos por columna, reparta cuatro granos entre las columnas vecinas
- La figura muestra el resultado con 5000 granos
- Si la pendiente global es pequeña, las avalanchas son microscópicas. Si la pendiente es grande, un granito adicional hará que la pila completa se desbarate (avalancha infinita)
- El sistema se auto-ajusta en una pendiente "crítica" en la cual, por cada grano de arena que se añada en la cima, un grano de arena sale de la grilla.

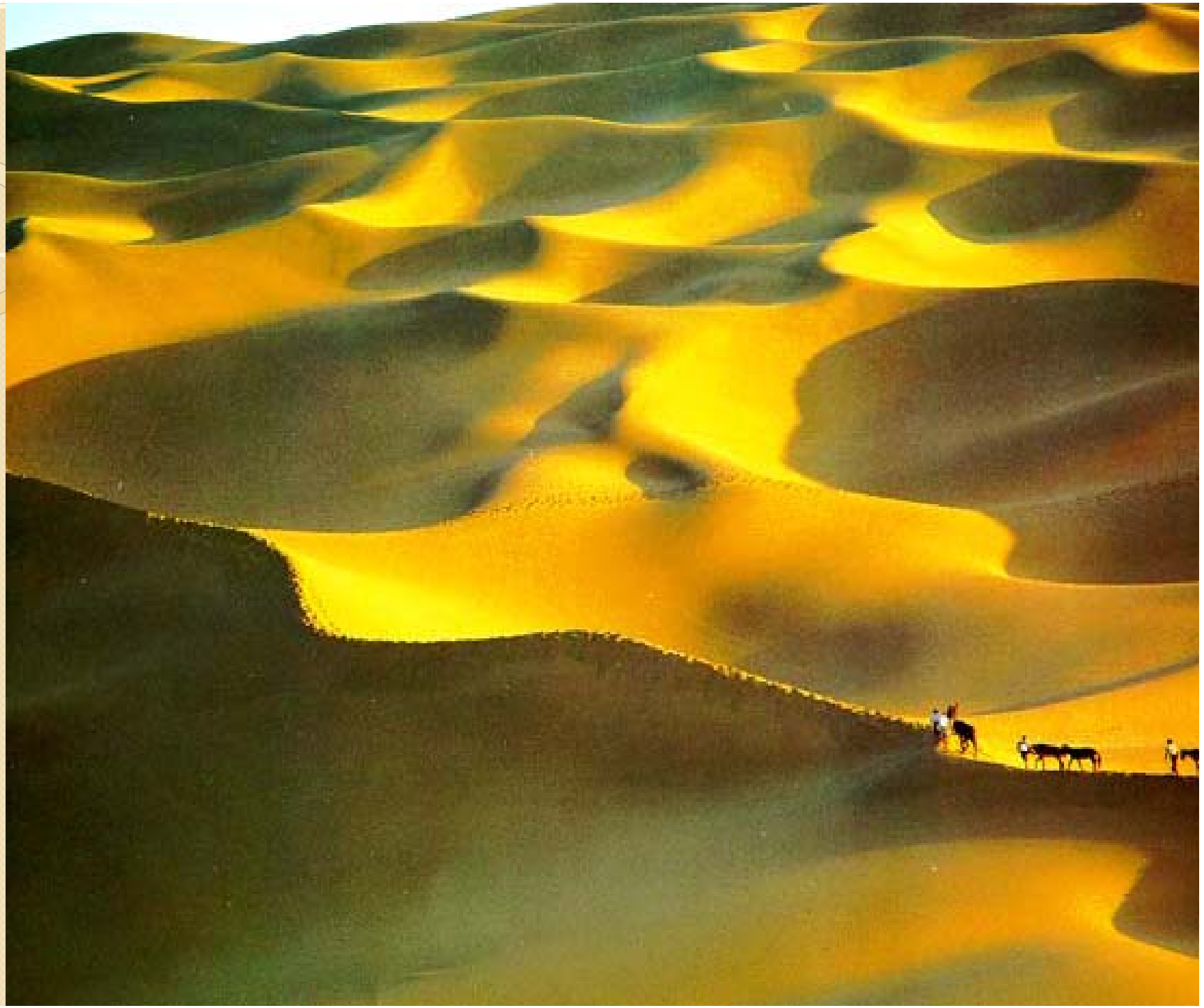
Es verdad!

Es verdad!

- Se han medido las avalanchas y siguen la ley de potencia que el autómata simple predice



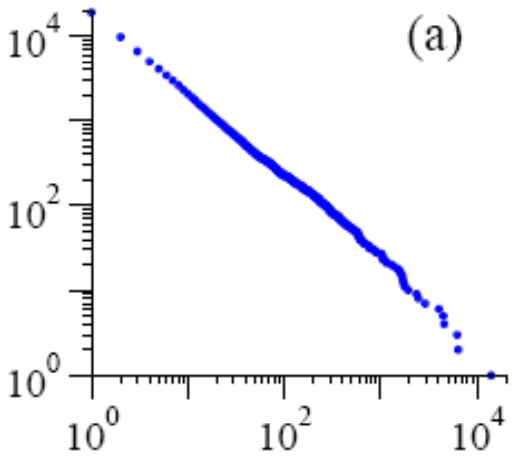




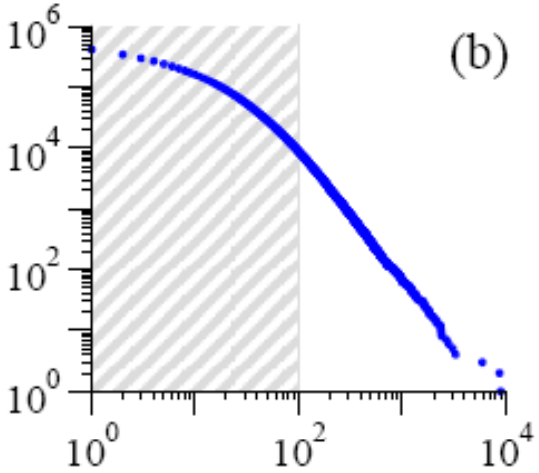
Características de SOC

- La complejidad emergente ocurre entre estados de orden y desorden caracterizados por transiciones de fase y bifurcaciones en interconexión de componentes genéricos
- La simulación mediante computador de estas interacciones genéricas puede revelar la esencia natural de esta complejidad emergente.

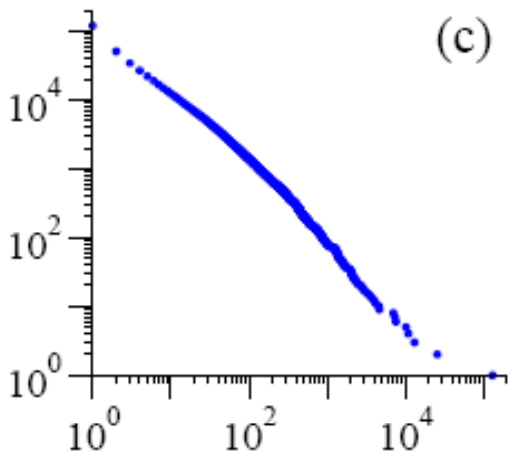
Leyes de potencia "everywhere"



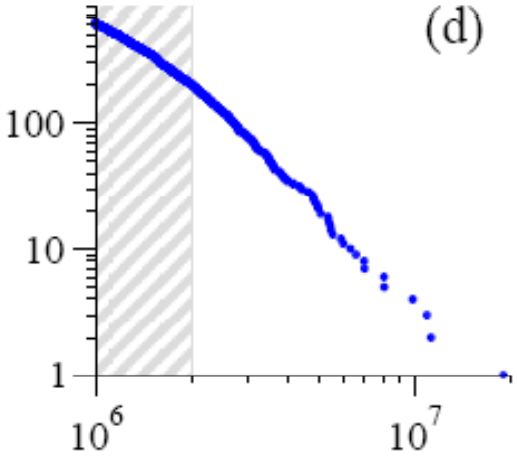
Frecuencia de palabras



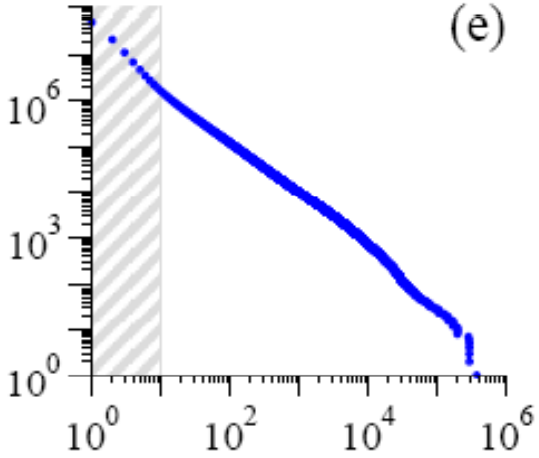
Citaciones bibliográficas



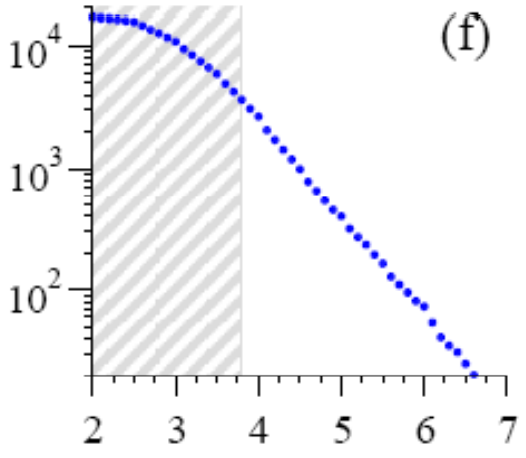
Consultas a páginas wel



Libros vendidos



Llamadas telefónicas recibidas



Magnitud de terremotos

Leyes de potencia "everywhere"

- **Número de personas afectadas por un apagón**
- **Tamaño de los incendios forestales**
- **Cascada de los eventos de congestión en tráfico aéreo**
- **Impactos de meteoritos**
- **Muertes y pérdidas económicas por desastres naturales o artificiales**
- **Variaciones in el mercado de valores**
- **Uso de las palabras del español**
- **Población de las ciudades**
- **Ingresos y riqueza de las compañías y los individuos**
- **La masa y el tamaño de los objetos en este auditorio**
- **Citación de artículos**
- **Publicaciones por autor**
- **Patentes por inventor**
- **Tamaño de los archivos Web, UNIX, Windows**
- **Utilización de la CPU en un computador**
- **etc., Etc., ETc., ETC!**

Fractales "everywhere"

1. Series de tiempo geofísicas: Variaciones de temperatura, caída de lluvias, flujos oceánicos, niveles de inundación en ríos, frecuencia de rotación de la tierra, manchas solares…
2. Series de tiempo en economía: Variaciones en el promedio industrial Dow Jones, ...
3. Series de tiempo fisiológicas: Variaciones en el pulso, EEG bajo estímulos placenteros, tasa de adquisición de insulina en pacientes diabéticos,…
4. Series de tiempo biológicas: Variaciones voltaícas en los nervios, transferencia de energía en canales sinápticos,…
5. Fluctuaciones electromagnéticas: ruido galáctico, intensidad de fuentes de luz, flujo magnético en superconductores,…
6. Ruido en dispositivos electrónicos: transistores BJT y FET, tubos al vacío, diodos Zener, túnel y Schottky, …
7. Variaciones de frecuencia en relojes atómicos, osciladores de cuarzo, resonadores superconductores, …
8. Fenómenos inducidos por el hombre: Tráfico en redes, variaciones de amplitud y frecuencia en música moderna y tradicional, …
9. Patrones de error en canales de comunicaciones
10. Generación de estímulos fisiológicamente placenteros como música o brisa, etc.

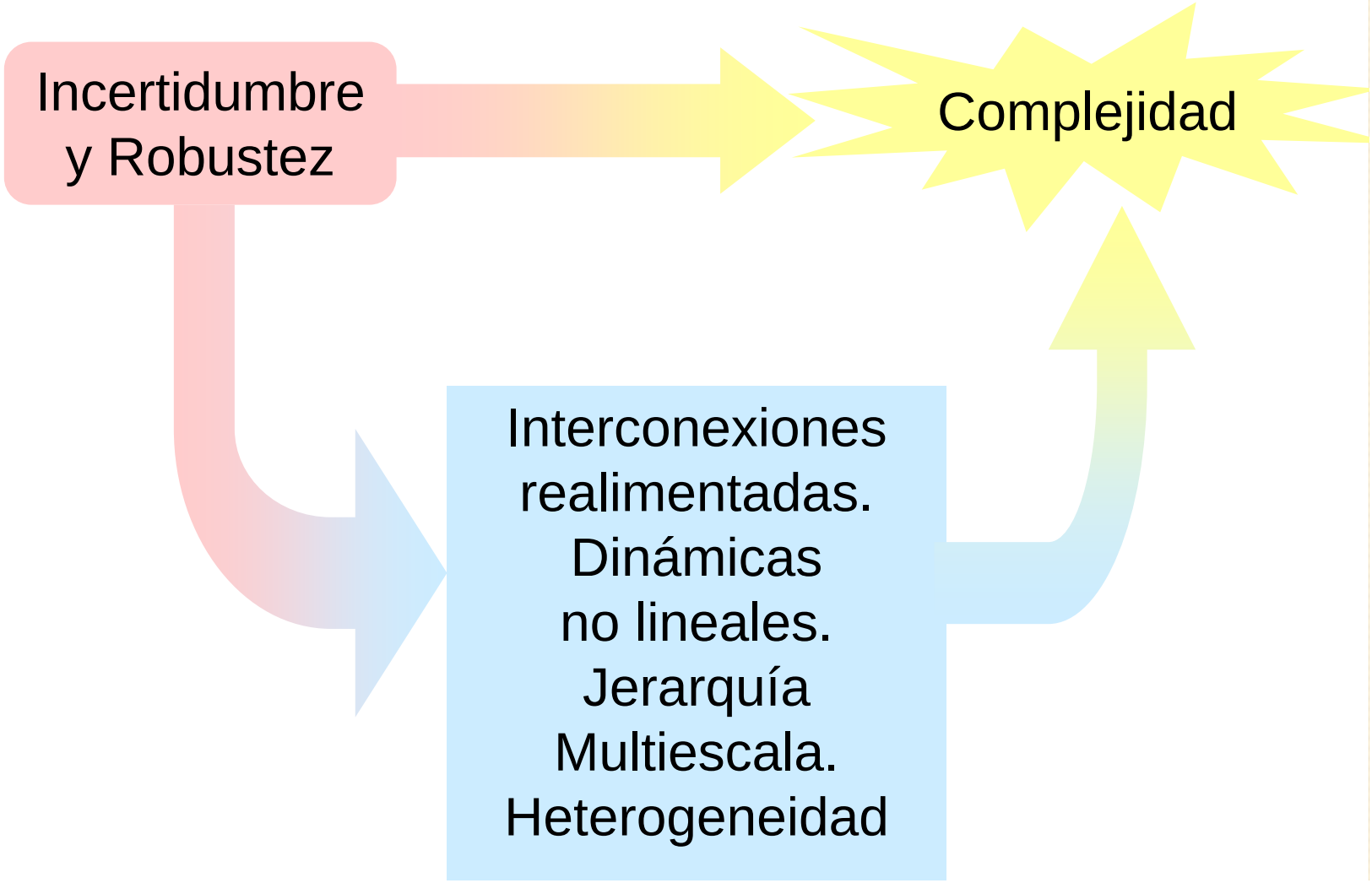
¿Criticalidad auto-organizada "everywhere"?

- Lewin. Life at the edge of chaos, 1992
- Waldrop. Complexity : The emergence science at the edge of order and chaos, 1992
- Goodwin. How the leopard changed its spots, 1994
- …
- Nagel. A cellular automaton model for freeway traffic, 1992
- Ohira. Phase transition in computer network traffic, 1998
- Vole. Phase Transition in internet traffic, 2001
- Verres. A chaotic map model of network traffic, 2000
- …

SOCnet!

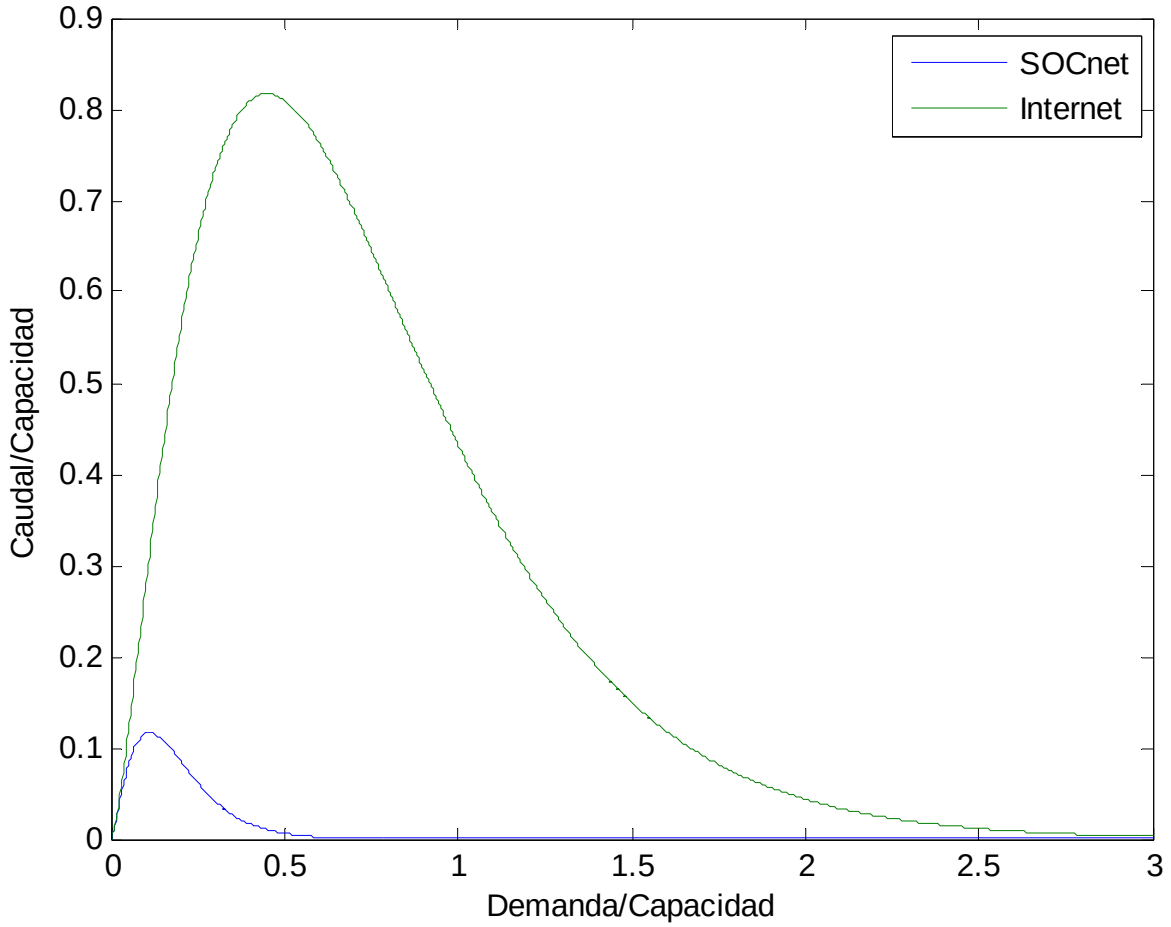
Se presentan los mismos fenómenos, atribuibles a SOC… Pero es una red inútil

En realidad, existe una estructura cuidadosamente diseñada para robustez y optimalidad



Diseño vs SOC

- SOCnet no permitiría Internet



Pero, ¿puede el alto diseño generar complejidad?

- SOC vs HOT –Highly Optimized Tolerance-
  - Los sistemas complejos en biología, ecología, tecnología, sociología, economía…
  - … han sido llevados (mediante diseño o evolución) a estados de alto desempeño tolerantes a incertidumbres en el ambiente y en sus componentes
  - Esto conduce a estructuras jerárquicas especializadas y modulares que "esconden" una gran complejidad,
  - Haciéndolos sensibles a perturbaciones desconocidas o ignoradas durante el diseño.

J. Doyle (Caltech), J. Carlson (UCSB)

Presupuestos de HOT

- Los "organismos" están siendo retados constantemente por las incertidumbres en el ambiente,
- Y han "evolucionado" una diversidad de mecanismos para minimizar las consecuencias de esta incertidumbre explotando sus regularidades.
- El resultado es especialización, modularidad, estructura y redundancia que conduce a altos desempeños,
- Pero la sensibilidad a perturbaciones novedosas no están incluidas en la historia evolutiva.

- Son sistemas robustos, pero al mismo tiempo frágiles.

Teoría de la Información

- Entropía, otra vez, $H(p) = \sum_{x \in \aleph} p(x) \log_2 \left(1 / p(x) \right)$
- Codificación de fuente: $\min_{l:\aleph \to D} \sum_{x \in \aleph} p(x) l(x)$
- Restricciones : Número de "codewords"

$$l(x) = f(r(x)),$$

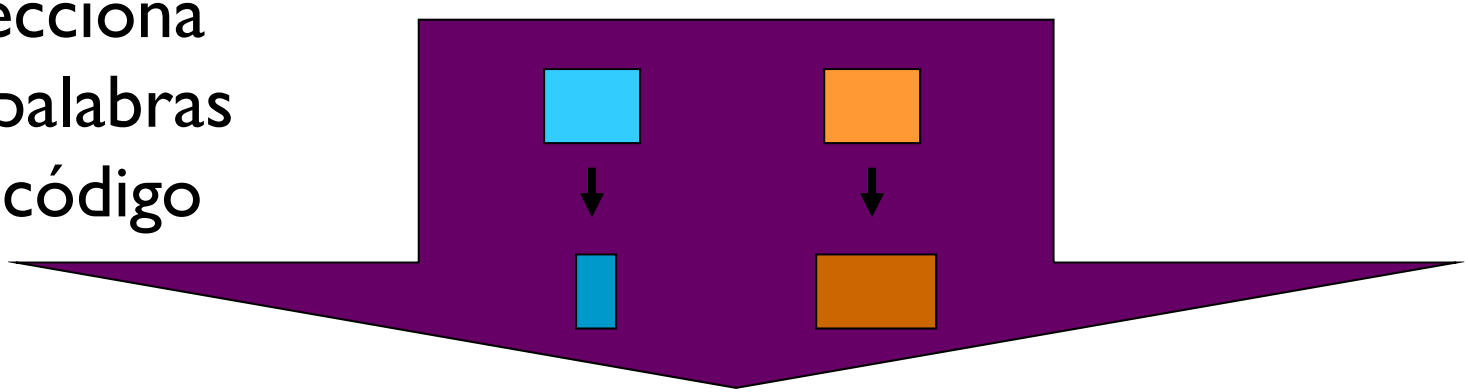
$$\sum_{x \in \aleph} r(x) \leq R$$

Compresión de Datos

(El más sencillo de las diseños óptimos en ingeniería)

Con base en la frecuencia de las palabras de la fuente,

Selecciona las palabras del código



Para minimizar la longitud del mensaje

Modelo general

$$\min \sum_i p_i l_i$$

$$l_i = f_\beta(r_i)$$

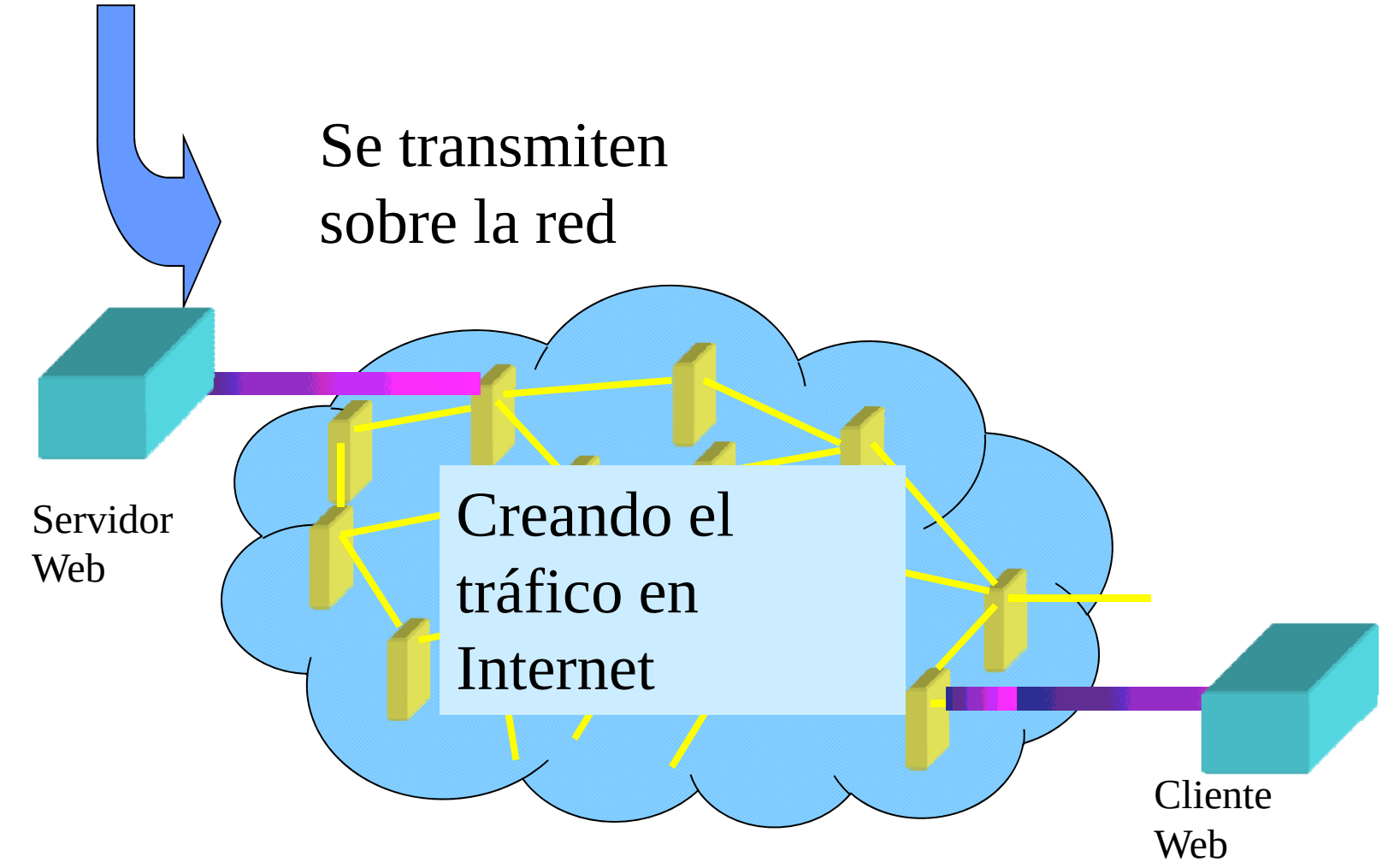
$$\sum_i r_i \le R$$

Compresión de datos

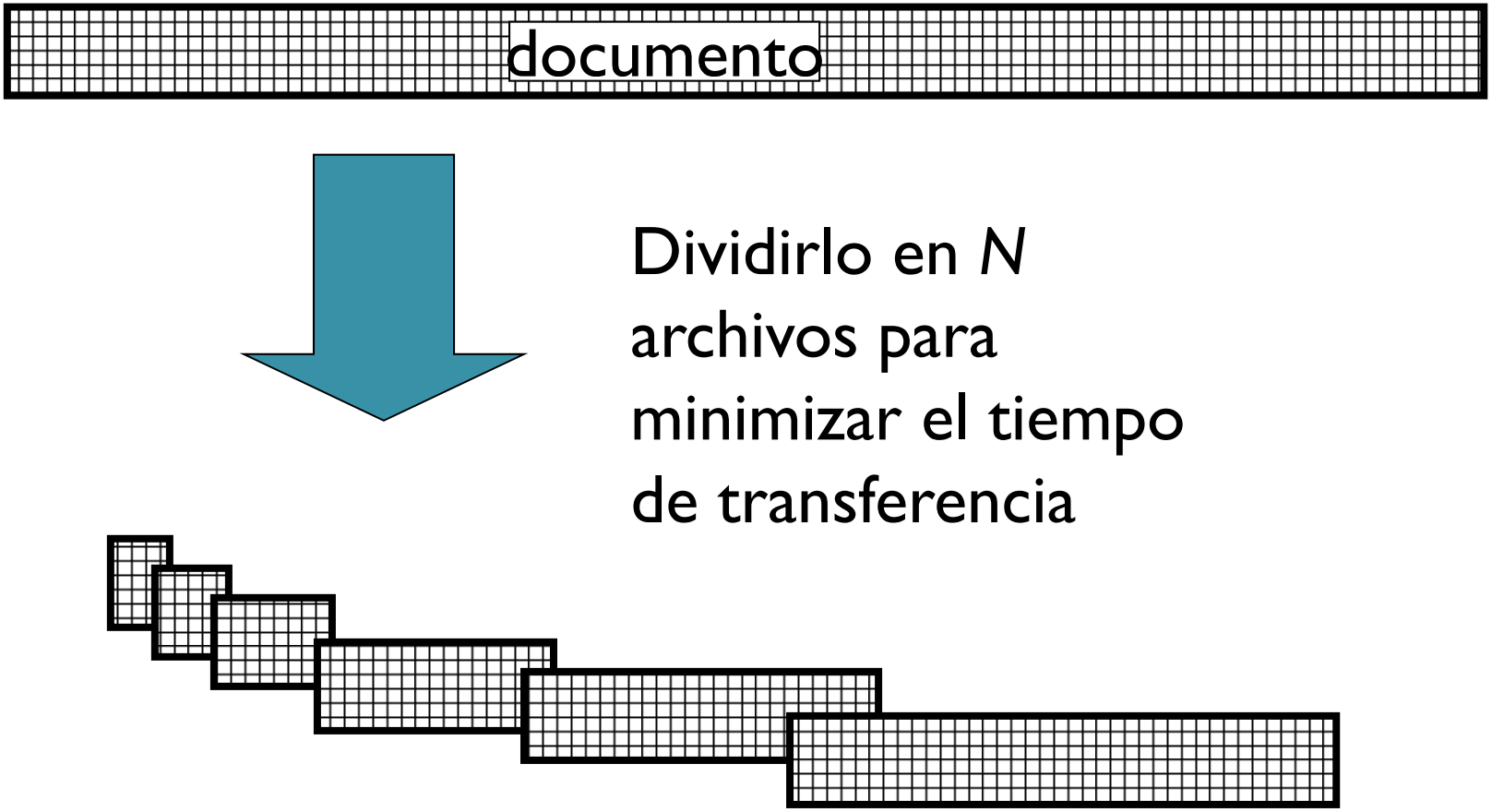
$$f_\beta(r_i) = \begin{cases} -c\log(r_i) & \beta = 0 \\ c\left(r_i^{-\beta} - 1\right)/\beta & \beta > 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dr_i} f_\beta(r_i) = -cr_i^{-\beta-1}, \quad f_\beta(1) = 0 \quad \forall \beta \ge 0$$

Web - Tráfico internet



Un aspecto en el diseño de páginas web



Modelo general

$$\min \sum_i p_i l_i$$

$$l_i = f_\beta(r_i)$$

$$\sum_i r_i \leq R$$

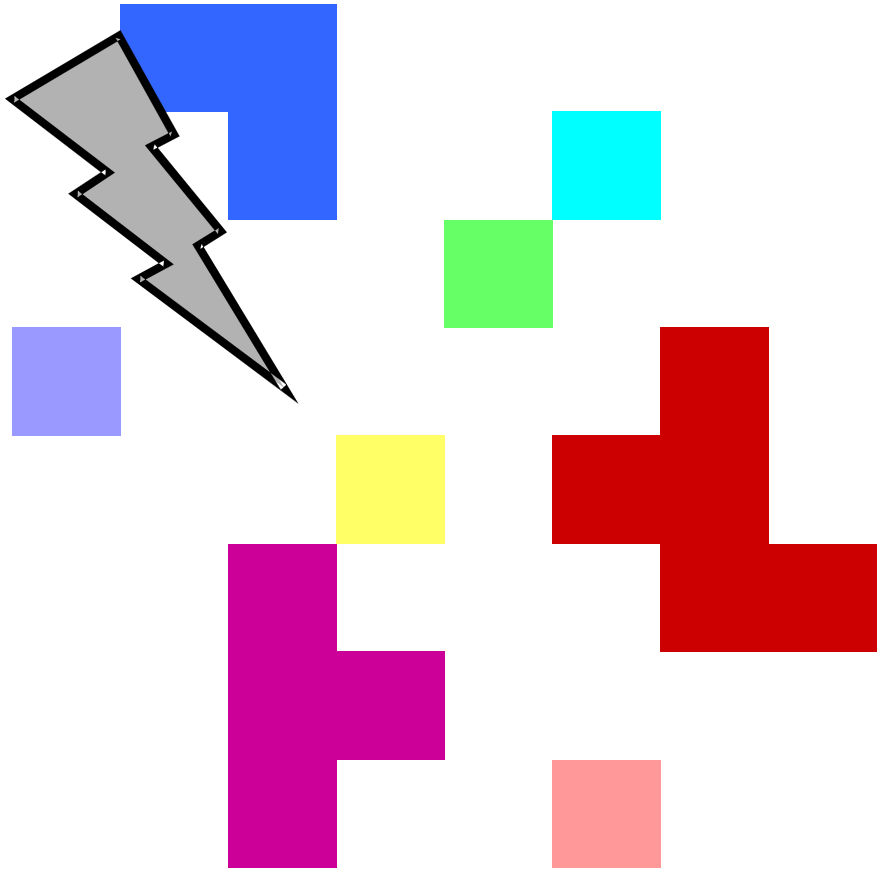
β = 1 : Diseño de páginas web

$$f_\beta(r_i) = \begin{cases} -c\log(r_i) & \beta = 0 \\ c\left(r_i^{-\beta} - 1\right)/\beta & \beta > 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dr_i} f_\beta(r_i) = -cr_i^{-\beta-1}, \quad f_\beta(1) = 0 \quad \forall \beta \geq 0$$

Modelos de Percolación (incendios forestales)

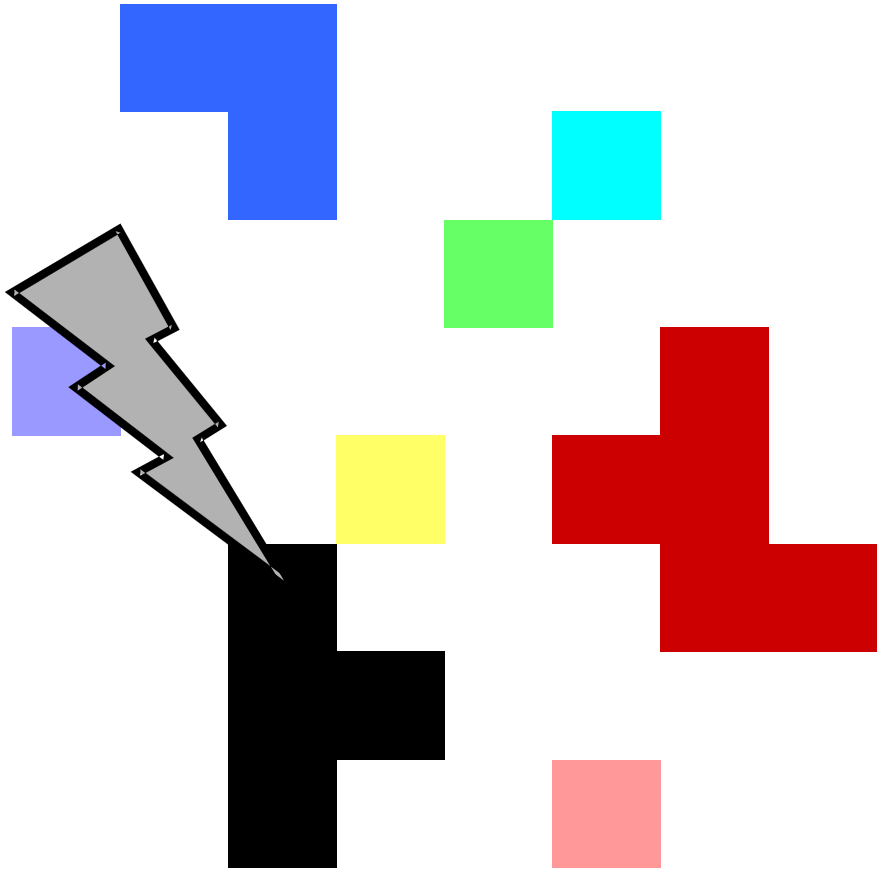
Un rayo cae en un único punto de la grilla



Si cae en un punto vacío, no hace nada

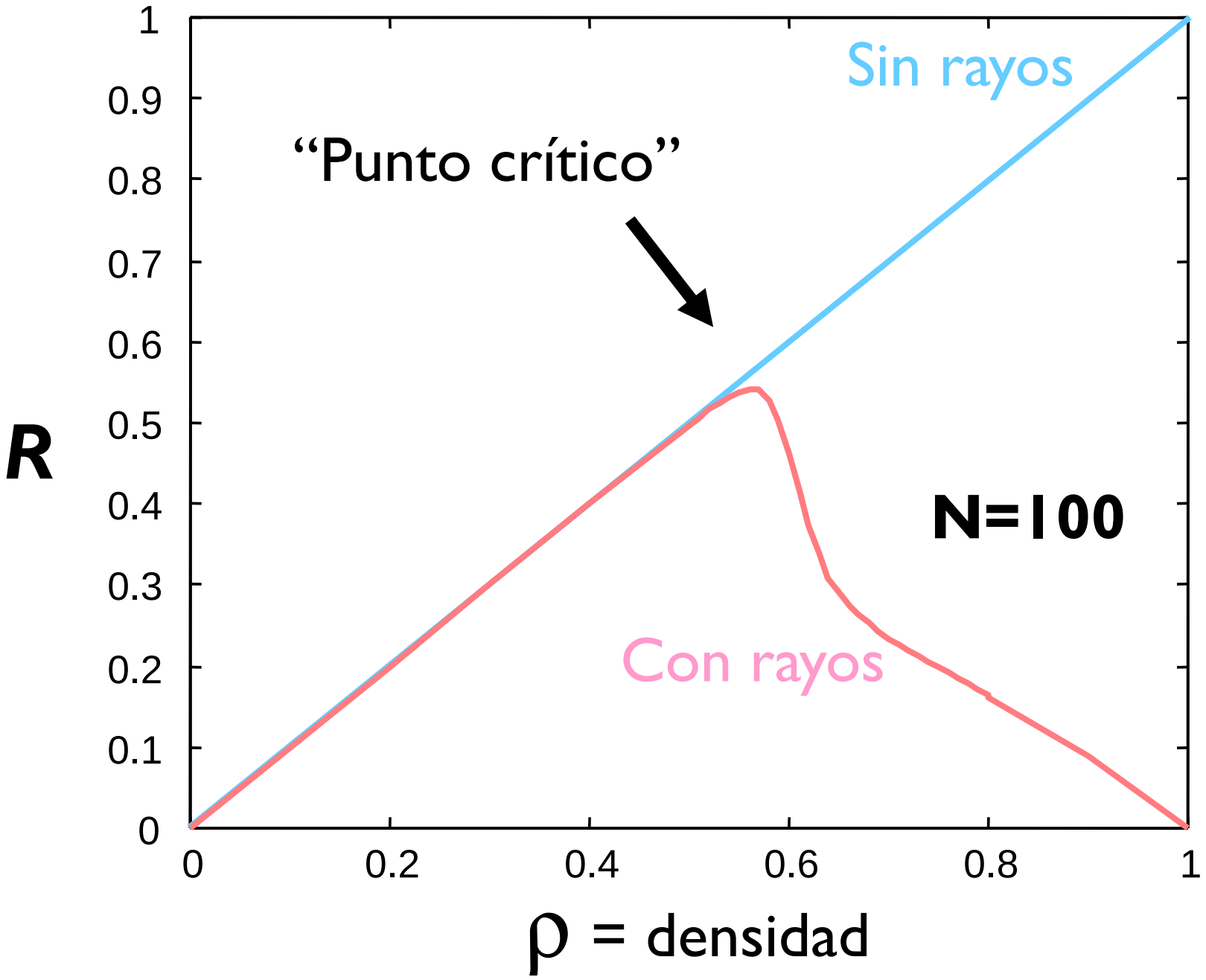
Modelos de Percolación (incendios forestales)

Si cae en un árbol, quema el árbol y sus vecinos



Resultado =

Densidad original - Pérdida


Sin rayos
"Punto crítico"
R
N=100
Con rayos
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
ρ = densidad

Modelo general

$$\min \sum_i p_i l_i$$

$$l_i = f_\beta(r_i)$$

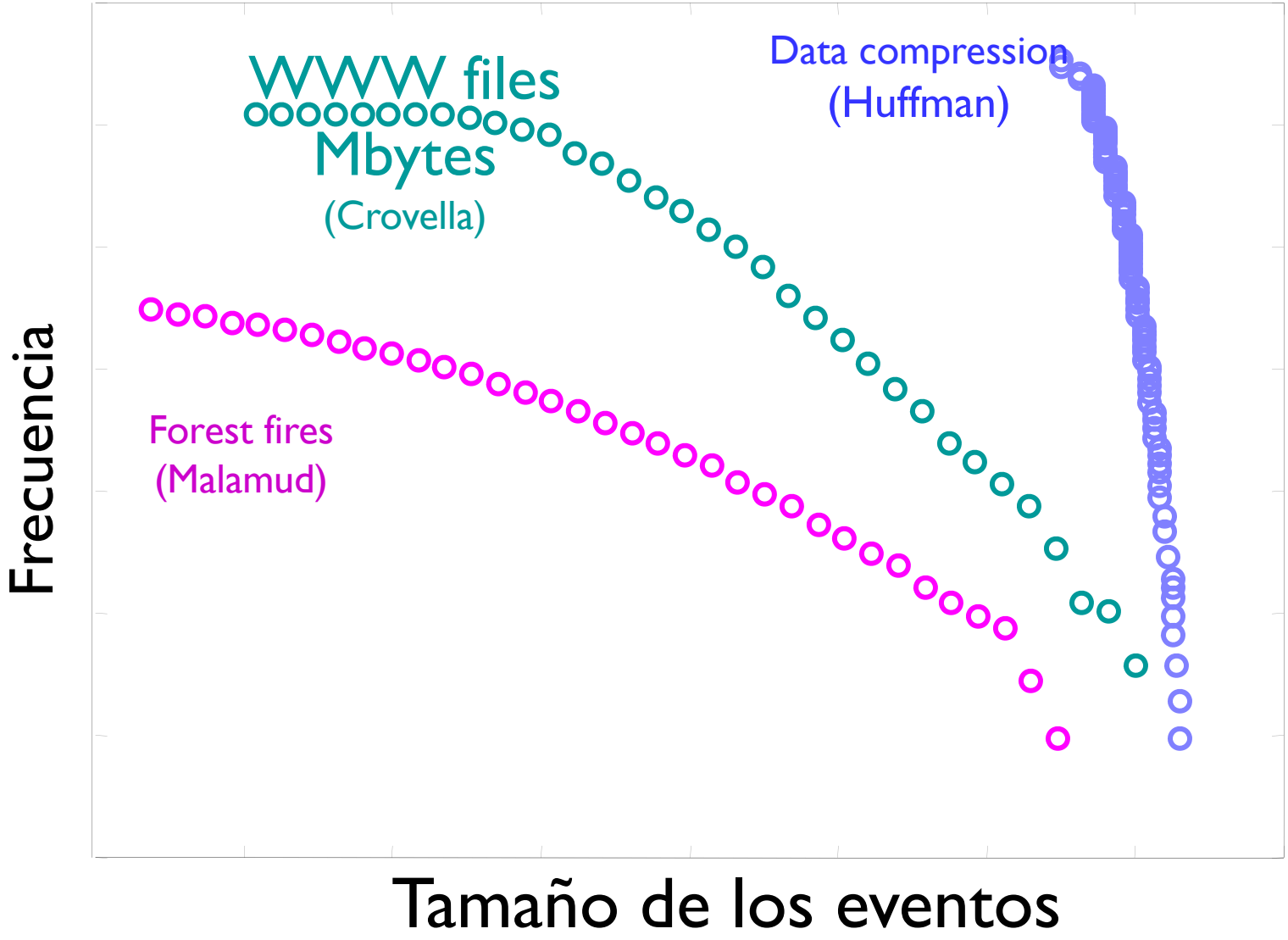
$$\sum_i r_i \leq R$$

β = 2 : Diseño de bosques

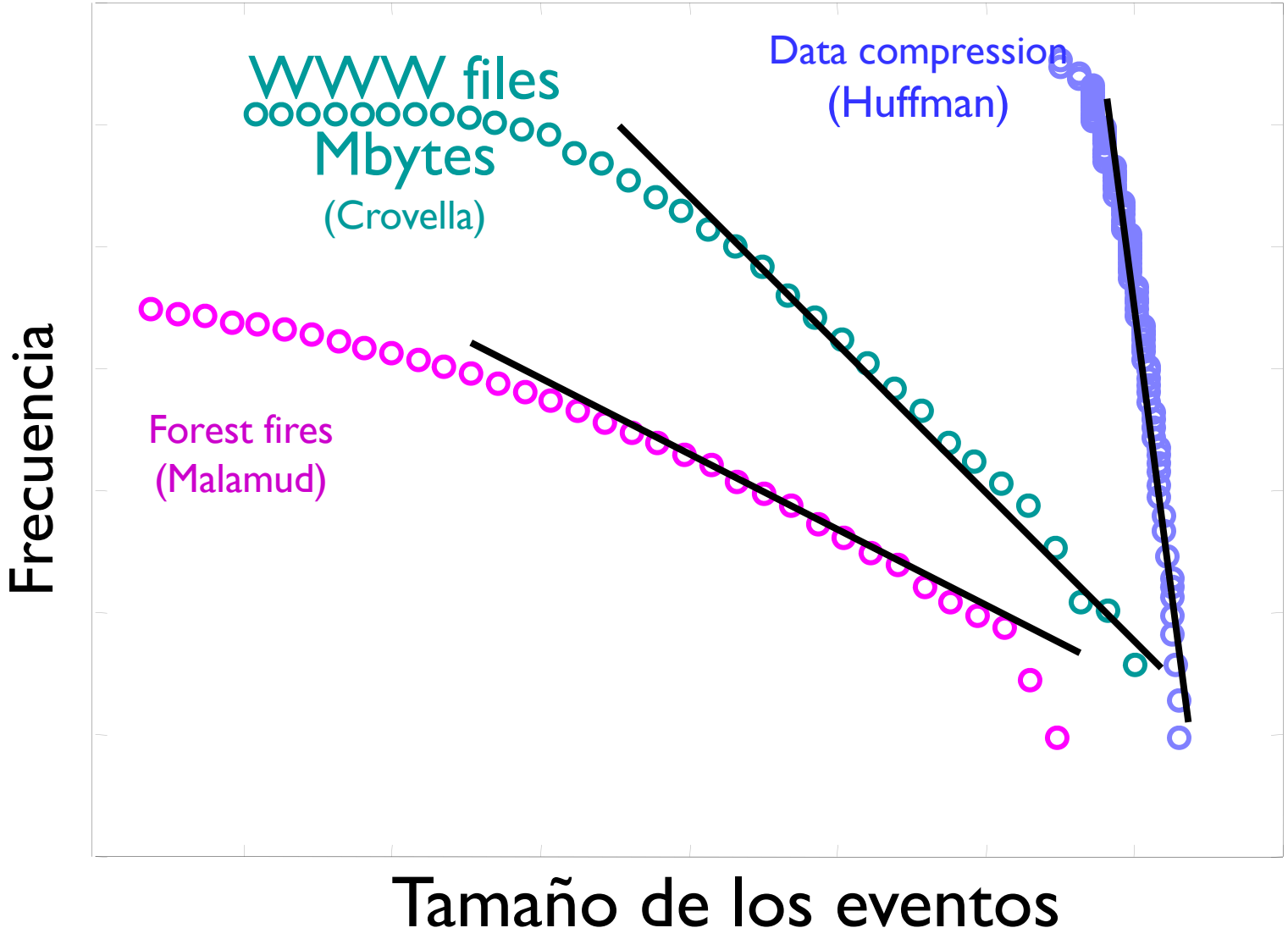
$$f_\beta(r_i) = \begin{cases} -c\log(r_i) & \beta = 0 \\ c\left(r_i^{-\beta} - 1\right)/\beta & \beta > 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dr_i} f_\beta(r_i) = -cr_i^{-\beta-1}, \quad f_\beta(1) = 0 \quad \forall \beta \geq 0$$

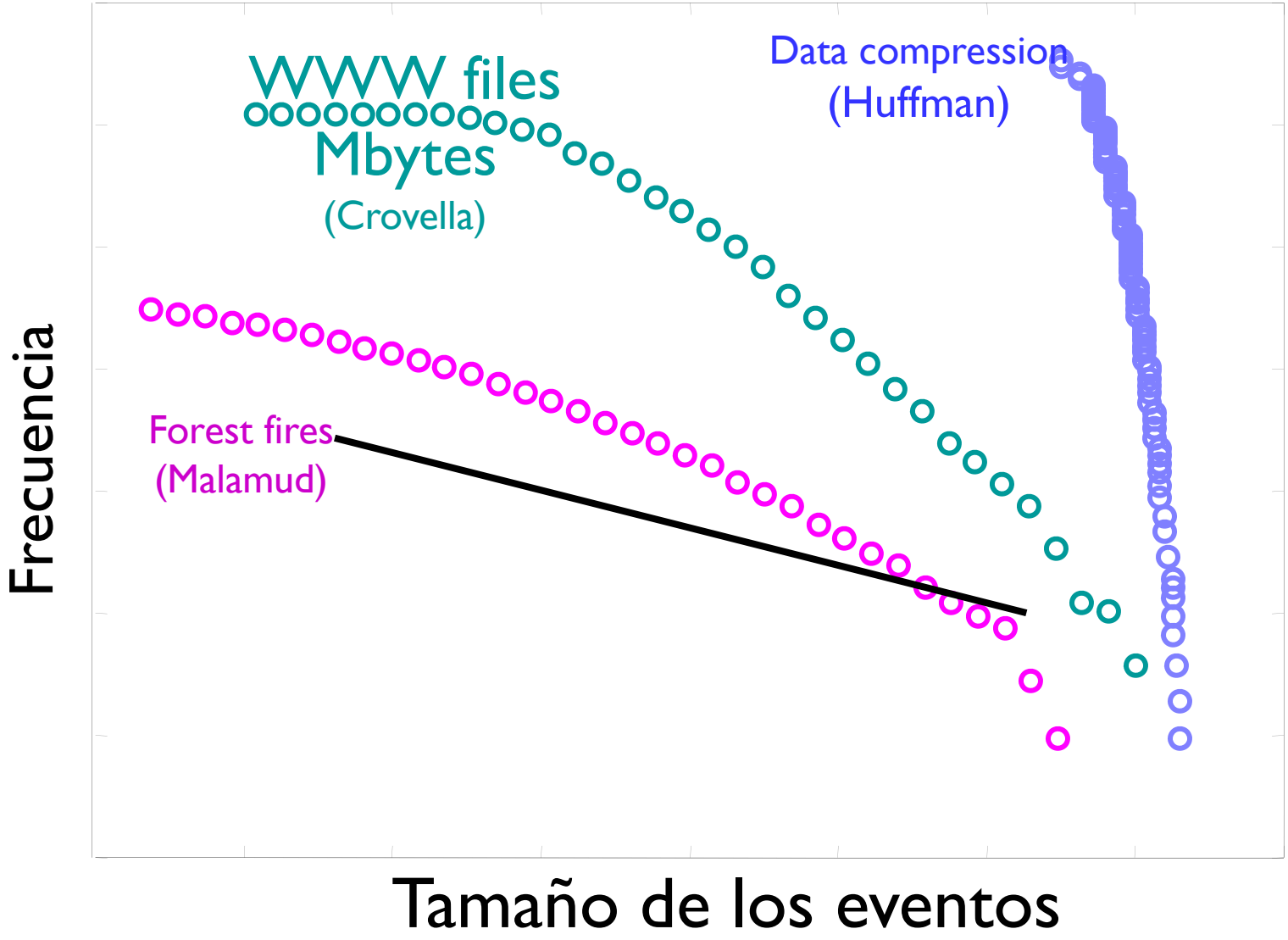
Resultados


WWW files
Mbytes
(Crovella)
Data compression
(Huffman)
Forest fires
(Malamud)
Frecuencia
Tamaño de los eventos

Resultados HOT



Resultados SOC

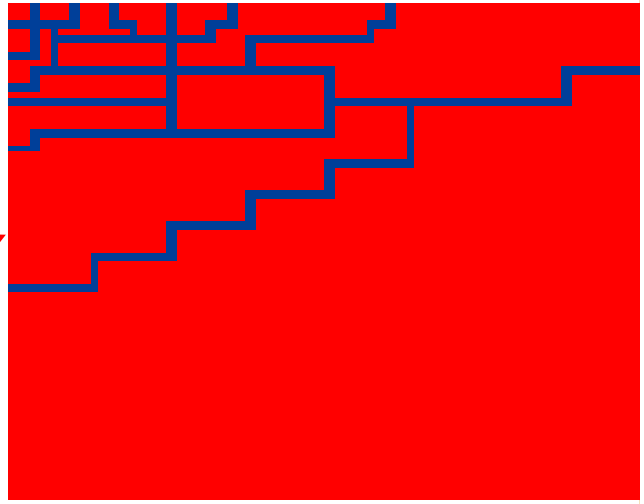


Resultados HOT

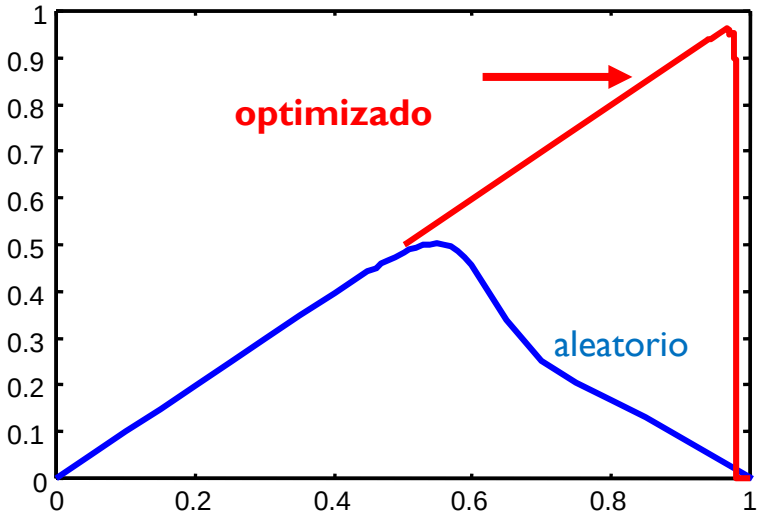
Mediante diseño, se puede incrementar la densidad de salida por encima del punto crítico

SOC/EOC

HOT



- Baja densidad de salida
- Mediana robustez
- Leyes de potencia sólo en el estado crítico



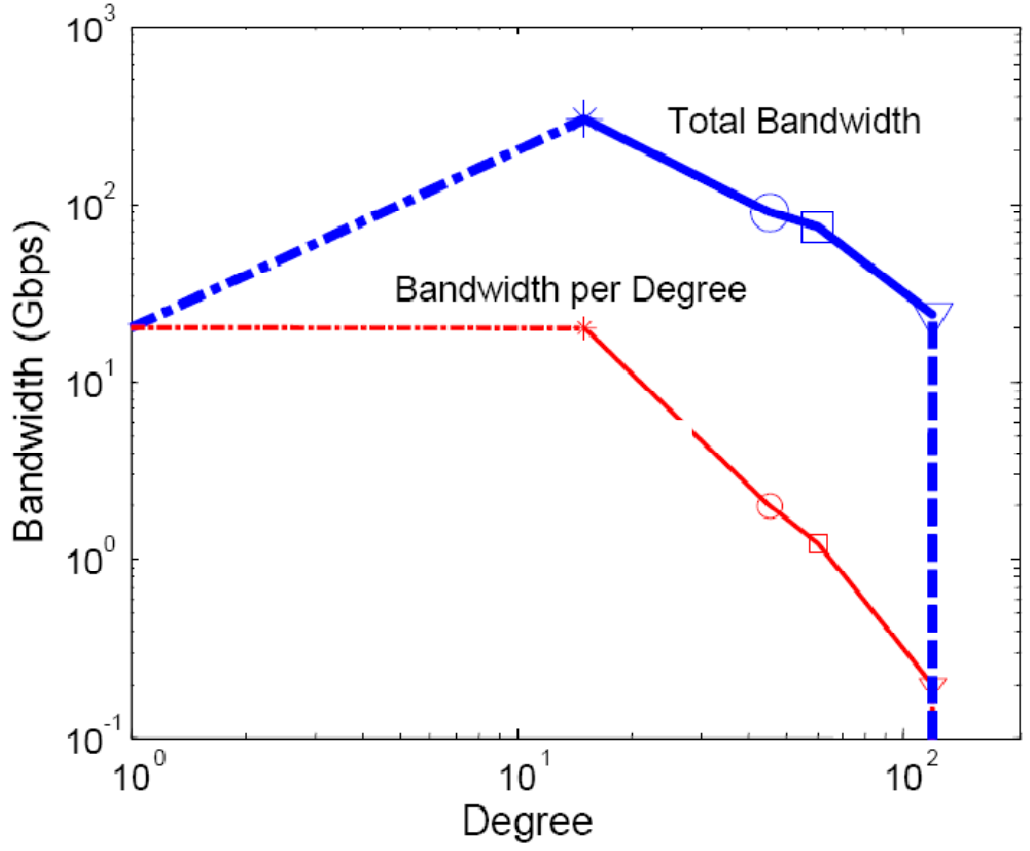
- Alta densidad de salida
- Alta robustez
- Leyes de potencia en todas las densidades

Topología

- Topología de Internet
  - ¿Erdos-Renyi? No! Leyes de potencia…
  - ¿Barabasi? … hmmm, SOC.
    - ¿Conexión preferencial en internet?
  - …
  - Se enfoca en la conectividad y deja de lado las restricciones tecnológicas y económicas en la construcción de Internet

Restricciones

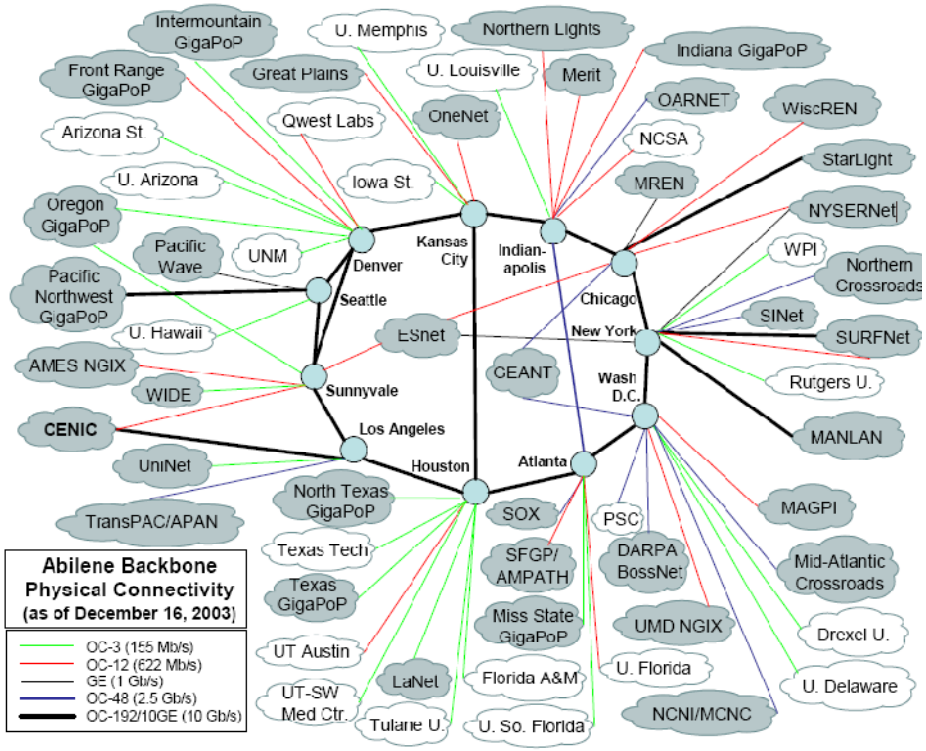
- Los enrutadores (y las subredes) tienen una región posible en el espacio Grado_de_Conexión vs Ancho_de_Banda



Cisco 12146 GSR

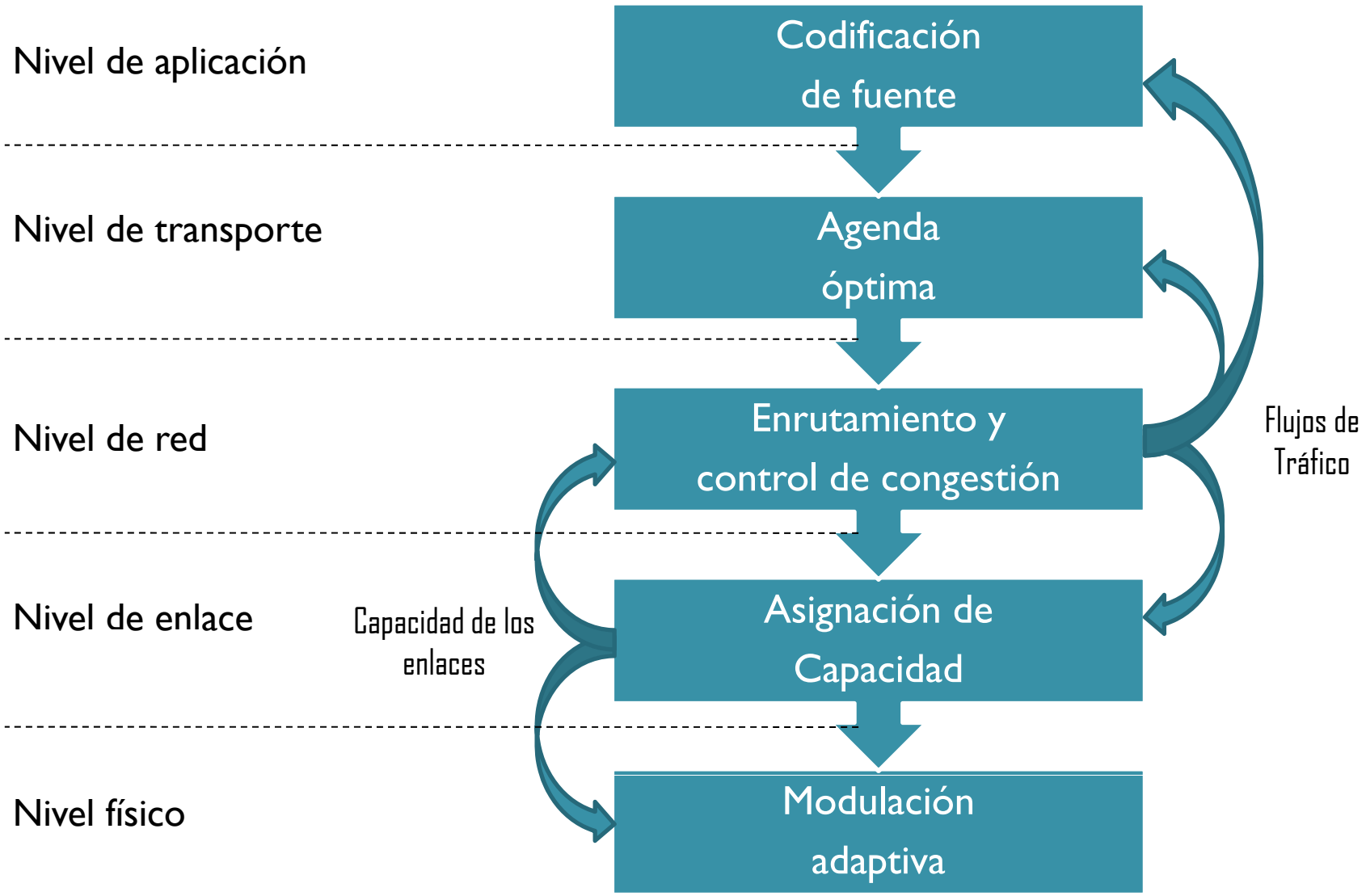
Diseño óptimo

- El costo de instalar y operar enlaces físicos en una red domina el costo de la infraestructura general
- Este es un incentivo para diseñar redes con el mínimo número de enlaces y compartir costos mediante multiplexación.



Los diseños óptimos que consideran estas restricciones generan leyes de potencia en el grado de conexión de los nodos más consistentes con las observadas empíricamente en Internet que las que los *mundos pañuelo* ("small worlds") genera.

Diseño Cross-Layer



Arquitectura de redes de datos

- Ventajas de un modelo en capas:
  - –Reduce la complejidad
  - –Estandariza interfaces
  - –Permite hacer ingeniería modular
  - –Asegura la interoperabilidad
  - –Acelera la evolución
  - –Simplifica el aprendizaje
- ¿Diseños óptimos?

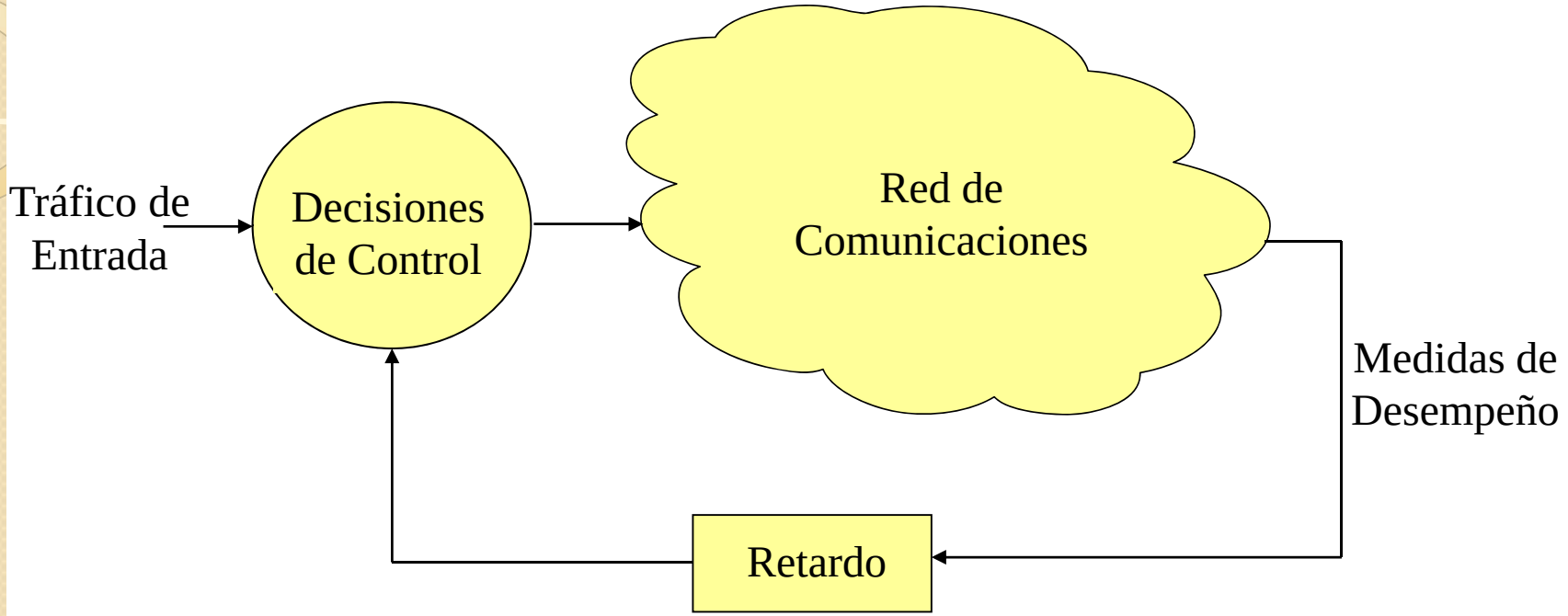
Se necesita una perspectiva holística

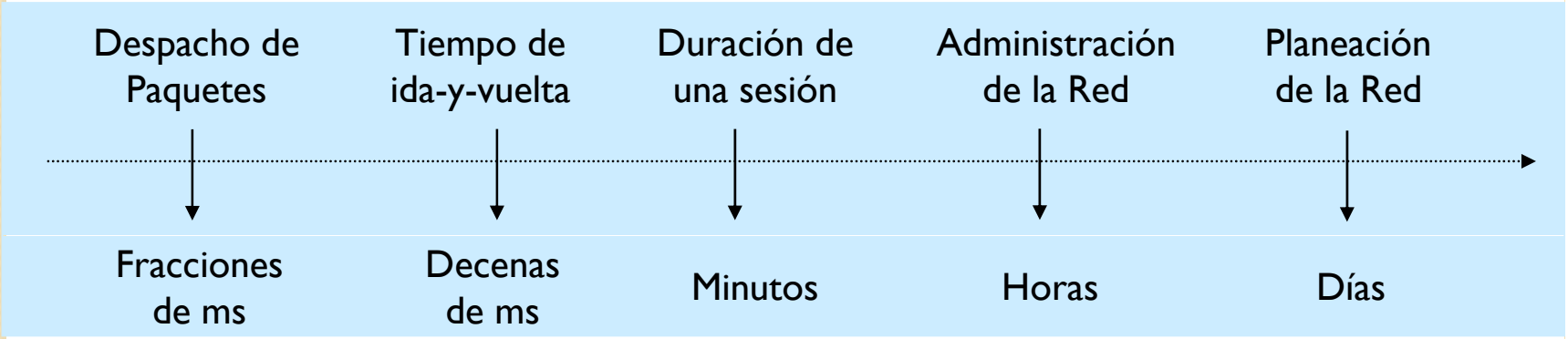
- La arquitectura es importante…
- Pero no se pueden olvidar las interacciones
- Se debe cambiar el enfoque del trabajo cross-layer a una perspectiva holística
  - Eliminar o cancelar las interacciones adversas entre capas
  - Generar robustez también frente a las ideas brillantes en el futuro

Enfoques por considerar

- Teoría de la información multiusuario
  - ¿Cuáles son los límites últimos?
- Optimización no lineal
  - Maximización de la utilidad de la red, con restricciones físicas y de desempeño
  - Optimización convexa no lineal, dualidad, solución distribuida
- Un enfoque de teoría de control para el diseño de protocolos
  - Sistemas dinámicos realimentados con énfasis en la estabilidad (p.ej. Diseño conjunto de algoritmos de acceso múltiple, control de congestión y enrutamiento para asignación de recursos)
- Algoritmos basados en adaptación y aprendizaje
  - Inteligencia computacional (redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, inteligencia de enjambre, …)

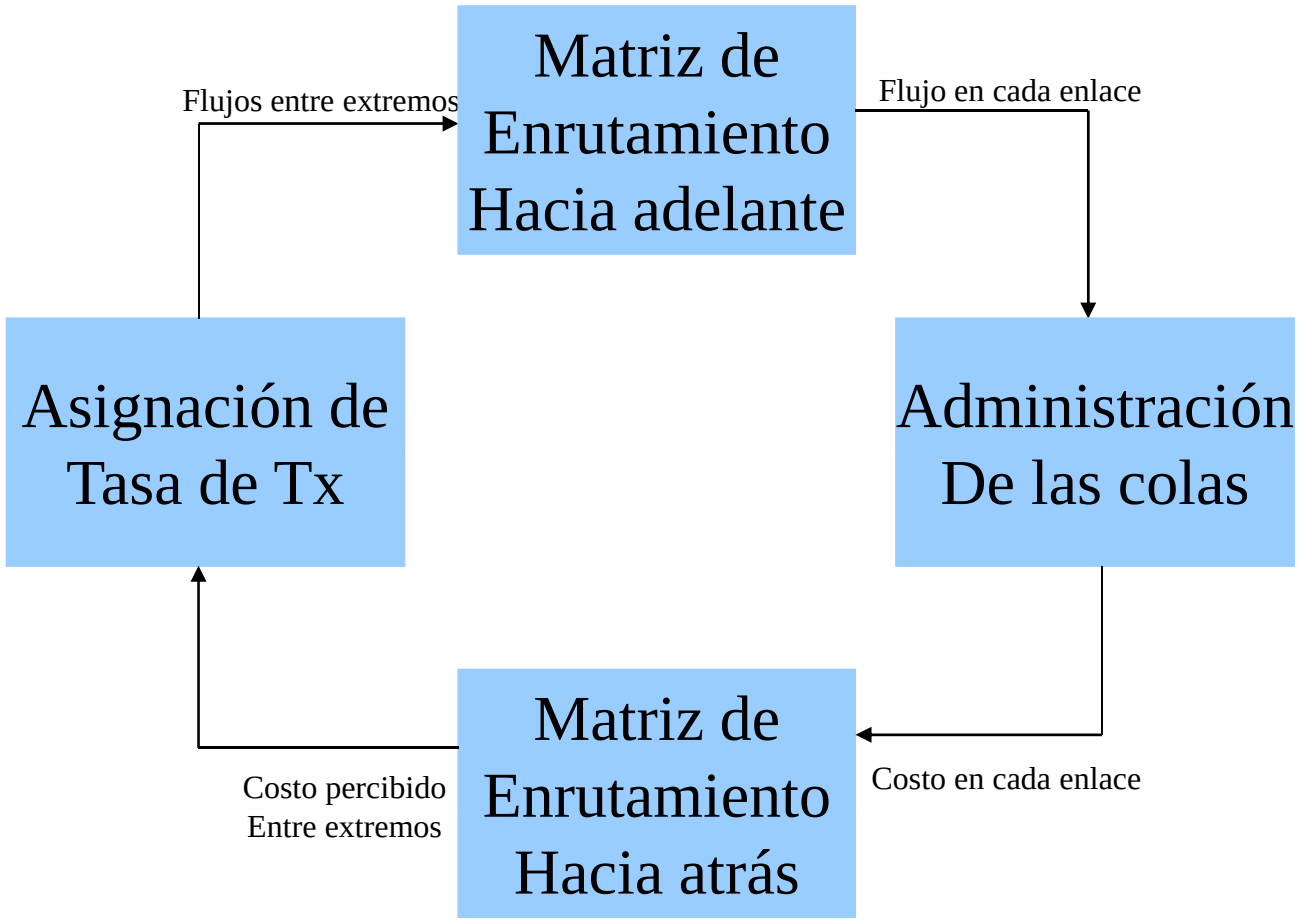
Control Multiescala





Control Predictivo Realimentado

Permitir un consumo más agresivo del ancho de banda si se espera bajo tráfico, o una reducción más abrupta si se espera alto tráfico



Modular la Probabilidad de Pérdida de acuerdo con la tasa que se espera en los próximos momentos

Dispersar el tráfico sobre n rutas independientes antes de la presencia de una ráfaga prolongada y colapsarlo nuevamente después de la ráfaga

Ejemplo: Diseño cross-layer *a_la_HOT*

- Interpretar el control de congestión TCP y el enrutamiento IP como un algoritmo descentralizado para maximizar conjuntamente la utilidad percibida por los usuarios sujeto a restricciones de recursos de capacidad.

$$\max_{x_i>0} \max_{R_i} \sum_i U_i(x_i)$$

$$\text{sujeto a } Rx < c, \;\; R \in \Re$$

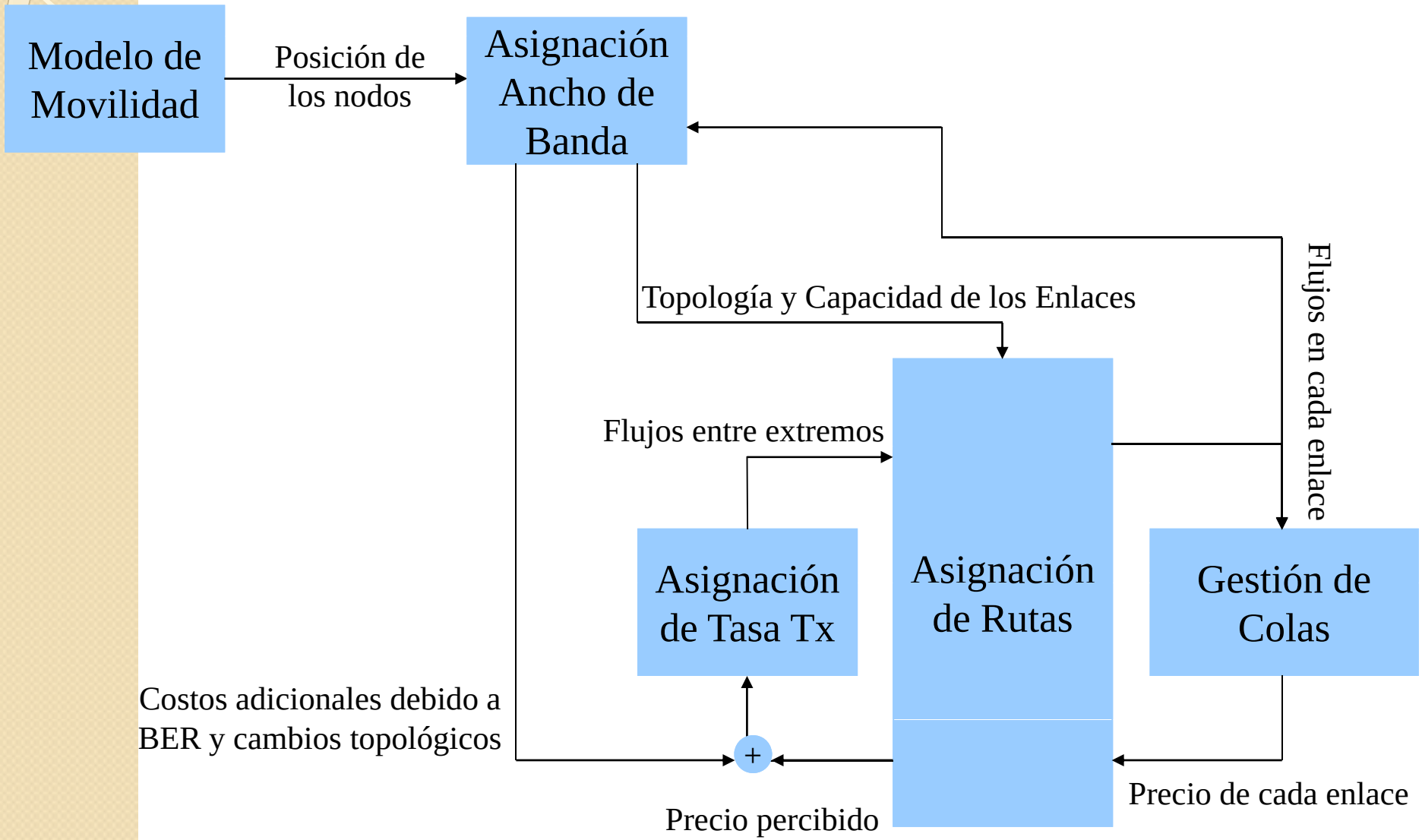
$\Re$ es el conjunto de rutas admisibles
R es una matriz de enrutamiento LxN para L enlaces y N fuentes
R_i es la i-ésima columna de R
c es el vector de capacidades de los enlaces
x_i es la tasa de transmisión de la fuente i
$U_i(x_i)$ es la utilidad percibida por la fuente i

Plantear el problema dual

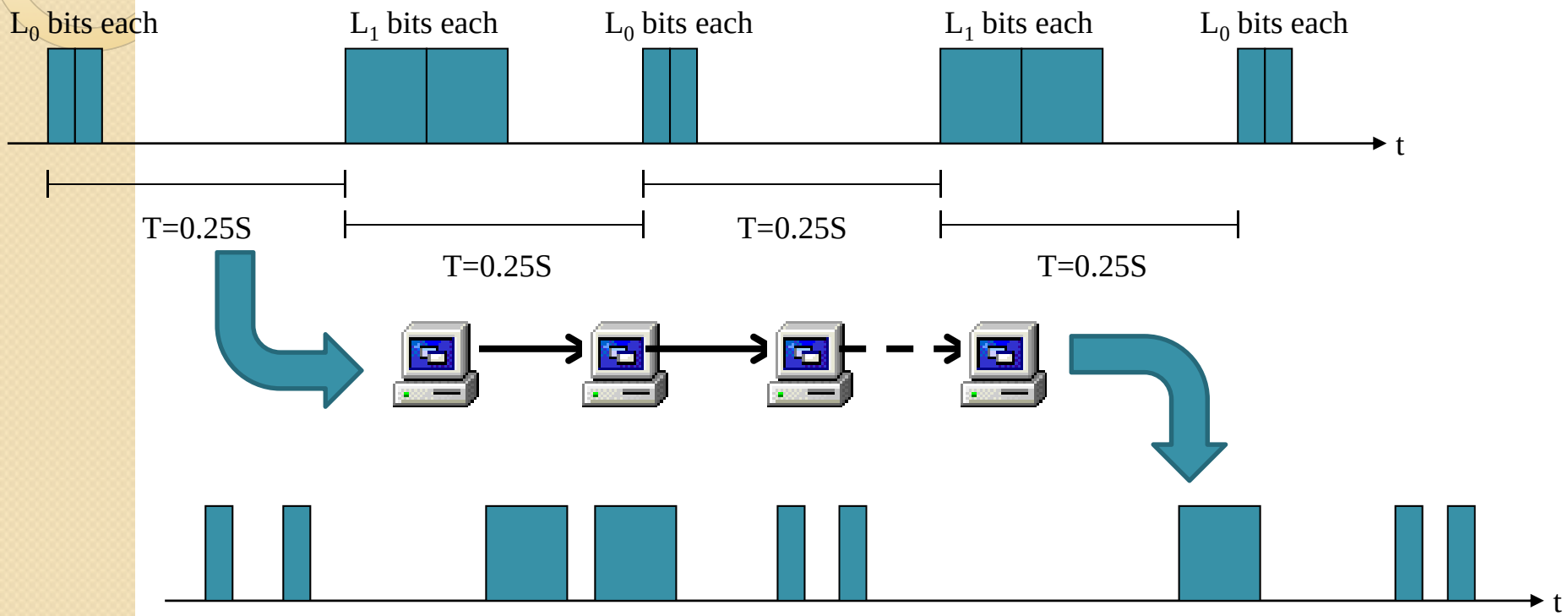
$$\max_{p \geq 0} \sum_i \max_{x_i > 0} \left(U_i(x_i) - x_i \min_{R_i} \sum_l p_l R_{l,i} \right) - p^T c$$

- Una estructura completamente descentralizada donde la asignación de capacidad y el enrutamiento se optimizan separadamente, de acuerdo con el "precio" p

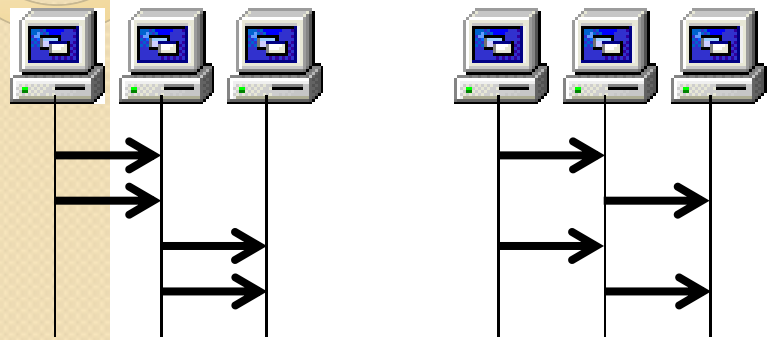
El caso de las redes móviles ad hoc



Estimación de ABW en redes móviles ad hoc



Estimación de ABW en redes móviles ad hoc



The gap between packets of the pair that have the minimum sum of OWD (SOWD) represents the effective time it takes a packet of the given length to get the destination.

$$BW(L_0) = \frac{L_0}{gap_0}$$

$$BW(L_1) = \frac{L_1}{gap_1}$$

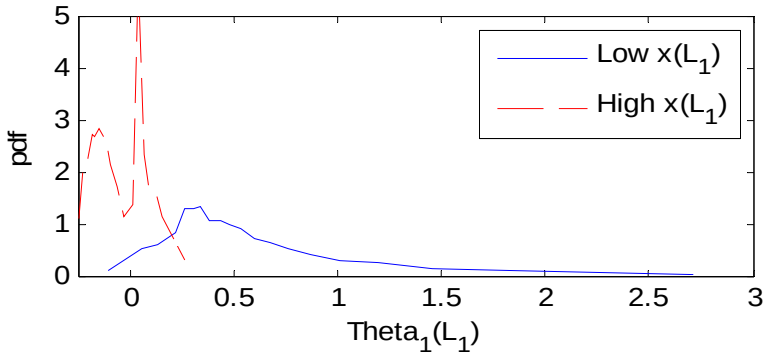
$$BW(L) = \frac{L}{\alpha L + \beta}$$

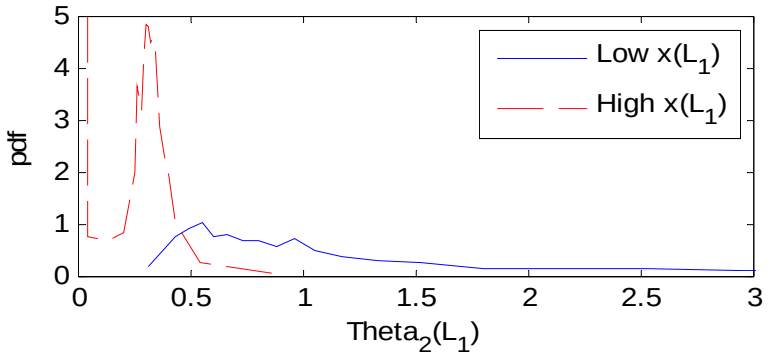
$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 1 \\ L_1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gap_0 \\ gap_1 \end{bmatrix}$$

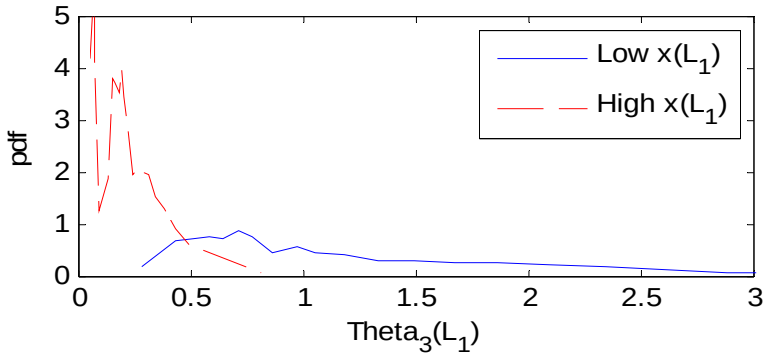
Estimación de ABW en redes móviles ad hoc

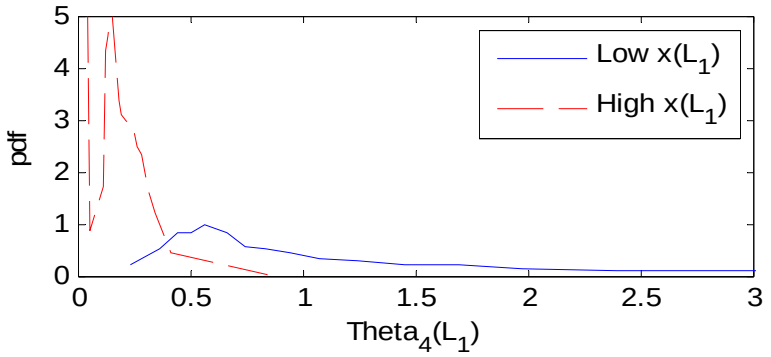
Estatistics from the dispersion trace for L_0 and L_1:

$\theta_1(L_i)$ = mean *gap* between packets of a pair of L_i bits
$\theta_2(L_i)$ = Standard deviation of the *gap* between packets of a pair of L_i bits
$\theta_3(L_i)$ = mean *sowd* of the packets of a pair of L_i bits
$\theta_4(L_i)$ = Standard deviation of the *sowd* of the packets of a pair of L_i bits

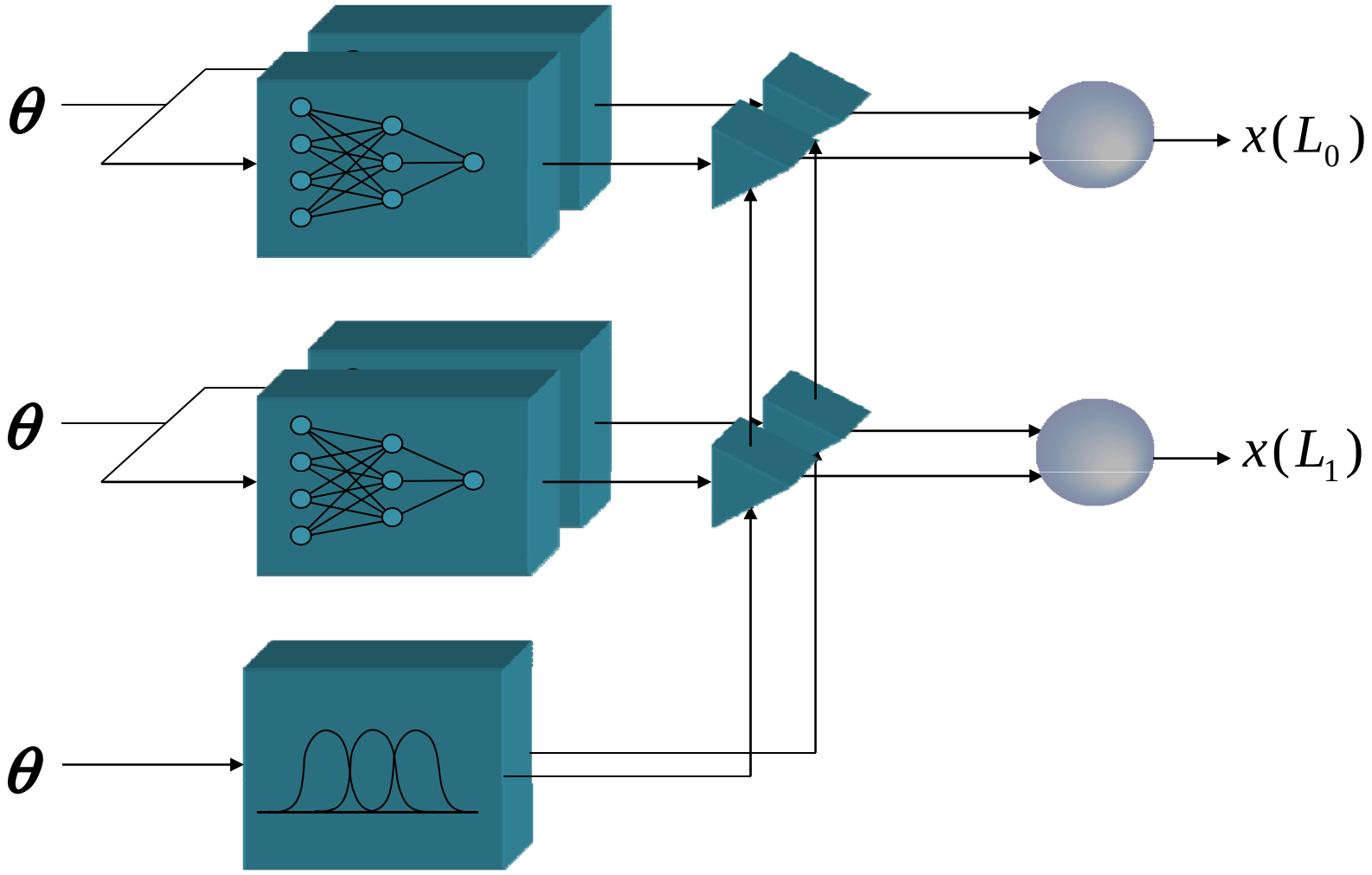




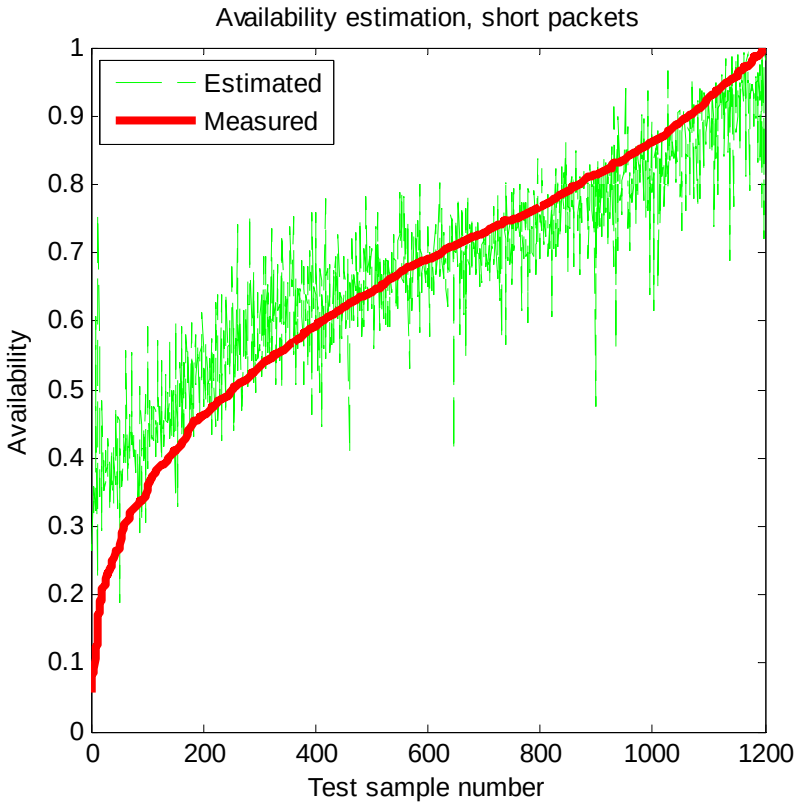


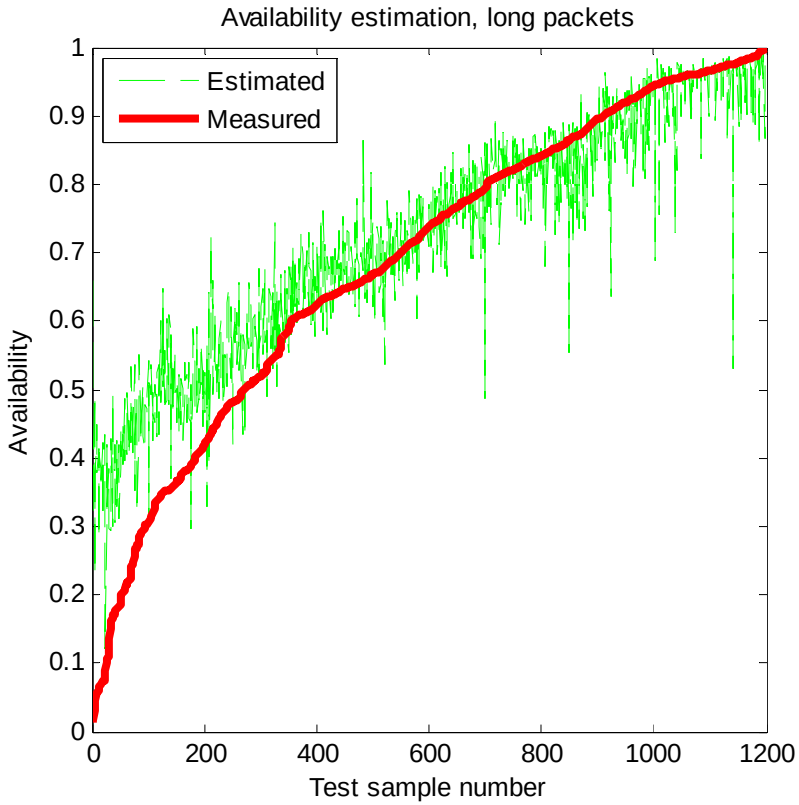


Estimación de ABW en redes móviles ad hoc



Estimación de ABW en redes móviles ad hoc





Gracias!

…Suave con las preguntas