

# TEMA 1

## 1 Topología

Son los elementos físicos (equipos + medios) y su interconexión

Enlaces: interconexión entre medios físicos. Pueden ser directos (extremos de dos equipos) o compartidos (varios equipos conectados a él)

Redes: medios físicos y equipos para interconectar los usuarios (almacenamiento y reenvío)

Topología: niveles de abstracción de las redes (equipos, medios, redes). Distintas figuras (estrella, árbol, anillo, irregular...)

## 2 Arquitectura

Topología + funciones específicas de cada equipo

Las funciones de los equipos están organizadas en términos de:

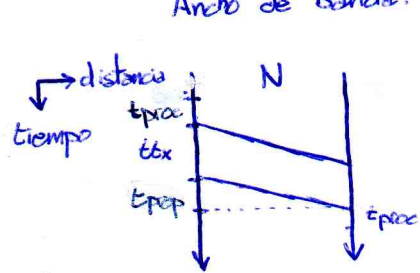
- Protocolos: función en una red que requiere de al menos dos equipos y de la posibilidad de que se intercambien datos
- Torre de protocolos: funciones organizadas jerárquicamente producidas por la abstracción para ofrecer un servicio al nivel superior basándose en el nivel inferior

## 3. Prestaciones

La fiabilidad es la posibilidad de resolver errores (bit o una secuencia/ráfaga de ellos, paquetes perdidos por congestión, rotos, desorden y duplicados)

Las aplicaciones deciden que servicio usar, utilizando la infraestructura (e-mail, news, remote login, procesos distribuidos)

Ancho de banda: bit/segundo



$t_{prec}$   $\equiv$  tiempo de procesamiento (viene dado por el router)

$$t_{tx} = \frac{\text{bits}}{\text{bandwidth}} \equiv \text{tiempo de transmisión}$$

$$t_p = \frac{\text{distancia}}{c} \equiv \text{tiempo de propagación } (c = 200.000 \text{ km/s})$$

$t_c \equiv$  tiempo en cada (lo omitiremos)

$$\text{Tiempo de retardo} \equiv T = N^{\circ} \text{ saltos } (t_{prec} + t_{tx} + t_p) + t_{prec}$$

RTT: tiempo de ida y vuelta. Tiempo de respuesta  $2RTT + T_{tra}$

delay: distancia del tubo; bandwidth: anchura del tubo; capacidad = delay x bandwidth

Aplicaciones interactivas  $\Rightarrow$  sensibles a la latencia (web)

Aplicaciones masivas  $\Rightarrow$  sensibles al bandwidth (descargas)

Aplicaciones multimedia  $\Rightarrow$  sensibles al jitter (variación de la latencia)

Caudal = tamaño transferencia / tiempo de transferencia [bps], debe ser menor que el de cualquier enlace

Tiempo de transferencia = RTT + (tamaño de transferencia / bandwidth) [s]

## Ejercicios

1. Repaso de SALT 2. Ejercicio de aplicar fórmula (lo misterioso: hallar N) 3. Presencial 1: ídem

4. Entregable 1 bit alternante: empaqueta (datos de usuario + señalización HDQ, tail), codifica contra errores de bit, retransmite pasado un plazo / confirma recepciones (señalización) con ACK, manejando la secuencia 0, 1 en el emisor/receptor, no entrega los paquetes con el bit alternante no esperado, retransmite sin cambiar el bit, no retransmite si recibe un ACK no esperado

# Probabilidad

Variaciones (importa el orden) de  $n$  elementos tomados de  $m$  en  $m$

Sin repetición

$$V_{n,m} = \frac{n!}{(n-m)!}$$

Con repetición

$$V_{R,n,m} = n^m$$

Combinaciones (no importa el orden) de  $n$  elementos tomados de  $m$  en  $m$

Sin repetición

$$C_{n,m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \binom{n}{m}$$

Con repetición

$$C_{R,n,m} = \binom{m+n-1}{m}$$

Probabilidad condicionada  $P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)}$

Probabi total  $P(B) = \sum P(A_i)P(B|A_i)$

Bayes  $P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum P(A_j)P(B|A_j)}$

Variable aleatoria discreta

$$E(X) = \sum x_i P_x(X=x_i); \quad V(X) = E(X^2) - (E(X))^2; \quad \sigma = \sqrt{V(X)}$$

Capacidad del enlace (Capacidad máxima de un canal ruidoso):

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bps (bits/seg.)}$$

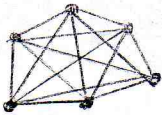
$B$  (Hz) → Ancho de banda

$\frac{S}{N}$  (dB) → Relación señal ruido

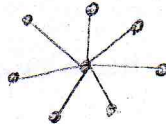
- LÍMITE DE SHANNON -

ACCESO: Public Switching Telephony Network (PSTN)

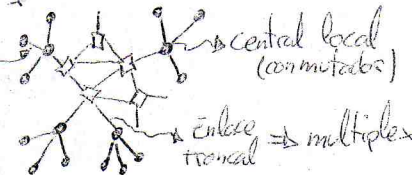
Red con interconectividad total



Red con conmutador central



Red jerárquica de dos niveles

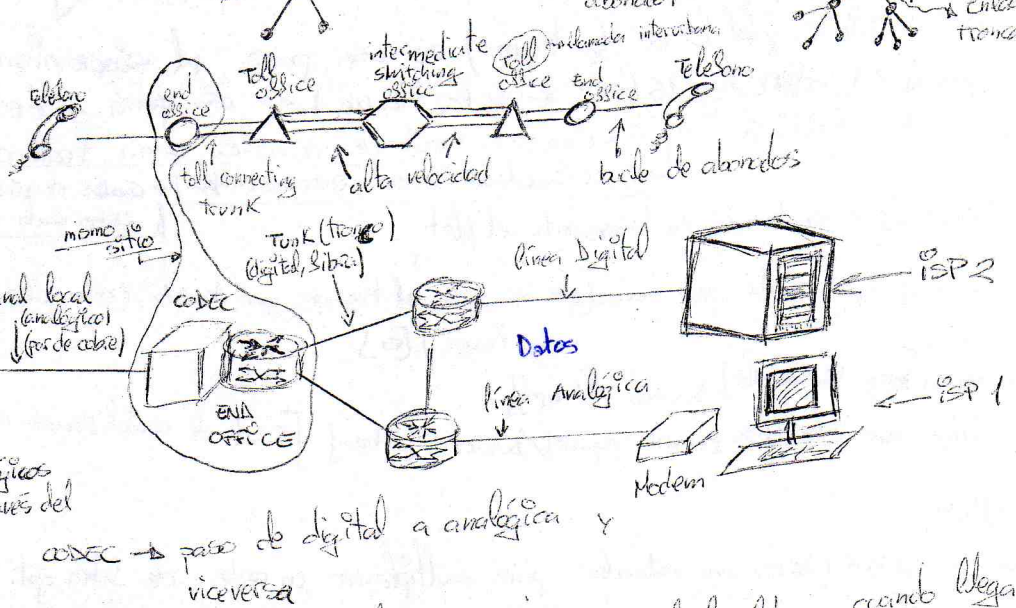


- Equipos y líneas: red telefónica

- Bucle de abonados:



Modem  
convierte los datos a analógicos para transmitirlos a través del bucle local.

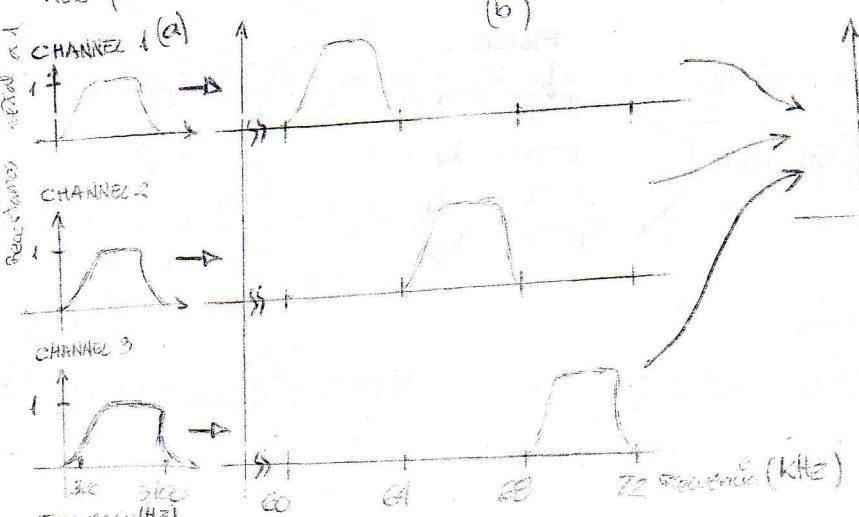


CODEC → paso de digital a analógica y viceversa

En PSTN datos (internet) y voz (teléfono) comparten el primer tramo (cable local) y cuando llega a la central local se dividen los datos, que van a la infraestructura de la red (bucle de abonados), y la voz, que va a la infraestructura red telefónica. PSTN → en desuso.

MULTIPLEXACIÓN

Reparto estático y centralizado del medio. Sirve para repartir la capacidad de un medio entre muchos canales. La contienda es el caso dinámico y distribuido. Multiplexación por división de Frecuencia (FDM):

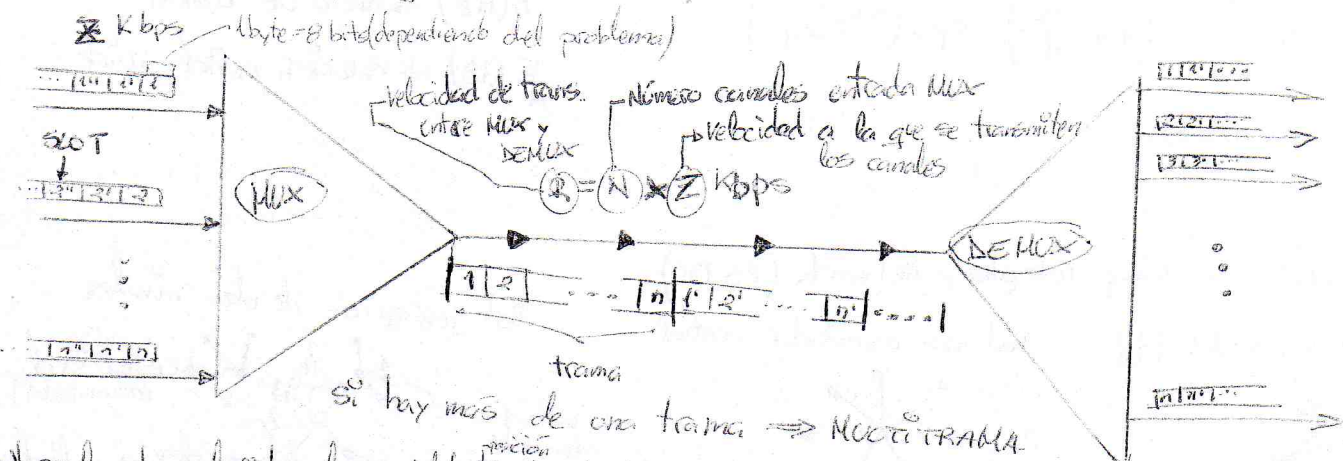


(a) Señal original (canal telefónico o canal multiplexado)  
(b) la señal desplazada en frecuencia  
(c) canal multiplexado

- SISTEMAS ANALÓGICOS -

El único que puede manejar ya directamente circuitos digitales frente al PCM que trabaja en analógico.

PCM → las señales analógicas se digitalizan mediante 8000 muestras por segundo



Si hay más de una trama ⇒ MULTITRAMA

Normalmente el intervalo 0 (slot 0 de la trama) se usa para el sincronismo y canal de señalización común. El intervalo 16 (slot 16 de la trama) se usa para sincronizar la multiplexura y los canales de señalización asociados. resto de canales para tráfico

Tamaño slot / vel. transmisión = tiempo que se tarda en transmitir el slot

En el: canales de señalización multitrama (4Kbps) + canales de señalización asociados (30 canales) = 3Kbps cada canal.

→ Duración: tramas x tiempo que tarda cada trama (que es igual al tiempo que tarda cada slot porque se cuenta @ vel. trans.) [s]

→ Capacidad del canal MFA: (tamaño slot) / duración [Kbps]

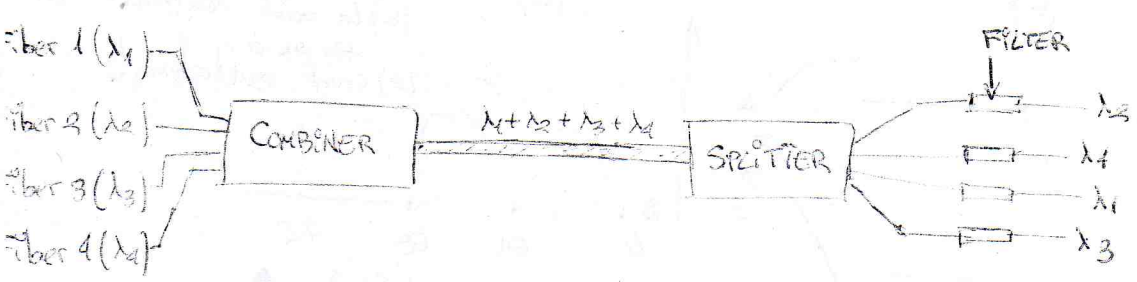
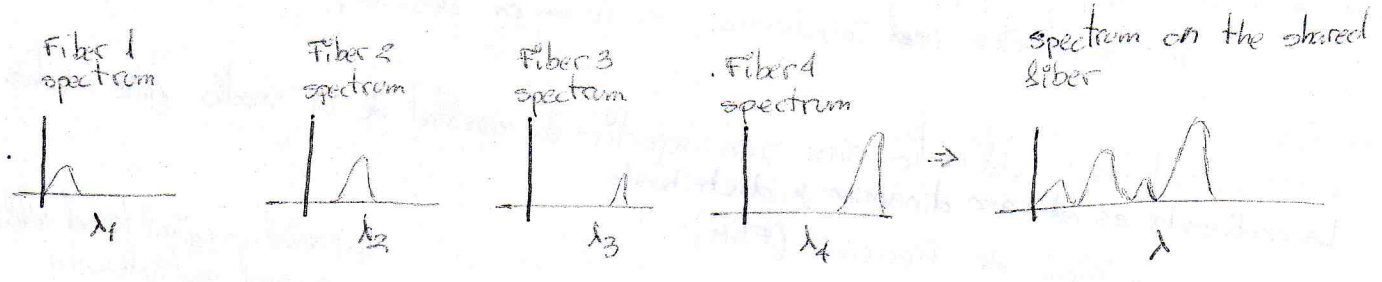
→ Capacidad del canal asociado: (bits en cada segundo) / duración [Kbps] [Canal de señalización asociado]

Señales (Hz) \*

→ La multiplexación SONET/SDH es un estándar para multiplexar en redes de fibra óptica (Hz) \*

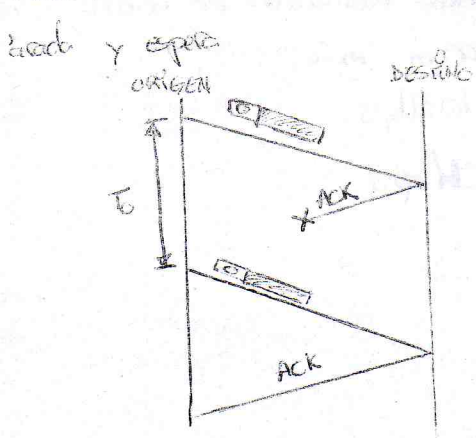
MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN EN "LONGITUDES DE ONDAS" (WDM):

- Fibra óptica



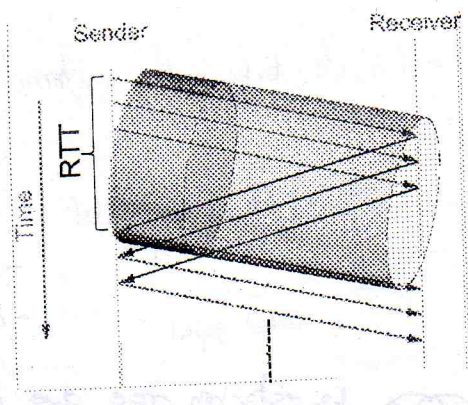
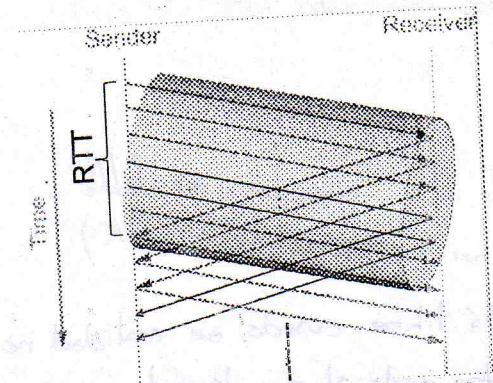
Wavelength division multiplexing

# TRANSMISIÓN FIDEL: TRANSFERENCIA FIDEL:



- \* CADA VEZ que el destino recibe un paquete envía un ACK de confirmación, si el origen no recibe este ACK pronto en  $T$  vuelve a enviar el paquete
- \* CON EL BIT ALTERNANTE asignamos un 0 al primer paquete, 1 al segundo, 0 al tercero, .... Así evitamos duplicados en el destino
- \* Los paquetes llevan un código CRC para comprobar que el paquete llega correctamente.

## Envío continuo:



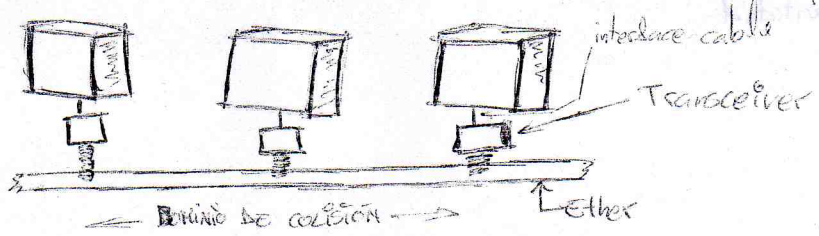
Transmisión continua; "pipe" lleno; "throughput" = "bandwidth"

Transmisión a medias; "pipe" sin llenar; "throughput" < "bandwidth"

## TEMA 2.2 (1ª PARTE): ETHERNET BÁSICA, WIFI Y REDES CELULARES

### ETHERNET CLÁSICA ("Legacy")

direc. ETH = 6 bytes



### Protocolo CSMA-CD

- Antes de que un ordenador empiece a transmitir el paquete, escucha para asegurarse que no hay nadie transmitiendo por la línea (Aun así también hay errores por tpoq. y porque dos ordenadores pueden escuchar a la vez y no oírse nada)
- 1- ESCUCHA 2- DETECTA colisión cuando se detecta una colisión se espera un valor aleatorio y se vuelve a intentar transmitir
- 3- BIT ALEATORIA

broadcast → transmitir a todos los ordenadores (dirección MAC reservada: FFFF:FF...)

multicast → transmitir a un grupo de ordenadores

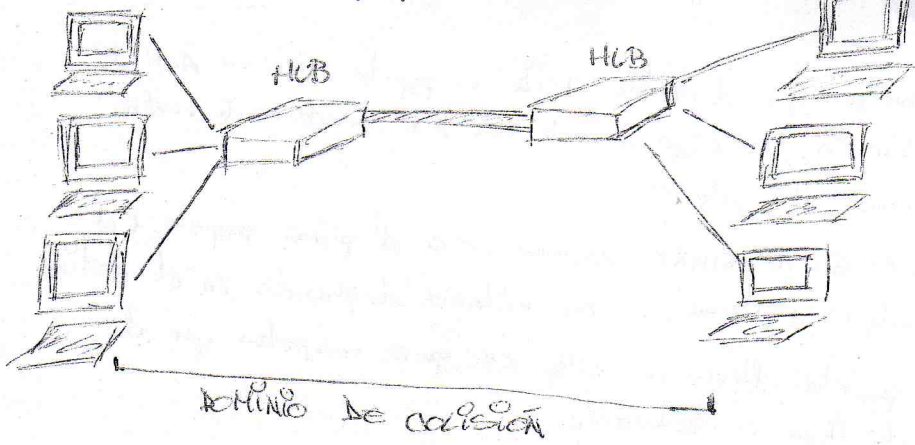
(se crea una dirección MAC para que los ordenadores elegidos reciban los paquetes que van a ella)

### PAQ (frame) Ethernet

|           |            |           |      |            |     |
|-----------|------------|-----------|------|------------|-----|
| 64        | 18         | 18        | 16   | ≥ 46 bytes | 32  |
| Preámbulo | Dest. addr | Src. addr | Type | Body       | CRC |

→ para comprobar que se ha transmitido correctamente la información

→ Dirección MAC de quien lo va a recibir (espacio de direcciones universal)  
 → el campo de los bits/type sirve para transmisión "unicast" y "multicast/broadcast"

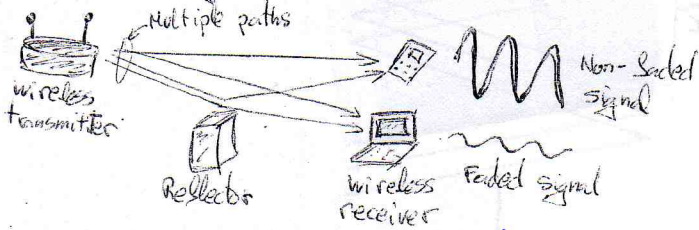


T: pares trenzados de cobre,  
 100 m máx.  
 10: 10 Mbps  
 10: 100 Mbps

## WiFi

WiFi "ad hoc" → conexión de todos los ordenadores entre ellos mediante wifi,

WiFi: Multiprogramación



- El medio radio no es homogéneo ni estable
- Los paquetes han de ser reconocidos (ACK)

Nodo oculto



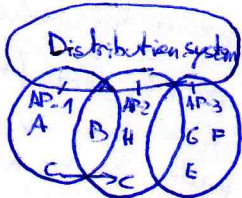
La estación cree que el medio está libre cuando en realidad no lo está, por está siendo utilizado por otro nodo al que la estación no ve

Nodo expuesto



La estación cree que el medio está ocupado cuando en realidad lo está ocupando otro nodo que no interferiría en su transmisión a otro destino

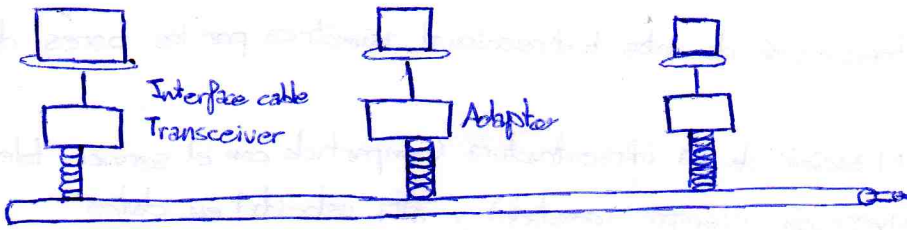
Wifi extendida



Distribución y movilidad

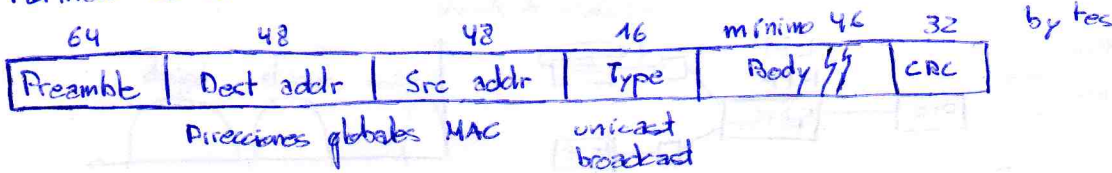
# Ethernet básica, WiFi y redes celulares

## Ethernet



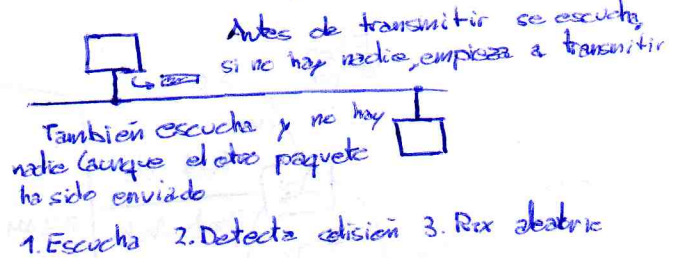
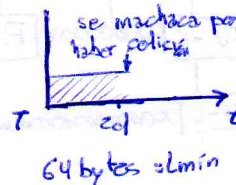
Medio común  
 Dominio de colisión  
 Retransmisiones  
 abatorias

Formato de la PDU (trama) de Ethernet



Protocolo CSMA-CD y colisiones: para transmisión Half-duplex, se detecta la portadora, las colisiones y la longitud mínima de trama. La espera es exponencial para reintentos. Ventana de colisión

1. A transmite en  $t$
2. Se alcanza B en  $t+d$
3. B transmite en  $t+d$
4. El indicador de colisión (runt) llega a A en  $t+2d$



$2,5 \mu s; 4 Rep \Rightarrow 2d, 5 \mu s, 10 Mbps$

Hubs Ethernet: pares y repetidores. 10 (Mbps) Base T (pares twisted trenzados, máx 100) + repetidores

Dominio de colisión: Hubs + pares

Categorías y evolución del nivel físico (cobre): dispositivos

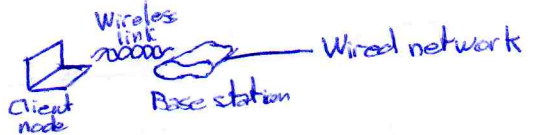
## WiFi

Red inalámbrica con infraestructura (puntos de acceso)

Ad hoc: enlaces entre clientes móviles

El medio radio no es homogéneo ni estable. Los paquetes han de ser reconocidos (ACK)

Problemas: red oculto, red expuesta

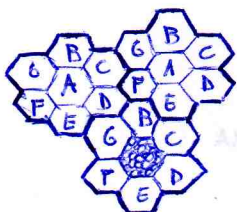


## Protocolo CSMA-CA

## Redes celulares

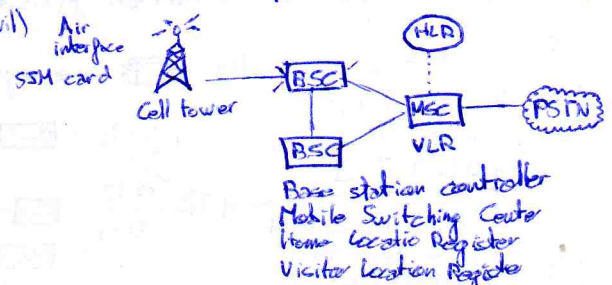
GSM: Analógica (1G), Digital (2G), Datos (3G) y alta velocidad (4G)

Sistema celular: reutilización de frecuencias, distintas si son conjuntas y microceldas para mayor densidad



Factor de reutilización  $F = \frac{\text{portadoras en sistema}}{\text{portadoras en cada celda (pares)}}$

Control: para gestionar el sistema (base móvil)  
 Anuncios: para avisar a los usuarios de llamadas entrantes  
 Acceso: para establecimiento de llamadas y asignación de canales  
 Datos



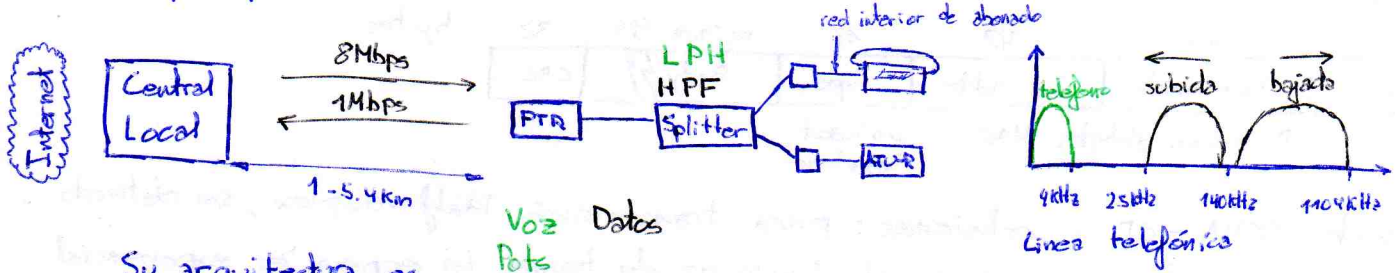
# Acceso digital en redes de abonado: xDSL y xPON

## xDSL

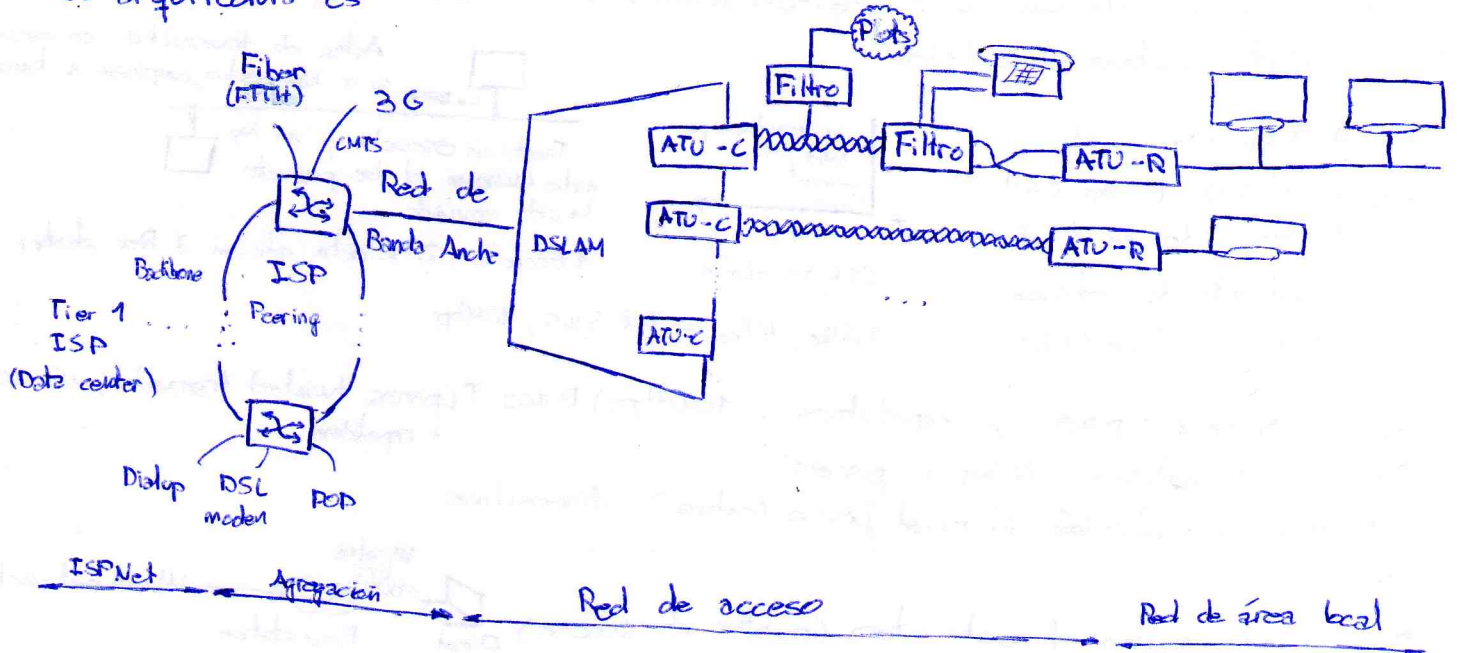
Protocolo de nivel físico para transmisión de datos bidireccional, asimétrica por los pares de cobre telefónico

Su principal ventaja son la reutilización de la infraestructura (compartido con el servicio telefónico, gran disponibilidad, baja inversión, siempre conectado) y alta velocidad en datos

Su principal inconveniente es la calidad del bucle de abonado



Su arquitectura es

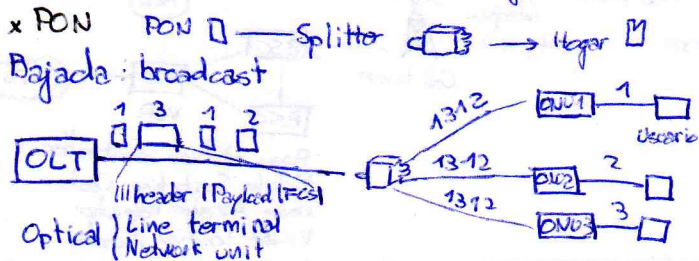


Los factores que determinan las prestaciones del nivel físico son la distancia, el diámetro del cable, las interferencias...

Evolución...

**PPP**  
 Determina el comienzo y fin de cada paquete y detecta errores  
 Network Control Protocol: obtención de parámetros de red. Byte de flag, address, control, protocolo (2), paquete IP (varias), checksum (264) y flag

**ATM**  
 Servicio orientado a conexión no fiable. Fragmenta las unidades de datos en PDUs (53 bytes), que se transmiten físicamente por ADSL



Subida: acceso múltiple TDMA



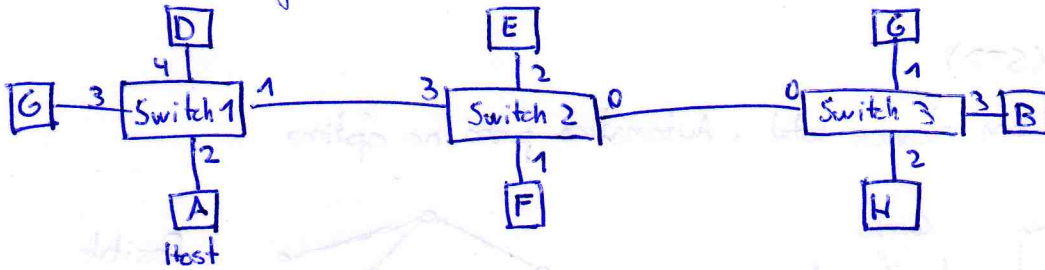
# TEMA 3 CONMUTACIÓN EN REDES DE DATOS

Conmutación de paquetes

Resumidas en página 17

Redes con datagramas

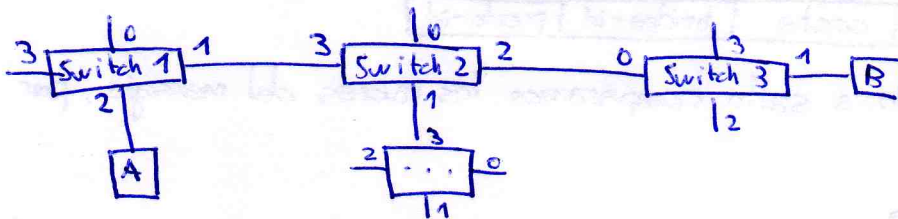
Resumidas en página 35



| Destino | Puertos |
|---------|---------|
| A       | 3       |
| B       | 0       |
| C       | 3       |
| D       | 3       |
| E       | 2       |
| F       | 1       |
| G       | 0       |
| H       | 0       |

Redes con circuitos virtuales

Resumidas en página 36



| Destino | Puertos |
|---------|---------|
| A       | 3       |
| B       | 2       |
| C       | 3       |
| D       | 3       |
| E       | 2       |
| F       | 1       |
| G       | 0       |
| H       | 0       |

Tablas CV

Solo para establecimiento

|    | Incoming Interface | Incoming VC | Outgoing Interface | Outgoing VC |
|----|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| S1 | 2                  | 5           | 1                  | 11          |
| S2 | 3                  | 11          | 2                  | 7           |
| S3 | 0                  | 7           | 1                  | 4           |

Encaminamiento fuente:



Entrada al conmutador

D C B A

D C B A

P H D C B A

Salida del conmutador

A D C B

D C B

P H D C B A

Rotación

Eliminación

Puntero

Conmutación en Ethernet

Puente (Bridge): conecta dos LANs difusivas

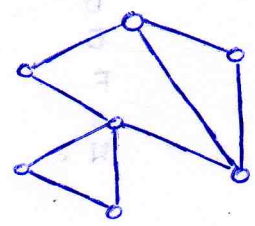
Se producen caídas por bucles (loops) redundantes

Copiar, aprender y olvidar:

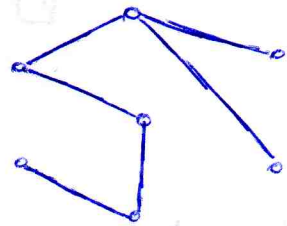
En cada bridge hay una tabla de forwarding en la que se asigna una MAC destino a un puerto local. Esta tabla está inicialmente vacía. Al recibir un paquete, si su MAC (Addr - Destino) pertenece a la tabla de forwarding, se encamina; en caso contrario, se copia a todos los enlaces (inundación) por si acaso. Si la tabla se rellena con MAC Addr - Origen (backward learning), las entradas de la tabla se vaciarían por falta de uso.

### Spanning Tree Protocol (STP)

Topología sin bucles y con alcance total. Automática pero no óptima



Grafo topológico de red con bucles



Posible árbol topológico

Solo se envían paquetes en los puentes del STP

Los puentes intercambian mensajes de señalización (BPDUs) en cada LAN:

|         |       |           |           |
|---------|-------|-----------|-----------|
| raíz-id | coste | bridge-id | puerto-id |
|---------|-------|-----------|-----------|

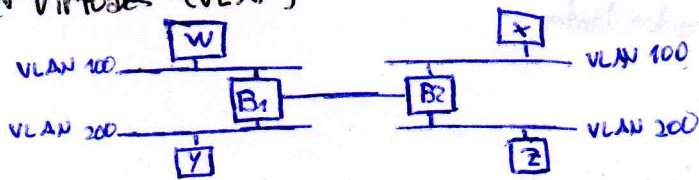
¿Cómo se construye? Salto a salto comparamos los valores del mensaje, por la izquierda, a más pequeño:

- Se decide el puente raíz
- Para cada LAN se decide un único puente designado (único encargado de copiar el tráfico a esa LAN) según el de menor coste a la raíz y menor id
- Cada puente marca su puerto a la raíz (marcado por el camino más corto)
- Cada puente marca sus puertos designados (los que le conectan con las LANs para las que son el puente designado)

En cada puente solo se copian paquetes desde/hacia los puertos raíz y designados. El estado de cada puerto del puente es fijado por el STP. El forwarding depende de dicho estado, que puede ser:

- Blocking: no copia ninguna trama que reciba (fuera del STP)
- Forwarding: copia, aprende y alivia
- Listening: STP en construcción (raíz, designado, nada? no copia ni aprende)
- Learning: STP en construcción (será forwarding, no copia pero aprende)
- Disabled: no participa en la construcción del STP por decisión de un admin

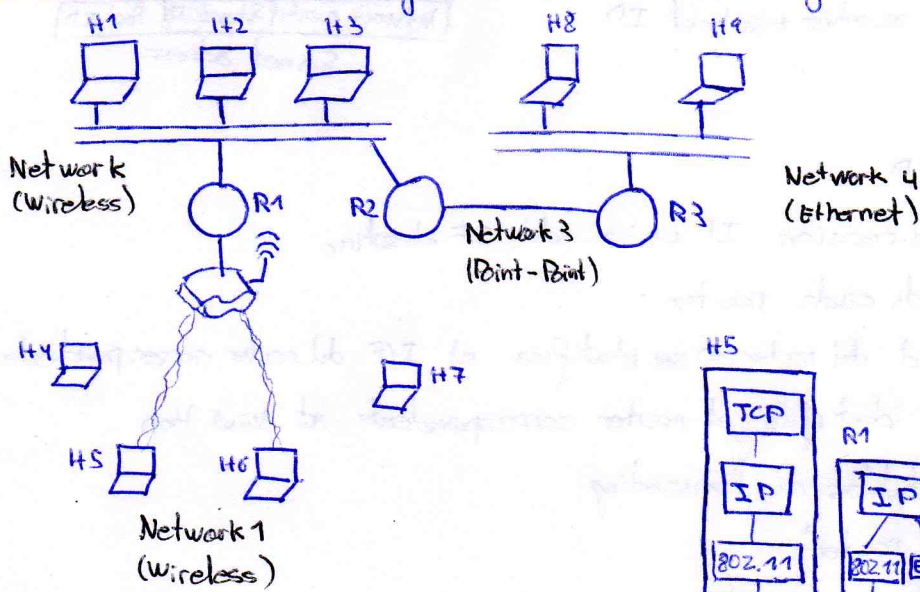
### LAN Virtuales (VLAN)



# TEMA 4

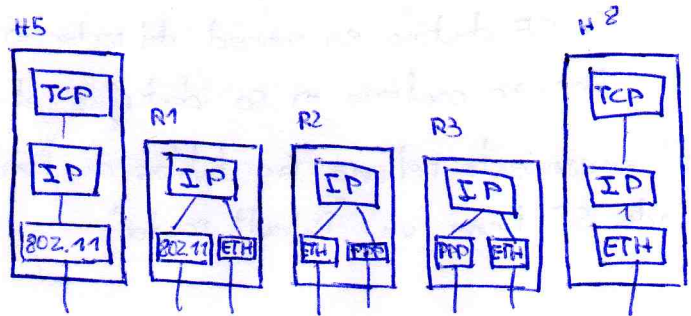
## Encaminto en redes de datos

• Inter-red: colección arbitraria de redes interconectadas para entregar un servicio de intercambio de datagramas entre sistemas finales



IP: protocolo nuclear para construir redes heterogéneas escalables

Se ejecutan en H y R  
Ejemplo



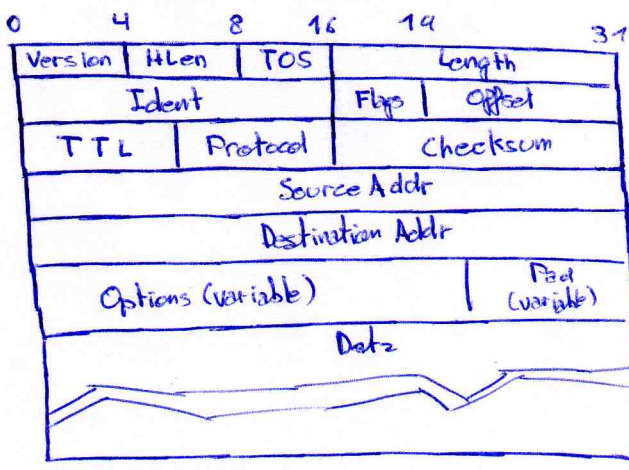
### • Modelo de servicio IP:

Modelo de envío de datos sin conexión CL (connection less)

Modelo de envío de datos "Best effort": las PDUs se pueden perder, desordenar, duplicar y retardar

Mecanismo de direccionamiento (identificación) universal

### • Modelo de servicio: formato de PDU



Version: 4 en IPv4

HLen: nº palabras de 32 bits en las cabeceras

TOS: tipo de servicios (QoS)

Length: bytes en el datagrama

Ident: info para fragmentación

Flags/offset: " " "

TTL: contador de saltos

Protocol: clave de demux (TCP=6, UDP=17)

Checksum: protección de la cabecera

Dest y Source Addr: direcciones destino y fuente

### • Direccionamiento global

Direcciones universales. Jerarquía: nº subred + nº SF. Sintaxis

10.3.2.4 ⇒

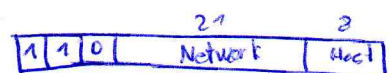
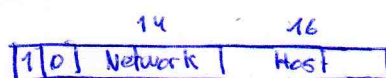
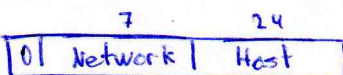
128 redes de 16 777 216 SFs cada una

128.96.33.1 ⇒

16 384 redes de 65 535 SFs cada una

192.12.69.77 ⇒

2047 152 redes de 256 SFs cada una



# Clases subnetting

Mask = número de bits de identificación de red

$2^{\text{mask}}$  redes de  $2^{32-\text{mask}}$  SFs cada una

Identificación de red = network number + subnet ID

Network number | Host number

111111111111111111111111 | 00000000  
Subnet mask (255.255.255.0)

Network number | Subnet ID | Host ID  
Subnet address

## Forwarding de datagramas IP

Cada datagrama tiene la dirección IP única del SF destino

En la tabla de forwarding de cada router:

Si SF destino en subred del router  $\Rightarrow$  se identifica el I/F del router correspondiente

En caso contrario  $\Rightarrow$  se identifica el router correspondiente al Next Hop

El encamienento rellena las tablas de forwarding

Cada SF tiene un "Default router"



|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

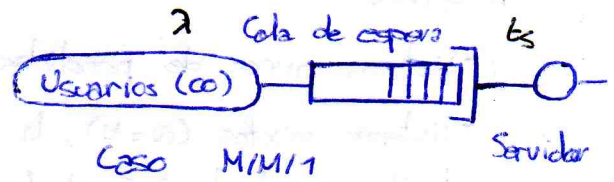
# TEMA 5 INTRODUCCIÓN AL TELETRÁFICO Y TEORÍA DE COLAS

## Teoría de colas

Define el comportamiento aleatorio de los sistemas de colas

Sistema de colas: representa un comportamiento aleatorio en el que:

- usuarios quieren utilizar unos servicios
- servidores proveen esos servicios
- colas donde se espera a ser servido



Hay procesos:

### A) Aleatorios:

tasa de llegadas: cuándo y cuántos usuarios llegan  $\lambda$

Tasa de servicio

tiempo de servicio: cuánto tiempo usan el servicio  $t_s$

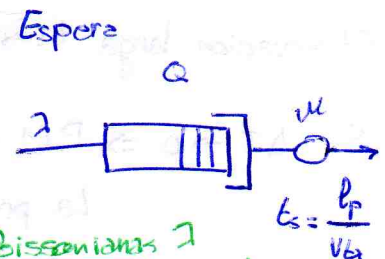
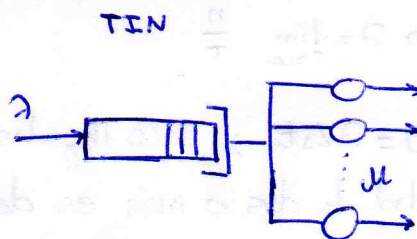
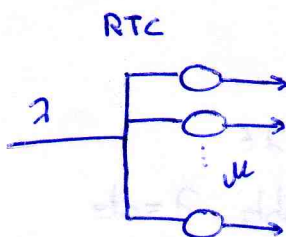
$$\mu = 1/t_s$$

### B) Deterministas:

número de servidores

algoritmo de asignación: FIFO, LIFO, PRIORIDADES, ROUND-ROBIN, PÉRDIDAS

|          | Commutación de circuitos  | Commutación de paquetes  |
|----------|---|--|
| Recurso  | Central de conmutación  | Enlace troncal   |
| Servicio | Utilización del punto de conmutación durante el tiempo de llamado | Utilización del enlace durante el tiempo de transmisión                  |
| Modelo   | RTC: pérdidas<br>TSN (red inteligente): espera                    | Espera<br>Primera aproximación: población finita, tráfico auto-semejante |



## Parámetros

- Tasa de llegadas  $\lambda$  (usuarios / unidad de tiempo)
- Tasa de servicio  $\mu$  (usuarios / unidad de tiempo)
- Tiempo medio de servicio  $t_s = 1/\mu$  (unidad de tiempo)
- Tamaño de la cola  $Q \Rightarrow$  determina las pérdidas
- Número de usuarios en el sistema  $n$
- Disciplina: algoritmo de asignación
- Carga del sistema / Factor de utilización / Intensidad de tráfico  $A = \lambda/\mu$  (Erlangs)  $= \rho$

## Dimensionamiento

El dimensionamiento de una red quedará determinado por varios parámetros

### Calidad del servicio (QoS)

- Sistemas de espera ( $Q = \infty$ ), la QoS es el tiempo medio de espera o la probabilidad de esperar

- Sistemas puros de pérdidas ( $Q = 0$ ), la QoS es la probabilidad de pérdidas

- Sistemas mixtos ( $Q = N$ ), la QoS es ambos parámetros, pero se suele aproximar a infinito, siendo la QoS el tiempo medio de espera

### Cuántos recursos

Número de servidores, tasa de servicio de cada servidor, tamaño de la cola...

Determinan el coste de la red

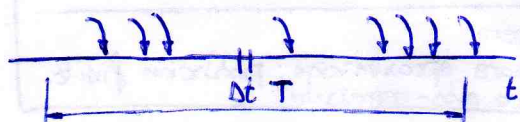
### Qué tráfico (todo un apartado)

## Tráfico

El modelo de colas es un proceso estacionario: hay una hora cargada (experimental), donde se analiza el caso peor y sus características son constantes en el tiempo

Las llegadas son un proceso aleatorio, independientes entre sí y equiprobables en el tiempo. Están caracterizadas por un proceso de Poisson.

### Distribución de Poisson (Página 21)



$n$  llegadas Poissonianas en un intervalo  $T$   
(independientes y equiprobables)

Observación larga ( $T \rightarrow \infty$ )  $\Rightarrow \lambda = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{n}{T}$

Si  $\Delta t \rightarrow 0 \Rightarrow P(1 \text{ llegada}) = \lambda \Delta t$ ;  $P(0 \text{ llegadas}) = 1 - \lambda \Delta t$

La probabilidad de dos o más es despreciable,  $\lambda = \text{cte}$

$\lambda$  es una "velocidad" (llegadas / tiempo), un factor de proporcionalidad de probabilidad de llegada en  $\Delta t$

Si hacemos  $T = m \Delta t$ ,  $p \equiv P(1 \text{ llegada en } \Delta t) = \lambda \Delta t$ , la probabilidad de  $k$  llegadas ( $k \in \mathbb{N}$ ) en  $T$  es

$$P(k)_T = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(k)_T = \lim_{m \rightarrow \infty} \binom{m}{k} p^k (1-p)^{m-k} = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}$$

Ver carpeta Montero  
SALT: distribución de Poisson

Además:  $E(k) = \lambda T$ ;  $\sigma_k^2 = \lambda T$

La probabilidad de un conjunto finito de procesos es el producto de las probabilidades por ser independientes  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N$

## Distribución exponencial



La variable aleatoria  $\tau$  "tiempo entre llegadas" está distribuida exponencialmente

Ver carpeta Montero  
SALT, distribución exponencial

$$P(Z > x) = P(K=0) \Big|_{t=x} = e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

$$F_Z(x) = P(Z \leq x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

$$f_Z(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

$$E(Z) = 1/\lambda$$

$$\sigma_Z^2 = 1/\lambda^2$$

La distribución exponencial no tiene memoria  $f_{ts} = \mu e^{-\mu x}$

## Distribución de los instantes de salida

Si las llegadas siguen una distribución de Poisson, el tiempo de servicio una distribución exponencial y además hay un tiempo en cola, tenemos dos casos

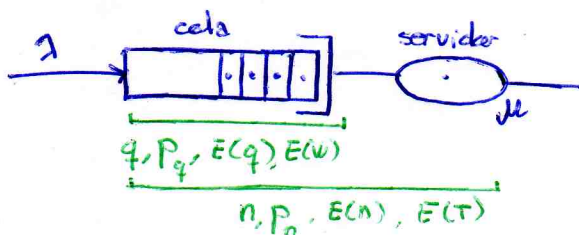
- Servidor ocupado: el tiempo entre salidas es el tiempo de servicio (exponencial), pues el tiempo en cola es constante. Por tanto, las salidas tienen una distribución de Poisson
- Servidor no siempre ocupado: se separan los casos (ocupado:  $P(1 \text{ en } \Delta t) = \mu \Delta t$ ; no ocupado:  $P(1 \text{ en } \Delta t) = 0$ ). Las salidas son también poissonianas (si no pierde)

## Notación de Kendall

Un sistema de colas se representa de la forma  $A/B/X/Y$ , siendo

- A - Distribución de llegadas
  - B - Distribución del servicio
  - X - Número de servidores
  - Y - Capacidad del sistema: colas + servidores
- } M ≡ Poisson / exponencial; D ≡ Determinista; G ≡ General

## M/M/1 (página 21)



Compartamiento derivable del cálculo de las probabilidades de estado  $P_n$ , en estacionario

$$P_n = \frac{\lambda}{\mu} P_{n-1} = \rho P_{n-1} \Rightarrow P_n = \rho^n P_0, \quad n > 0$$

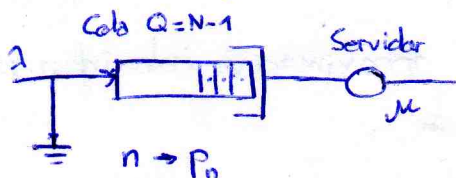
Se cumple que  $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n P_0 = 1$ , si  $\rho < 1$  (sistema estacionario,  $P_0 = (1-\rho)$ )

En efecto, probabilidad de servidor ocupado  $\equiv 1 - P_0 = 1 - (1-\rho) = \rho$

Caudal de salida  $= 0 \cdot P_0 + \mu(1 - P_0) = 0 + \mu(1 - (1-\rho)) = \lambda =$  Caudal de entrada

Número medio de usuarios  $\sum n P_n = \rho / (1-\rho)$

M/M/1/N (Página 22)



$$(\lambda + \mu) P_n = P_{n+1} \mu + P_{n-1} \lambda$$

$$P_n = \rho^n P_0 = \rho^n \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}}$$

$$\sum_{n=0}^N P_n = 1 \Rightarrow \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} = P_0$$

El caudal de entrada es el caudal de salida

Observaciones: expresiones válidas para  $0 < n < N$ . Si  $\rho < 1$  y  $N \rightarrow \infty$ , se pueden utilizar para el caso M/M/1. Si  $n=0$ ,  $\lambda P_0 = \mu P_1$ ; si  $n=N$ ,  $\lambda P_{N-1} = \mu P_N$

La probabilidad de bloqueo ( $P_B$ ) es la probabilidad de que las llegadas se rechacen en un sistema finito. Es equivalente a la probabilidad de que el sistema esté totalmente ocupado



En un sistema infinito  $P_B=0, \gamma=\lambda$

Caudal cursado  $\equiv \gamma$

$$P_B = P_N = \rho^N \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} = \frac{\rho-1}{\rho} = \frac{\lambda-\mu}{\lambda}$$

Caudal cursado normalizado  $\equiv \frac{\gamma}{\mu} = 1 - P_B$  (Si  $\rho=1, \frac{\gamma}{\mu} = \frac{N}{N+1}, P_B = \frac{1}{N+1}$ )

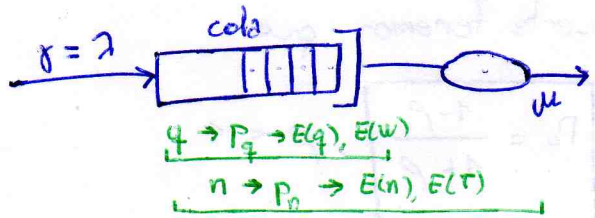
En las diapositivas 6 y 7 se muestra la evolución de ambos parámetros con  $\rho$  (página 23)

Aproximación de cola infinita: si  $\rho^{N+1} \ll 1$  se puede aplicar el modelo M/M/1, pues truncar una cola infinita no afecta a su compartamiento observable

Ejemplo: calcular el tamaño de "buffer" que debe tener un conmutador de paquetes con  $\rho=0.5$  y probabilidad de no perder del 99.9%.

1. Aproximamos por cola infinita  $P_B = P_N |_{M/M/1} = (1-\rho) \rho^N < 10^{-3}$
2. Despejamos N:  $0.5^N < 2 \cdot 10^{-3} \Rightarrow (N \log 0.5) < (-3 + \log 2) \Rightarrow N \geq 9$
3. Comprobamos la suposición:  $\rho^{N+1} = 0.5^{10} = 1/1024 \ll 1$

Fórmula de Little: para un sistema de colas en estado estacionario y sin pérdidas, se cumple que  $E(n) = \gamma E(T)$ . En M/M/1/N:  $\gamma = \lambda(1-P_B)$



$E(w) \equiv$  tiempo medio de espera en cola  
 $E(T) \equiv$  tiempo medio de espera en el sistema  
 $E(q) \equiv$  número medio de usuarios en la cola  
 $E(n) \equiv$  número medio de usuarios



En M/M/1 tenemos que:

$$E(T) = \frac{E(n)}{\gamma} = \frac{E(n)}{\lambda} = \frac{1/\mu}{1-\rho} = \frac{1}{\mu-\lambda}$$

$$\frac{E(T)}{E_s} = \frac{E(T)}{1/\mu} = \mu E(T) = \frac{1}{1-\rho}$$

$$E(T) = E(w) + 1/\mu$$

$$E(q) = \lambda E(w)$$

En las diapositivas:

8 - Gráfica aproximación cola infinita y demostración

11 - Gráfica  $E(T)$  en función de  $\rho$

12 - Gráfica  $\mu E(T)$  en función de  $\rho$

### Sistemas de nacimiento y muerte

El número de individuos en un sistema en un instante determinado  $t$  será  $N(t) = A(t) - D(t)$

donde los nacimientos siguen un proceso de Poisson de  $\lambda_n$  y las muertes de  $\mu_n$

Se realiza un análisis por equilibrio de flujos:  $\lambda_{n-1} P_{n-1} + \mu_{n+1} P_{n+1} = (\lambda_n + \mu_n) P_n$

Ejemplos:

- M/M/1: probabilidad de 1 salida en  $\Delta t$ : 0, si  $n=0$ ;  $\mu \Delta t$ , si  $n=1$ ;  $2\mu \Delta t$ , si  $n=2 \dots \mu_n \Delta t$ ;  $N\mu \Delta t$ , si  $n \geq N$

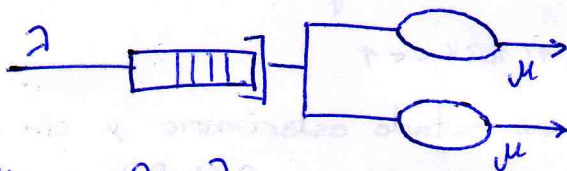
- Cola con control de flujo (más usuarios esperando, menos llegan): probabilidad de 1 llegada en  $\Delta t$ :  $\lambda_n \Delta t$

De forma general:

$$P_n = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_0, \quad P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^j \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i}}, \quad \sum_{n=0}^N P_n = 1$$

Si  $N=\infty$ ,  $\lambda_i = \lambda$ ,  $\mu_i = \mu \Rightarrow$  M/M/1,  $P_n = \rho^n P_0$ ,  $P_0 = (1-\rho)$ , como ya se vio

### M/M/2 (página 26)



$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0 \\ \mu_1 &= \mu \\ \mu_{i>1} &= 2\mu \end{aligned}$$

$$N = \infty; \lambda_i = \lambda$$

Aplicando las fórmulas de nacimiento y muerte tenemos que

$$P_n = 2 \rho^n \frac{1-\rho}{1+\rho} = 2 \rho^n P_0, \quad n > 0$$

$$\rho = \frac{\lambda}{2\mu}$$

$$P_0 = \frac{1-\rho}{1+\rho}, \quad \rho < 1$$

El tiempo de retardo se obtiene por definición, pues el número de usuarios es

$$E(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=1}^{\infty} n 2\rho^n \frac{1-\rho}{1+\rho} = \frac{2\rho}{1-\rho^2}, \text{ y por tanto:}$$

$$E(T) = \frac{E(n)}{\gamma} = \frac{1}{\lambda} \frac{2\rho}{1-\rho^2} = \frac{1/\mu}{1-\rho^2} \quad \text{Diapositiva 18, evolución de } E(T) \text{ con } \rho \text{ (M/M/2)}$$

Si en lugar de utilizar dos servidores con tasa de salida  $\mu$  utilizamos un único servidor con tasa  $2\mu$ , tenemos que

$$E(T) = \frac{1/2\mu}{1-\rho} = 2 \times \text{M/M/1} \quad \text{Diapositiva 19, comparativa entre ambas opciones}$$

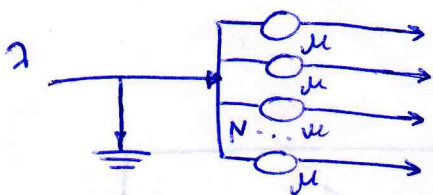
### Sistemas con servidores infinitos (M/M/∞) (Página 26)

$\lambda_n = \lambda$ ;  $\mu_n = n\mu$  (tantos servidores como usuarios hayan pedido el servicio)

### Sistemas con control de flujos (Página 27)

$\lambda_n = \lambda/(n+1)$ ;  $\mu_n = \mu$  (llegadas exponenciales, pues hay control de flujo)

### M/M/N/N (Página 27)



Ecuaciones de estado

$$P_n = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_0, \quad 0 < n \leq N$$

Para conmutación de circuitos

### Probabilidad (1 salida en $\Delta t$ ). Primera distribución de Erlang (Página 27)

$$\left. \begin{array}{l} 0 \\ \mu \Delta t, n=1 \\ 2\mu \Delta t, n=2 \\ \dots \\ N\mu \Delta t, n=N \end{array} \right\} \lambda_n = \lambda, \mu_n = n\mu \Rightarrow P_n = \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} P_0 = \frac{\rho^n}{n!} P_0, \quad 0 < n \leq N$$

Se cumple que:

$$\sum_{n=0}^N P_n = 1 \Rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{l=1}^N \frac{\rho^l}{l!}} \Rightarrow P_n = \frac{\rho^n}{n!} \frac{1}{\sum_{l=0}^N \frac{\rho^l}{l!}} \quad \text{Con } 0 < n \leq N$$

$\rho = A$  (Erlangs)

### Fórmula de Erlang-B (Probabilidad de bloqueo) (Página 27)

Probabilidad de bloqueo  $\equiv P_B = E(N, A)$

Para población infinita:

$$P_B = P_N = \frac{\rho^N}{N!} \frac{1}{\sum_{l=0}^N \frac{\rho^l}{l!}} = \frac{A^N}{N!} \frac{1}{\sum_{l=0}^N \frac{A^l}{l!}}$$

En este sistema de colas tenemos que:

equilibrio caudales

$$E(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n \stackrel{\text{equilibrio caudales}}{=} \rho (1 - P_0) = A (1 - P_0)$$

Número medio de servidores ocupados  $\equiv A$   
Número medio de llamadas en curso

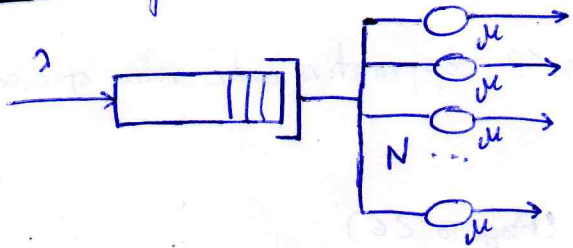
$$\gamma = \sum_{n=0}^{\infty} \mu_n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \mu P_n = \mu \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \mu E(n) \stackrel{\text{equilibrio caudales}}{=} \lambda (1 - P_0)$$

Little

$$E(T) \stackrel{\text{Little}}{=} E(n) / \gamma = E(n) / \mu E(n) = 1 / \mu$$

Diapositivas 24, 25, 26: grafica, tabla y calculadora Erlang

M/M/N (Página 30)



Equaciones de estado

$$P_n = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_0$$

$0 < n \leq N$   
Para telefonía inteligente

Segunda distribución de Erlang (Página 30)

Probabilidad (1 salida en  $\Delta t$ )

$$\left. \begin{cases} 0, & n=0 & \lambda_n = \lambda \\ \mu \Delta t, & n=1 & \lambda_n = \lambda \\ 2\mu \Delta t, & n=2 & \mu_n = n\mu, n \leq N \\ N\mu \Delta t, & n=N & \mu_n = N\mu, n > N \end{cases} \right\} \Rightarrow P_n = \begin{cases} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} P_0 = \frac{(N\rho)^n}{n!} P_0, & 0 < n \leq N \\ \frac{\lambda^n}{N! N^{(n-N)} \mu^n} P_0 = \frac{N^N \rho^n}{N!} P_0, & n > N \end{cases}$$

Con  $\rho = \frac{\lambda}{N\mu} = \frac{A}{N}$

Se cumple que:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \Rightarrow P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{l=1}^{N-1} \frac{(N\rho)^l}{l!} + \sum_{l=N}^{\infty} \frac{N^N \rho^l}{N!}} \stackrel{\rho < 1}{=} \frac{1}{\sum_{l=0}^{N-1} \frac{(N\rho)^l}{l!} + \frac{N^N}{N!} \frac{\rho^N}{1-\rho}}$$

Fórmula de Erlang-C (Probabilidad de Esperar) (Página 30)

Probabilidad de esperar  $\equiv P(\text{delay}) = E_2(N, A)$

$$P(\text{delay}) = P(n \geq N) = \sum_{n=N}^{\infty} P_n = \sum_{n=N}^{\infty} \frac{N^N \rho^n}{N!} P_0 = \frac{N^N}{N!} \frac{\rho^N}{1-\rho} P_0 = \frac{1}{N!} \frac{A^N}{1 - \frac{A}{N}} P_0$$

En este sistema de colas tenemos que:

$$E(q) = \sum_{q=0}^{\infty} q P_q = \sum_{n=0}^{\infty} (n-N) P_n = \frac{N^N}{N!} P_0 \sum_{n=N}^{\infty} (n-N) \rho^n = \frac{N^N}{N!} \rho^N P_0 \frac{\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\rho}{1-\rho} E_2(N, A)$$

Little

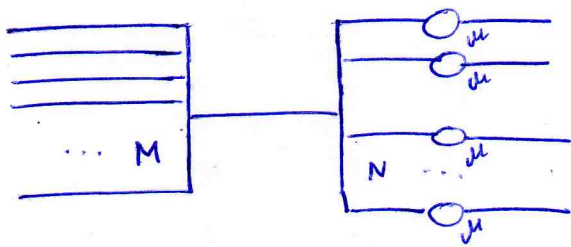
$$E(w) \stackrel{\text{Little}}{=} E(q) / \gamma = E(q) / \lambda = \frac{1/\mu}{N-A} E_2(N, A) \quad E(T) = E(w) + 1/\mu$$

$E(n) = \lambda E(T) = E(q) + A$   
 $A \equiv$  Número medio de usuarios:  $A = N\rho$   
 $\rho \equiv$  Factor de utilización del servidor

## Revisión de modelos de usuario

- Modelo telefónico: llegadas modeladas como Poisson
- Modelo del concentrador: llegadas como suma de procesos Poisson
- Modelo de usuarios finitos: en centrales de conmutación tandem. Son pocos usuarios y la tasa de servicio influye en su tasa de llegadas. Si se conoce el número de usuarios, se puede hacer una aproximación mejor que Erlang-B: modelo de Engset (proceso de nacimiento y muerte)

### Distribución de Engset (Página 32)



Ecuciones de estado

$$P_n = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} P_0$$

$M \equiv$  Usuarios (finito)

$\lambda \equiv$  tasa de llegadas de cada usuario cuando está libre

$$0 < n \leq N \quad M \geq N$$

Para centrales de conmutación tandem

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_n = (M-n)\lambda \\ \mu_n = n\mu \end{array} \right\} \Rightarrow P_n = \binom{M}{n} \frac{\lambda^n}{\mu^n} P_0, \quad 0 < n \leq N$$

Se cumple que:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{l=1}^N \binom{M}{l} \frac{\lambda^l}{\mu^l}} = \frac{1}{\sum_{l=0}^N \binom{M}{l} \frac{\lambda^l}{\mu^l}} \Rightarrow P_n = \binom{M}{n} \frac{\lambda^n}{\mu^n} \frac{1}{\sum_{l=0}^N \binom{M}{l} \frac{\lambda^l}{\mu^l}} \quad 0 < n \leq N$$

$$\text{Probabilidad (todos los servidores ocupados)} \equiv P_N = \binom{M}{N} \frac{\lambda^N}{\mu^N} \frac{1}{\sum_{l=0}^N \binom{M}{l} \frac{\lambda^l}{\mu^l}}$$

Por ser un sistema finito, es distinto a la probabilidad de rechazo. Por ejemplo, si  $N=M$ ,  $P_n$  es finito pero NO se rechaza a ningún usuario

Congestión temporal o probabilidad de bloqueo  $\equiv P_B = P_N$

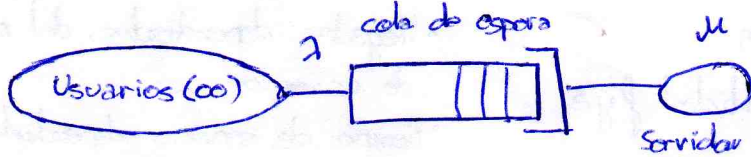
Congestión de llamadas o probabilidad de rechazo  $\equiv P_L = \text{llamadas perdidas} / \text{totales}$

Se cumple que  $P_L = P_B \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$  Diapositiva 33

Engset se puede aproximar por Erlang B con  $A = \lambda/\mu$  y  $P_L = P_B = P_N \frac{M!}{N! (M-N)!}$  Diapositiva 34

# TEMA 7 TELETRAFICO EN REDES DE DATOS

M/G/1 (página 34)



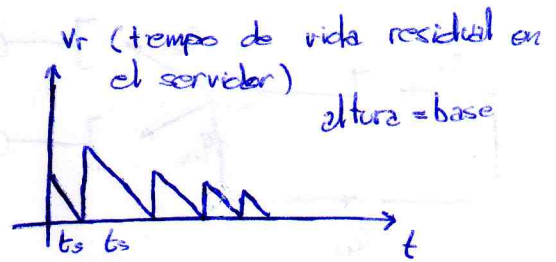
$t_s = l_p \text{ (bits)} / v_{bx} \text{ (bps)}$   
 $v_{bx}$  determinista  
 $l_p$  aleatoria (no exponencial)

Tasa de llegadas de Poisson  $\lambda$

Tasa de servicio  $\mu = 1/E(t_s)$ ,  $t_s$  distribución desconocida

Por Little:

$$\begin{cases} E(T) = E(W) + 1/\mu \\ E(n) = \lambda E(T) \\ E(q) = \lambda E(W) \\ E(W) = \frac{E(v_r) \rho}{1-\rho} + \frac{E(q)}{\mu} \end{cases}$$



Tiempo medio de espera a que acabe el usuario siendo servido

Tiempo medio de espera en cola

$\rho \equiv$  probabilidad de servidor ocupado =  $\lambda/\mu < 1$

Juntando las ecuaciones tenemos que:

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} \left[ 1 - \frac{\rho}{2} (1 - \mu^2 \sigma^2) \right] = \frac{\rho}{1-\rho} \left[ 1 - \frac{\rho}{2} + \frac{\rho}{2} \mu^2 \sigma^2 \right]$$

Para distribución exponencial ( $\sigma^2 = 1/\mu^2$ )

Para distribución determinista ( $\sigma^2 = 0$ )

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} = E(n)_{\text{M/M/1}}$$

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} \left( 1 - \frac{\rho}{2} \right)$$

Aplicable como

Si  $\sigma^2 > 1/\mu^2$ , peor que M/M/1 mejor  $E(n)_{\text{M/M/1}} = E(T)_{\text{M/M/1}}$  mayores que  $E(n)_{\text{M/D/1}}, E(T)_{\text{M/D/1}}$

Si  $\sigma^2 < 1/\mu^2$ , mejor que M/M/1 peor Se puede usar M/M/1 como caso peor de M/D/1

$$E(W) = E(T) - 1/\mu$$

Aplicando Little ( $E(T) = E(n)/\lambda$ ) y  $\sigma^2 = E(t_s^2) - 1/\mu^2$ :  
 $= \lambda E(t_s^2) / (2(1-\rho))$ , con  $E(t_s^2)$  valor cuadrático medio del tiempo de servicio

## Redes de colas

Se tiene una estación i:

En un sistema con M estaciones



$$P(\vec{n}) = \prod_{i=1}^M P(n_i)$$

Probabilidad vectorial de estado  $\equiv P(\vec{n}) = P(n_1, n_2, \dots, n_M)$

Se busca una operación en forma de producto y computacionalmente asumible

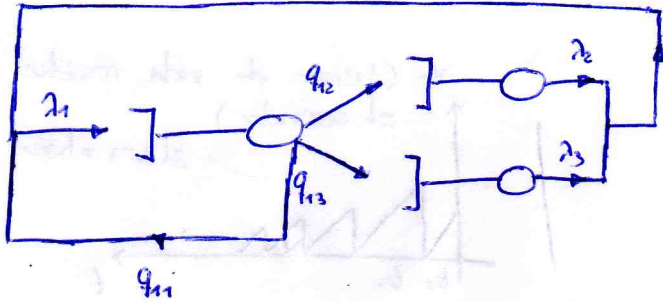
Condiciones de Jackson: establecen que hay una solución en forma de producto si

- $\lambda$  poissonianas
- $\mu$  exponenciales e independientes
- tránsito aleatorio y de probabilidad fija
- No hay pérdidas

Estas condiciones son extensibles:

- llegadas dependientes del número de usuarios
- tiempo de servicio dependiente del número de usuarios en una estación
- ...

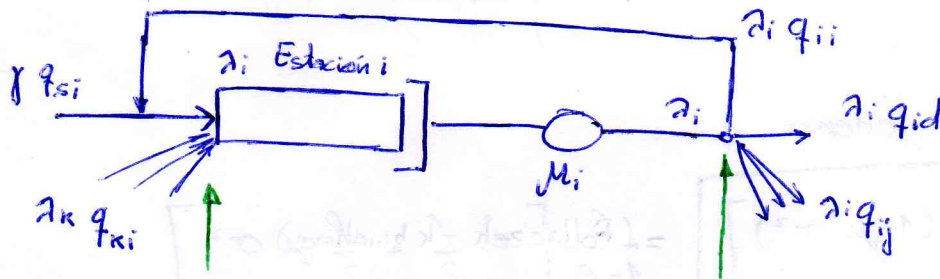
Red cerrada



Condición de equilibrio

$$N(\text{usuarios}) = \text{cte}$$

Red abierta



Condición de equilibrio

$$\lambda_s = \lambda_d$$

Acumulado entradas/salidas

$$q_{ij} = \text{probabilidad tránsito}$$

$$\lambda_s = \lambda_d = \gamma$$

Ecuaciones de equilibrio

(M ecuaciones, M incógnitas:  $\lambda_i$ )

Probabilidades de tránsito

( $q_{ij} = q_{si} = q_{id}$ )

$$\lambda_i = \gamma q_{si} + \sum_{k=1}^M \lambda_k q_{ki}, \quad i=1, \dots, M$$

$$q_{id} + \sum_{j=1}^M q_{ij} = 1, \quad i=1, \dots, M$$

Probabilidad vectorial de estado:

$$P(\vec{n}) = \prod_{i=1}^M P(n_i) \Rightarrow P(n_i)_{\text{MUMM}} = \rho_i^{n_i} (1 - \rho_i), \quad \rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} < 1$$

Retardo total

$$E(T) \stackrel{\text{Little}}{=} \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^M E(n_i) = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i - \lambda_i}$$

Aplicación: encontrar  $q_{ij}$  para que  $E(T)$  sea mínima

Retardo de ruta: retardo medio de los paquetes que siguen una ruta dado

$$E(T) = \sum_{\text{icerta}} E(T_i) = \sum_{\text{icerta}} \frac{E(n_i)}{\lambda_i} = \sum_{\text{icerta}} \frac{1}{\mu_i - \lambda_i}, \quad \text{con } \rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} < 1$$

## Clasificación de los servicios

### A) Básicos

- Portadores: proporcionan capacidad de transmisión de información entre puntos de acceso. Por ejemplo: circuitos, paquetes, CVs... **Propio de RSTC**
- Teleservicios: proporcionan capacidad completa de comunicación entre usuarios (incluyen el equipo terminal). Por ejemplo: llamada telefónica, mensaje multimedia, video-conferencia...

### B) Suplementarios

Modifican un servicio básico. Por ejemplo: llamada a tres, redirección...

## Definición y objetivos de QoS

QoS se define como el efecto colectivo de las prestaciones del servicio, las cuales determinan el grado de satisfacción del usuario del mismo

Nos centraremos en servicios portadores, en redes con conmutación de paquetes (pues podría ser relativa a los usuarios o difícil de medir)

### Requisitos de QoS de aplicaciones (Página 12)

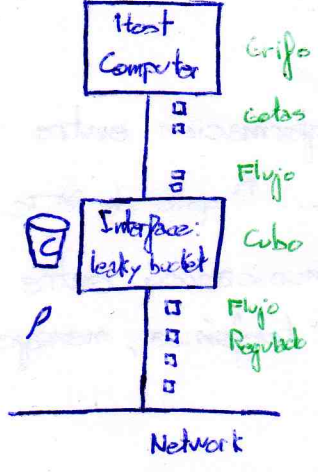
Fiabilidad, delay, bandwidth, jitter (tema 1). Es necesario conocer los requisitos de los teleservicios. Ejemplo: e-mail (reliability high, delay low, jitter low, bandwidth low...) **Ver diapositiva 6**

### Acuerdos de servicio: SLA / SLS

Tres pasos para conseguir QoS en la red:

- Cuantificar las necesidades del usuario / aplicación y asociarla un perfil de tráfico. Realizada por los acuerdos de servicio: SLS (incluye parámetros del tráfico y la QoS requerida, de forma permanente o cada vez que se establece una conexión, en función del protocolo de control) y SLA (aspectos menos técnicos como precios, penalizaciones por incumplimiento de SLS...)
- Comunicar dicha QoS a la red: Realizada por el protocolo de control
- Implementarla en función de los requisitos o tráfico. Realizado por mecanismos de control de tráfico y congestión

Leaky Bucket



Token Bucket

Tasa de generación de "tokens"  $\equiv \rho$  (1 token cada  $\Delta t$ )  
 Tamaño del bucket  $\equiv C$   
 Tasa máxima de consumición de tokens:  $M$  ( $f(V_{max}), f(LB)$ )

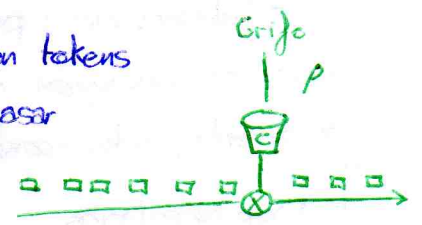
Si no quedan tokens:

- Almacenar a la espera de que lleguen tokens
- Tirar, marcar el paquete y dejarlo pasar

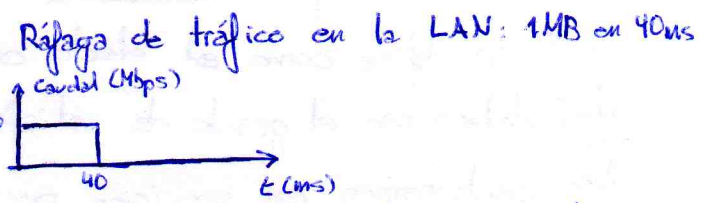
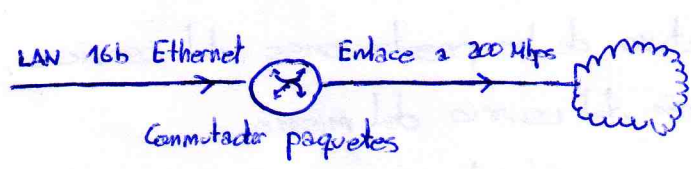
Duración máxima de una ráfaga (s):

$$S \times M = C + \rho \times S$$

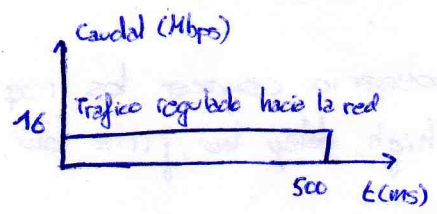
$$S = \frac{C}{M - \rho}$$



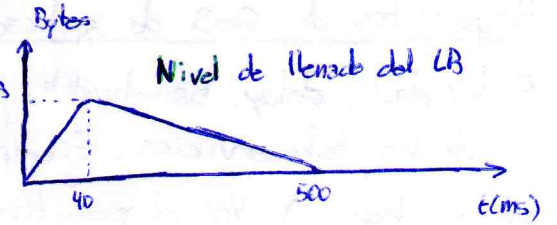
Ejemplo:



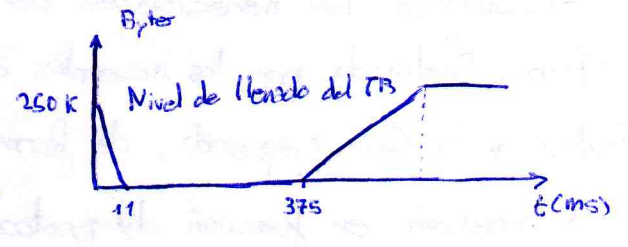
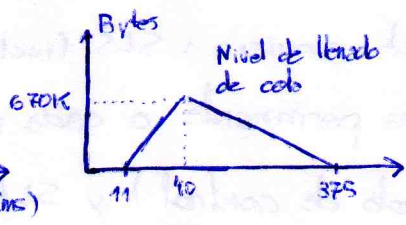
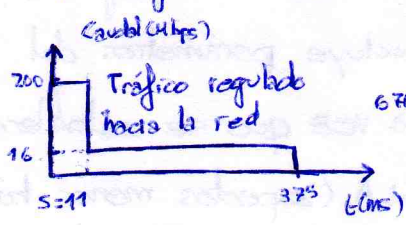
Si el conmutador implementa un LB para regular el tráfico de salida a la red a un máximo de  $\rho = 16$  Mbps  $\Rightarrow$  Leaky Bucket



Capacidad mínima del LB para no tirar  $40(200 - 16)$



Si el conmutador implementa un TB para regular el tráfico a un caudal medio de  $\rho = 16$  Mbps permitiendo ráfagas cortas a la máxima velocidad  $M = 200$  Mbps: se añade una cola que regula el tráfico



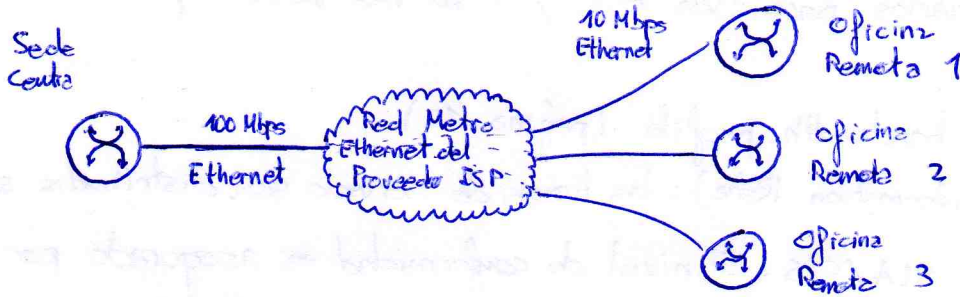
$$S \times 200 = C + 16 \times S$$

$$S = \frac{C}{200 - 16}$$



TEMA 8.2 ESPECIFICACIÓN DE QOS. CASO DE ESTUDIO: METRO ETHERNET

Red Metro Ethernet: cualquier red destinada a suministrar servicios Metro Ethernet  
 Servicios Metro Ethernet: servicios de conectividad MAN/WAN de nivel 2 a través de UNIs Ethernet. La red del proveedor puede implementarse con varias opciones de transporte



Modelo de referencia



(Página 9)

La CE y la MEN intercambian servicios frames (SF) por la UNI. SF es una trama Ethernet

Dispositiva 16: enlace de acceso Ethernet

| Preamble | SFD | Dest. Address | Source Address | 0x 2100 | User priority | Bits of VLAN ID | Type length | Data   | Pd   | Checksum |
|----------|-----|---------------|----------------|---------|---------------|-----------------|-------------|--------|------|----------|
| 7        | 1   | 6             | 6              | 2       | 2             | 2               | 2           | 0-1500 | 0-46 | 4        |
| 68-1522  |     |               |                |         |               |                 |             |        |      |          |

Conexiones virtuales Ethernet

Dispositiva 17

Point to point, Multipoint to multipoint, scaled multipoint EVC

Servicios Metro - Ethernet

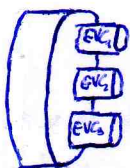
Dispositiva 18

E-line

Dispositiva 19

E-LAN, E-tree

Identificación de los EVCs



Cada EVC se identifica con VIDI (12 bits)

Clases de servicio (COS)

Se identifica con 3 bits: silver, gold y platinum. User priority

Había tres pasos para conseguir QoS. A continuación los veremos más en detalle

Especificación del perfil de tráfico

La elección de los parámetros de tráfico (usados para capturar las características del tráfico) forman parte del perfil de tráfico