

TEMA 1:

INTRODUCCIÓN A LA CONMUTACIÓN

Índice del tema:

1. INTRODUCCIÓN
2. CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS
3. CONMUTACIÓN DE PAQUETES
4. CONCEPTOS BÁSICOS DE TELETRÁFICO

1. Introducción

◆ **Conmutación:** es el proceso mediante el cual la información 'fluye' por la red de comunicación entre el emisor y el receptor

◆ **Evolución de las redes de comunicación:**

■ **Redes dedicadas o redes punto a punto**

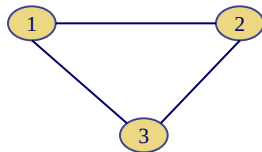
2 equipos



$$(2-1)=$$

1 línea

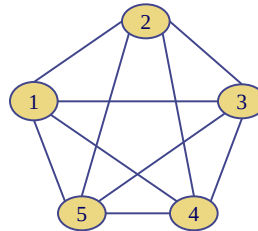
3 equipos



$$(3-1) + (2-1) =$$

3 líneas

5 equipos



$$(5-1) + (4-1) +$$

$$(3-1) + (2-1) =$$

10 líneas



N equipos

(serie aritmética)

$$\frac{(N-1) \cdot N}{2} = \theta(N^2) \text{ líneas}$$

Ventajas:

- sencillez

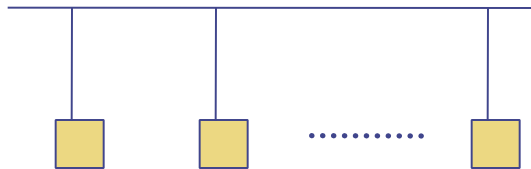
Inconvenientes:

- # enlaces necesarios elevado cuando $N \uparrow$

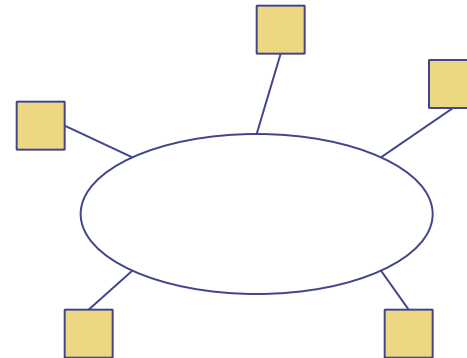
1. Introducción

- **Redes no conmutadas (o redes de difusión):** existe un único medio de transmisión al que se conectarán todos los terminales
 - ◆ Podemos encontrar diferentes topologías:

En bus:



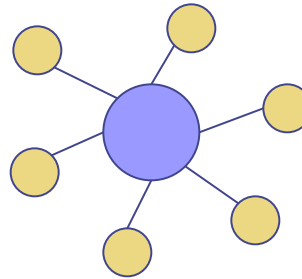
En anillo:



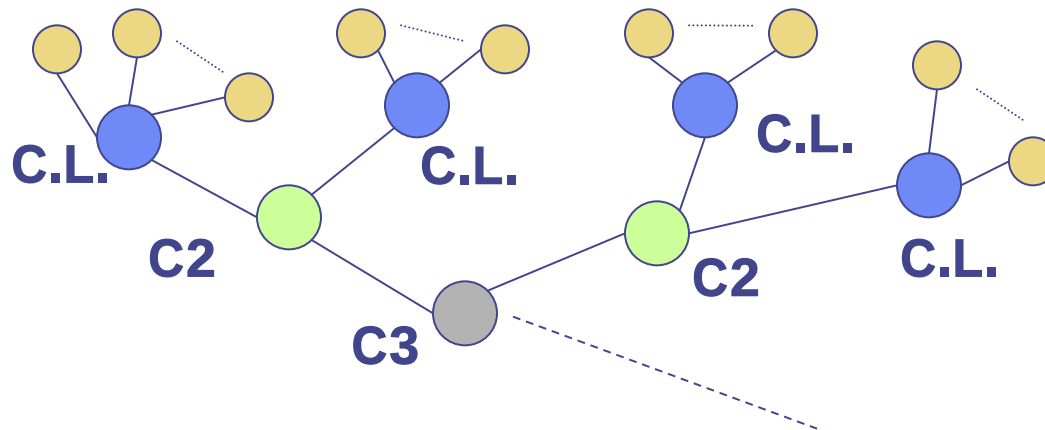
1. Introducción

- **Redes conmutadas:** los equipos no se conectan directamente entre sí, sino a través de un elemento denominado “nodo de conmutación”

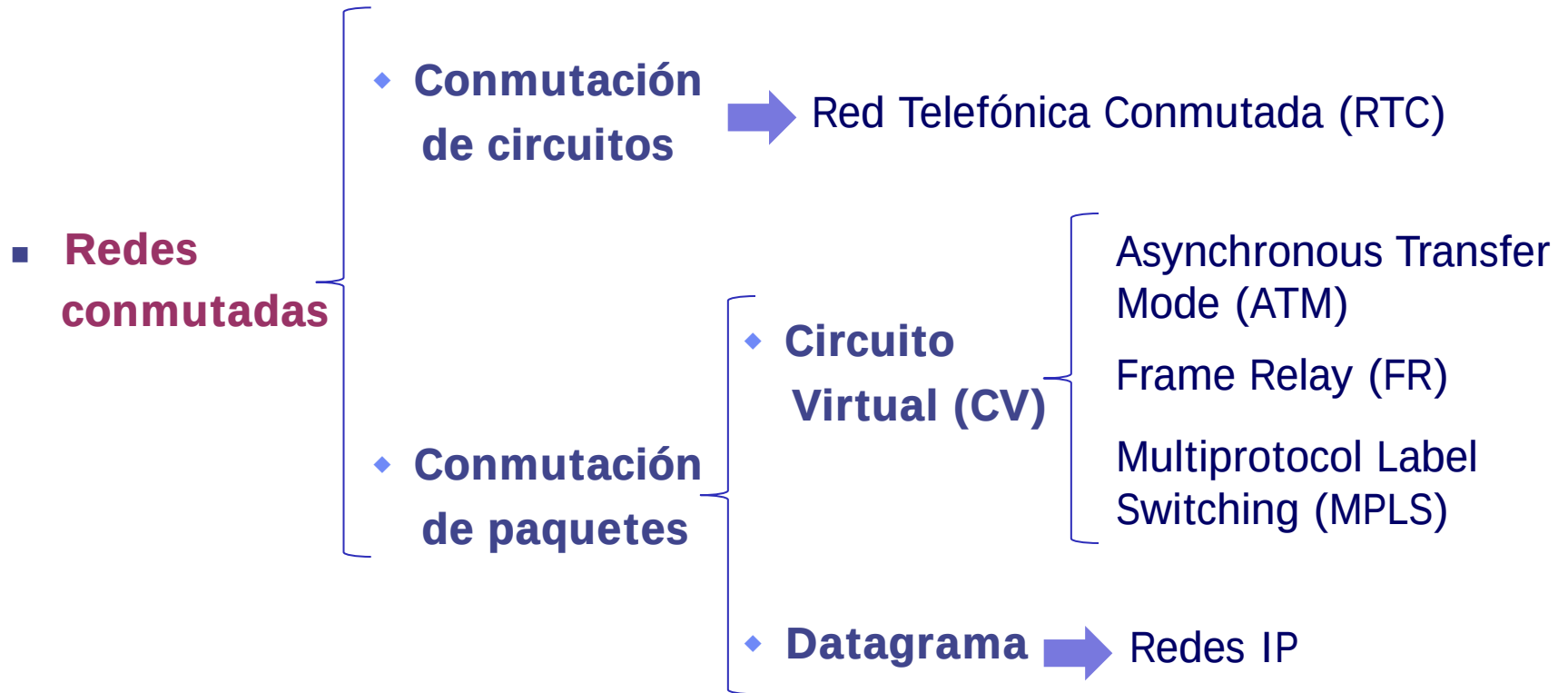
- ◆ Único nodo central



- ◆ Redes conmutadas jerárquicas



1. Introducción



2. Conmutación de circuitos

- ◆ Las redes de conmutación de circuitos tienen su origen en las redes telefónicas, creadas para transmitir voz
- ◆ Son **redes orientadas a la conexión**:
 - Antes de comenzar la transmisión de información, los equipos de conmutación deben establecer un camino físico entre emisor y receptor
 - Este camino permanece activo durante la comunicación entre usuarios, liberándose al terminar la comunicación
- ◆ Su funcionamiento pasa por las siguientes etapas (señalización):
 - Establecimiento de la conexión
 - Transferencia
 - Liberación de la conexión

2. Conmutación de circuitos

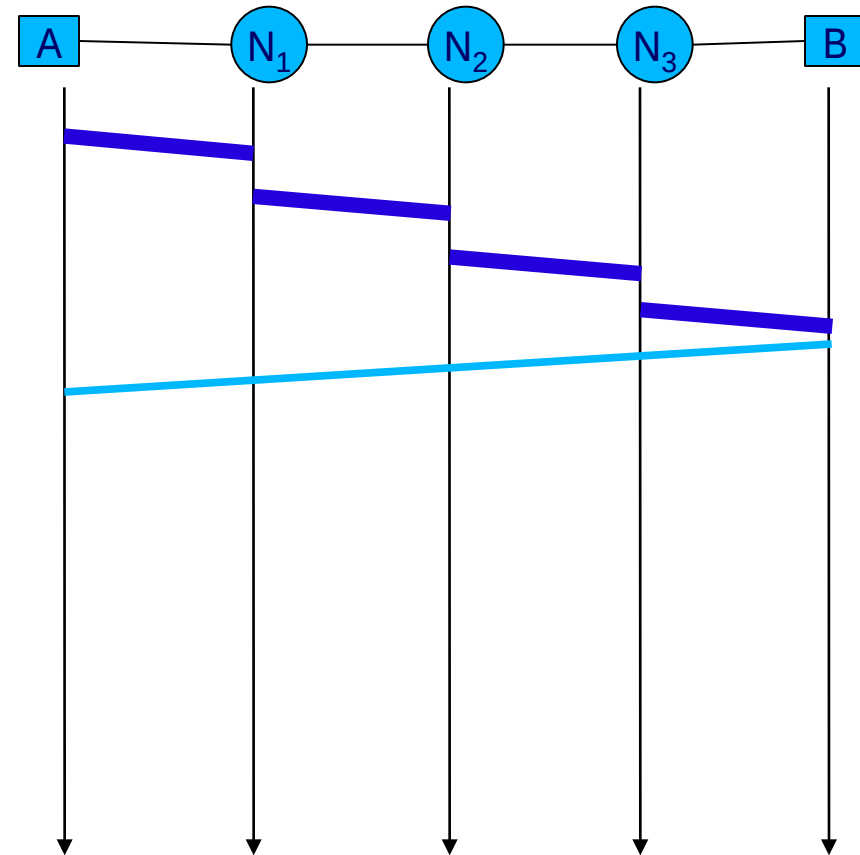
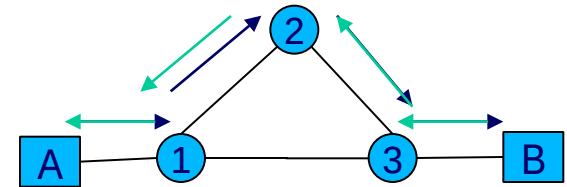
Etapas:

1. Establecimiento de la conexión (solicitud del circuito)

El emisor solicita el establecimiento de conexión hacia una estación receptora.

2. Confirmación (confirmación del circuito)

El receptor envía un mensaje de confirmación al emisor. Atravesará cada uno de los nodos intermedios, sin demora de nodo, puesto que ya tienen reservado un canal para esa conexión.



2. Conmutación de circuitos

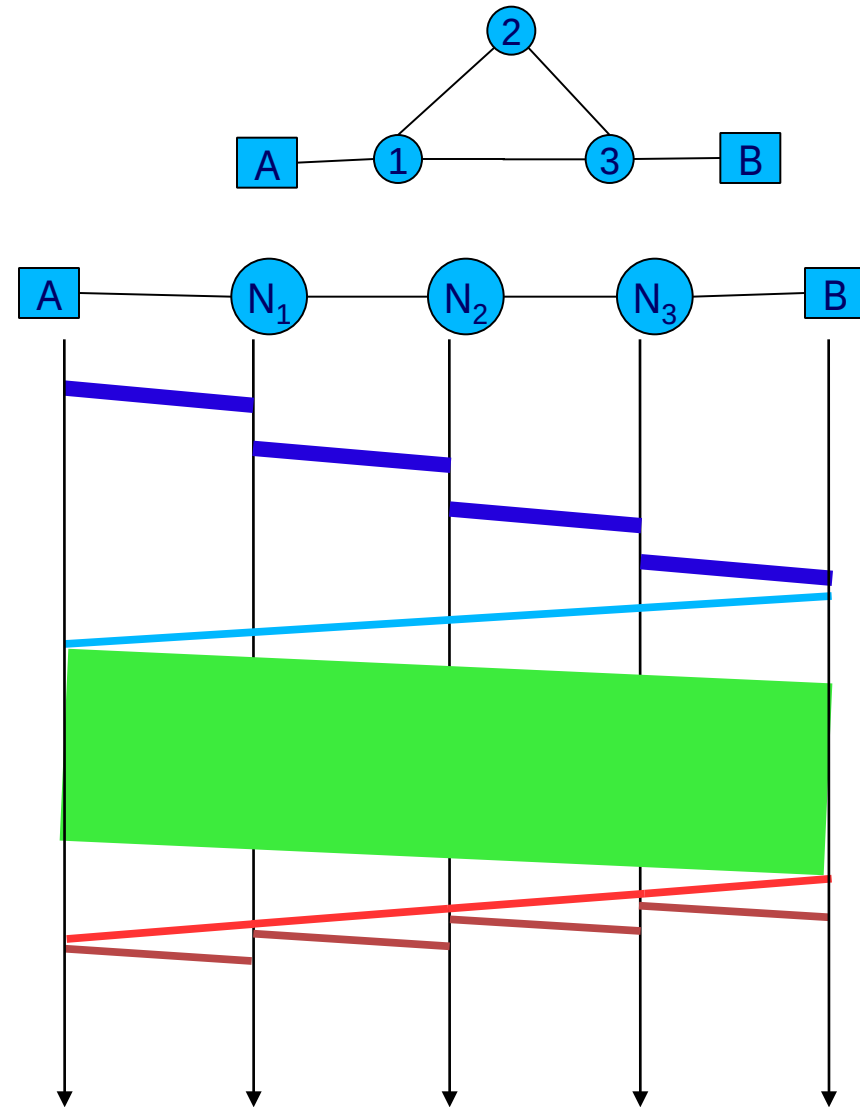
Etapas:

3. Transferencia (transmisión de la información)

Los datos avanzarán desde el emisor al receptor por el circuito exclusivo establecido para esa comunicación. Tampoco existirá en los nodos tiempo de demora.

4. Liberación de la conexión (liberación del circuito)

El emisor o el receptor indicarán al nodo más inmediato que ha finalizado la conexión. El nodo informa al siguiente y libera el canal reservado. Se repite nodo a nodo hasta que se libera el canal dedicado.



2. Conmutación de circuitos

◆ Ventajas:

- Capacidad de los nodos para 'reservar' los recursos necesarios → Los recursos están completamente dedicados durante la comunicación
- Adecuado para comunicaciones de voz (flujo de datos continuo)

◆ Inconvenientes

- Ligero retraso inicial durante la fase de establecimiento
- En comunicaciones transoceánicas (o vía satélite) el retardo de propagación produce molestias tanto en el eco como en la comprensibilidad del lenguaje natural
- Se pueden dar bloqueos en las llamadas (cuando no se encuentran recursos para ser cursadas)
- Cuando la información es a ráfagas (comunicaciones de datos) puede ser un esquema altamente ineficiente (mucho tiempo sin actividad)

3. Conmutación de paquetes

- ◆ La información a transmitir conforma un mensaje
- ◆ Los mensajes se dividen en unidades lógicas más pequeñas, llamadas paquetes
- ◆ A cada paquete se le adjunta una cabecera, que contiene cierta información de control (dirección origen, dirección destino, ...), para que la red pueda encontrar un camino válido hacia el destino
- ◆ Los nodos reciben un paquete, lo almacenan, lo procesan y lo reenvían (a partir de la información que aparece en la cabecera). También denominado **“Store&Forward”**
- ◆ Si mientras se transmite un paquete llegan otros, estos se almacenarán en cola esperando turno
- ◆ No hay recursos dedicados → Son **redes no orientadas a la conexión**
- ◆ Más eficiente para flujos de información no continuos. En las comunicaciones entre computadores son apreciables los periodos de inactividad

3. Conmutación de paquetes

◆ **Modo 'datagrama':**

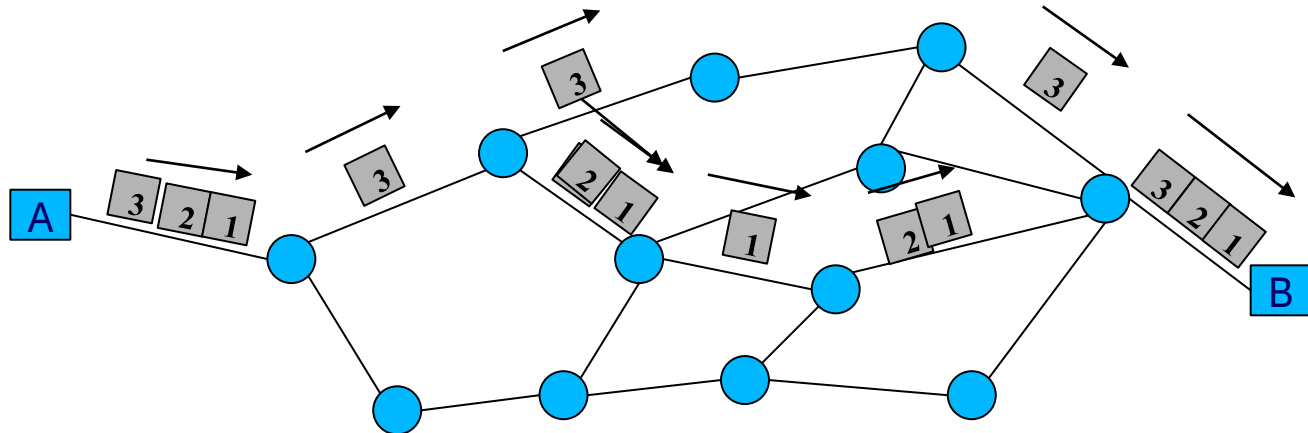
- Cada paquete viaja de manera independiente por la red: no siguen la misma ruta
- Llegada 'no ordenada' al nodo de salida que los ordena antes de entregarlos al destino (o el propio destino)
- No hay fase de establecimiento
- Se puede adaptar a los cambios en la red (congestión)

◆ **Modo 'circuito virtual':**

- Se establece una ruta antes de comenzar con el envío
- La ruta se usa durante toda la comunicación, pero no hay recursos dedicados: circuito virtual conmutado
- Se necesita una fase de establecimiento, pero el procesamiento del resto de paquete es más rápido
- Más apropiado para un intercambio de datos durante un periodo de tiempo largo:
 - ◆ Llegada en orden de los paquetes
 - ◆ Facilidad para establecer mecanismo de control de errores (y flujo)

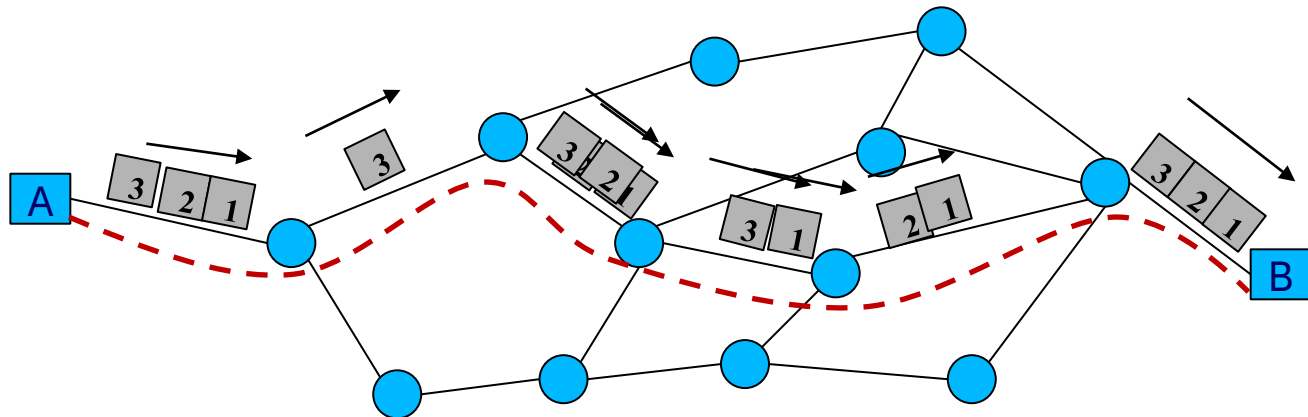
3. Conmutación de paquetes

◆ Modo 'datagrama':



3. Conmutación de paquetes

◆ Modo 'circuito virtual':



3. Conmutación de paquetes

◆ Ventajas:

- Permite que los recursos sean compartidos, lo que incrementa la eficiencia del sistema
- El bloqueo de llamadas no es relevante (un incremento de tráfico provoca un mayor retraso en las comunicaciones)
- Es posible establecer prioridades a los paquetes. Los paquetes con mayor prioridad experimentarán un menor retardo

◆ Inconvenientes:

- Aparece el retardo, parámetro crítico para la evaluación del GoS
- Mayor complejidad en los equipos de conmutación intermedios
- Retraso asociado al procesamiento de los nodos intermedios
- Los paquetes tienen un límite en su longitud. Capacidad de almacenamiento de los nodos

3. Conmutación de paquetes

Cada nodo procesa el paquete recibido de forma independiente:

1. Recibirá todos los bits del paquete
2. Los almacenará en la memoria central
3. Averiguará el enlace de salida adecuado
4. Se transmitirá por el enlace elegido

Tipos de retardo:

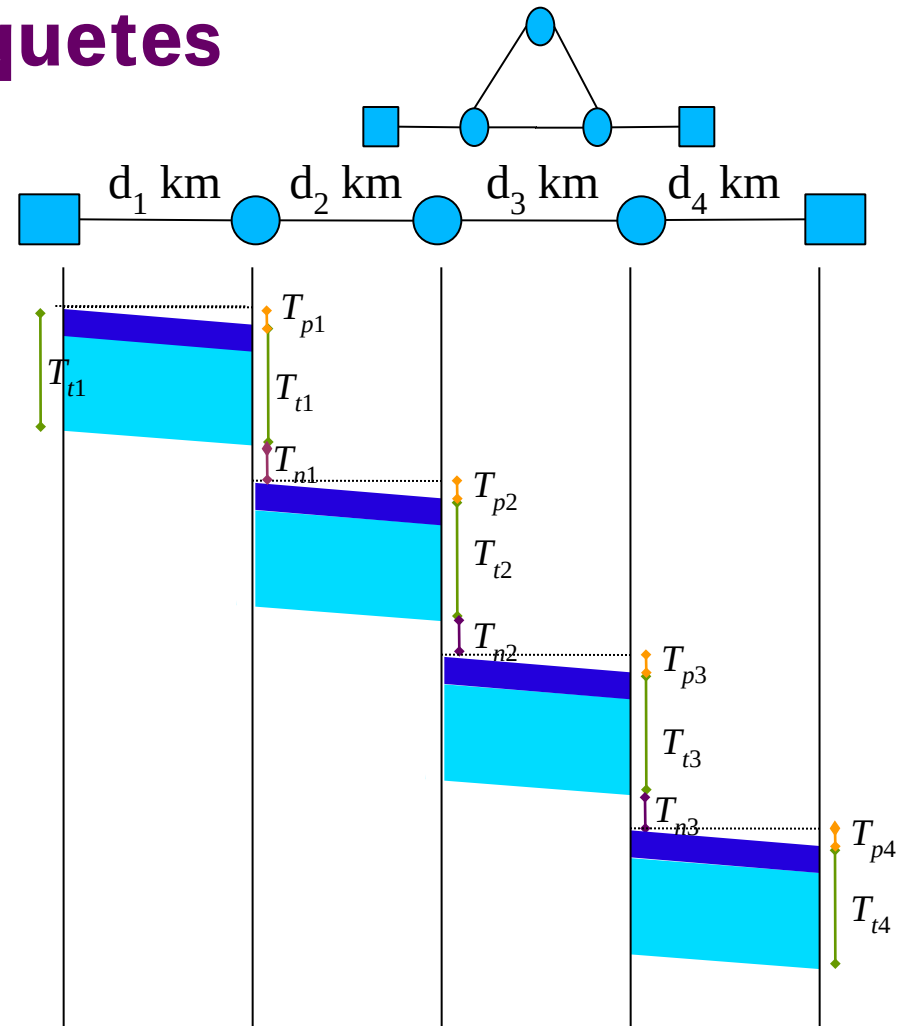
Retardo de propagación (T_p): Es el tiempo que tarda la señal en viajar por la línea de transmisión (cable, onda, luz)

$$T_p = \frac{d}{v_p}$$

Retardo de transmisión (T_t): Es el tiempo que invierte el emisor en poner un paquete en la línea de transmisión

$$T_t = \frac{H + p}{c}$$

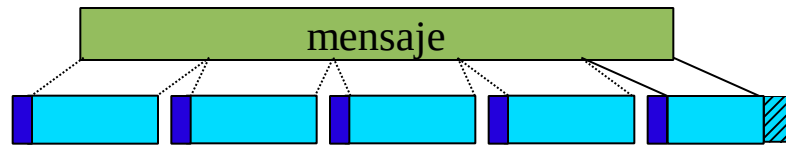
Retardo de nodo (T_n): Es el tiempo que un nodo necesita para averiguar el enlace de salida adecuado



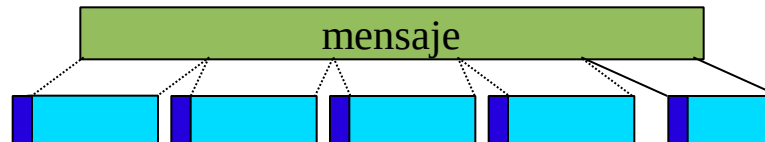
3. Conmutación de paquetes

- **Tipos de conmutación de paquetes:**

- **Longitud fija:** si es necesario se utiliza relleno o “padding” en el último paquete.



- **Longitud variable:**



3. Conmutación de paquetes

Paquetes de longitud fija

Hipótesis:

- todos los paquetes siguen el mismo camino → llegarán ordenados
- todos los enlaces son de la misma capacidad (c bps)

Cálculo del número de paquetes:

m: tamaño del mensaje (bits)

H: tamaño de la cabecera (bits)

p: bits de información en el paquete

$$n^{\circ} \text{ paq.} = k = \lceil m/p \rceil$$

Ejemplo:

m: 1105 bits

h: 16 bits

p: 250 bits

$$k = \lceil 1105/250 \rceil = \lceil 4.42 \rceil = 5 \text{ paquetes}$$

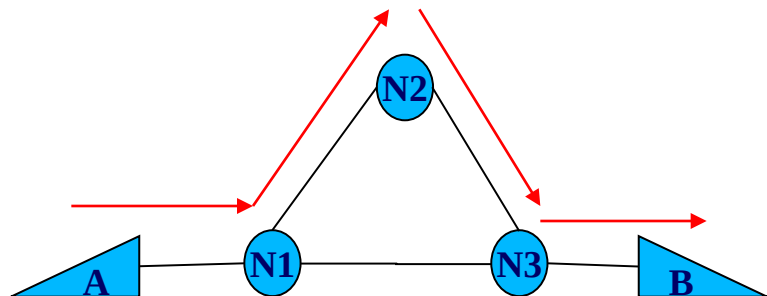
Paq. 1: 250 bits de información

Paq. 2: 250 bits de información

Paq. 3: 250 bits de información

Paq. 4: 250 bits de información

Paq. 5: 105 bits inform.+145 bits de relleno



3. Conmutación de paquetes

Paquetes de longitud fija

Retardo extremo a extremo (T):

$$T_p = \frac{d_1}{v_p} + \frac{d_2}{v_p} + \frac{d_3}{v_p} + \frac{d_4}{v_p} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{d_i}{v_p}$$

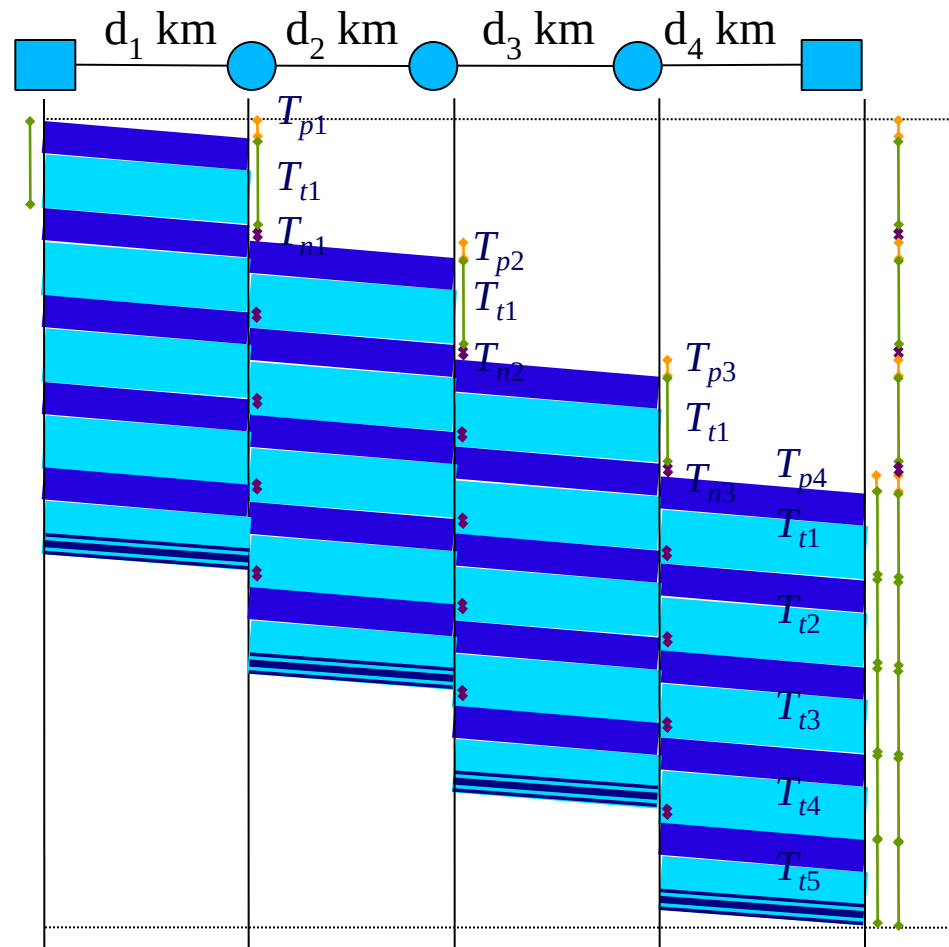
$$T_t = \sum_{i=1}^n \frac{H+p}{C_i} + \left\lceil \frac{m}{p} \right\rceil \frac{H+p}{C_{n+1}} = (3+5) \frac{H+p}{C}$$

$$T_n = \sum_{i=1}^n T_{ni} = T_{n1} + T_{n2} + T_{n3}$$

$$T = T_p + T_t + T_n$$

Si n nodos y enlaces iguales:

$$T = \frac{D}{v_p} + n \cdot \frac{(H+p)}{c} + \left\lceil \frac{m}{p} \right\rceil \cdot \frac{(H+p)}{c} + n \cdot T_n$$



3. Conmutación de paquetes

Paquetes de longitud variable

Hipótesis:

- todos los paquetes siguen el mismo camino → llegarán ordenados
- todos los enlaces son de la misma capacidad (C bps)

Cálculo del número de paquetes:

m: tamaño del mensaje (bits)

h: tamaño de la cabecera (bits)

p: bits de información en el paquete

$$n^{\circ} \text{ paq.} = k = \lceil m/p \rceil$$

Ejemplo:

m: 1105 bits

H: 16 bits

p: 250 bits

$$k = \lceil 1105/250 \rceil = \lceil 4.42 \rceil = 5 \text{ paquetes}$$

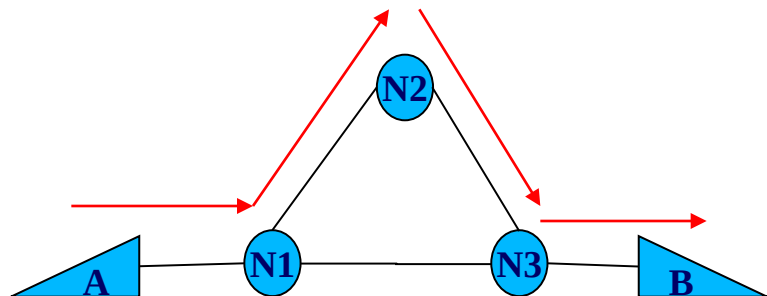
Paq. 1: 250 bits de información

Paq. 2: 250 bits de información

Paq. 3: 250 bits de información

Paq. 4: 250 bits de información

Paq. 5: 105 bits inform.



3. Conmutación de paquetes

Paquetes de longitud variable

Retardo extremo a extremo (T):

$$T_p = \frac{d_1}{v_p} + \frac{d_2}{v_p} + \frac{d_3}{v_p} + \frac{d_4}{v_p} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{d_i}{v_p}$$

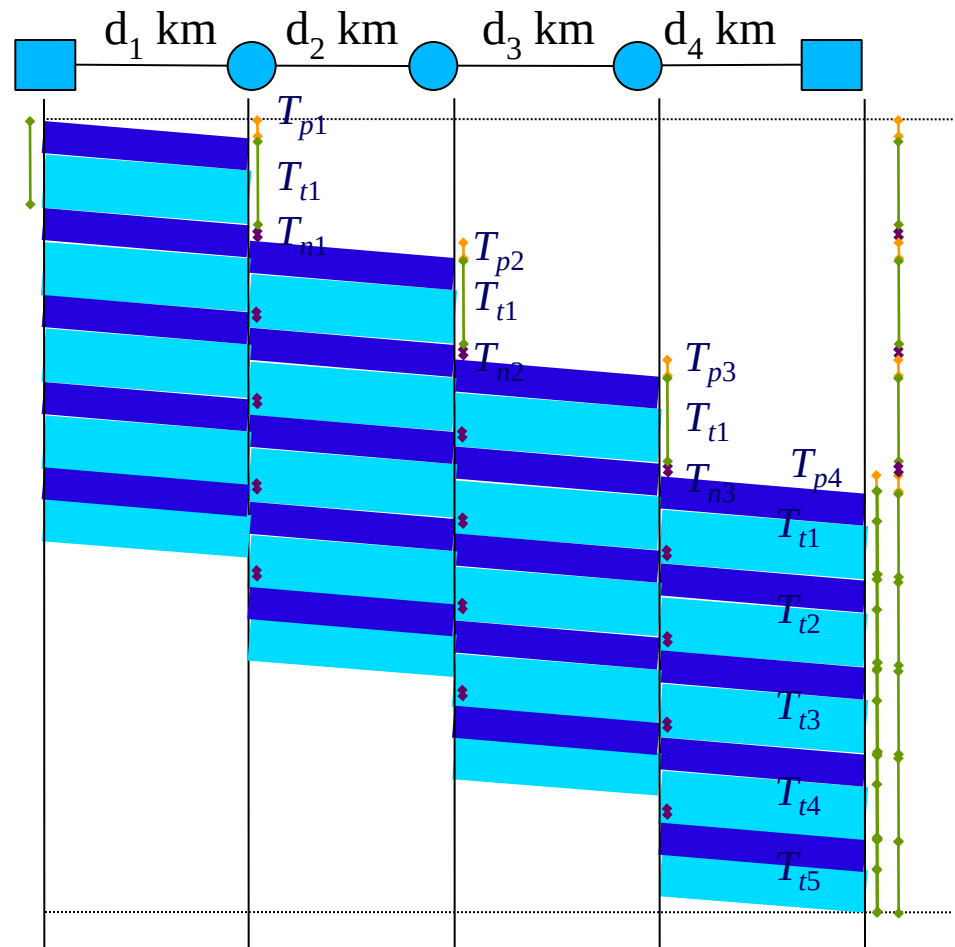
$$T_t = \sum_{i=1}^n \frac{H+p}{C_i} + \left\lceil \frac{m}{p} \right\rceil \frac{H}{C_{n+1}} + \frac{m}{C_{n+1}}$$

$$T_n = \sum_{i=1}^n T_{ni} = T_{n1} + T_{n2} + T_{n3}$$

$$T = T_p + T_t + T_n$$

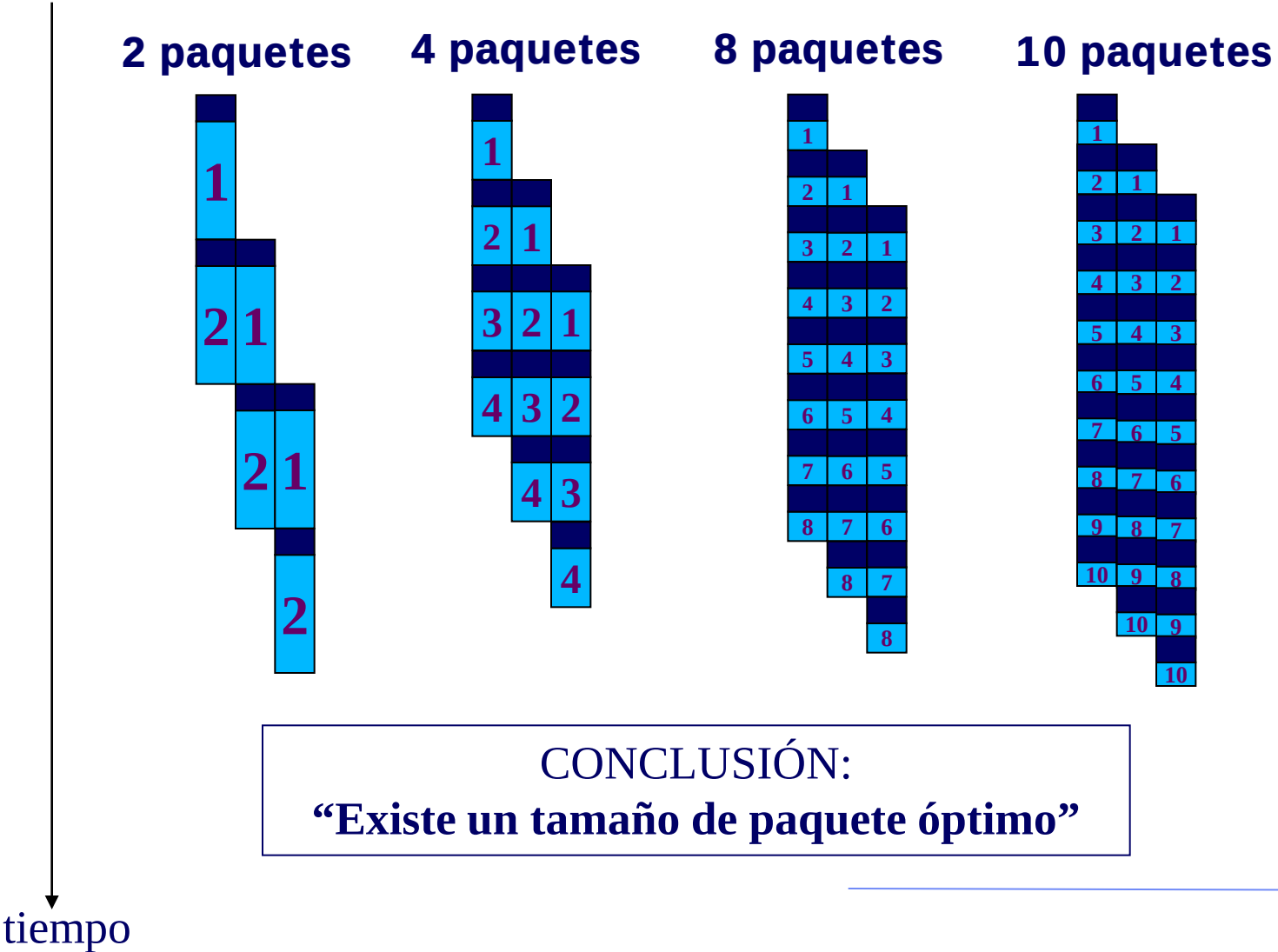
Si n nodos y enlaces iguales:

$$T = \frac{D}{v_p} + n \cdot \frac{(H+p)}{c} + \left\lceil \frac{m}{p} \right\rceil \cdot \frac{H}{c} + \frac{m}{c} + n \cdot T_n$$



3. Conmutación de paquetes

EFFECTO “PIPELINE”



3. Conmutación de paquetes

Cálculo de la longitud óptima de paquete

m = longitud del mensaje = variable aleatoria

p = longitud del paquete

k = nº de paquetes

$$T = \frac{D}{v_p} + n \cdot \frac{(H + p)}{c} + \left[\frac{m}{p} \right] \cdot \frac{H}{c} + \frac{m}{c} + n \cdot T_n$$

$\bar{k} = \frac{\bar{m}}{p}$

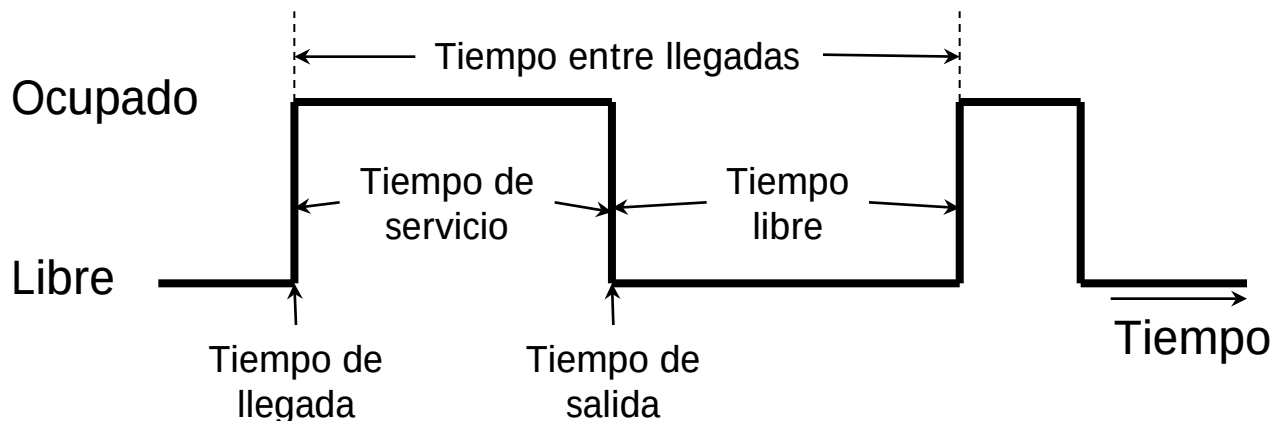
$$\bar{T} = \frac{D}{v_p} + n \cdot \frac{(H + p)}{c} + \frac{\bar{m}}{p} \cdot \frac{H}{c} + \frac{\bar{m}}{c} + n \cdot T_n$$

$$\frac{d\bar{T}}{dp} = \frac{n}{c} - \frac{\bar{m} \cdot H}{p^2 \cdot c} = \frac{p^2 \cdot n - \bar{m} \cdot H}{p^2 \cdot c}$$

$$\frac{d\bar{T}}{dp} = 0 \Rightarrow p^2 \cdot n = \bar{m} \cdot H \Rightarrow p_{opt} = \sqrt{\frac{\bar{m} \cdot H}{n}}$$

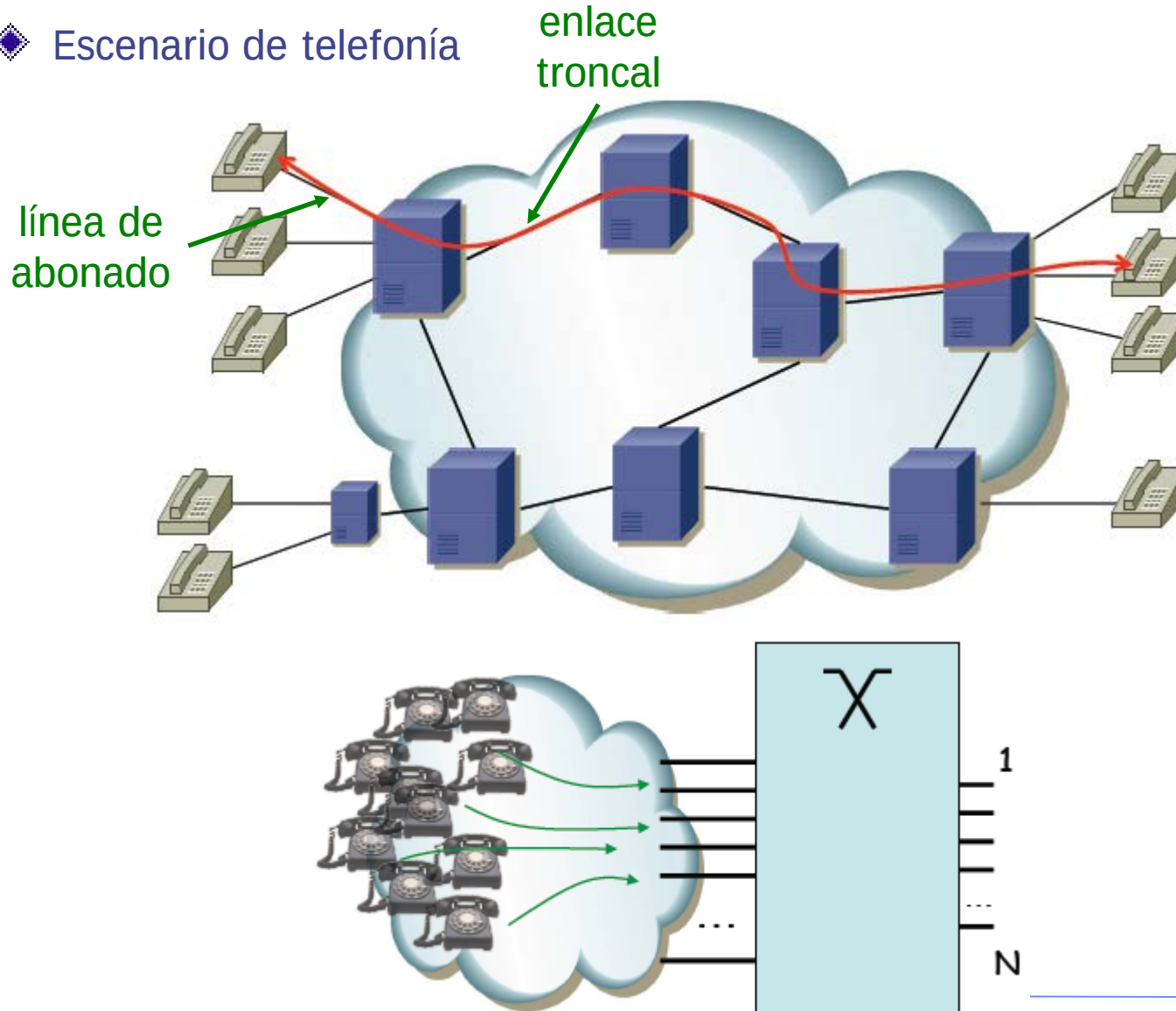
4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ La Teoría de Teletráfico se define como la aplicación de la teoría de probabilidad a la solución de problemas relacionados con la planificación, la evaluación de prestaciones, la operación y el mantenimiento de sistemas de telecomunicación
- ◆ El objetivo de la Teoría de Teletráfico es diseñar sistemas tan efectivos en costes como sea posible que cumplan un GoS predefinido, cuando se conocen las demandas futuras de tráfico y la capacidad de los elementos del sistema
- ◆ La descripción de las propiedades del tráfico se divide en procesos aleatorios para las llegadas de intentos de llamada y para los tiempos de servicio



4. Conceptos básicos de Teletráfico

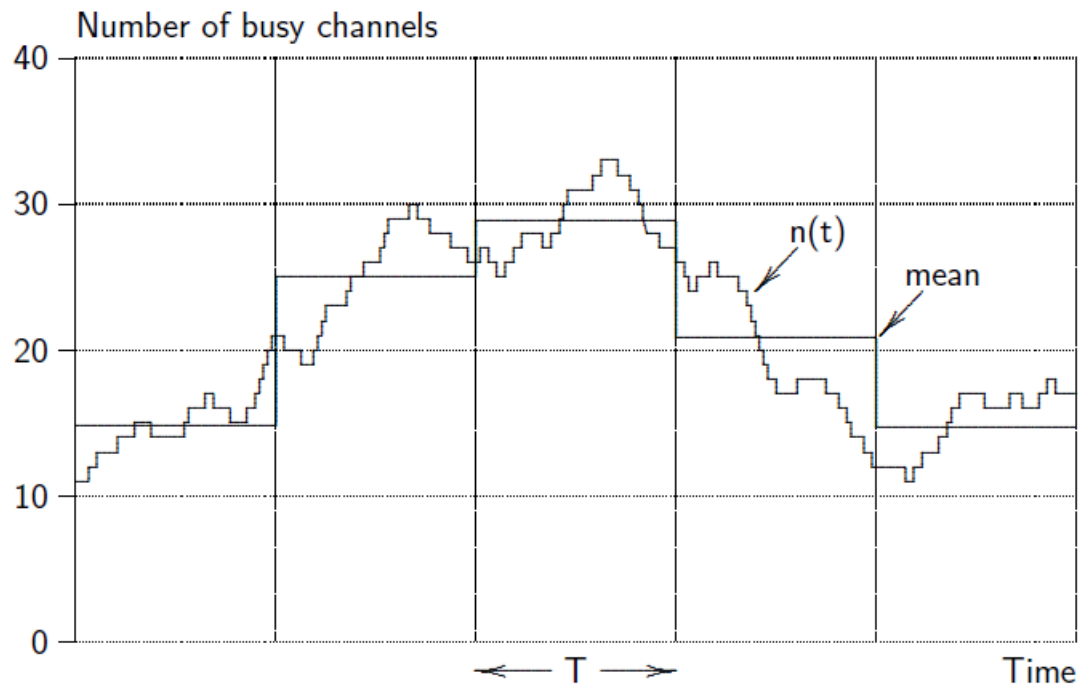
◆ Escenario de telefonía



4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ **Intensidad de tráfico instantánea** en un conjunto de recursos es el número de recursos ocupados en un instante de tiempo dado. Dependiendo de la tecnología, el conjunto de recursos corresponde a un grupo de servidores, canales, líneas troncales, etc.
- ◆ Los momentos estadísticos (media, varianza, ...) se pueden calcular para un periodo de tiempo T dado. Para la intensidad de tráfico media obtenemos:

$$\bar{n} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T n(t) dt$$



4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ El **Tráfico Cursado (TC)** se define como el número medio de recursos ocupados en el intervalo T ($TC = I$). También representa la utilización o carga de la línea (ρ)
 - La unidad utilizada para intensidad de tráfico es el *Erlang* (E), que no tiene dimensiones. Una línea troncal puede cursar como máximo 1 Erlang, por lo tanto, el tráfico cursado no puede exceder el número de líneas troncales
 - El tráfico cursado total en un intervalo de tiempo T es el **Volumen de Tráfico (V)**, y se mide en erlang-horas (Eh) o erlang-segundos. Es igual a la suma de todos los tiempos de servicio dentro de dicho periodo

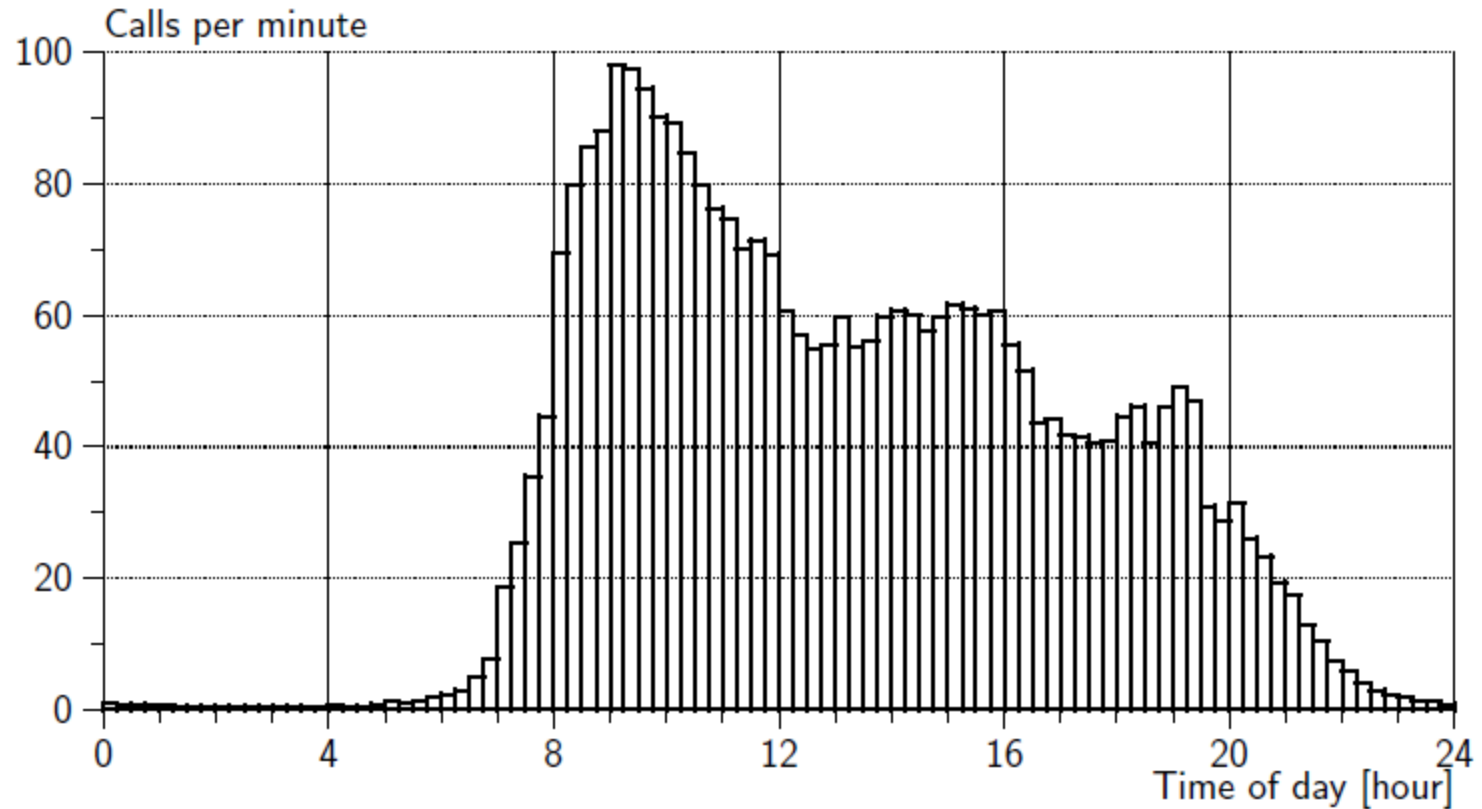
- ◆ El **Tráfico Ofrecido (TO)** es el tráfico que sería cursado si hubiera una cantidad ilimitada de recursos. Es un parámetro teórico que no puede ser medido, sólo puede ser estimada:

$$TO = \lambda \cdot \overline{t_s}$$
 - λ es la intensidad de llamadas (número medio de llamadas ofrecidas por unidad de tiempo)
 - $\overline{t_s}$ es el tiempo medio de servicio

- ◆ El **Tráfico Rechazado (TR)** es la diferencia entre el tráfico ofrecido (TO) y el tráfico cursado (TC)

4. Conceptos básicos de Teletráfico

◆ Variaciones de tráfico y el concepto de hora cargada



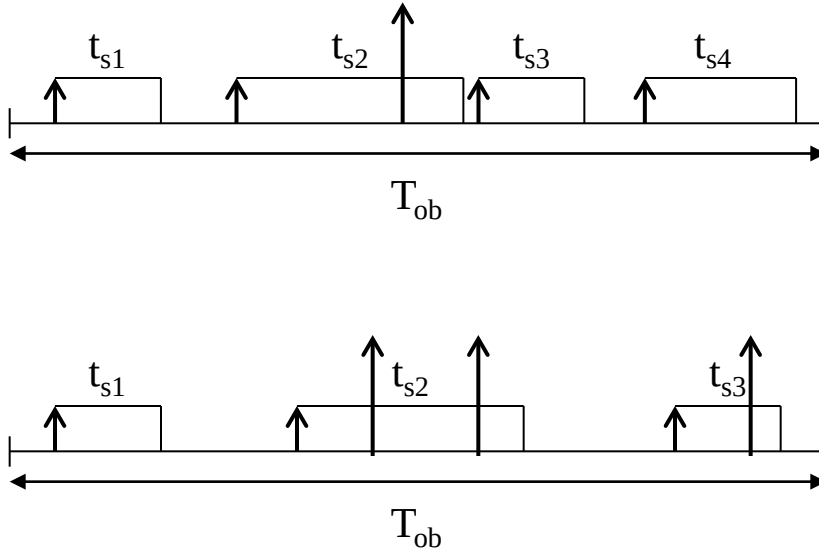
- **Hora Cargada:** Aquellos 60 minutos que en media, durante un largo periodo de tiempo, tienen el tráfico más elevado

4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ **Concepto de bloqueo.** El sistema telefónico no se dimensiona para que todo los abonados puedan conectarse al mismo tiempo. La cantidad de equipamiento se limita por razones económicas y es por lo tanto posible que un abonado no pueda establecer una llamada, y que tenga que esperar o que sea bloqueado
- ◆ Dependiendo de cómo funcione el sistema se distingue entre sistemas de pérdidas (p. e. enlaces troncales) y sistemas de tiempos de espera (p. e. redes de computadores)
- ◆ El efecto que producen los sistemas de pérdidas debido a la insuficiencia de equipamiento se puede expresar de 2 formas:
 - Congestión en llamadas (Probabilidad de pérdidas, P_L): La fracción de todos los intentos de llamadas que observan todos los servidores ocupados
 - Congestión en tiempo (Probabilidad de bloqueo, P_B): La fracción de tiempo en que todos los servidores están ocupados
- ◆ Estas medidas cuantitativas pueden ser utilizadas para establecer principios de dimensionamiento para líneas troncales

4. Conceptos básicos de Teletráfico

◆ Ejemplo



$$TC = \sum_{i=1}^2 TC_i = 0,75 + 0,50 = 1,25E < 2 = \frac{\sum_{i=1}^4 t_{si} + \sum_{i=1}^3 t_{si}}{T_{ob}} = \frac{\sum_{i=1}^7 t_{si}}{T_{ob}} = \frac{\sum_{i=1}^{\#C} t_{si}}{T_{ob}}$$

$$\lambda_o = \frac{\#O}{T_{ob}} = \frac{11}{T_{ob}} \Rightarrow TO = \lambda_o \times \bar{t}_s$$

$$\lambda_R = \frac{\#R}{T_{ob}} = \frac{4}{T_{ob}} \Rightarrow TR = \lambda_R \times \bar{t}_s$$

$$TC_1 \approx 0,75 = 75\% = \frac{\sum_{i=1}^4 t_{si}}{T_{ob}} \quad \text{with } V \text{ pointing to } \sum_{i=1}^4 t_{si}$$

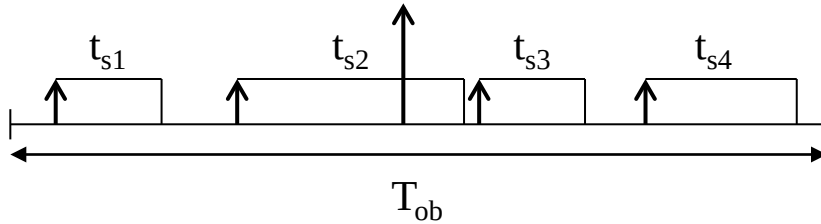
$$\left. \begin{aligned} \lambda_{C1} &= \frac{\#C^1}{T_{ob}} = \frac{4}{T_{ob}} \\ \bar{t}_s &= \frac{\sum_{i=1}^{\#C^1} t_{si}}{\#C^1} = \frac{\sum_{i=1}^4 t_{si}}{4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow TC_1 = \lambda_{C1} \times \bar{t}_s = \frac{4}{T_{ob}} \times \frac{\sum_{i=1}^4 t_{si}}{4}$$

$$TC_2 \approx 0,50 = 50\%$$

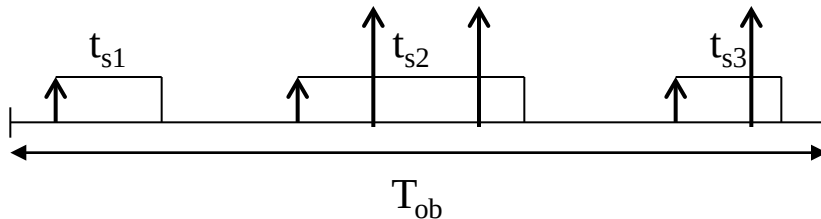
$$\left. \begin{aligned} \lambda_C &= \frac{\#C}{T_{ob}} = \frac{7}{T_{ob}} \\ \bar{t}_s &= \frac{\sum_{i=1}^{\#C} t_{si}}{\#C} = \frac{\sum_{i=1}^7 t_{si}}{7} \end{aligned} \right\} \Rightarrow TC = \lambda_C \times \bar{t}_s$$

4. Conceptos básicos de Teletráfico

◆ Ejemplo



$$\mu_1 = \frac{\#C^1}{\sum_{i=1}^{\#C^1} t_{si}} = \frac{4}{\sum_{i=1}^4 t_{si}} \Rightarrow \mu_1 = \frac{1}{t_{s1}}$$



$$\mu_2 = \frac{\#C^2}{\sum_{i=1}^{\#C^2} t_{si}} = \frac{3}{\sum_{i=1}^3 t_{si}} \Rightarrow \mu_2 = \frac{1}{t_{s2}}$$

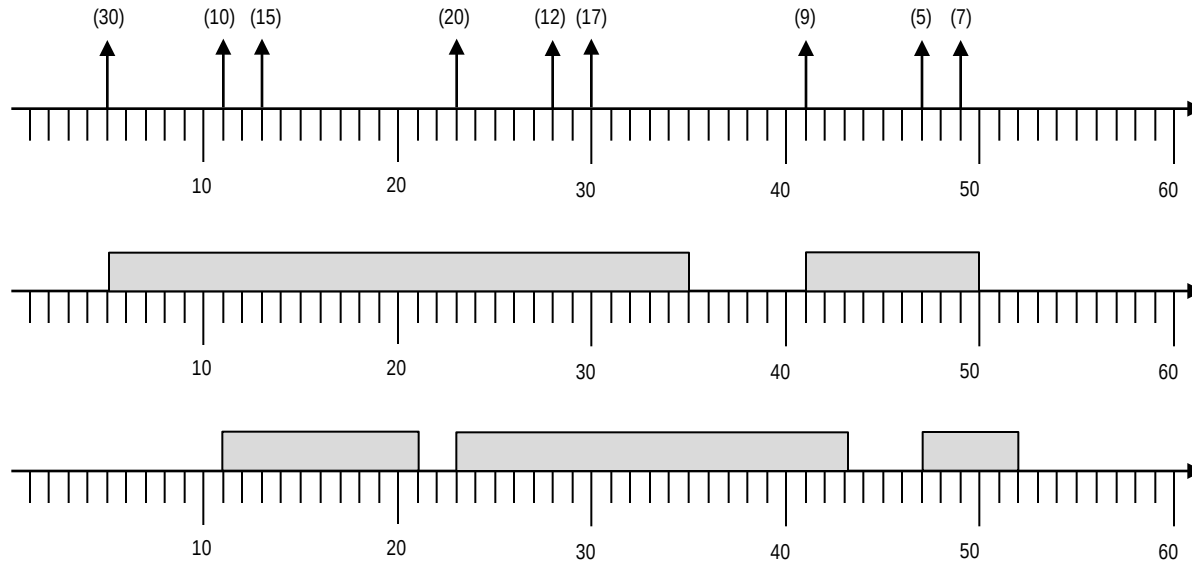
$$\mu = \frac{\#C}{\sum_{i=1}^{\#C} t_{si}} = \frac{7}{\sum_{i=1}^7 t_{si}} = \frac{1}{t_s} = \mu_1 \frac{\sum_{i=1}^4 t_{si}}{\sum_{i=1}^7 t_{si}} + \mu_2 \frac{\sum_{i=1}^3 t_{si}}{\sum_{i=1}^7 t_{si}} = \mu_1 P(s_1) + \mu_2 P(s_2) = \bar{\mu}$$

$$P_L = \frac{\#R}{\#O} = \frac{4}{11}$$

$$P_B = \frac{T_{ocupados}}{T_{obs}}$$

4. Conceptos básicos de Teletráfico

Ejercicio



$$\lambda_O =$$

$$TC_1 =$$

$$\lambda_C =$$

$$TC_2 =$$

$$\lambda_R =$$

$$TC = TC_1 + TC_2 =$$

$$TO =$$

$$TR =$$

$$\overline{t_s} =$$

$$P_L =$$

$$PB =$$

$$TO = TC + TR$$

$$TR = TO P_L$$

$$TC = TO(1 - P_L)$$

$$\lambda_O = \lambda_C + \lambda_R$$

4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ **Modelado de Intervalos Temporales.** Los intervalos temporales son no-negativos, y por lo tanto pueden ser expresados por variables aleatorias no-negativas
- ◆ Los intervalos temporales de interés son por ejemplo: tiempos de servicio, duración de la congestión, tiempos de espera, etc.
- ◆ En principio, se podría utilizar cualquier función de distribución con valores no-negativos. Sin embargo, la distribución exponencial tiene características únicas que la hacen apropiada para usos prácticos y analíticos. La más importante es la Propiedad de Markov (ausencia de memoria), que indica que el futuro es independiente del pasado
- ◆ La distribución exponencial se caracteriza únicamente por la tasa λ :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \lambda > 0, t \geq 0,$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \lambda > 0, t \geq 0$$

$$m_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot f(t) dt = \frac{2}{\lambda^2}$$

$$media = m_1 = \frac{1}{\lambda}$$

$$varianza = m_2 - m_1^2 = \frac{1}{\lambda^2}$$

4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ **Procesos de Llegada.** Los procesos de llegadas, tales como las llamadas telefónicas que llegan a un sistema de conmutación o los paquetes que llegan a un servidor, son descritos matemáticamente mediante procesos estocásticos.
- ◆ El proceso de Poisson es el proceso puntual más importante. Sus dos características más importantes son:
 - La distancia temporal entre eventos consecutivos está distribuido exponencialmente
 - El número de eventos dentro de un intervalo de tiempo de longitud fija sigue la distribución de Poisson

$$p(i, t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} \cdot e^{-\lambda t}, \quad i = 0, 1, \dots \quad \lambda > 0$$

$$m_1 = \lambda \cdot t \qquad \sigma^2 = \lambda \cdot t$$

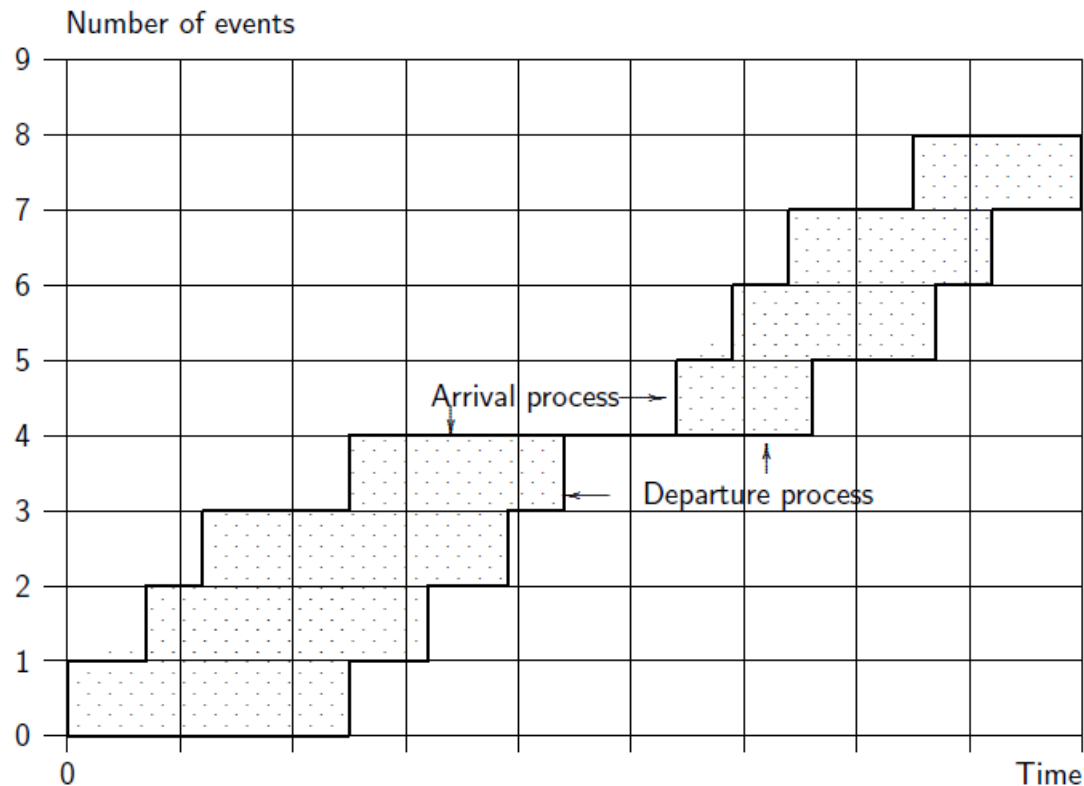
4. Conceptos básicos de Teletráfico

◆ Otras características del proceso de Poisson:

- **Superposición.** Mediante la superposición de n procesos de Poisson independientes obtenemos otro proceso de Poisson. Se puede probar teniendo en cuenta que:
 - ◆ La más pequeña de n distribuciones exponenciales es una distribución exponencial
 - ◆ La suma de n distribuciones de Poisson es una distribución de Poisson
- **Descomposición.** En la división aleatoria de un proceso de Poisson en n subprocesos, cada subproceso será un proceso de Poisson independiente

4. Conceptos básicos de Teletráfico

- ◆ **Ley de Little.** Consideramos un sistema de colas, en el que los clientes llegan al sistema, esperan a ser servidos y después dejan el sistema
- ◆ La distancia vertical ($N(t) = A(t) - D(t)$) representa el número actual de clientes siendo servidos. Los clientes no salen en el mismo orden en el que llegan, así que la distancia horizontal no describe el tiempo actual en el sistema del cliente



4. Conceptos básicos de Teletráfico

◆ **Ley de Little.** Consideramos un periodo de tiempo P y asumimos que el sistema está en equilibrio estadístico en el instante inicial $t=0$. Utilizamos la siguiente notación:

- $a(P)$: número de llegadas en el periodo P
- $V(P)$: los tiempos de estancia en el sistema de todas las llamadas en el periodo P (Volumen de Tráfico) = el área sombreada entre curvas
- $\lambda(P) = \frac{a(P)}{P}$: la tasa de llegadas en el periodo P
- $T(P) = \frac{V(P)}{a(P)}$: tiempo medio de estancia en el sistema de cada llamada en el periodo P
- $N(P) = \frac{V(P)}{P}$: número medio de elementos en el sistema en el periodo P

◆ Existe la siguiente relación entre estas variables:

$$N(P) = \frac{V(P)}{P} = \frac{T(P) \cdot a(P)}{P} = \lambda(P) \cdot T(P)$$

◆ Si los límites: $\lambda = \lim_{P \rightarrow \infty} \lambda(P)$ $T = \lim_{P \rightarrow \infty} T(P)$

existen, entonces el valor límite de $N(P)$ también existe y:

$$N = \lambda \cdot T$$