

**GIST; GIT; GIST+ADE**

Comunicaciones Digitales

# **T5 Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones Digitales**

**Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Universidad Rey Juan Carlos**



Eduardo Morgado Reyes ([eduardo.morgado@urjc.es](mailto:eduardo.morgado@urjc.es))



# Contenidos

- ▶ Sincronización:
  - Sincronización en frecuencia y fase.
  - Sincronización de símbolo.
- ▶ Multiplexado y Acceso Múltiple:
  - Técnicas de duplexado (separación UL y DL).
  - Acceso Múltiple en Canales AWGN:
    - Acceso supervisado:
      - FDMA, TDMA, CDMA, SDMA.
    - Acceso no supervisado:
      - Aloha, CSMA.
- ▶ Diseño de Sistemas de Comunicaciones Digitales

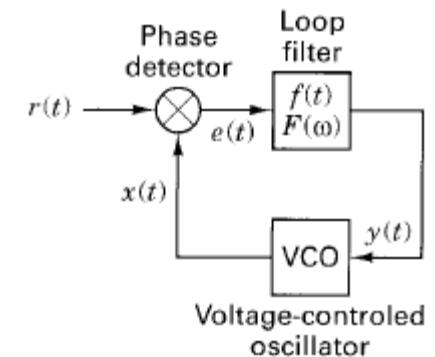
# Sincronización

- ▶ Todos los sistemas de comunicación requieren algún nivel de sincronización en las señales recibidas en el Rx.
  - Cada nivel implica un coste para obtener unos beneficios (en prestaciones y versatilidad)
- ▶ Tipos:
  - Sincronización en frecuencia y fase (de portadora):
    - El Rx es capaz de generar señales de referencia con fase idéntica a la que le llega del transmisor.
    - Para ello debe estar sincronizado con la portadora recibida.
    - *Phase lock* → el oscilador local del receptor está sincronizado en frecuencia y fase con la señal recibida.
  - Sincronización de símbolo:
    - *Symbol lock* → el Rx genera un tren de pulsos sincronizados con los símbolos de la señal recibida.
  - Sincronización de trama (frame).
  - Sincronización de red (network).

# Sincronización en Frecuencia y Fase (I)

## ▶ PLL (Phase Locked Loop):

- Controla la fase de una réplica local de la señal portadora recibida.
- Componentes:
  - Detector de fase:
    - Mide la diferencia de fase (error de fase) entre la señal recibida y la réplica.
  - Filtro de lazo:
    - Filtro paso bajo → para eliminar el error de fase que provenga del ruido en recepción.
  - VCO:
    - Oscilador sinusoidal cuya frecuencia se controla por el nivel de voltaje a la entrada.
      - Dependencia lineal. Directamente proporcional.
    - Se alimenta con la versión filtrada del error de fase.
- En Rx digitales modernos el esquema (y las expresiones matemáticas) es mucho más complejo.
  - Por ejemplo: detector de fase mediante filtro de correladores.
  - Pero los principios básicos son similares a los que veremos.



# Sincronización en Frecuencia y Fase (II)

- ▶ Funcionamiento PLL en ausencia de ruido:

$$\begin{aligned} r(t) &= \cos[w_0 t + \theta(t)] \\ x(t) &= -2 \sin[w_0 t + \hat{\theta}(t)] \end{aligned} \Rightarrow e(t) = x(t) \cdot r(t) = \sin[\theta(t) - \hat{\theta}(t)] + \sin[2w_0 t + \theta(t) + \hat{\theta}(t)]$$

- El filtro de lazo elimina la componente de alta frecuencia → la señal de error filtrada es función de la diferencia de fases.
- Asumiendo que  $\omega_0$  es la frecuencia generada por el VCO cuando la entrada es 0:

$$\Delta\omega(t) = \frac{d}{dt} [\hat{\theta}(t)] = K_0 y(t) = K_0 e(t) * f(t) \approx K_0 [\theta(t) - \hat{\theta}(t)] * f(t)$$

- Función de transferencia en lazo cerrado del PLL:

$$j\omega \hat{\Theta}(\omega) = K_0 [\Theta(\omega) - \hat{\Theta}(\omega)] F(\omega)$$

$$H = \frac{\hat{\Theta}(\omega)}{\Theta(\omega)} = \frac{K_0 F(\omega)}{j\omega + K_0 F(\omega)}$$

# Sincronización en Frecuencia y Fase (III)

## ▶ Prestaciones del PLL con ruido:

- $B_L$  es el BW del lazo sencillo (*single-sided loop BW*).

$$W_L = 2B_L = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(w)|^2 dw$$

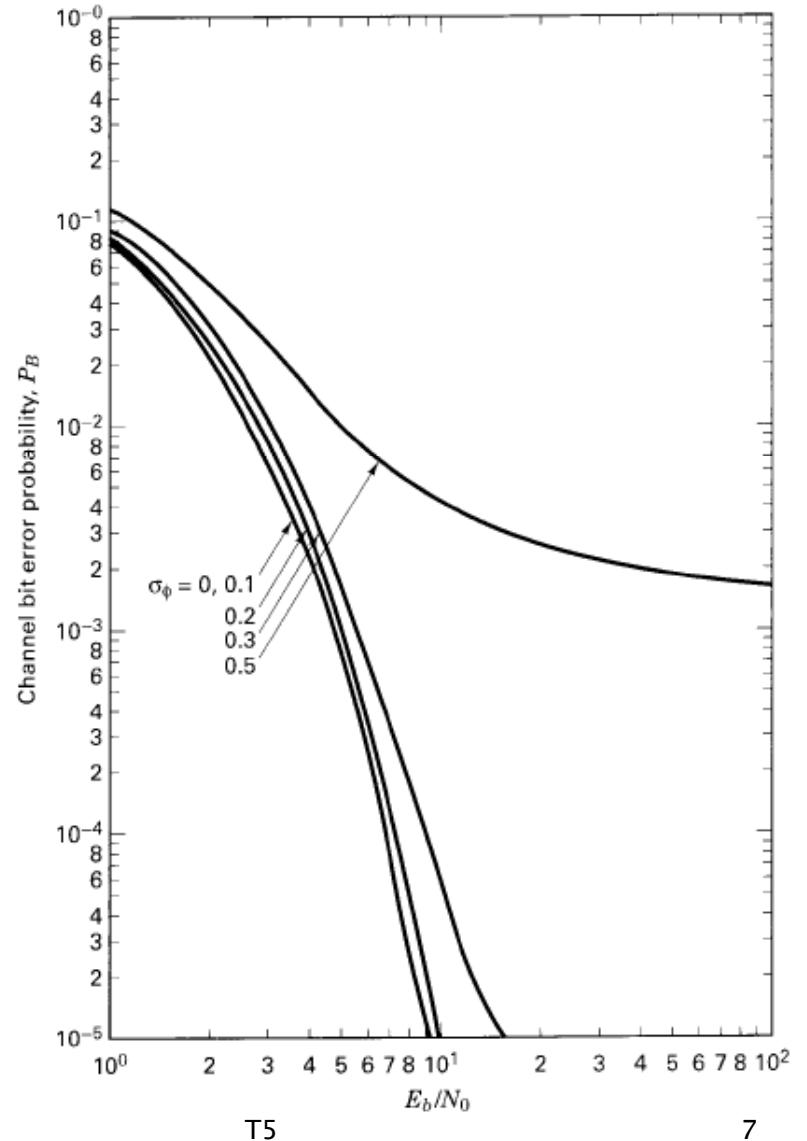
$$\left. \begin{array}{l} r(t) = \cos[w_0 t + \theta(t)] + n(t) \\ D.E.P = \frac{N_0}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow VAR(\hat{\theta}) = \sigma_{\hat{\theta}}^2 = 2N_0 B_L$$

- Compromiso entre cantidad de ruido en fase y capacidad de seguimiento.



# Sincronización en Frecuencia y Fase (y IV)

- ▶ Degradación de prestaciones del sistema ante error de sincronización en fase:
  - Si el PLL no es capaz de corregir los errores de fase (seguir las variaciones de fase) → empeora la probabilidad de error de símbolo.
    - Errores de fase pequeños a SNR moderadas → poca degradación.
    - Gran error de fase → ni a altas SNR se corrige la importante degradación.
  - Hay disponibles las curvas de degradación para los sistemas coherentes más comunes.
    - Ejemplo: BPSK.





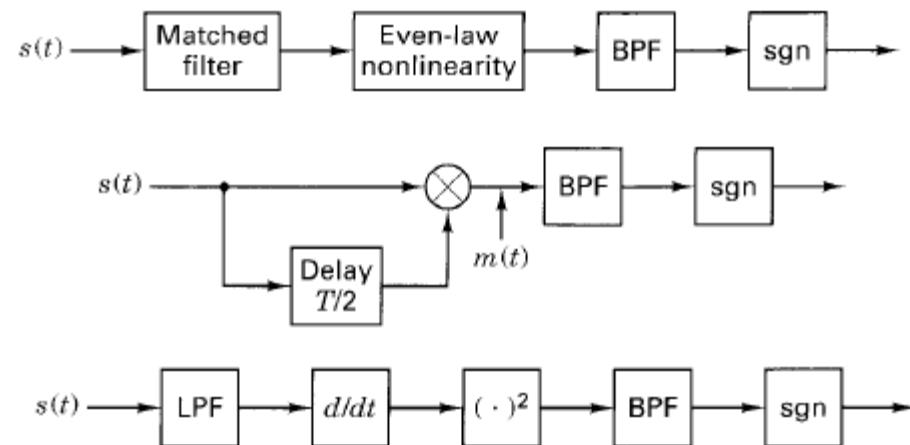
# Sincronización de Símbolo (I)

- ▶ Necesaria en todos los receptores digitales para alcanzar una demodulación óptima.
- ▶ Tipos:
  - Sincronizadores NDA (non-data-aided):
    - Sin información sobre la secuencia de datos recibida.
  - Sincronizadores DA (data-aided):
    - Se conoce de cierta información sobre la secuencia de datos recibida que ayuda a la sincronización.
- ▶ Dentro de los NDA:
  - De lazo abierto (open-loop; OLS):
    - Son filtros sincronizadores.
    - Recuperan una réplica del reloj a partir de filtros y operaciones no lineales sobre la señal recibida.
  - De lazo cerrado (closed-loop; CLS):
    - Comparan la señal de entrada con una señal de reloj generada localmente para sincronizar el reloj local con las transiciones de la señal recibida.
    - Más precisos pero más complejos.

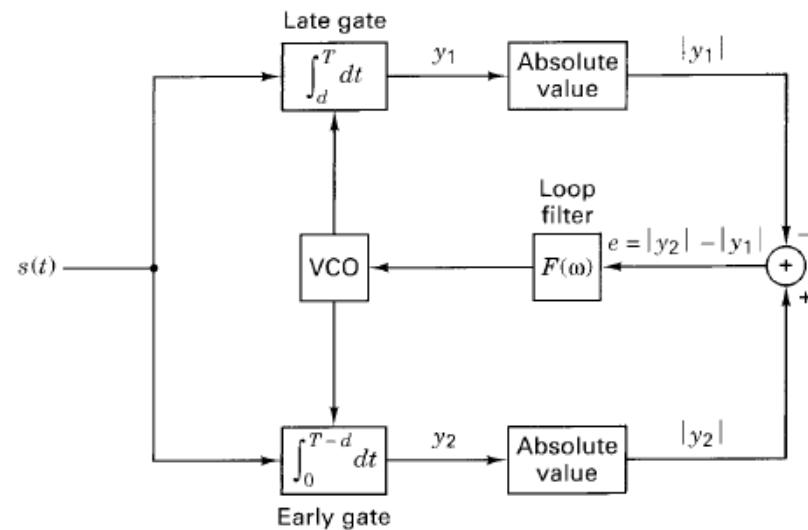
# Sincronización de Símbolo (II)

## ► Estructura:

- OLS:



- CLS:



# Sincronización de Símbolo (y III)

## ▶ Prestaciones con ruido:

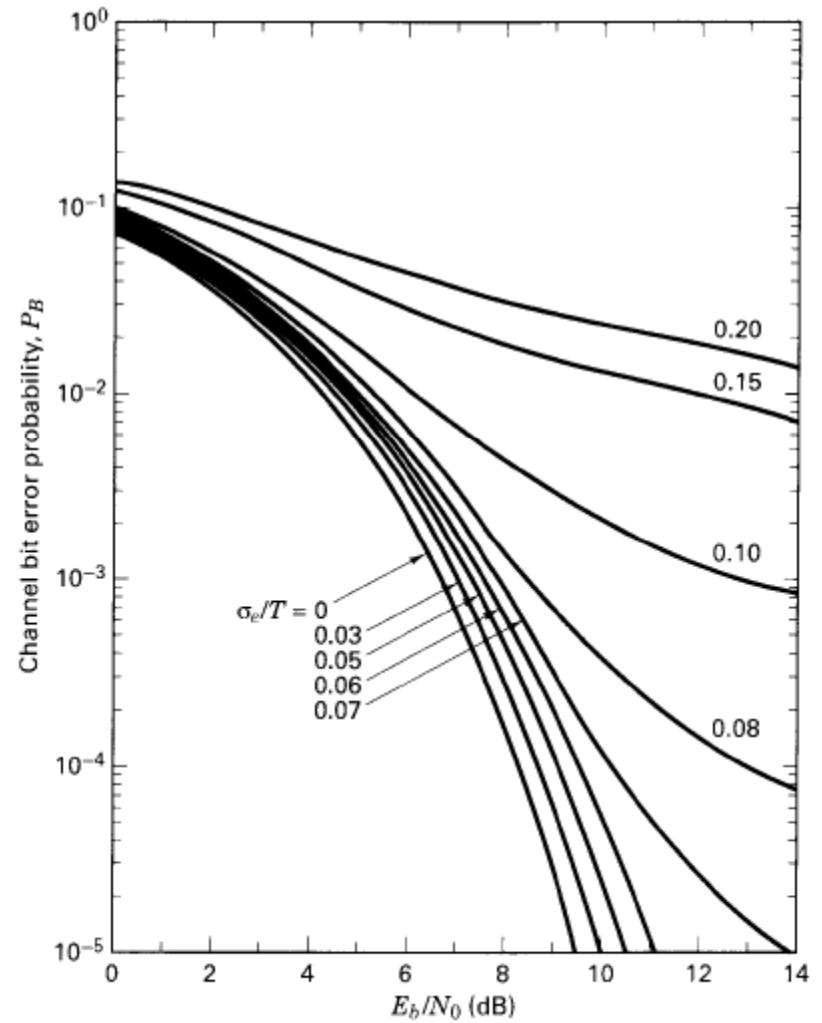
- OLS:

$$\frac{|\bar{\varepsilon}|}{T} \approx \frac{0.33}{\sqrt{KE_b/N_0}} \quad \text{con } \frac{E_b}{N_0} > 5, K \geq 18$$

$$\frac{\sigma_\varepsilon}{T} \approx \frac{0.411}{\sqrt{KE_b/N_0}} \quad \text{con } \frac{E_b}{N_0} > 1$$

- CLS:

$$\frac{\sigma_\varepsilon^2}{T^2} \approx 2N_0B_L$$

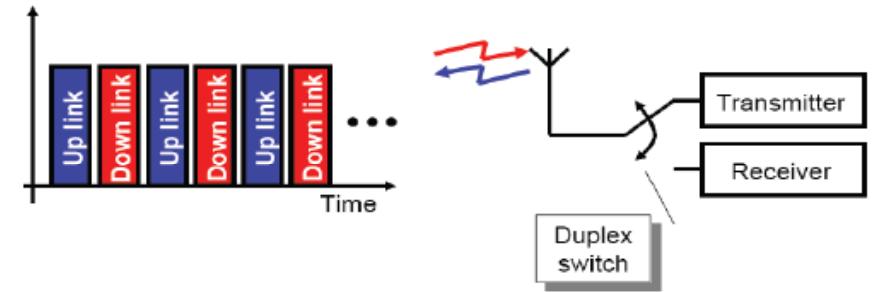


# Multiplexado y Acceso Múltiple

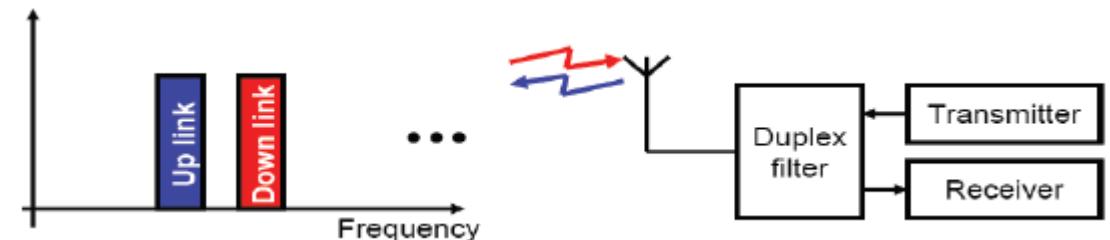
- ▶ Un recurso de comunicaciones (RC) representa el tiempo y BW disponible.
  - Uso eficiente → gestionar el uso de los recursos entre los usuarios:
    - Para no desperdiciar slots de tiempo o bandas de frecuencia.
    - Para un uso equitativo por parte de los usuarios.
- ▶ Múltiples usuarios (sistema multi-usuario) → compartir el RC.
  - Distintas configuraciones:
    - Uno a uno; todos a uno; todos a todos; sub-grupo a uno; sub-grupo a sub-grupo; sub-grupo a todos.
- ▶ Técnicas:
  - Multiplexado → recursos asignados a priori.
    - Fijos o varían muy lentamente.
  - Acceso múltiple → el esquema de acceso cambia dinámicamente.
    - Un controlador del sistema debe conocer las necesidades de RC de cada usuario.

# Duplexado

- ▶ Separación de:
  - Enlace ascendente (UL):
    - Canal de acceso múltiple (MAC; Multiple Access Channel).
  - Enlace descendente (DL):
    - Canal de difusión (BC; Broadcast Channel).



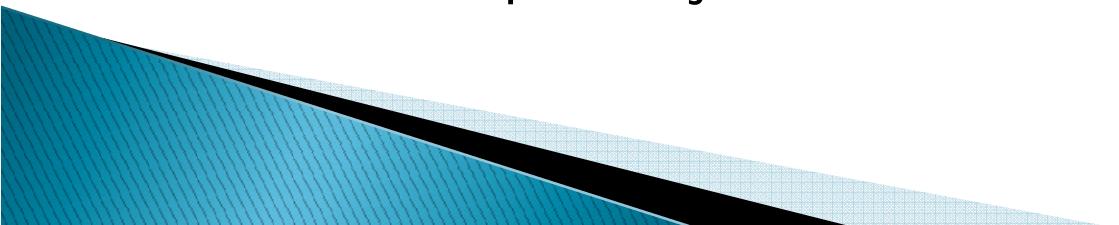
- ▶ Técnicas:
  - TDD (Time Division Duplex).
    - Menor complejidad pero transmisión discontinua.
  - FDD (Frequency Division Duplex).
    - Transmisión continua pero mayor complejidad.



- ▶ Ambas configuraciones tienen la misma región de capacidad.

# Acceso Múltiple para canales AWGN

- ▶ Técnicas supervisadas:
  - Existen reglas bien definidas para la transmisión que pre-asignan recursos.
  - Técnica determinista.
  - Adecuada para flujos de información regulares.
  - Se puede garantizar QoS (Calidad de Servicio): tasa, retardo...
- ▶ Técnicas no supervisadas (o bajo demanda):
  - Los propios usuarios toman la decisión sobre cuando transmitir.
  - Técnica probabilística.
  - Adecuada para flujos de información muy irregulares.



# Acceso Supervisado

- ▶ Útiles cuando existe infraestructura y los usuarios transmiten regularmente.
- ▶ Requieren un mayor mantenimiento pero pueden garantizar prestaciones (QoS).
- ▶ Existen normas claras que indican cuándo los usuarios pueden transmitir.
- ▶ Las comunicaciones entre distintos usuarios pueden separarse en:
  - Frecuencia: FDMA.
  - Tiempo: TDMA.
  - Código: CDMA.
  - Espacio: SDMA (sólo en sistemas MIMO).
  - Incluso en polarización: PDMA.



# FDMA

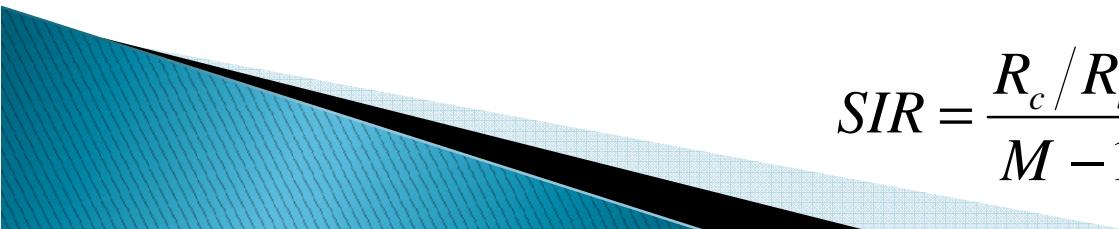
- ▶ Se divide el BW en sub-bandas.
  - Cada usuario Tx en una sub-banda → acceso ortogonal.
- ▶ Características:
  - Sincronización temporal sencilla.
  - Sincronización frecuencial compleja.
  - Muy sensible a la selectividad en frecuencia.
  - Problemas por no linealidades → productos de intermodulación.
- ▶ Técnica típica en:
  - Sistemas analógicos.
  - Sistemas de banda ancha (donde las sub-bandas son de anchura razonable).
  - Combinación con otros métodos de acceso.
- ▶ Variaciones:
  - OFDMA:
    - A cada usuario OFDM se le asigna un grupo de portadoras distinto.
  - SC-FDMA:
    - Similar a OFDM pero precodificando los símbolos mediante una DFT.
    - Consigue ventajas y mejoras de prestaciones.

# TDMA

- ▶ Se divide el eje temporal en distintos intervalos periódicos.
  - Cada usuario Tx en una intervalo distinto → acceso ortogonal.
- ▶ Características:
  - Sincronización temporal compleja (y con Tx discontinua).
  - Sincronización frecuencial sencilla (y sin necesidad de intervalos de guarda).
  - Utiliza todo el BW → puede combatir selectividad en frecuencia.
  - Los periodos de inactividad favorecen que el usuario sondee el canal y se configure adecuadamente.
- ▶ Técnica típica combinada con FDMA:
  - Cada canal en frecuencia se subdivide en tiempo para generar más canales.
  - Ejemplo: GSM.
    - EB típica: 3 frecuencias distintas (FDMA), cada una compartida por 8 usuarios en TDMA → Cada EB puede servir a 24 usuarios.

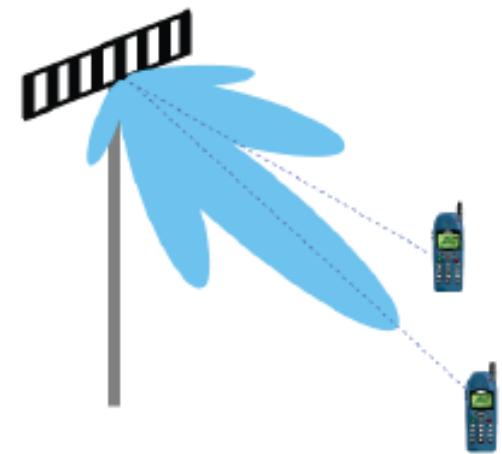
# CDMA

- ▶ Los usuarios Tx simultáneamente en el mismo tiempo y frecuencia utilizando distintos códigos de ensanchado.
- ▶ Características:
  - Segundo tipos de códigos:
    - Ortogonales:
      - Límite de usuarios acotado (limitado por número de códigos); Muy sensibles a sincronización; Sin interferencia entre usuarios (salvo si hay multirayecto).
    - No ortogonales:
      - Número de usuarios variable (limitado por SIR); Menos sensibles a sincronización; Interferencia entre usuarios (correlación cruzada; incluso sin multirayecto).
  - Capacidad limitada por interferencia.
    - UL es el enlace limitante (por falta de sincronismo).


$$SIR = \frac{R_c / R_b}{M - 1}$$

# SDMA

- ▶ Sistemas MIMO (Multiple–Input Multiple–Output).
  - Al menos MISO.
- ▶ El uso de varias antenas hace posible la TX a través de varios canales espaciales:
  - Cada usuario Tx en un canal espacial distinto (idealmente sin interferencia).
- ▶ Características:
  - La complejidad crece con el número de usuarios.
  - La ganancia del esquema está limitada por el número de antenas.
  - Para un gran número de usuarios, estos se dividen en grupos:
    - Dentro del grupo se utiliza SDMA.
    - Entre grupos, un esquema ortogonal.

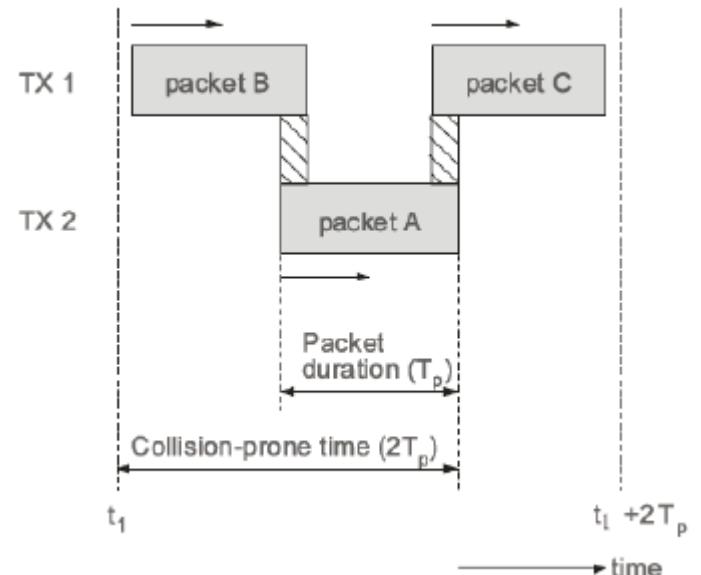


# Acceso No Supervisado

- ▶ Técnicas bajo demanda:
  - Sin preasignación de recursos → los propios usuarios deciden cuando transmitir.
  - Pueden existir colisiones de paquetes.
- ▶ Útiles cuando los flujos de información de los usuarios son irregulares (tráfico a ráfagas).
  - Análisis probabilístico.
  - Difícil garantizar QoS.
- ▶ Ampliamente utilizadas, especialmente en área local.
  - Redes cableadas: ej. ethernet.
  - Redes inalámbricas: ej. WiFi.
- ▶ Técnicas destacadas:
  - Aloha / Aloha ranurado.
  - Carrier Sense Multiple Access (CSMA).

# Aloha (I)

- ▶ Historia:
  - Desarrollado en 1971.
  - Universidad de Hawaii.
  - Acceso a un satélite desde varios ordenadores.
- ▶ Modos:
  - Transmission mode: los usuarios transmiten en cualquier momento.
  - Listening mode: después de transmitir, el usuario queda a la espera de recibir un ACK del receptor.
    - Si se detectan errores en la recepción (por colisión de paquetes), se recibirá un NACK.
  - Retransmission mode: si se recibe un NACK, se retransmite el paquete después de un tiempo aleatorio.
  - Timeout mode: si no se recibe ACK ni NACK en un tiempo especificado, se retransmite el paquete.
- ▶ Ventana de colisión =  $2T_p$
- ▶ Prestaciones fácilmente modelables con teoría de colas.



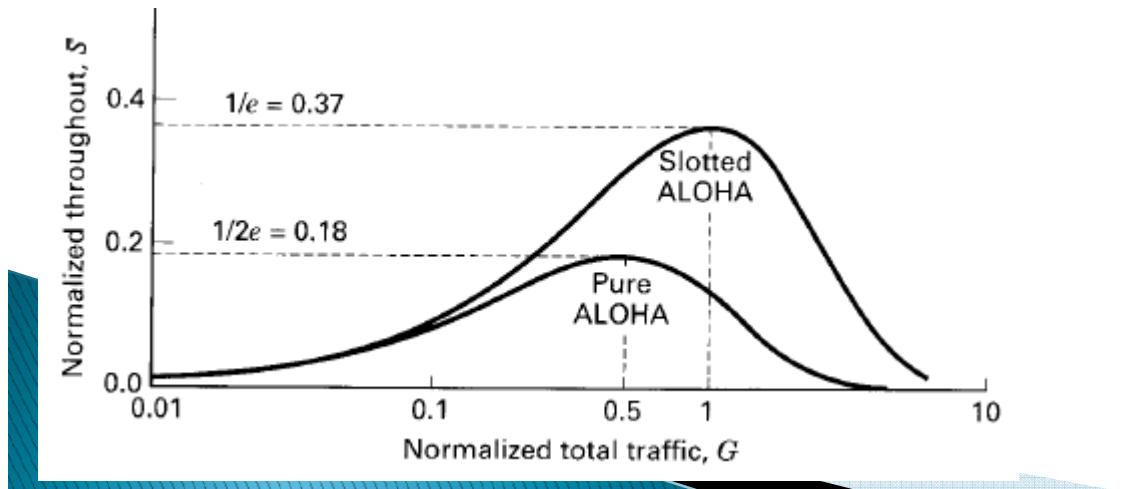
# Aloha (y II)

- ▶ Hipótesis de trabajo:
  - Tiempos de Tx aleatorios e independientes entre usuarios.
  - Tasa de Tx =  $\lambda_t$  (en paquetes/segundo).
- ▶ Modelado como distribución de Poisson:
- ▶ Cálculo de throughput (tasa efectiva):

$$\rho(n, t) = \frac{(\lambda_t t)^n e^{-\lambda_t t}}{n!}$$

$$\lambda_t = \lambda + \lambda_r$$

$$\lambda = \lambda_t - \lambda_r = (1 - \rho(\text{colisión}))\lambda_t = \rho(\text{no colisión})\lambda_t = \rho(0,2T_p)\lambda_t$$

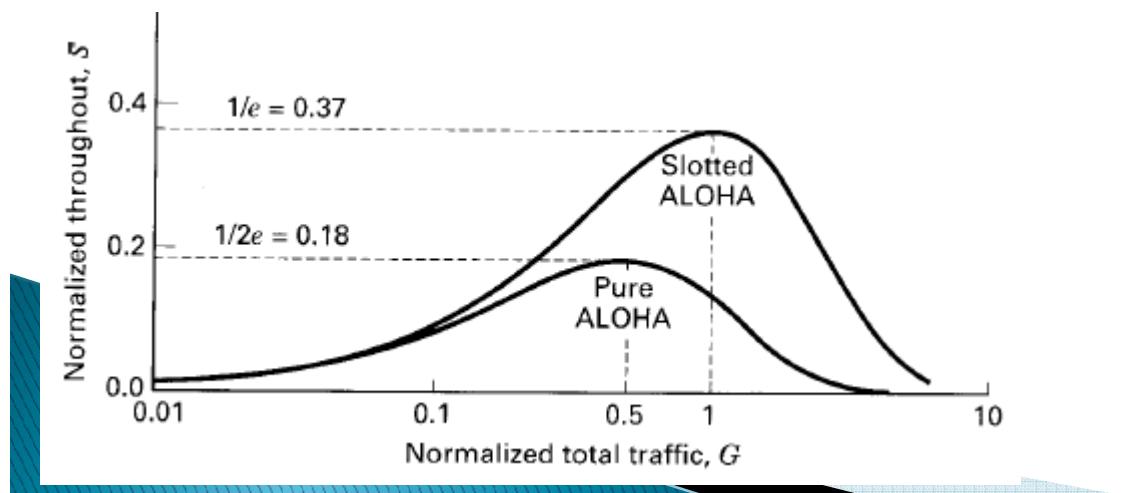


$$\lambda = \lambda_t e^{-2T_p \lambda_t}$$

$$S = G e^{-2G}$$

# S-Aloha

- ▶ Slotted-Aloha (Aloha Ranurado):
  - Mínima sincronización.
    - Pilotos de sincronización enviados a todos los usuarios.
  - Se divide el tiempo en slots.
  - Los usuarios sólo pueden transmitir al comienzo del slot
- Se reduce a la mitad la ventana de colisión.
- Mejoran las prestaciones.



$$\lambda = \lambda_t e^{-T_p \lambda_t}$$

$$S = G e^{-G}$$

# CSMA

- ▶ CSMA/CD = Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.

- Los usuarios comprueban el canal antes de transmitir.
- Modalidades:
  - Nonpersistent CSMA.
  - P-Persistent CSMA.

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}$$

$$a = \frac{\tau_d}{T_p}$$

