



# REDES

*Grados Ing. Informática / Ing. de Computadores / Ing. del Software / Doble Grado  
Universidad Complutense de Madrid*

---

## TEMA 3. La capa de enlace de datos

### **PROFESORES:**

Rafael Moreno Vozmediano  
Rubén Santiago Montero  
Juan Carlos Fabero Jiménez

# Introducción

---

- **¿Para qué sirve la capa de enlace?**
  - Proporcionar los servicios y mecanismos necesarios para convertir el medio físico de transmisión, propenso a posibles errores de transmisión, en un enlace de datos lógico libre de errores.
- **Funciones de la capa de enlace**
  - Ofrecer servicios a la capa superior
    - Servicios orientados a conexión
    - Servicios sin conexión
  - Entramado
    - Construir tramas de datos según el formato específico del protocolo
    - Delimitar el inicio y el fin de cada trama para que el receptor pueda reconocer y procesar cada trama de forma individual
  - Control de errores
    - Incorporar los mecanismos necesarios para detectar los errores de transmisión
    - Utilizar los mecanismos necesarios para retransmitir toda trama perdida o errónea
  - Control de flujo
    - Incorporar los mecanismos necesarios para controlar el flujo de transmisión y evitar que el emisor pueda saturar a un receptor más lento

# Servicios de la capa de enlace

- **Servicios orientados a conexión**
  - Garantizan la entrega fiable de tramas
    - Se detectan los errores de la transmisión y se descartan las tramas erróneas
    - Todas las tramas perdidas o erróneas se retransmiten
    - Se detectan y descartan todas las tramas duplicadas
    - Las tramas se entregan a la capa superior ordenadas y libres de errores
    - Se realiza el control de flujo entre el emisor y el receptor
  - Para llevar a cabo el control de errores, se utilizan
    - Técnicas de detección de errores
    - Numeración de tramas
    - Confirmación de todas las tramas recibidas correctamente
    - Retransmisión de tramas no confirmadas
  - Los protocolos de enlace orientados a conexión incluyen tres fases
    - Establecimiento de la conexión de enlace
    - Transmisión de datos
    - Finalización de la conexión de enlace
  - Uso
    - Redes con tasas de errores alta (hoy en día casi no se usan)
    - Ejemplo: protocolo HDLC (High-level Data Link Control)

# Servicios de la capa de enlace

- **Servicios sin conexión**

- No garantizan la entrega fiable de tramas
  - Se detectan los errores de la transmisión y se descartan las tramas erróneas
  - Las tramas perdidas o erróneas no se retransmiten
  - Las tramas correctas no se confirman
  - No se detectan ni descartan posibles tramas duplicadas
  - Las tramas se entregan a la capa superior en el orden en que llegan
  - No se realiza el control de flujo entre el emisor y el receptor
- No hay fases de establecimiento o fin de conexión
  - Cada trama se considera independiente del resto
- Uso
  - Redes con tasas de errores baja (hoy en día son los más comunes)
  - Ejemplos
    - Protocolo LLC (Logic Link Control)
    - Protocolo PPP (Point-to-Point Protocol)

# Entramado

---

- **Función de entramado**

- Construir las tramas según el formato especificado por el protocolo, incluyendo

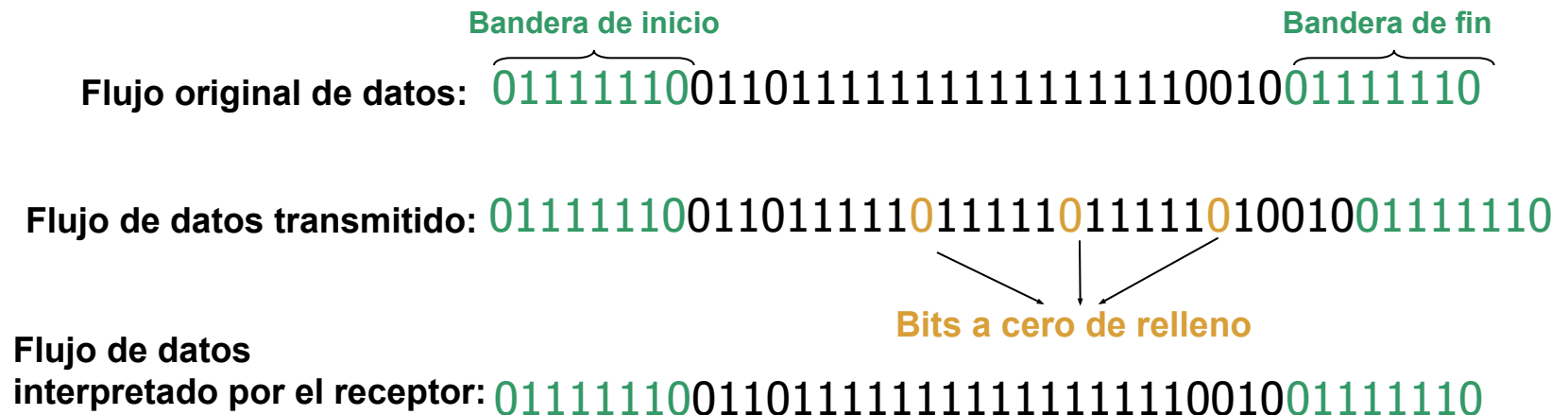
- La cabecera del protocolo de enlace
- Los datos procedentes de la capa superior
- Códigos de detección de errores

(Se estudiarán ejemplos de protocolos de enlace y formatos de trama al final del tema)

- Delimitar el inicio y fin de cada trama. Existen distintas técnicas:
  - Cuentas de caracteres
  - Inserción de caracteres de inicio y fin
  - Inserción de patrones de inicio y fin
  - etc.

# Entramado

- **Técnica de inserción de patrones de inicio y fin**
  - Es una de las técnicas más comunes para delimitar el inicio y fin de las tramas
  - Funcionamiento:
    - Todas las tramas comienza con un patrón conocido de bits
      - Ejemplo de patrón de inicio y fin: **01111110**
    - Para evitar que este patrón aparezca en medio de los datos y la trama se interprete incorrectamente, se usa la siguiente técnica:
      - Cada vez que la capa de enlace de datos del transmisor encuentra una cadena de cinco bits 1 consecutivos en los datos, automáticamente inserta un bit 0 al final de la cadena de unos
      - Cuando el receptor recibe cinco bits 1 consecutivos seguidos de un bit 0, automáticamente borra el bit 0 de relleno



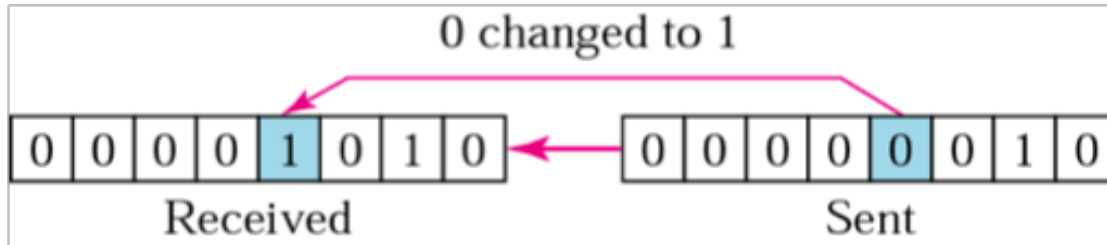
# Técnicas de detección de errores

- **Necesidad de técnicas de detección de errores**
  - Los medios físicos de transmisión son propensos a errores, debido a los distintos tipos de perturbación existentes (atenuación, distorsión, ruido, etc.)
    - Las técnicas de detección de errores son necesarias para determinar si un bloque de datos transmitido a través de un medio físico ha sufrido algún error durante la transmisión
  - Las técnicas de detección de errores se aplican a nivel de la capa de enlace, tanto en servicios orientados a conexión como en servicios sin conexión
    - En servicios orientados a conexión
      - Se detectan los errores de la transmisión
      - Se descartan las tramas erróneas
      - Se establecen mecanismos para retransmitir las tramas erróneas
    - En servicios no orientados a conexión
      - Se detectan los errores de la transmisión
      - Se descartan las tramas erróneas
      - No se retransmiten las tramas erróneas

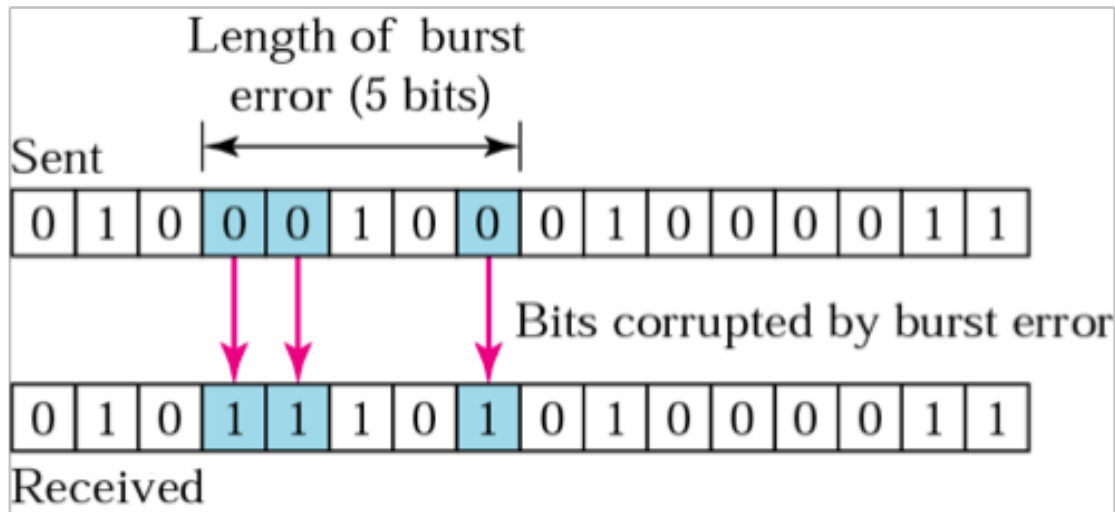
# Técnicas de detección de errores

- **Tipos de errores**

- Errores de bits individuales (single-bit errors)



- Errores de ráfaga (burst errors)





# Técnicas de detección de errores

- **Bits de paridad**

- Es una de las técnicas de detección de errores más simple
  - Se utiliza cuando la probabilidad de error es pequeña, para detectar errores de bits individuales en pequeños bloques de datos (p. ej. en caracteres)
- ¿Qué es la paridad?
  - La paridad de un carácter o un bloque de bits se refiere al número de 1's que contiene dicho bloque
  - La paridad puede ser par o impar:
    - **Bit de paridad par**
      - Vale 0 si el número de unos que contiene el bloque es par (o cero).
      - Vale 1 si el número de unos que contiene el bloque es impar.
    - **Bit de paridad impar**
      - Vale 1 si el número de unos que contiene el bloque es par (o cero).
      - Vale 0 si el número de unos que contiene el bloque es impar.

- Ejemplos:

<b>Carácter (7 bits)</b>	<b>Paridad par</b>	<b>Paridad impar</b>
0000000	0	1
1011010	0	1
0110100	1	0
1100111	1	0

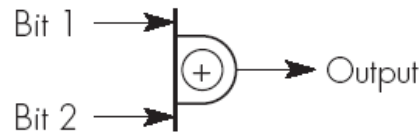
# Técnicas de detección de errores

- **Bits de paridad (cont.)**

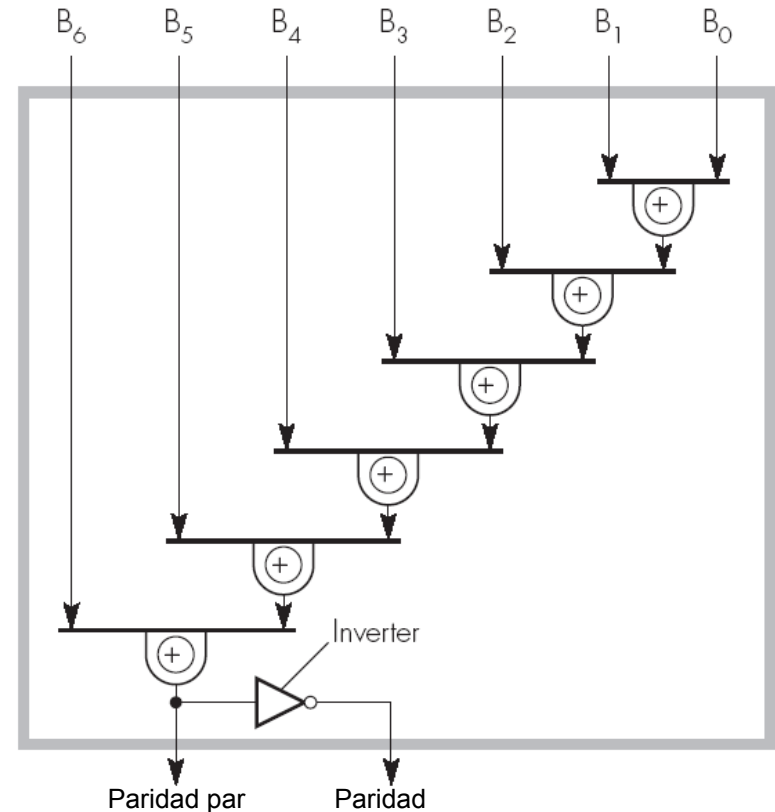
- ¿Cómo se calcula la paridad?

- La paridad equivale a la función lógica XOR

Bit 1	Bit 2	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



- Para calcular la paridad de un carácter se puede realizar una XOR de todos los bits del carácter



# Técnicas de detección de errores

- **Bits de paridad (cont.)**

- Limitaciones de la paridad

- Los bits de paridad sólo son capaces de detectar los "errores impares"
  - Es decir, aquellos errores que sólo afectan a un número impar de bits.
  - Si el error afecta a un número par de bits, entonces no podrá ser detectado
- Ejemplo (paridad par)

Carácter enviado: 

0	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Carácter recibido: 

0	1	1	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Paridad  
calculada = 0

Error detectado

Carácter enviado: 

0	1	0	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Carácter recibido: 

0	1	1	1	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Paridad  
calculada = 1

Error no detectado

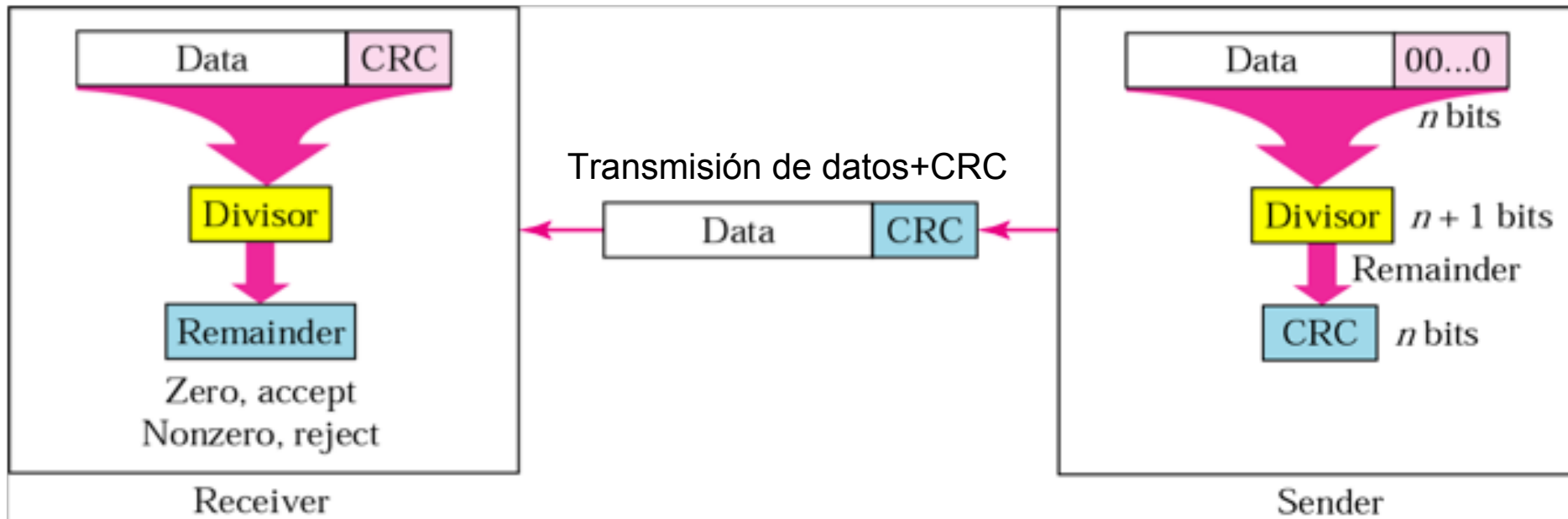
# Técnicas de detección de errores

- **Comprobación de redundancia cíclica**

- Cuando se producen errores de tipo ráfaga es necesario utilizar técnicas basadas en **códigos polinomiales**
  - Estas técnicas se denominan **comprobación de redundancia cíclica** (CRC, *Cyclic Redundance Check*)
  - También se conocen con el nombre de **secuencia de comprobación de trama** (FCS, *Frame Check Sequence*)
- Funcionamiento

Receptor: comprobación del CRC

Emisor: generación del CRC



# Técnicas de detección de errores

- **Comprobación de redundancia cíclica (cont.)**

- **Funcionamiento (cont.)**

- **Terminología**

- $M(x)$ : Trama a transmitir ( $k$  bits)
- $G(x)$ : Divisor o generador polinomial ( $n + 1$  bits)
- $R(x)$ : Resto de la división o CRC ( $n$  bits)

- **Generación del CRC en el emisor**

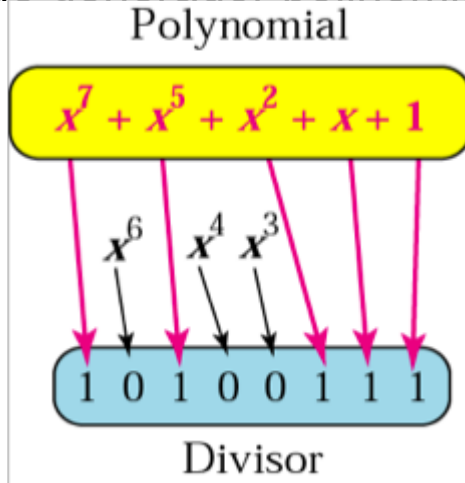
- A la trama a transmitir,  $M(x)$ , se concatenan  $n$  ceros a la derecha
  - Esto es equivalente a multiplicar  $M(x) * 2^n$
- A continuación,  $M(x) * 2^n$  se divide por el generador polinomial (divisor)  $G(x)$ 
  - La división se realiza en aritmética módulo 2 (las sumas o restas parciales se sustituyen por operaciones XOR)
- Esta división da lugar a un cociente  $Q(x)$  y a un resto  $R(x)$ 
  - El resto  $R(x)$  representa el código de redundancia cíclica (CRC)
- El emisor envía la trama concatenada con el CRC o resto, es decir:
  - Trama enviada:  $T(x) = M(x) * 2^n + R(x)$

- **Comprobación del CRC en el receptor**

- El receptor toma la trama recibida,  $T(x) = M(x) * 2^n + R(x)$ , y la divide por el mismo generador polinomial  $G(x)$
- El resto de esta división debe ser cero
  - En caso contrario significa que se ha producido un error en la transmisión

# Técnicas de detección de errores

- Comprobación de redundancia cíclica (cont.)
  - Ejemplo de generador polinomial (8 bits)



- Algunos generadores polinomiales estándar

Name	Polynomial	Application
<b>CRC-8</b>	$x^8 + x^2 + x + 1$	ATM header
<b>CRC-10</b>	$x^{10} + x^9 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$	ATM AAL
<b>ITU-16</b>	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$	HDLC
<b>ITU-32</b>	$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$	LANs

# Mecanismos de control de errores

- **Aplicación de los mecanismos de control de errores**
  - Son necesarios para garantizar la entrega fiable en servicios de enlace orientados a conexión
  - Estos mecanismos se utilizan para
    - Retransmitir todas las tramas perdidas o erróneas
    - Descartar tramas duplicadas
    - Entregar tramas ordenadas a la capa superior
- **Clasificación de los mecanismos de control de errores**
  - Mecanismo de solicitud de repetición simple (*idle repeat request* o RQ simple)
    - También denominado mecanismo de parada y espera (Stop-and-Wait)
  - Mecanismos de ventana deslizante
    - También denominados mecanismos de solicitud de repetición continua (*continuous repeat request* o RQ continuo)
      - RQ continuo con Retroceso-N
      - RQ continuo Repetición selectiva

# Mecanismos de control de errores

- **RQ simple o mecanismo de parada y espera**

- Por cada trama enviada, el receptor debe devolver una confirmación de la misma
- Hasta que no se recibe confirmación de la última trama enviada el emisor no puede enviar la siguiente trama
- En caso de error en la transmisión, si no llega la confirmación de una trama, cuando transcurre un tiempo determinado, dicha trama se retransmite

- **RQ continuo con repetición selectiva**

- Por cada trama enviada, el receptor debe devolver una confirmación de la misma
- El emisor puede enviar hasta  $K$  tramas consecutivas ( $K$ =tamaño de ventana), sin tener que esperar una confirmación
- En caso de error en la transmisión, si no llega la confirmación de una trama, se retransmiten todas las tramas a partir de la trama pendiente de confirmar

- **RQ continuo con repetición selectiva**

- Por cada trama enviada, el receptor debe devolver una confirmación de la misma
- El emisor puede enviar hasta  $K$  tramas consecutivas ( $K$ =tamaño de ventana), sin tener que esperar una confirmación
- En caso de error en la transmisión, si no llega la confirmación de una trama, se retransmite únicamente la trama pendiente de confirmar



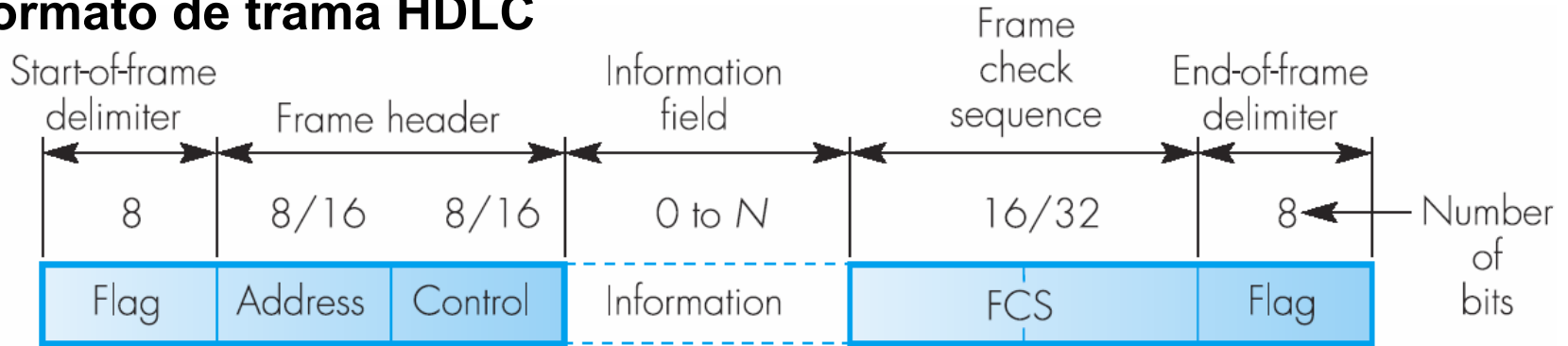
# El protocolo HDLC

---

- **Características generales de HDLC**
  - HDLC = Control de enlace de datos de alto nivel (High-level Data Link Control)
    - Protocolo de enlace que ofrece servicios orientados a conexión
  - Modos de funcionamiento
    - NRM: modo normal de respuesta (*Normal Response Mode*)
      - Modelo de comunicación half-duplex maestro-esclavo
      - Las estaciones esclavas sólo pueden transmitir cuando la estación maestra lo ordena específicamente
    - ABM: Modo equilibrado asíncrono (*Asynchronous Balanced Mode*)
      - Modelo de comunicación full-duplex computador-computador
      - Todas las estaciones tienen la misma categoría
      - Cualquier estación puede transmitir en cualquier momento a través del enlace

# El protocolo HDLC

## • Formato de trama HDLC



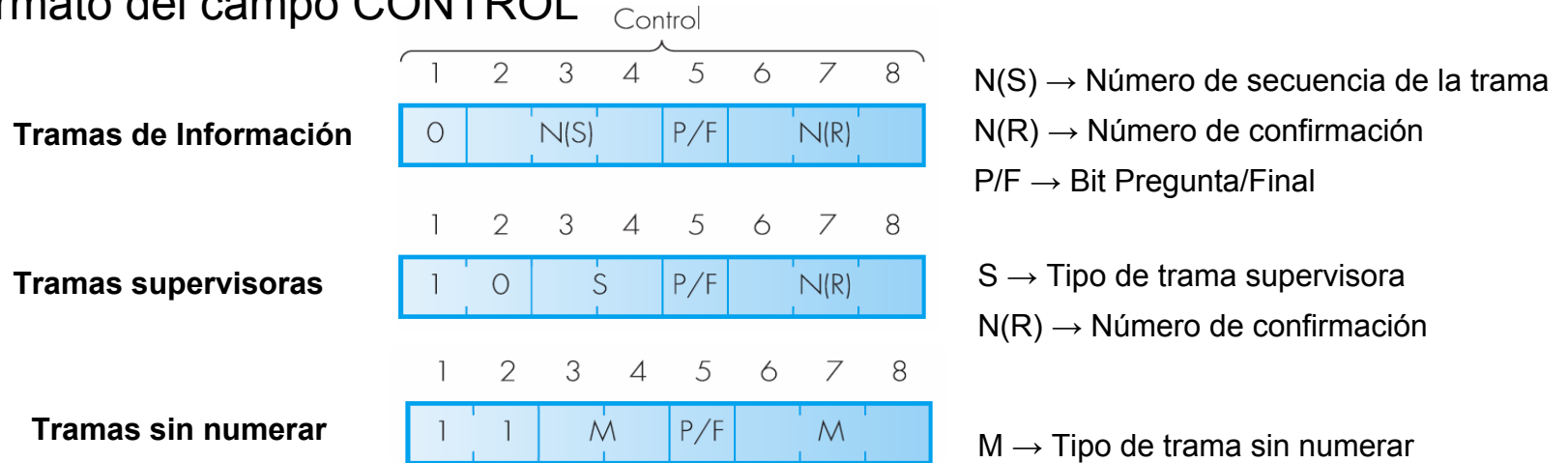
## ○ Campos

- Banderas de inicio y fin (*flags*)
  - Patrón de bits = 01111110
  - Utiliza inserción y eliminación de bits cero para garantizar que el patrón no aparece dentro de la secuencia de bits
- Campo FCS: secuencia de comprobación de trama
  - CRC de 16 bits que se calcula usando el generador polinómico:  $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
- Campo dirección (Address)
  - En modo NRM: especifica la dirección del esclavo
  - En modo ABM: en conexiones ABM punto a punto, el campo dirección se pone a valor 11111111 (dirección de difusión)
- Campo Control
  - Especifica el tipo de trama e información adicional (número de secuencia, número de confirmación, bit P/F, etc.)
  - Se detalla a continuación

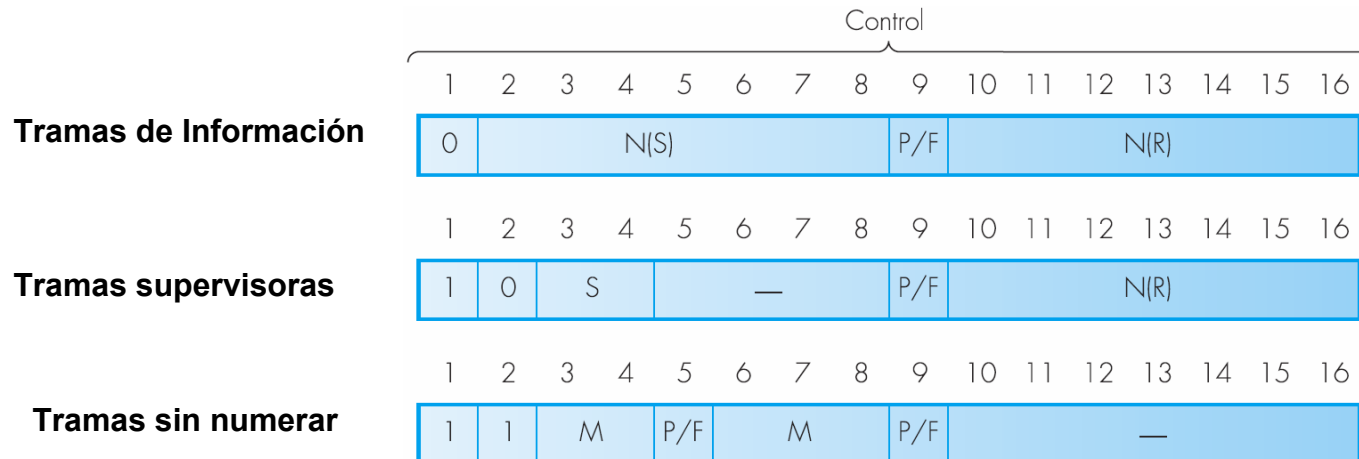
# El protocolo HDLC

- **Tipos de tramas HDLC**

- Formato del campo CONTROL



- Formato del campo CONTROL en tramas extendidas



# El protocolo HDLC

- **Tramas de información (tramas de tipo I)**
  - Tramas que transportan datos de la capa superior
  - Números de secuencia, N(S)
    - Se utiliza para control de errores y flujo
    - Pueden ser de 3 bits (conexión normal) o de 7 bits (conexión extendida)
      - N° secuencia de 3 bits → 8 identificadores distintos (valores 0 a 7)
      - N° secuencia de 7 bits → 128 identificadores distintos (valores 0 a 127)
  - Números de confirmación, N(R)
    - Se utiliza para enviar confirmaciones superpuestas (técnica de *piggy-backing*)
      - Puesto que la conexión es de tipo full-duplex, se puede adjuntar la confirmación a los datos que viajan en sentido contrario
      - En caso de no existir tráfico en sentido contrario, las confirmaciones deben enviarse en tramas de confirmación explícitas
    - El número de confirmación contiene el identificador de la siguiente trama que se espera recibir
  - Bit P/F (Pregunta/Final)
    - Se utiliza sobre todo en modo NRM: el maestro pone el bit P/F a 1 para indicar al esclavo que debe confirmar la trama
    - También se usa cuando no se recibe la confirmación de una trama y expira el temporizador

# El protocolo HDLC

- **Tramas supervisoras**
  - **Tramas de tipo RR** (*Receptor Ready*, receptor preparado)
    - Es una trama de confirmación
    - Se utiliza para confirmar tramas de datos, en caso de no existir tráfico en sentido contrario
    - El número de confirmación,  $N(R)$ , contiene el identificador de la siguiente trama que se espera recibir
  - **Tramas de tipo REJ** (*Reject*, rechazo)
    - Es una trama de confirmación negativa, para implementar el mecanismo RQ continuo con retroceso-N
    - Cuando el receptor recibe una trama errónea, devuelve una trama REJ, indicando en el  $n^{\circ}$  de confirmación,  $N(R)$ , el identificador de la siguiente trama que espera recibir.
    - El receptor descartará todas las tramas recibidas a continuación, hasta recibir la trama indicada en el campo  $N(R)$
    - El emisor debe retransmitir todas las tramas, a partir la trama indicada en el campo  $N(R)$

# El protocolo HDLC

- **Tramas supervisoras (cont)**
  - **Tramas de tipo SREJ** (*Selective Reject*, rechazo selectivo)
    - Es una trama de confirmación negativa para implementar el mecanismo RQ continuo con repetición selectiva
    - Cuando el receptor recibe una trama de información errónea, devuelve una trama SREJ, indicando en el nº de confirmación, N(R), el identificador de la trama que debe retransmitir el emisor
    - El emisor retransmite únicamente la trama especificada en el campo N(R)
  - **Tramas de tipo RNR** (*Receptor Not Ready*, receptor no preparado)
    - Se utiliza para controlar el flujo: permite al receptor indicar al emisor que suspenda temporalmente el envío de tramas
    - Esta trama confirma todas las tramas de información anteriores a la trama indicada en el número de confirmación, N(R), pero sin incluir ésta
    - Al recibir una trama RNR, el emisor debe detener inmediatamente el envío de nuevas tramas de información
    - Cuando el receptor está en condiciones de recibir nuevas tramas de información, debe enviar una trama supervisora de tipo RR.

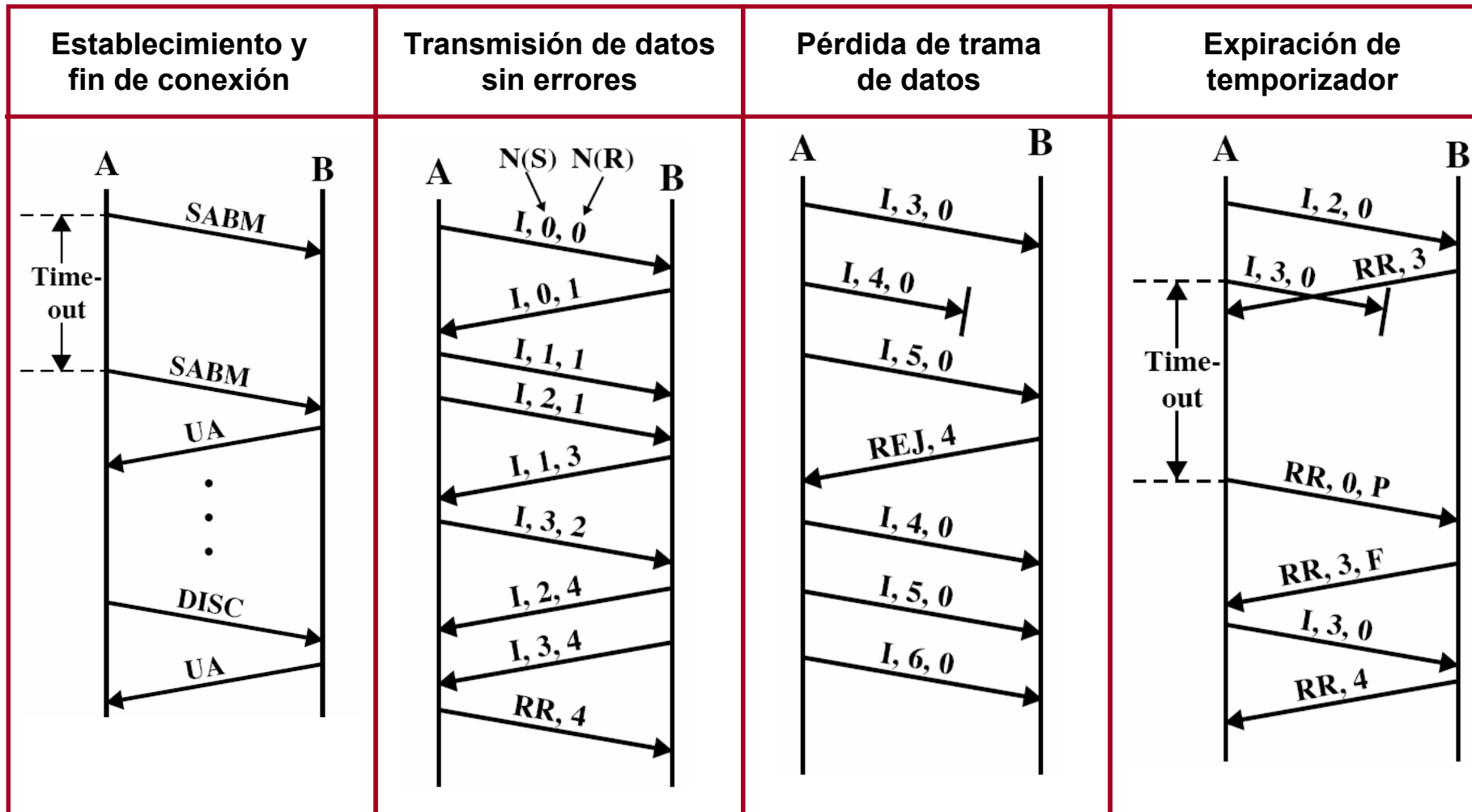
# El protocolo HDLC

- Tramas sin numerar

Nombre	Significado	Descripción
SNRM	Set NRM	Establecimiento de conexión de enlace en modo NRM (números de secuencia de 3 bits)
SABM	Set ABM	Establecimiento de conexión de enlace en modo ABM (números de secuencia de 3 bits)
SNRME	Set NRM Extended	Establecimiento de conexión de enlace en modo NRM extendido (números de secuencia de 7 bits)
SABME	Set ABM Extended	Establecimiento de conexión de enlace en modo ABM extendido (números de secuencia de 7 bits)
DISC	Disconnect	Solicitud de desconexión
UA	Unnumbered ACK	Confirmación de tramas sin numerar
UI	Unnumbered Information	Información sin numerar
FRMR	Frame Reject	Rechazo de trama por tener un formato inaceptable
RSET	Reset	Reiniciar conexión (reinicia los números de secuencia y confirmación)

# El protocolo HDLC

- Ejemplos de funcionamiento de HDLC





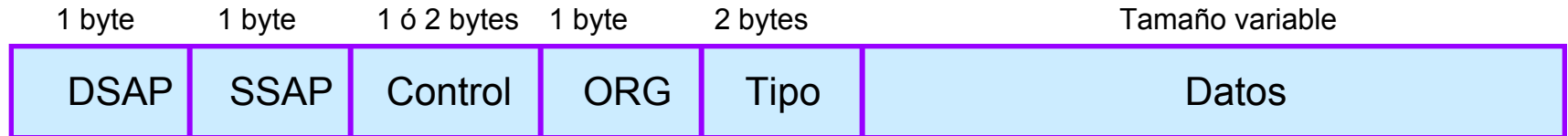
# El protocolo LLC

---

- **Características generales de LLC**
  - LLC = control del enlace lógico (*Logic Link Control*)
    - Es el protocolo de enlace de las redes de área local
    - Descrito en el estándar IEEE 802.2
  - LLC está basado en HDLC
    - Formato de trama similar
      - Incluye algunos campos adicionales
    - Mismos tipos de tramas
      - Información (I)
      - Supervisoras (RR, REJ, RNR)
      - Sin numerar (SABM, SABME, DISC, UA, UI, ...)
    - Ofrece dos tipos de servicios
      - Orientados a conexión
      - Sin conexión

# El protocolo LLC

- **Formato de la trama LLC**



- DSAP y SSAP
  - Puntos de acceso al servicio (SAP = Service Access Point) destino y fuente
  - En el caso de aplicaciones TCP/IP → DSAP = AA (hex); SSAP = AA (hex);
- ORG
  - Código de organización
  - En el caso de aplicaciones TCP/IP → ORG = 00
- Tipo
  - Identifica al protocolo de la capa superior al que pertenecen los datos
  - Ejemplos:
    - IP → Tipo = 2048 (0800 HEX)
    - ARP → Tipo = 2054 (0806 HEX)
  - Control
    - Tiene el mismo significado que en HDLC
    - Especifica el tipo de trama e información adicional (número de secuencia, número de confirmación, bit P/F, etc.)

# El protocolo LLC

---

- **Servicios ofrecidos por LLC**

- Servicios orientados a conexión

- Establecimiento de conexión

- Tramas sin numerar: tipo SABM/SABME, UA

- Transmisión de datos

- Tramas de datos: tipo I
- Tramas supervisoras: tipo RR, REJ, RNR (no se usan tramas SREJ)

- Desconexión

- Tramas sin numerar: tipo DISC, UA

- Servicios sin conexión

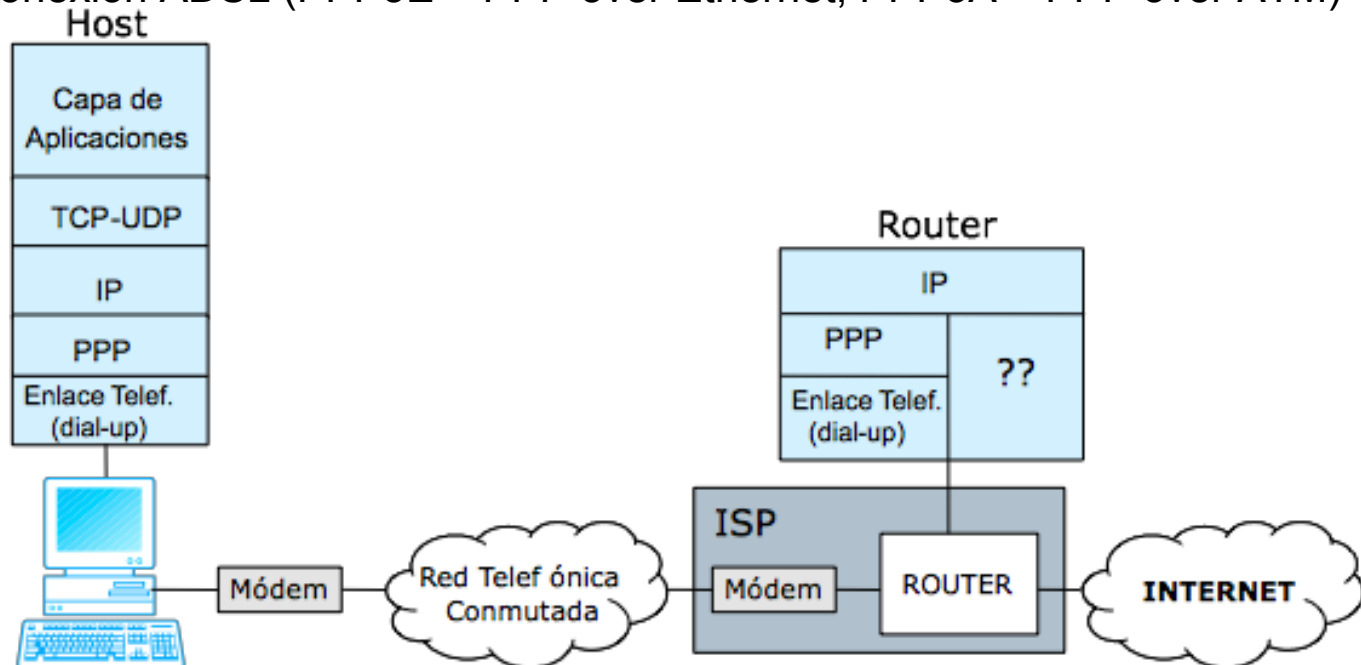
- Sólo transmisión de datos

- Tramas sin numerar: UI

# El protocolo PPP

- **PPP=Point-to-Point Protocol**

- Protocolo de enlace sin conexión basado en HDLC
  - Formato de trama similar a HDLC
  - PPP sólo ofrece servicios de enlace sin conexión
- Se utiliza para encapsular tráfico IP (u otros protocolos de red) sobre enlaces punto a punto, por ejemplo:
  - Conexión telefónica mediante módem convencional entre el usuario y su proveedor de acceso a Internet (ISP)
  - Conexión ADSL (PPPoE = PPP over Ethernet, PPPoA = PPP over ATM)



# El protocolo PPP

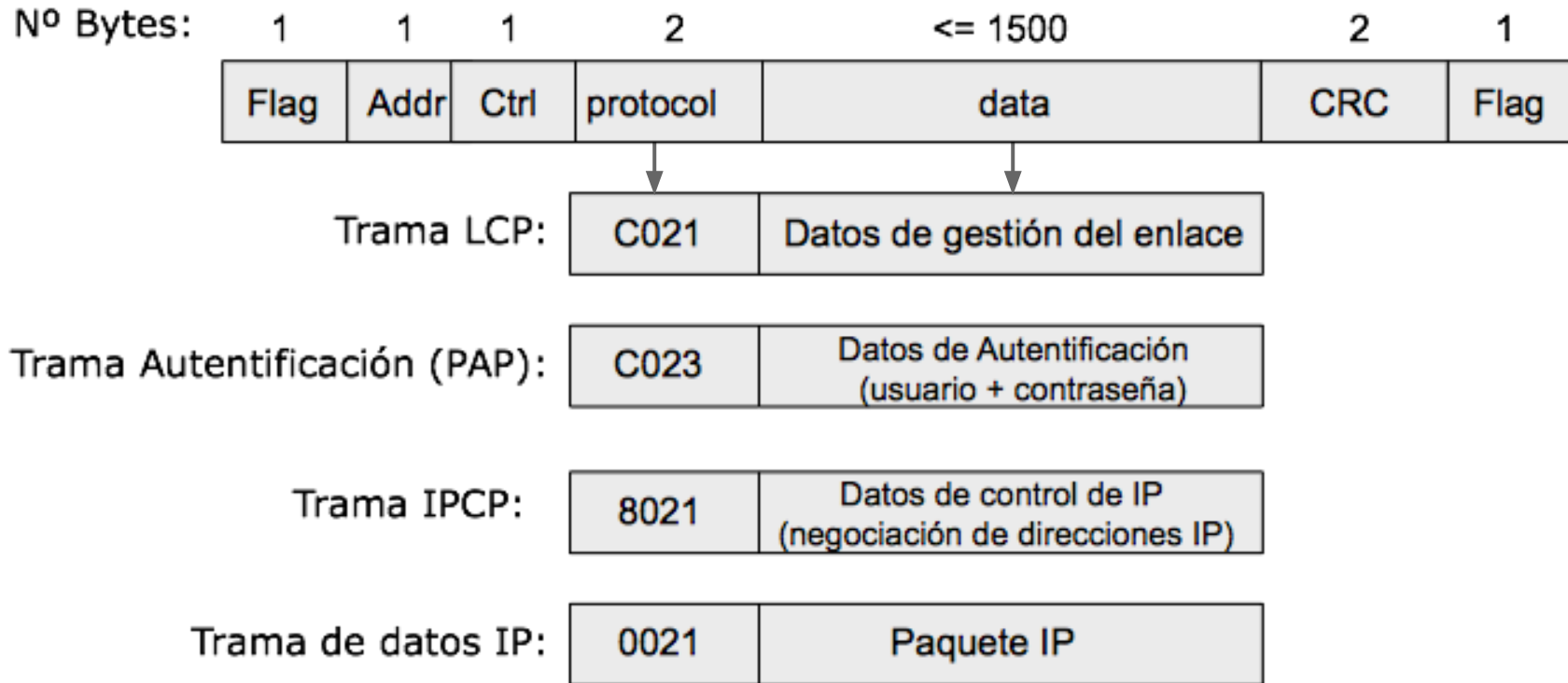
---

- **Funciones de PPP**

- Control del enlace
  - Permite realizar el establecimiento y configuración de la conexión de enlace
  - Permite negociar algunas opciones la conexión: tamaño máximo de trama, protocolo de autenticación utilizado, etc.
  - Se realiza mediante el protocolo LCP (Link Control Protocol)
- Autenticación del usuario
  - Permite al usuario autenticarse en el proveedor de acceso a Internet (ISP) mediante un nombre de usuario y una contraseña
  - Existen dos protocolos de autenticación
    - PAP (Password Authentication Protocol)
    - CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol)
- Gestión del protocolo de red
  - Permite negociar la dirección IP del cliente
  - Se realiza mediante el protocolo IPCP (IP Control Protocol)

# El protocolo PPP

- **Formato de la trama PPP**



- **Campos de la trama**

- **Flags de inicio y fin:** similar a HDLC (valor 01111110)
- **Campo dirección (Addr):** Utiliza dirección HDLC de difusión (valor 1111111)
- **Campo Control (Ctrl):** Tramas sin numerar de tipo UI (valor 11000000)
- **Campo protocolo:** código del protocolo que se encapsula en el campo datos
- **Campo CRC:** código de detección de errores