



**Politecnico
di Milano**

**Dipartimento di
Elettronica e
Informazione**

Reti di Telecomunicazione

Reti a pacchetto in area geografica – WAN
Strato di collegamento dati



Sommario

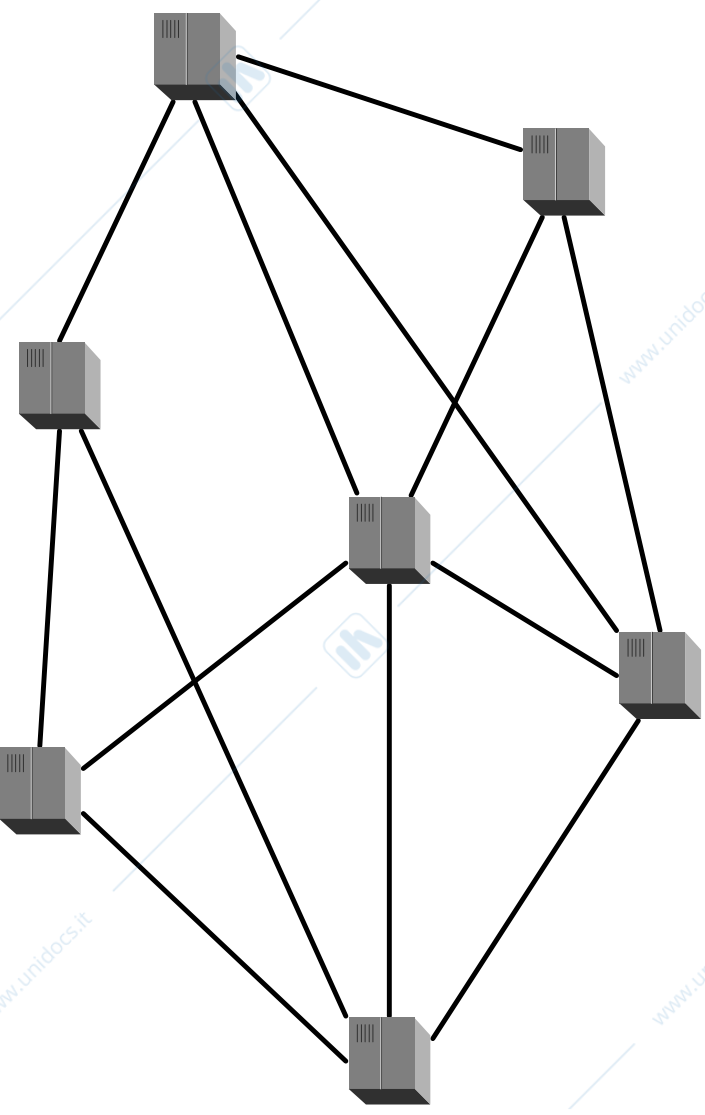
- **Generalità**
- **Protocollo Stop and wait**
- **Protocolli Continuous ARQ**
- **Protocollo HDLC**



Reti in area geografica

Generalità

- **Topologia costituita da**
 - ◆ Rete di trasporto a lunga distanza
 - ◆ Nodi della rete di accesso
 - ◆ Rami tra le due reti
- **Caratteristiche**
 - ◆ Rete a maglia
 - ◆ Senza o con gerarchia
- **Aspetti fondamentali**
 - ◆ Rami
 - Capacità trasmissiva
 - Lunghezza
 - ◆ Nodi
 - Velocità di elaborazione
 - Capacità di memoria
- **Parametri di prestazione**
 - ◆ Throughput
 - ◆ Ritardo
 - ◆ Probabilità di perdita





Reti in area geografica

Strato di collegamento dati



- **Compito fondamentale**
 - ◆ Elevare le prestazioni di una linea fisica con dato tasso di errore offrendo al livello di rete un servizio di collegamento privo di errori
- **Informazione strutturata in trame**
- **Funzioni fondamentali**
 - ◆ Gestione del collegamento dati
 - ◆ Delimitazione delle trame
 - ◆ Indirizzamento
 - ◆ Controllo degli errori e delle eventuali ritrasmissioni
 - ◆ Controllo di flusso



Strato di collegamento dati

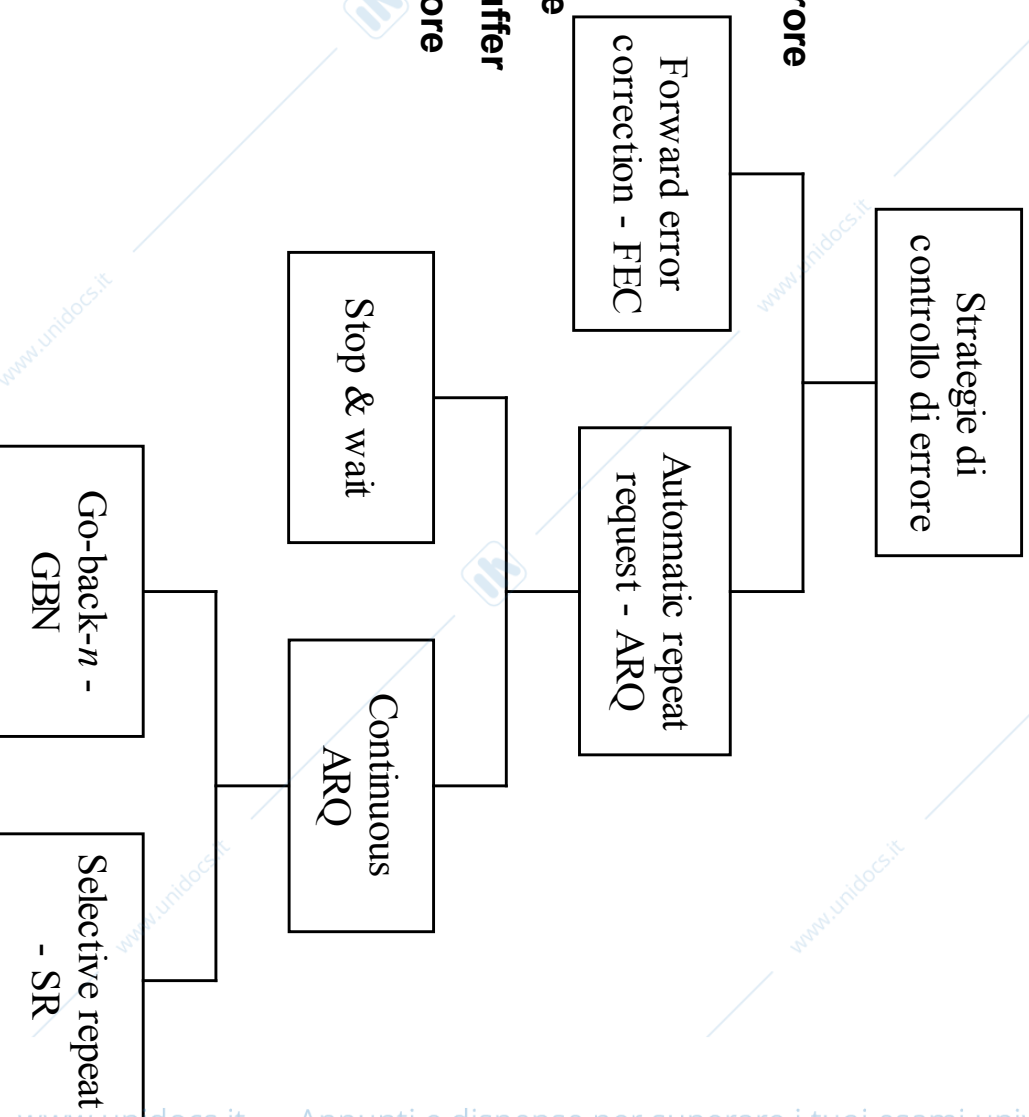
Controllo degli errori e delle eventuali ritrasmissioni

Strategie

- ◆ Forward Error Correction - FEC
 - Codici a blocchi
 - Codici convoluzionali
 - Traffico indipendente dal tasso di errore
 - Processing sempre più spinto per codici più complessi
- ◆ Automatic Repeat request
 - Usa un codice di rivelazione di errore
 - Richiede un canale di ritorno e un buffer
 - Il traffico aumenta con il tasso di errore

Protocolli ARQ

- ◆ Stop and wait
- ◆ Continuous ARQ: trame numerate





Sommario

- **Generalità**
- **Protocollo Stop and wait**
- **Protocolli Continuous ARQ**
- **Protocollo HDLC**



Protocolli ARQ

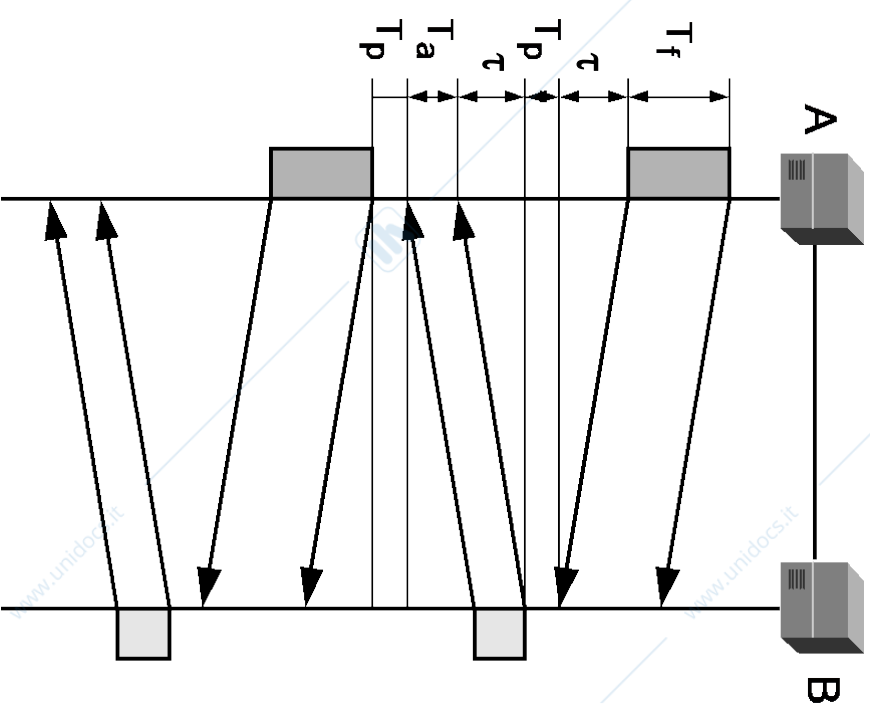
Stop and wait - Assenza di errori

■ Parametri

- ◆ T_f : tempo di trasmissione di una trama (s)
- ◆ T_a : tempo di trasmissione di un riscontro (s)
- ◆ T_p : tempo di elaborazione (s)
- ◆ τ : tempo di propagazione (s)
- ◆ C : frequenza di cifra (*capacità*) del canale (bit/s)
- ◆ L_f : lunghezza della trama (bit)
- ◆ L_a : lunghezza del riscontro (bit)
- ◆ d : distanza tra trasmettitore e ricevitore (m)
- ◆ v : velocità di propagazione (m/s)

■ Tempo di trasferimento di N_f trame

$$\begin{aligned} T_{tot} &= N_f (T_f + T_a + 2T_p + 2\tau) = \\ &= N_f \left(\frac{L_f}{C} + \frac{L_a}{C} + 2T_p + 2\tau \right) \end{aligned}$$





Protocolli ARQ

Stop and wait - Assenza di errori

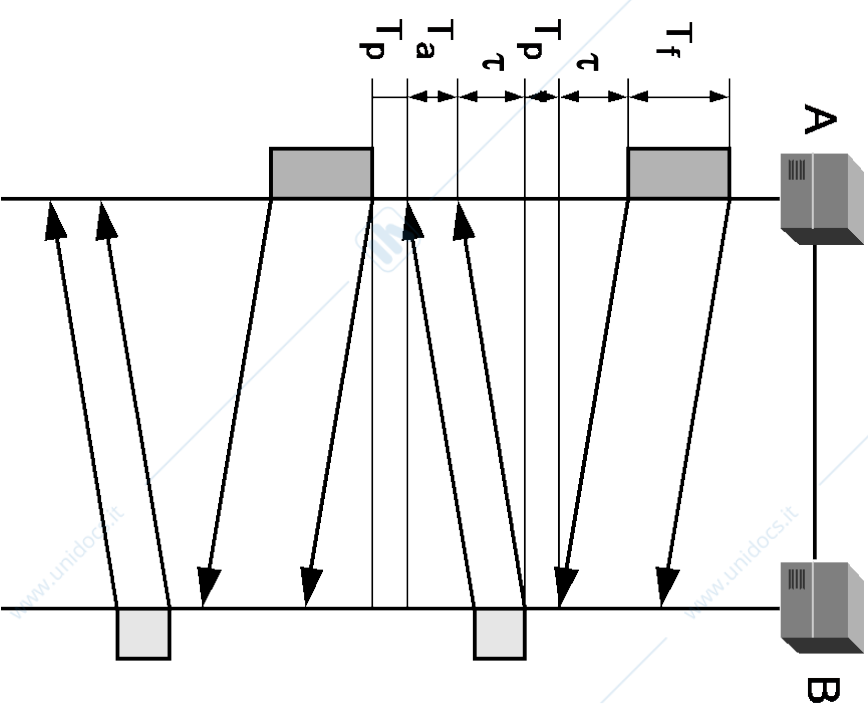
- Efficienza η del protocollo in assenza di errori

$$\frac{d}{a} = \frac{\tau}{T_f} = \frac{V}{L_f} = \frac{dC}{L_f V}$$

$$\eta = \frac{T_f}{T_f + T_a + 2T_p + 2\tau} \approx \frac{T_f}{T_f + 2\tau} = \frac{1}{1 + 2a}$$

- Efficienza di utilizzazione del collegamento

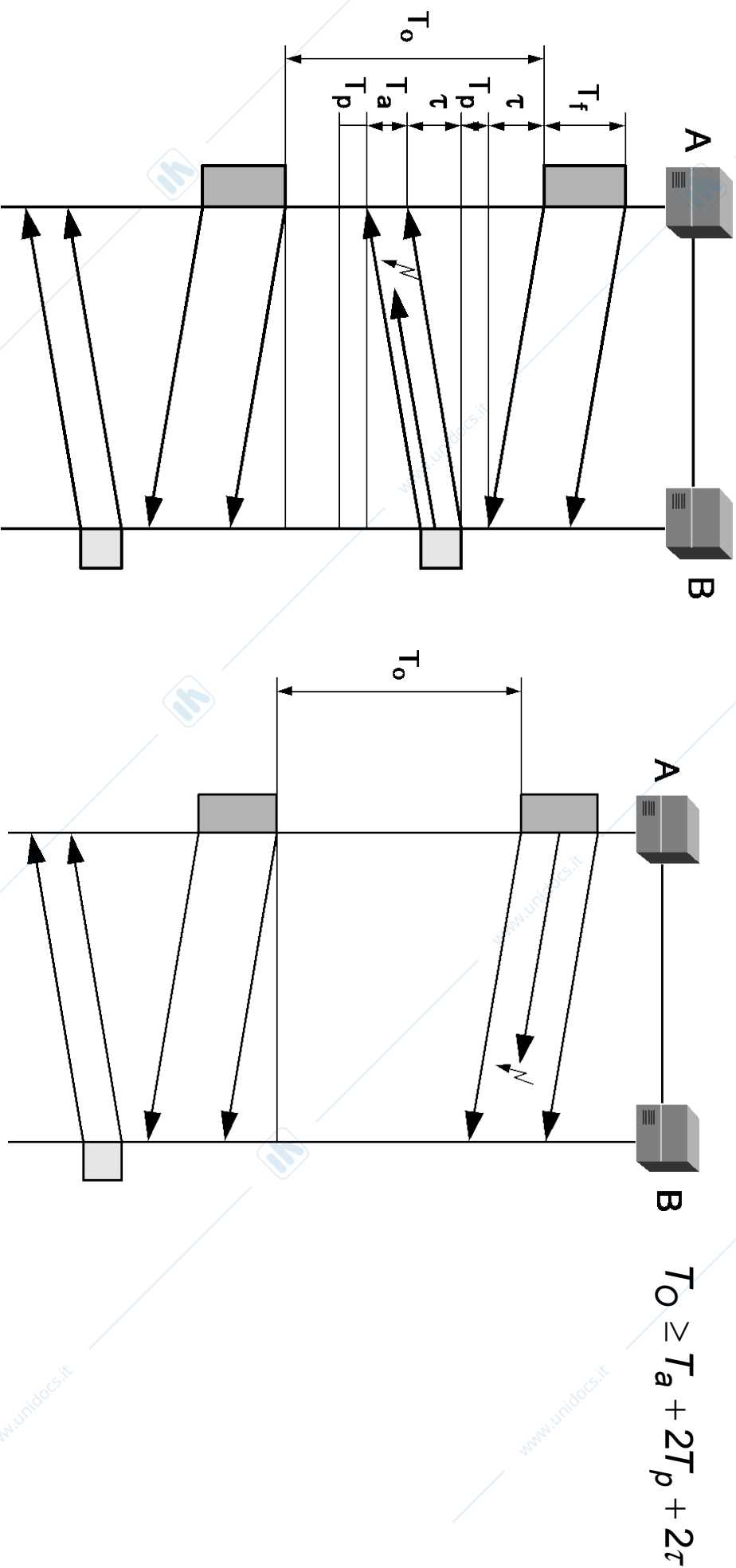
$$THR = \eta \cdot C \quad (\text{bit/s})$$



Protocolli ARQ

Stop and wait - Presenza di errori

- Presenza di errori su trame o riscontri richiede la ritrasmissione con time-out T



- Necessità di numerazione di trame

- ◆ Tx trasmette una trama due volte per scadenza del time-out e riceve un riscontro
- ◆ Rx crede di aver ricevuto due trame diverse!



Stop and wait

Calcolo dell'efficienza in presenza di errori

■ Assunzioni

- ◆ Errori sui bit e sulle trame mutuamente indipendenti
- ◆ p : probabilità di un bit errato
- ◆ P : probabilità di una trama errata
- ◆ a_i : probabilità di successo alla trasmissione i -esima
- ◆ N_s : numero medio di trame trasmesse per trama ricevuta con successo

■ Calcolo efficienza (coeff. utilizzazione link)

$$P = 1 - (1 - p)^{L_f + L_a}$$

$$N_s = \sum_{i=1}^{\infty} i a_i = \sum_{i=1}^{\infty} i P^{i-1} (1 - P) = (1 - P) \sum_{i=1}^{\infty} i P^{i-1} = \frac{1}{1 - P}$$

$$\eta = \frac{T_f}{(N_s - 1)(T_f + T_O) + T_f + T_a + 2T_p + 2\tau} = \frac{T_f}{T_f + T_O P + (T_a + 2T_p + 2\tau)(1 - P)}$$

$$T_O = T_a + 2T_p + 2\tau \rightarrow \eta = \eta_{\max} = \frac{T_f(1 - P)}{T_f + T_a + 2T_p + 2\tau}$$

$$T_a = T_p \cong 0 \rightarrow \eta_{\max} = \frac{1 - P}{1 + 2a}$$



Sommario

- **Generalità**
- **Protocollo Stop and wait**
- **Protocolli Continuous ARQ**
 - ◆ Go-back- n
 - ◆ Selective repeat
- **Protocollo HDLC**



Protocolli ARQ

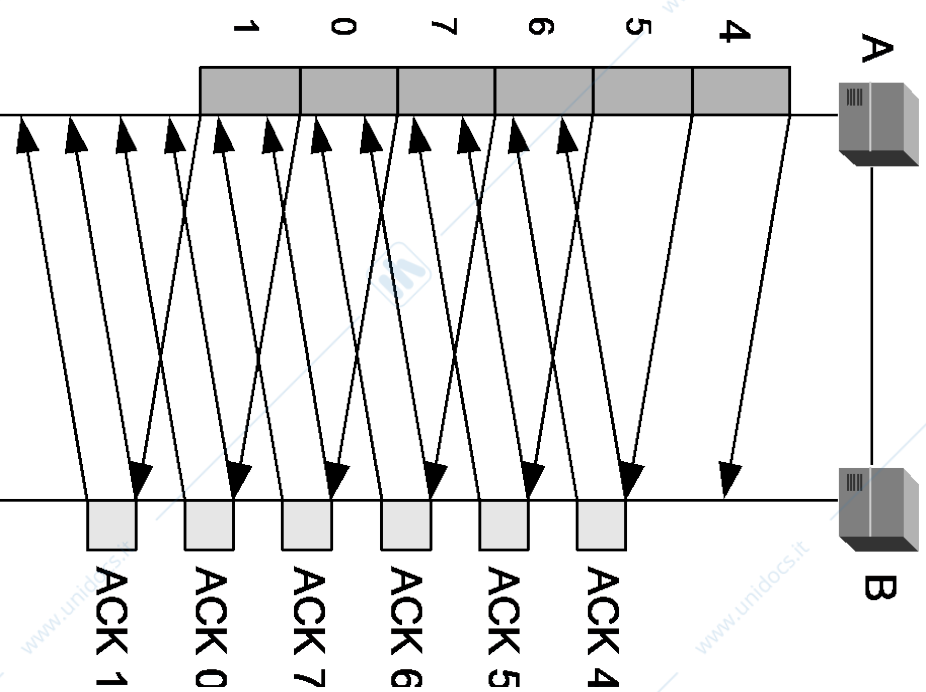
Continuous ARQ

- Numerazione ciclica modulo N

$$N = 2^b$$

- Tempo di trasferimento di N_f trame ($T_p = 0$)

$$T_{tot} = N_f T_f + T_a + 2\tau = N_f \left(\frac{L_f}{C} + \frac{L_a}{C} \right) + 2\tau$$





Strato di collegamento dati

Sliding window

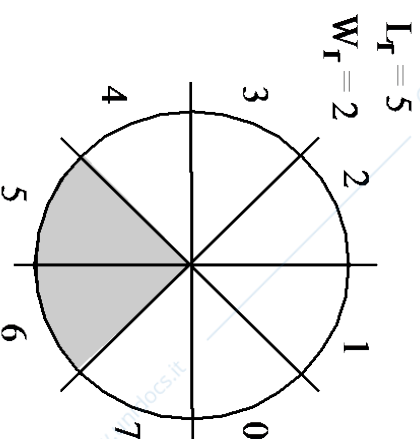
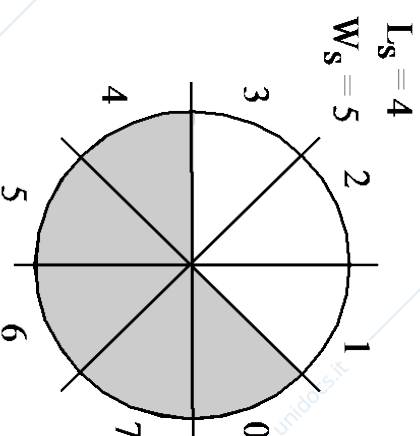
■ Controllo di flusso sul collegamento dati mediante sliding window

- ◆ Controlla il riempimento dei buffer
- ◆ Basato su numerazione di trame modulo N

■ Sliding window utilizza due finestre

- ◆ Finestra in trasmissione con ampiezza W_s
 - Fino a W_s trame possono essere trasmesse in assenza di riscontro
- Ogni riscontro ricevuto in sequenza fa scorrere la finestra
- ◆ Finestra in ricezione con ampiezza W_r
 - Fino a W_r trame possono essere accettate
 - Ogni trama accettata in sequenza fa scorrere la finestra
- ◆ Vincolo per evitare ambiguità: $W_s + W_r \leq N$
 - Le due aperture non devono sovrapporsi per massima rotazione (W_s) della finestra in ricezione

$$L_s \leq n \leq (L_s + W_s - 1)_{\text{mod } N}$$



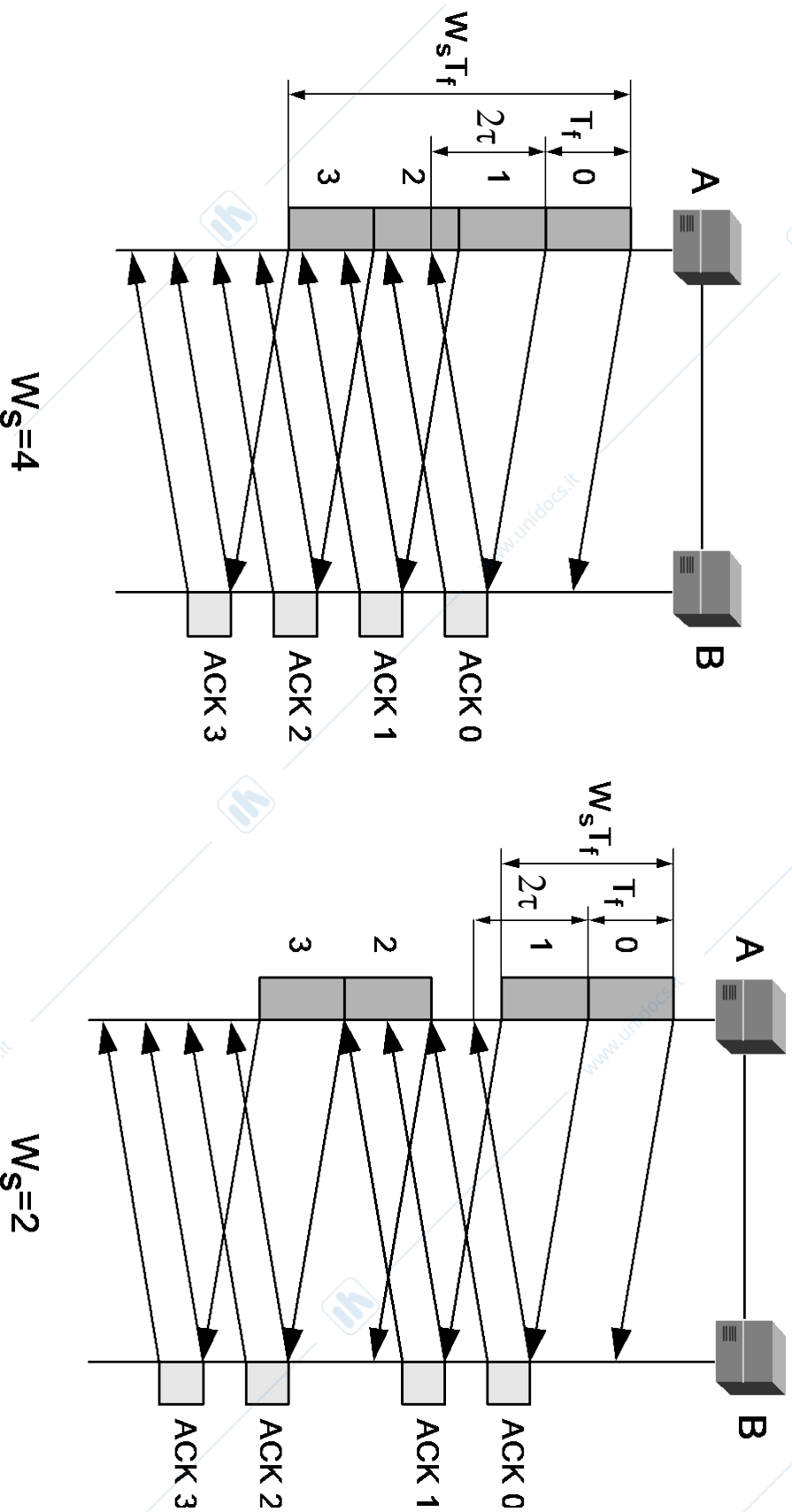
$$L_r \leq n \leq (L_r + W_r - 1)_{\text{mod } N}$$



Continuous ARQ

Sliding window

- Effetto della relazione tra W_s e τ



- Condizione richiesta per evitare perdite di efficienza

$$W_s T_f \geq T_f + T_a + 2\tau$$



Protocolli ARQ

Continuous ARQ

■ Due tipi di riscontri entrambi numerati

- ◆ ACK i : riscontro positivo di tipo cumulativo fino alla trama i
- ◆ NACK i : riscontro negativo della trama i

■ Protocolli

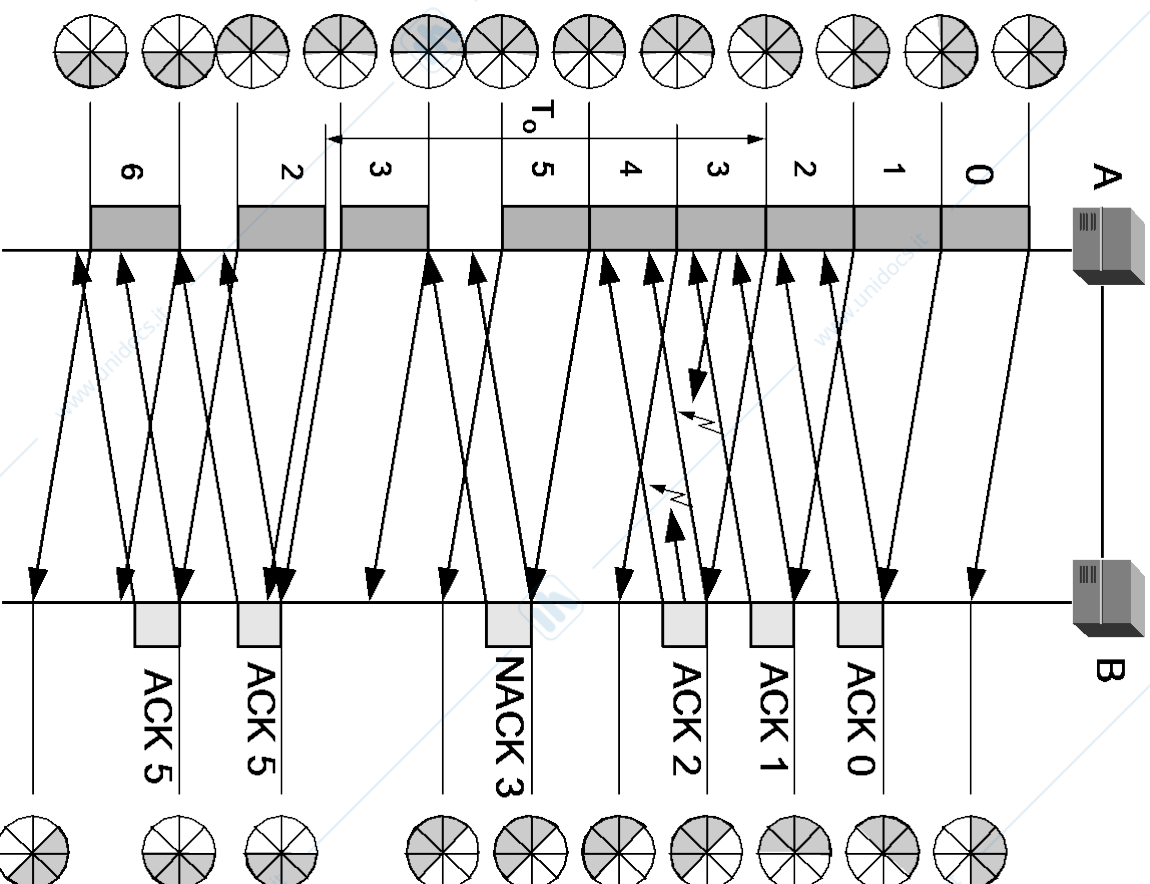
- ◆ Go-back- n
 - Trame ricevute fuori sequenza a causa di errori sono scartate
 - Ritrasmissione a partire dall'ultima trama non riscontrata
 - n è il numero massimo di trame che possono essere trasmesse in assenza di riscontri (es. $n = 7$ con numerazione modulo 8)
 - NACK i indica riscontro negativo della trama i , ma anche riscontro positivo fino alla trama $i - 1$
- ◆ Selective repeat
 - Trame accettate anche fuori sequenza → RX buffer per risequenziare le trame
 - NACK i indica solo riscontro negativo della trama i
 - Ritrasmissione selettiva
 - Esplicitamente richiesta (NACK)
 - Per scadenza di time-out

Selective repeat

- Time-out rende il protocollo efficiente con trasmissioni discontinue

- Sliding window

- ◆ $W_s = W_r = W$
 - $W = N/2$





Continuous ARQ

Calcolo efficienza – Assenza di errori

■ Calcolo efficienza in assenza di errori

- ◆ $T_a = T_p = 0$
- ◆ Buffer del TX sempre non vuoto

$$\bullet \eta = \begin{cases} 1 & W_s \geq 1 + 2a \\ \frac{W_s T_f}{T_f + 2\tau} & W_s < 1 + 2a \end{cases}$$



Continuous ARQ

Calcolo efficienza – Presenza di errori

■ Assunzioni

- ◆ $T_a = T_p = 0$
- ◆ Buffer del Tx sempre non vuoto
- ◆ K : numero di trame ritrasmesse in seguito a errore (trascurando la trama errata)

■ Efficienza

$$\bullet \eta = \frac{T_f}{N_s T_f} = \frac{1}{N_s}$$

• Selective repeat

$$\bullet N_s = \frac{1}{1-P}$$

• Go-back - n

$$\bullet N_s = 1 \cdot (1-P) + (K+1)P(1-P) + (2K+1)P^2(1-P) + \dots + (iK+1)P^i(1-P) + \dots =$$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} (iK+1)P^i(1-P) = \frac{KP}{1-P} + 1 = \frac{1+(K-1)P}{1-P}$$

$$\bullet KT_f \cong 2T_f + 2\tau \rightarrow K = 2 + 2a \Rightarrow N_s = \frac{1+P+2aP}{1-P}$$



Continuous ARQ

Calcolo efficienza – Presenza di errori

■ Finestra “non strozza”

- $W_S \geq 1 + 2a$

- $\eta = \begin{cases} 1-P & \text{SR} \\ \frac{1-P}{1+P+2aP} & \text{GBN} \end{cases}$

■ Finestra “strozza”

- $W_S < 1 + 2a$

- $\eta = \frac{W_S T_f}{W_S T_s} = \frac{W_S}{T_f + 2\tau} = \frac{W_S}{N_s(1+2a)}$
- $N_s = \begin{cases} 1 & \text{SR} \\ \frac{1-P}{1+(K-1)P} & \text{GBN} \end{cases}$

- $\eta = \begin{cases} \frac{W_S(1-P)}{1+2a} & \text{SR} \\ \frac{W_S(1-P)}{(1+2a)[1+(W_S-1)P]} & \text{GBN} \end{cases}$



Protocolli di linea

Efficienza per diverse probabilità di errore

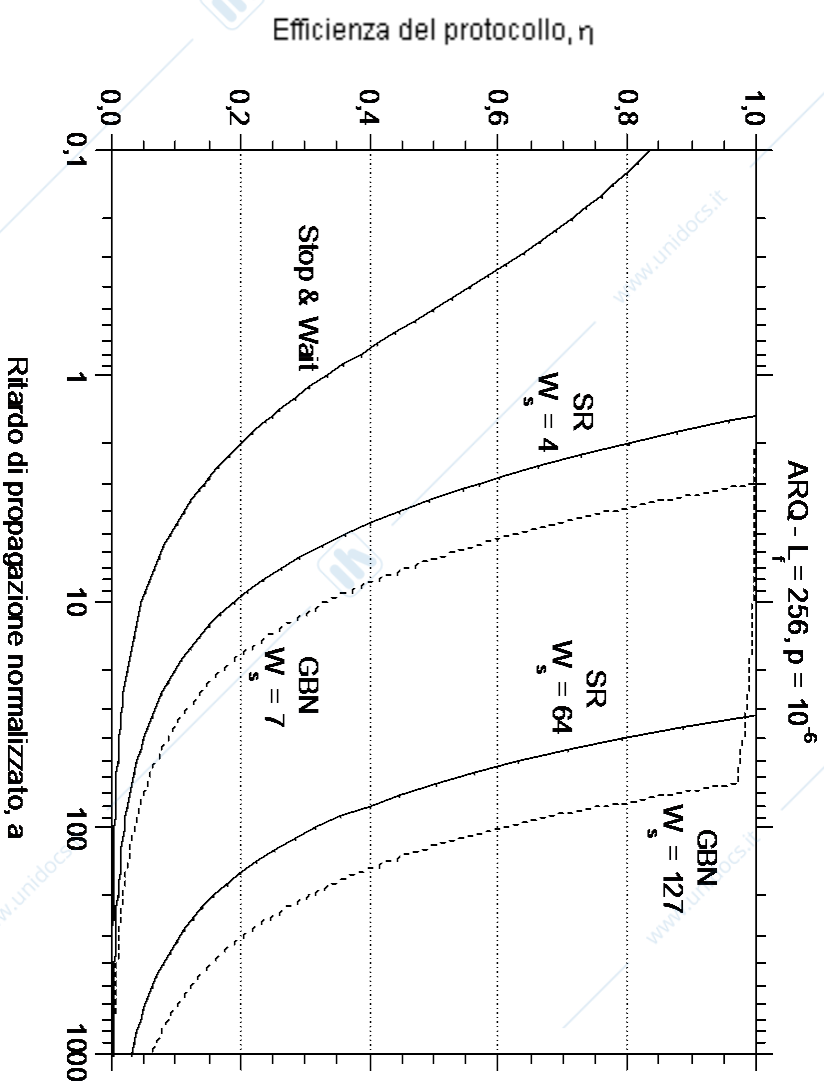
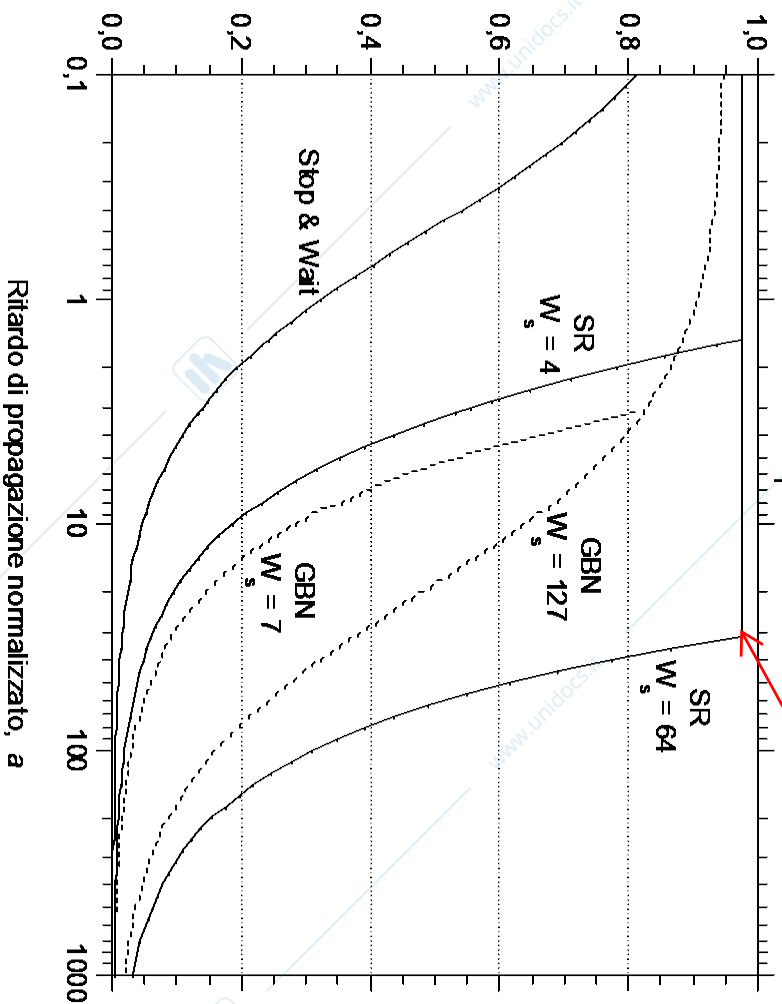
Ipotesi

- ◆ $T_a = 0 \rightarrow L_a = 0$
- ◆ $T_p = 0$

ARQ - $L_f = 256, p = 10^{-4}$

probabilità

strozza



Discontinuità : $W_s = 1 + 2a \rightarrow a = \frac{W_s - 1}{2}$



Sommario

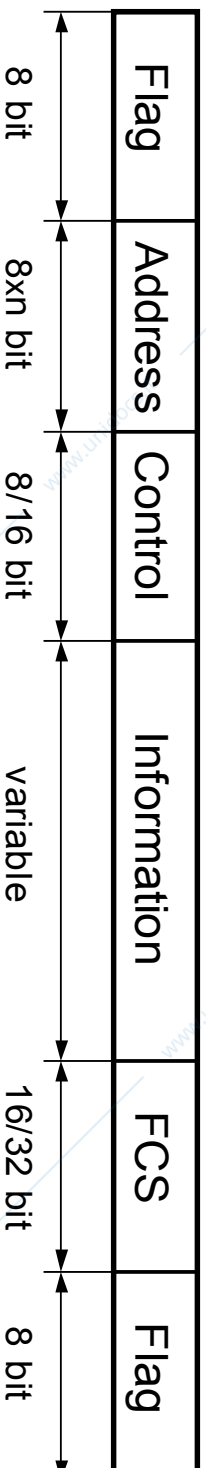
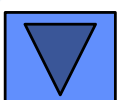
- **Generalità**
- **Protocollo Stop and wait**
- **Protocolli Continuous ARQ**
- **Protocollo HDLC**
 - ◆ Specifiche
 - ◆ Esempi
 - ◆ Prestazioni



HDLC

Struttura di trama

■ Formato di trama





HDLC

Funzioni

■ Flag: 01111110

◆ Trasparenza dati realizzata tramite bit stuffing

- Trasmittente inserisce uno 0 dopo ogni occorrenza di cinque 1 (non nei flag)
- Ricevente rimuove lo zero dopo i cinque uni

011111101011111110111111101000111110111110

(a)

0111111010111110110111111010100011111010111110

(b)

◆ Occorrenza di errori può causare

- Divisione di una trama in due (flag simulato all'interno di una trama)
- Fusione di due trame (flag tra due trame consecutive soggetto ad errore)

■ Address: indica il **secondario** in configurazioni sbilanciate

- ◆ Campo di 8 bit estendibili a multipli di 8
- ◆ 128 stazioni indirizzabili con configurazione base
- ◆ Comandi: indirizzo indica il destinatario
- ◆ Risposte: indirizzo indica il mittente

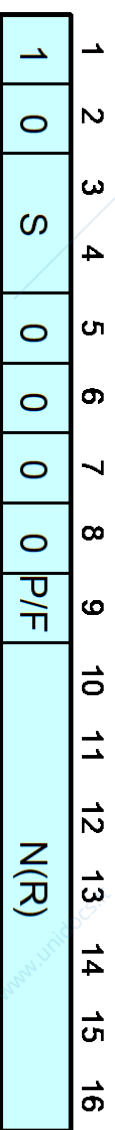
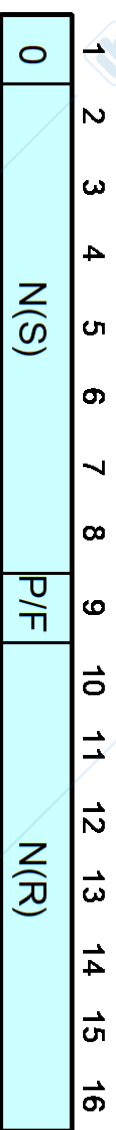
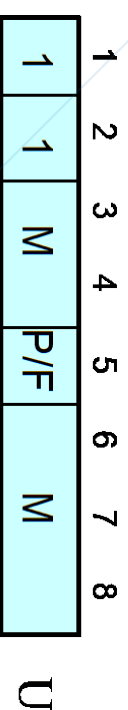
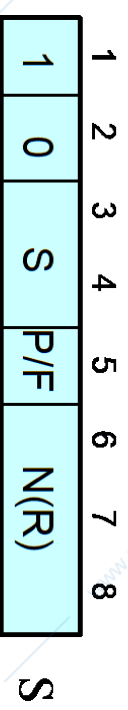
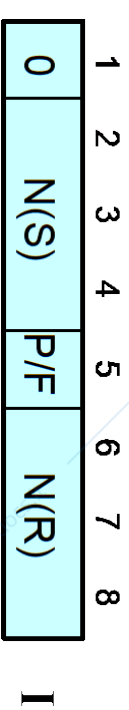


HDLC

Funzioni

■ Control: indica il tipo di trama e contiene la numerazione

- ◆ Tipi di trame
 - Information
 - Supervisory
 - Unnumbered
- ◆ Numerazione
 - N(S), N(R): 3 bit estendibili a 7 con SNRME
 - N(S): numero sequenziale di trama
 - N(R): numero della prossima trama attesa (riscontro implicito fino a $N(R)-1$)
- ◆ Controllo di flusso
 - Esercitato con il controllo a finestra con N(s) e N(r)
- ◆ Recupero da errori
 - Implementa sia Go-back-n, sia Selective repeat
- ◆ Piggybacking realizzato mediante N(R) nelle trame I





HDLC

Funzioni

■ Campi nella trama

- ◆ I: N(S), N(R)
- ◆ RR: N(R)
- ◆ REJ: N(R)
- ◆ SREJ: N(R)
- ◆ SREJ: N(R) [Campo I: N(R-1), ...]

■ Comandi e risposte

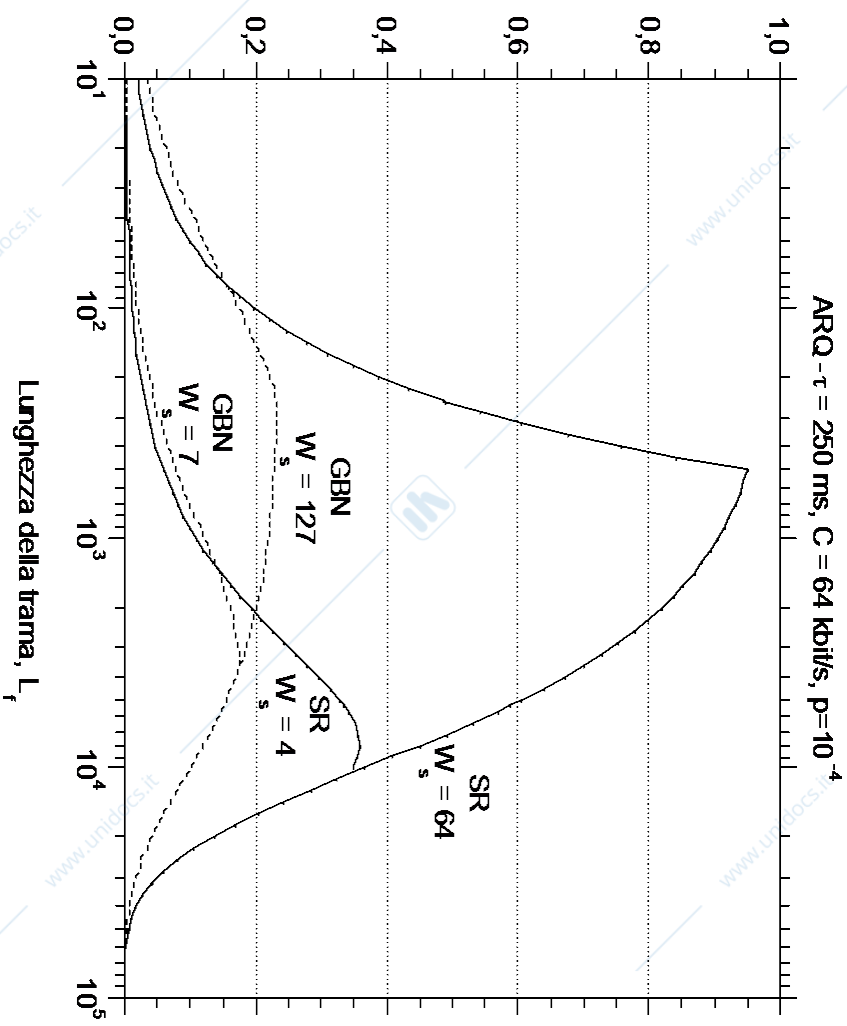
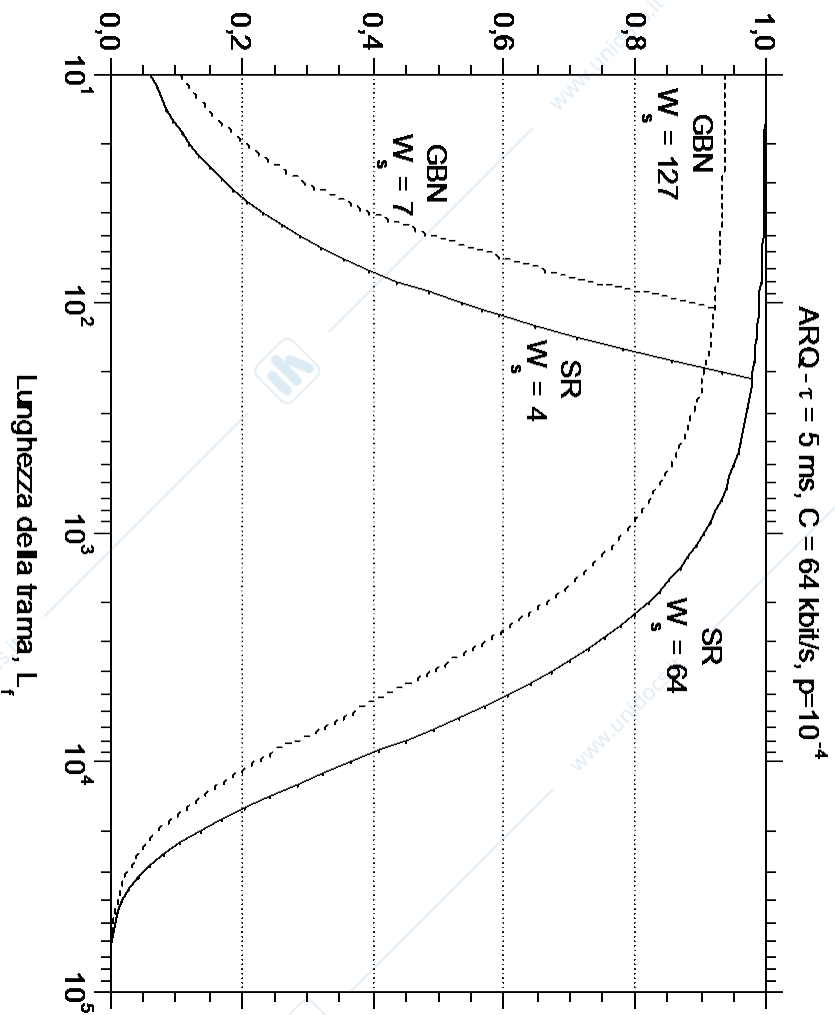
- ◆ Comando: indirizzo del destinatario
- ◆ Risposta: indirizzo del mittente

Type	Frame	C	R
I		X	X
S	RR	X	X
	RNR	X	X
	REJ	X	X
	SREJ	X	X
	SIM	X	
	SNRM/SNRME	X	
	SARM/SARME SABM/SABME	X	
UA		X	
U	UI	X	X
	RSET	X	
	FRMR		X
	DISC	X	
	Others	X	X



Sliding window

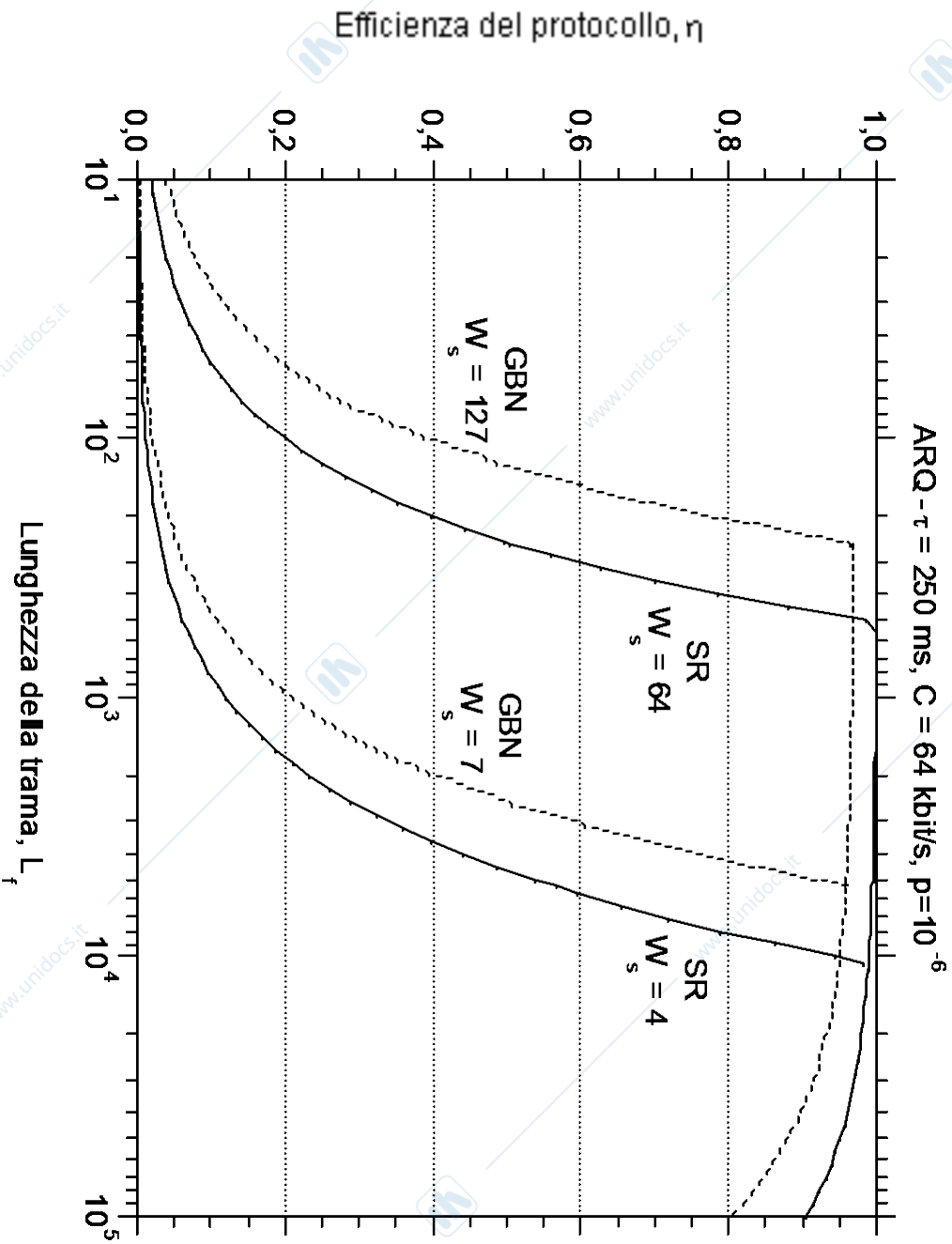
Efficienza - Collegamenti terrestre e via satellite





Sliding window

Efficienza - Collegamento via satellite





■ Slide eliminate





Livello di collegamento dati

High-level Data Link Control

- **Tipo di stazione**
 - ◆ *Primaria*: responsabile del collegamento, emette comandi
 - ◆ *Secondaria*: asservita alla primaria, emette risposte
 - ◆ *Combinata*: emette sia comandi, sia risposte
- **Configurazione del collegamento**
 - ◆ *Sbilanciata*: 1 primaria, ≥ 1 secondarie
 - ◆ *Bilanciata*: 2 stazioni combinate
- **Modi di trasferimento**
 - ◆ Asynchronous Balanced Mode (ABM): configurazione bilanciata
 - 2 stazioni combinate
 - Trasmissione di tipo full-duplex
 - ◆ Normal Response Mode (NRM): configurazione sbilanciata
 - 1 stazione primaria e almeno 1 stazione secondaria
 - Trasmissione di tipo half-duplex
 - ◆ Asynchronous Response Mode (ARM): configurazione sbilanciata
 - Come NRM ma il secondario può iniziare la trasmissione senza permesso



HDLC

Funzioni

■ Frame check sequence: verifica la correttezza degli altri campi eccetto i flag

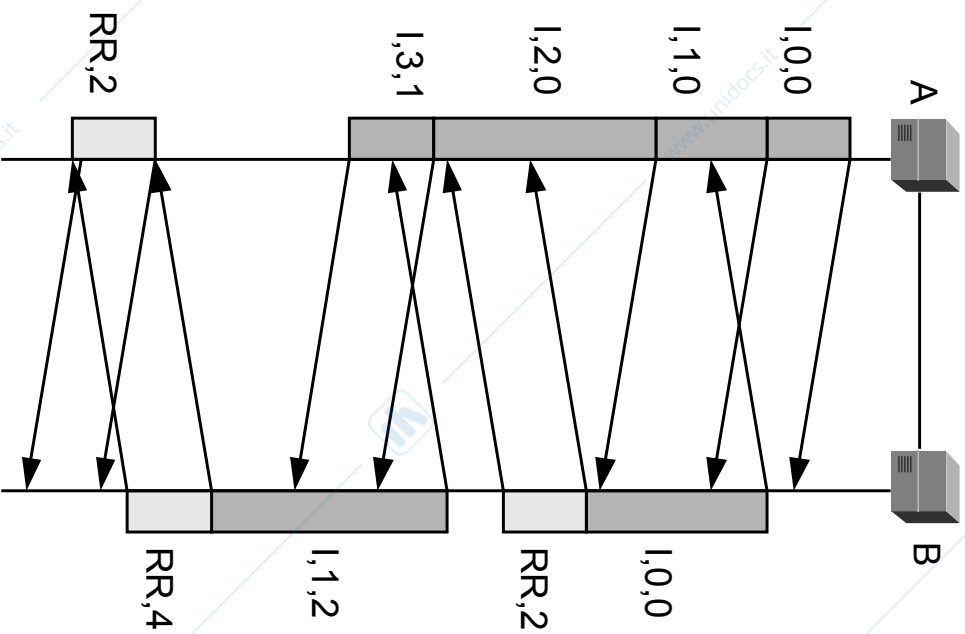
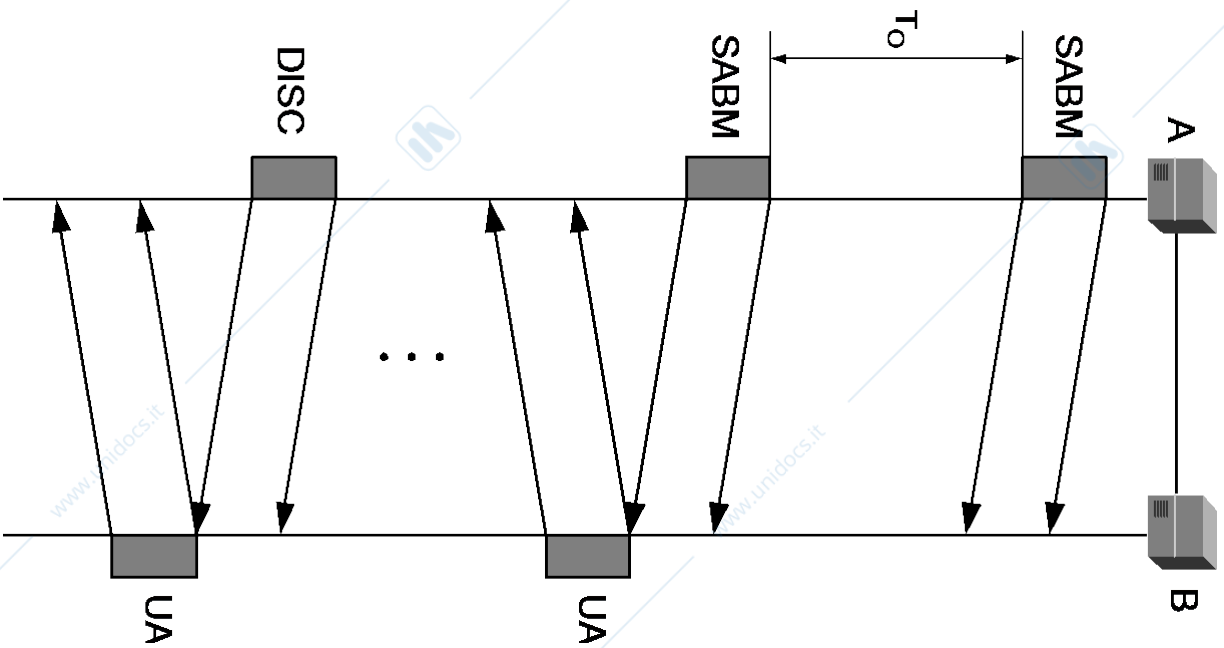
- ◆ Rivelazione di errore basata sull'aritmetica modulo 2
- ◆ Campo da proteggere (*Addr, Cont, Info*) di n bit \rightarrow polinomio $P(X)$ di grado $n-1$
- ◆ Campo FCS a k bit \rightarrow polinomio divisore $D(X)$ di grado k
- ◆ FCS riceve il resto della divisione tra $P(X) \cdot X^k$ e $D(X)$
 - $\frac{P(X) \cdot X^k}{D(X)} = Q(X) + \frac{R(X)}{D(X)}$
- ◆ Trama trasmessa di $n+k$ bit: polinomio $P'(X) = P(X) \cdot X^k + R(X)$ di grado $n+k-1$
 - $P'(X) = P(X) \cdot X^k + R(X)$
- ◆ Errore rivelato se la divisione in frazioni produce resto $\neq 0$
- ◆ Protezione da
 - Errori su singolo bit se $D(X)$ ha almeno due termini
 - Errori su due bit se $D(X)$ soddisfa una data proprietà
 - Errori su un numero dispari di bit se $D(X)$ è esprimibile come fattore di $X+1$
 - Errori consecutivi in numero $< k$

- ◆ CCITT-ITU: $D(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ con $k=16$
- ◆ USA: $D(X) = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$ con $k=16$



Gestione del collegamento dati

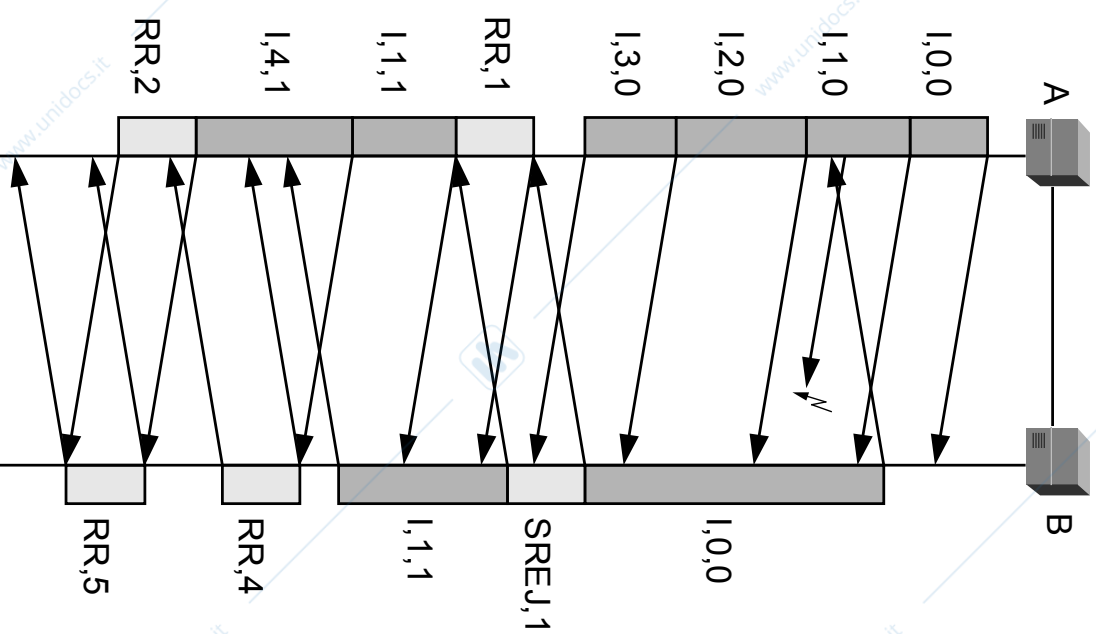
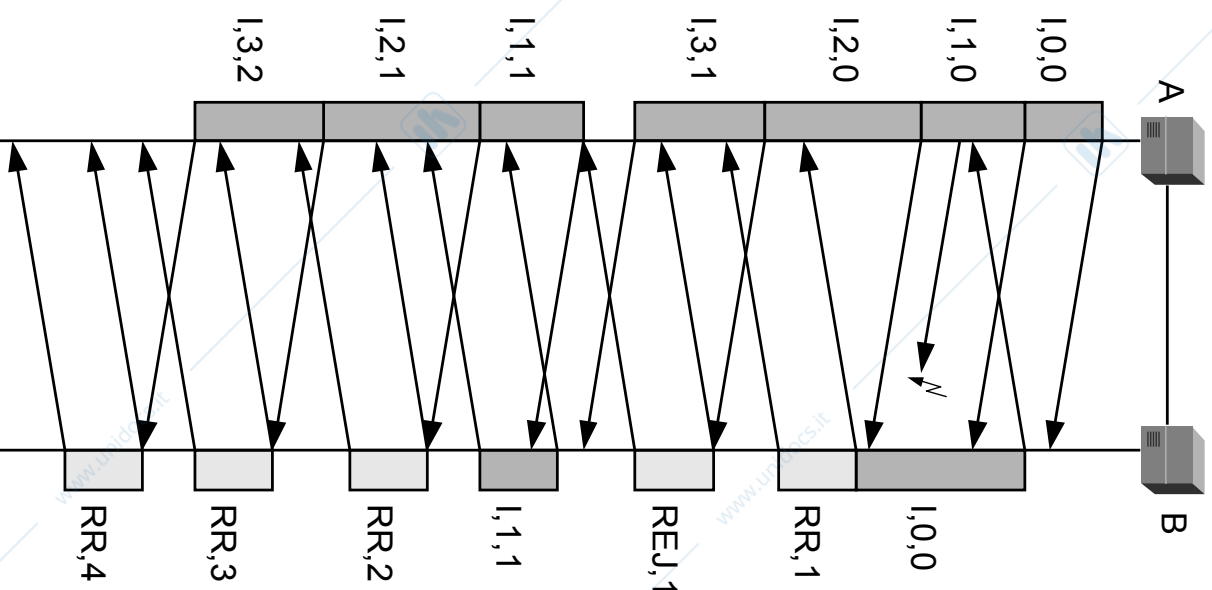
Esempio di ABM ideale





Gestione del collegamento dati

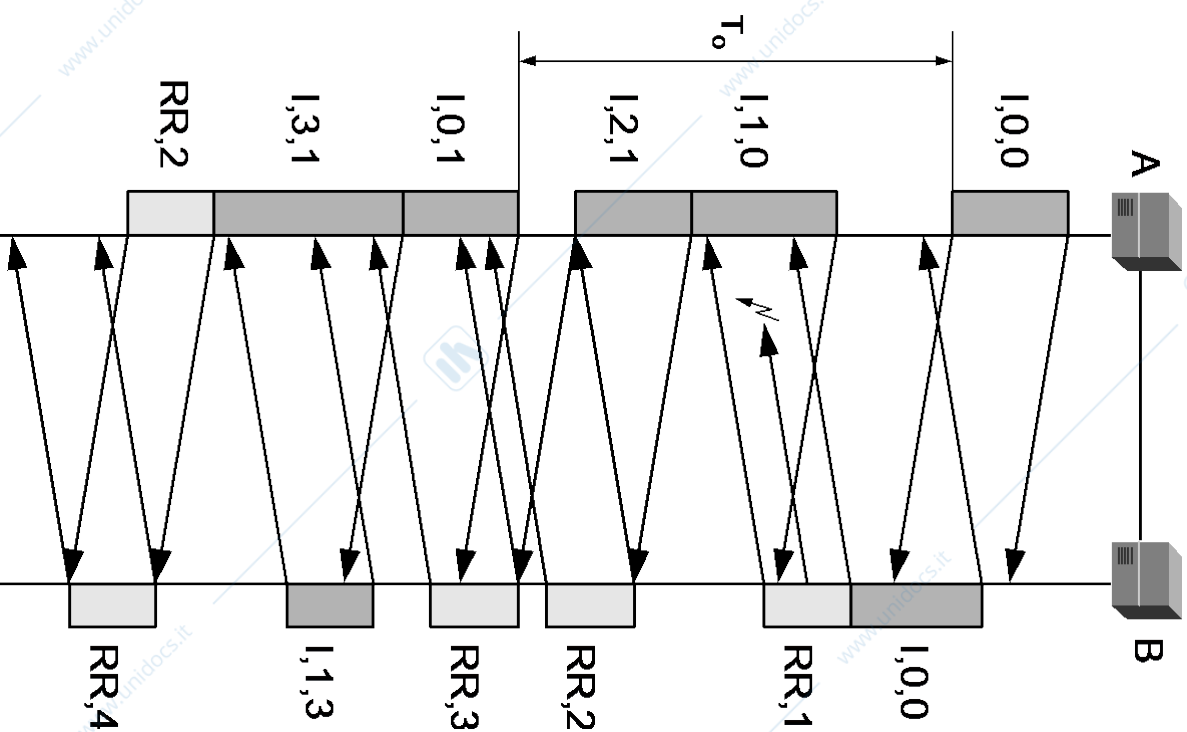
Esempio di ABM con errore in GBN e SR





Gestione del collegamento dati

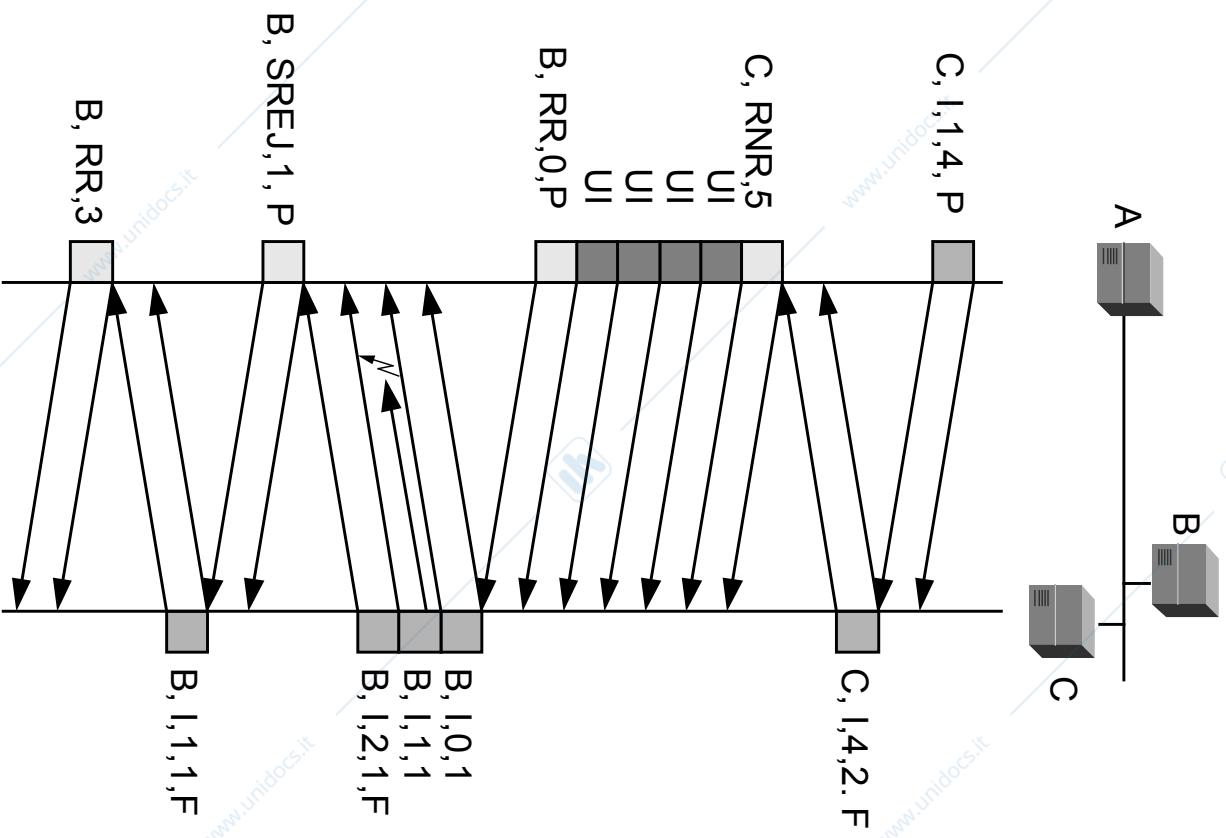
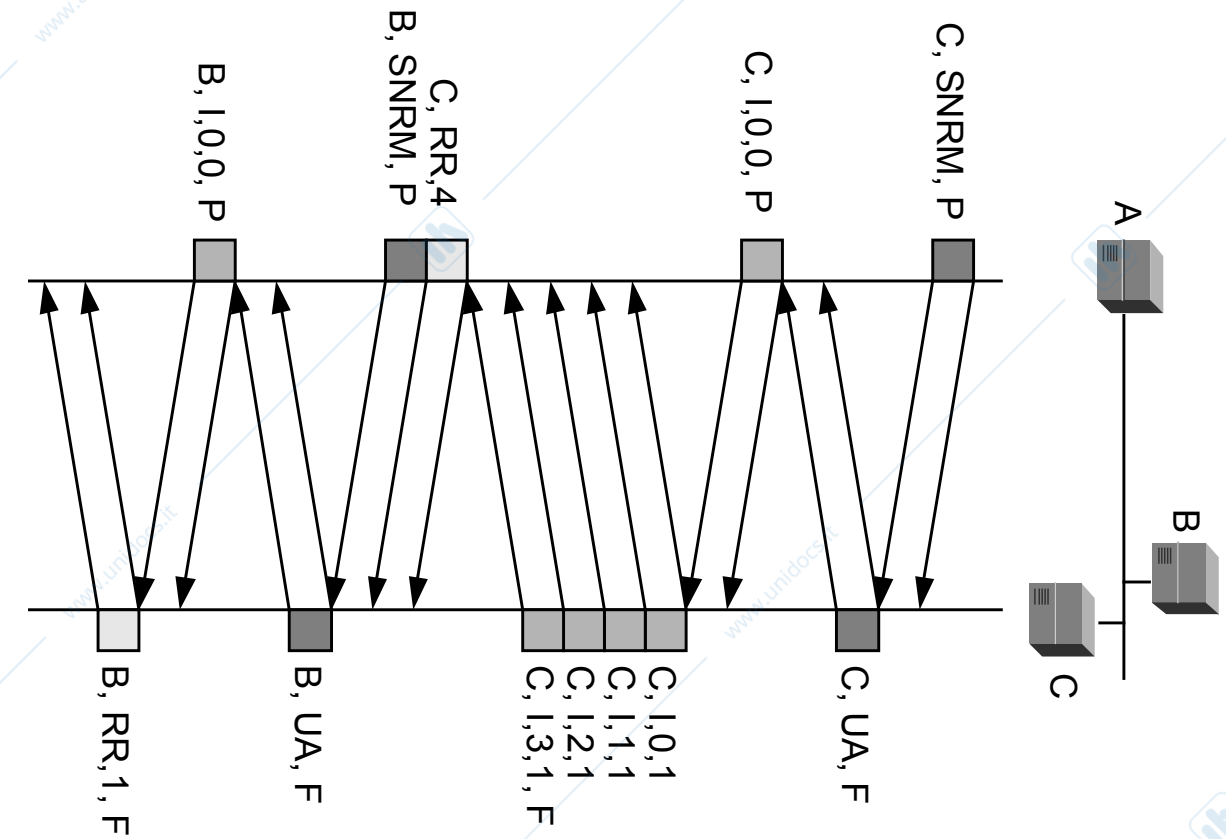
Esempio di ABM con ritrasmissione per timeout





Gestione del collegamento dati

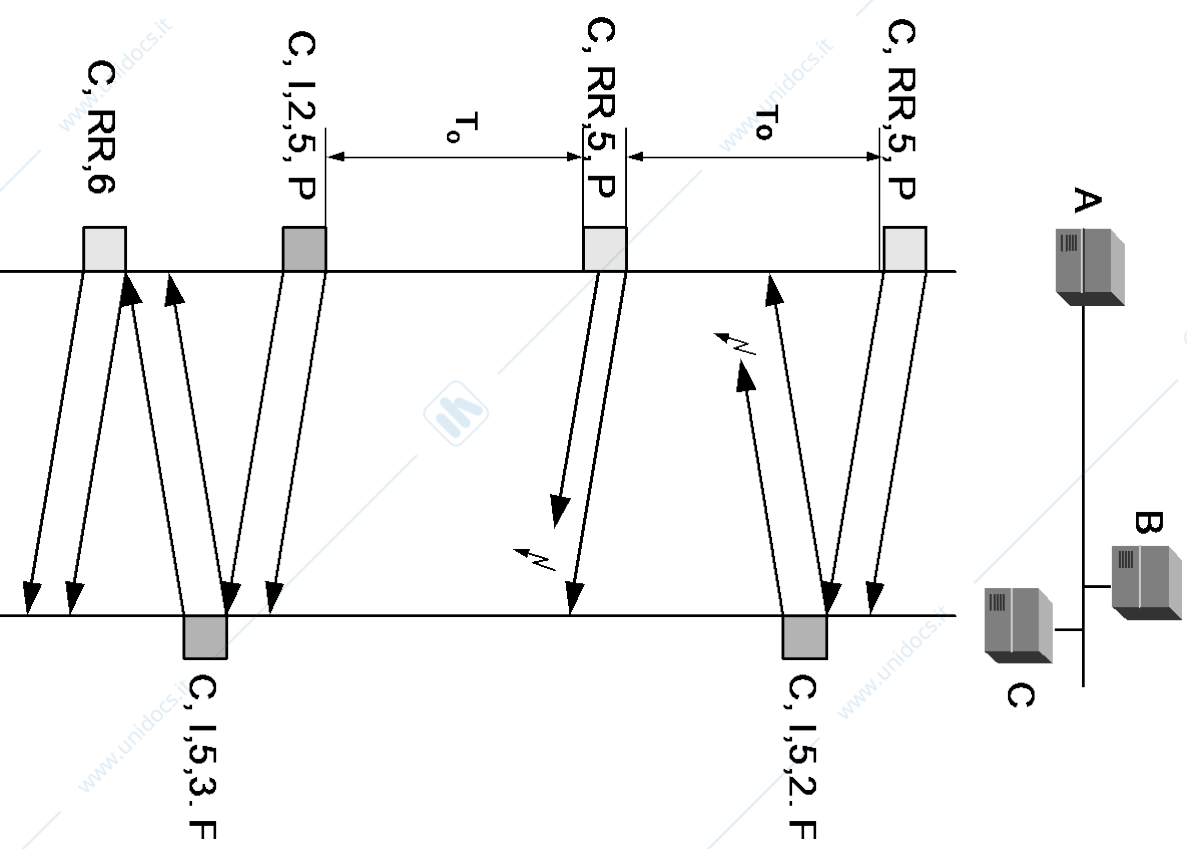
Esempio di NRM





Gestione del collegamento dati

Esempio di NRM (cont.)





Livello di collegamento dati

Gestione delle finestre

- **Finestra corrente definita da 2 parametri**
 - ◆ Apertura W
 - ◆ Estremo inferiore L
- **Finestra in trasmissione**
 - ◆ Trasmesse, in assenza di riscontro, fino a W_s trame con $L_s \leq N(s) \leq (L_s + W_s - 1)_{\text{mod}N}$
 - ◆ L_s = ultimo $N(r)$ ricevuto in trame I, RR, RNR, REJ
- **Finestra in ricezione**
 - ◆ Accettate tutte le trame con $L_r \leq N(s) \leq (L_r + W_r - 1)_{\text{mod}N}$
 - ◆ L_r = ultimo $N(r)$ inviato in trame I, RR, RNR, REJ
- **Protocollo Go-back-n**
 - ◆ $W_r = 1$
 - ◆ $W_s \leq N-1$
- **Protocollo Selective repeat**
 - ◆ $W_s = W_r = W \rightarrow W = N/2$

