

ARCHITETTURA A STRATI

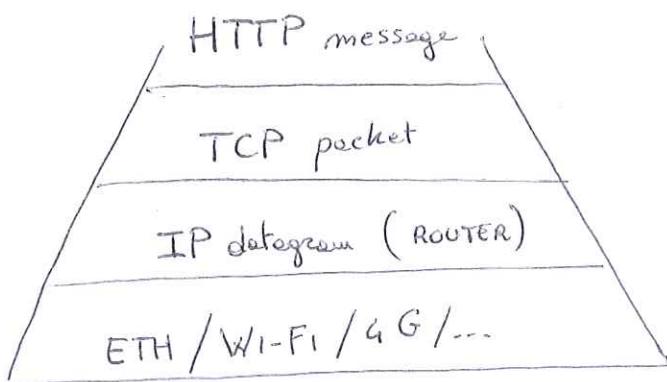
1) APPLICATION LAYER

2) TRANSPORT LAYER

3) INTERNET LAYER

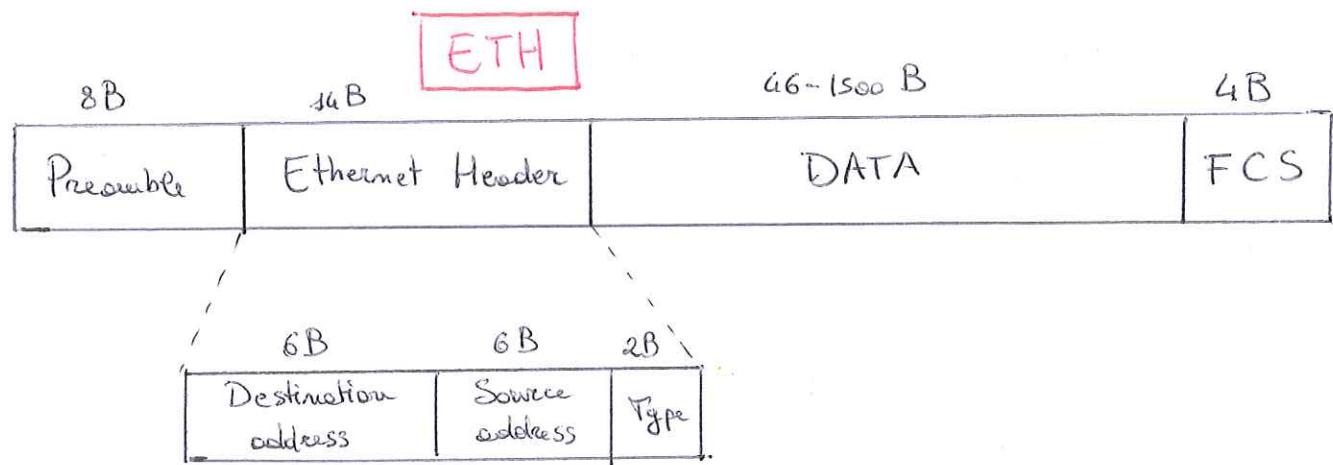
4) DATA LINK LAYER

(Physical Networks)



- ARP Protocol: Address Resolution Protocol → Mappa l'indirizzo IP in indirizzo MAC del dispositivo hardware

Per poter mandare FISICAMENTE pacchetti tra dispositivi connessi alla stessa rete.



- FCS = Frame Check Sequence → Verifica se le trame sono state ricevute correttamente
- PREAMBLE → CODIFICA MANCHESTER (ultimi 2 bit a 1, altri a 0)
- Invia a 10 Mbps

- CSMA (Carrier Sense Multiple Access):

Ascoltare prima di trasmettere → devo scritto il canale libero per un IFS (Internet Frame Spacing): @ 10Mbps → IFS = 9,6μs

→ C'è COLLISION DETECTION, in base al rileggio rilevato sul canale

- DEFER: aspetto tempo da quando rilevo la collisione alla fine delle trame e poi aspetto un altro IFS prima di ritrasmettere.

- RINFORZA LA COLLISIONE: quando rilevo una collisione, CONTINUO A TRASMETTERE altri 32 bit di segnale → SEQUENZA DI JAM

Devo garantire che la trama sia maggiore del più grande ritardo di propagazione
in andata e ritorno (d = distanza, $C_{linee} = 200 \text{ m}/\mu\text{s}$):

$$T_{TX} > T_{A/R} = \frac{2d}{200} \mu\text{s}$$

$$T_{A/R} = 2 \cdot \text{Propagation Delay} ; \quad \text{Propagation Delay} = \frac{d}{200 \text{ m}/\mu\text{s}}$$

VARIABILI IN GIOCO:

d = distanza max

$L_{MIN} = 64 \text{ Bytes} = \text{trama minima}$

R = velocità delle reti

C = velocità di propagazione ($200 \text{ m}/\mu\text{s}$, nel vuoto)

$$\frac{L_{MIN}}{R} > \frac{2d}{C}$$

RANDOM BACKOFF: per gestire le RITRASMISSIONI \rightarrow genere tempo CASUALE

Il tempo di BACKOFF generato è MULTIPLO dello SLOT-TIME = $\sigma = 51,2 \mu\text{s}$

EXPONENTIAL BACKOFF: N = contatore di ritrasmissioni

$K = \min(N, 10)$

Backoff Window: $0 \leq R < 2^K$

Dopo $N=16$ ritrasmissioni \rightarrow BUTTO IL PACCHETTO

RIPETITORI ETH

3 Funzioni:

1. RE-SHAPING: ricostituisce le forme d'onda

2. RE-TIMING: resetta il clock a 0

3. RE-TRANSMITTING: propaga il messaggio su tutte le porte, tranne quelle da cui proviene. Ritrasmette anche le collisioni.

Si passa da Rete a BUS a Rete a STELLA, sostituendo il coassiale con un

HUB, un RIPETITORE, ma le velocità non cambiano.

L'HUB NON legge le trame, fa solo lavoro fisico!

BRIDGE: montato sull'HUB per poter gestire le collisioni; deve sapere:

(1) leggere gli indirizzi

(2) memorizzare dove sono le stazioni

SWITCH: bridge multiporta, fa parlare in parallelo più stazioni



AUMENTA LA VELOCITA'!

$$C = \frac{N}{2} \cdot (\text{rel. linee})$$
, dove $N = \# \text{ stazioni}$

Nello switch c'è un BUFFER per far aspettare i pacchetti ed EVITARE LE COLLISIONI → NON HO PIU' BISOGNO DI CSMA!

Lo switch legge le trame, individua la destinazione e invia il pacchetto solo a lei

1) STORE & FORWARD:

- Legge TUTTA la trama
- Controlla il CRC e scorge se:
 - CRC fallito
 - trama corta ($< 64 \text{ B}$)
 - trama lunga ($> 1518 \text{ B}$)
- Guarda i bit delle destinazioni e le invia alle porte di destinazione

2) CUT-THROUGH:

- Legge SOLO fino all'indirizzo di destinazione (6 bytes dopo il PREAMBLE)
- NON fa controlli
- Seleziona destinazione delle tabelle e invia

OSSERVAZIONE:

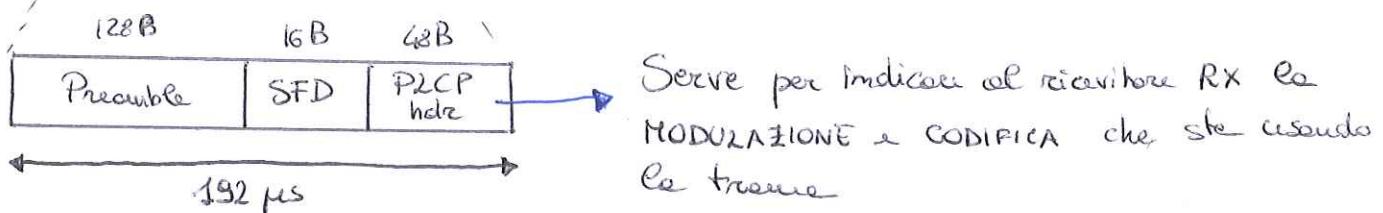
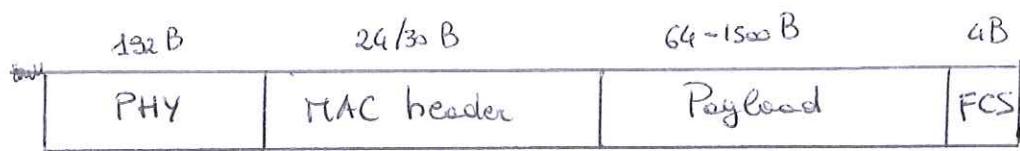
- un HUB non puo' avere linee con velocita' diverse (o permettere trasmetti sempre a quelle piu' lente), è un RIPETITORE
- con lo SWITCH si puo', MA SOLO SE NON È CUT-THROUGH, poiché non memorizza le trame nel buffer

W-LAN

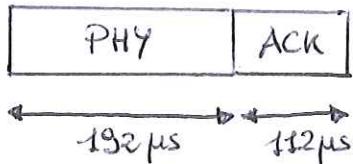
Non si puo' fare COLLISION DETECTION.

- CSMA: Una stazione trasmette solo se sente il canale libero per un tempo di DIFS (Distributed Inter Frame Spec). L'ACK viene inviato dopo un SIFS (Short IFS).

DATA



ACK



- VIRTUAL CARRIER SENSING: nel campo duration viene specificata la durata della trasmissione (compresa di ACK). Quando sente il canale IDLE , ma sa che la trasmissione ancora non è terminata aspetta inserendo un NAV (Network Allocation Vector) che dura fino alla fine della trasmissione ; quindi sta facendo VIRTUAL CARRIER SENSING.

- BACKOFF: Serve perché se 2 o più stazioni fanno Virtual Carrier Sense, dopo un DIFS vogliono trasmettere entrambe → COLLISIONE!

Usiamo un protocollo CSMA Collision Avoidance:

- * Differenze con ETH: genera una finestra di BACKOFF anche se sono state 1^o TX (non RTX!)

Scelgo un numero di finestre iniziali $W = 32$:

numero di backoff $\in [0, W-1] = [0, 31]$

Probabilità di collisione $= \frac{1}{32} < 5\%$.

• BACKOFF FREEZING:

Se sto aspettando il mio tempo di backoff e nel frattempo avverto che il canale viene occupato \rightarrow faccio FREEZING del contatore di BACKOFF e riprendo a decrementarlo dopo aver sentito il canale IDLE per un DIFS.

(*) DIFERENZA con ETH:

in ETH non avrei aspettato, generando una COLLISIONE.
BACKOFF tra TX CONSECUTIVE: serve per evitare di monopolizzare il canale

• 1° BO: $CW_{min} \rightarrow [0, 31]$

• 2° BO: $[0, 2 \cdot (CW_{min} + 1) - 1] \rightarrow [0, 63]$

• 3° BO: $[0, 2^2 \cdot (CW_{min} + 1) - 1] \rightarrow [0, 127]$

... ~~BO~~

$$2^m \cdot (CW_{min} + 1) - 1$$

$$CW_{max} = 2^5 \cdot (CW_{min} + 1) - 1 = 1023$$

Per $m=5$ ritrasmissioni
 \Downarrow
Dopo BUTTO il PACCHETTO

• TEORIA DEI "PROCESSI RIGENERATIVI":

$$S_{station} = \frac{E[\text{payload}]}{E[T_{tx payload}] + SIFS + T_{ACK} + DIFS + E[T_{BACKOFF}]}$$

ARCHITETTURA DI RETE DI 802.11

- BSS: BASIC SERVICE SET → equivalente di 1 cella radio

BSS Infrastructure: usa un Access Point (AP) che funge da nodo relay, così non ho bisogno di sapere chi c'è nelle mie stesse celle e posso fare POWER SAVING MODE (PSM).

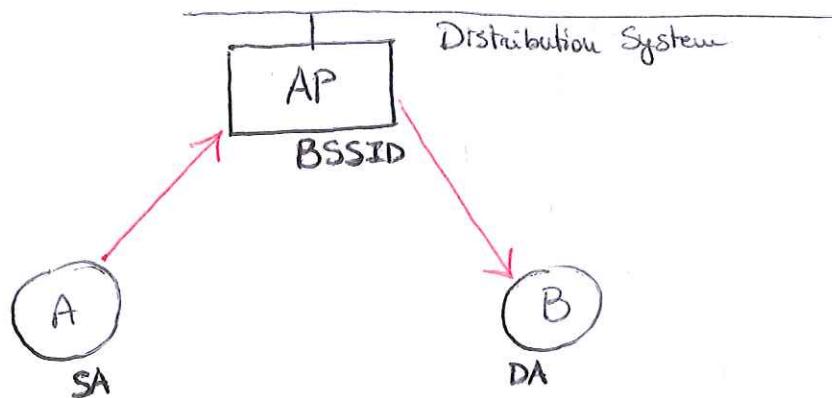
Independent BSS (IBSS): rete "ad hoc", collegamento peer-to-peer, non obbligatorio.

INDIRIZZAMENTO in un IBSS

Frame Control	Duration/ID	Address 1 DA	Address 2 SA	Address 3 BSSID	Sequence Control	Date	FCS
		DEST. address	SOURCE address	BSS Identifier			

Il campo Address 3 è usato per il BSSID: mi serve in RICEZIONE per poter filtrare le trame e capire se provengono o meno dalla mia stessa cella (BSS).

INDIRIZZAMENTO IN UN BSS

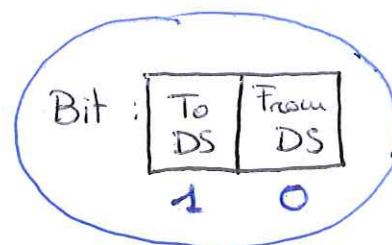


- DISTRIBUTION SYSTEM: il sistema di distribuzione che sta dietro un AP e che invia le trame alle "vere" destinazioni.

L'AP ha una SCHEDA DI RETE (NIC = Network Interface Card) con un suo indirizzo MAC. Per poter passare da AP ad arrivare a DA, devo conoscere anche l'indirizzo MAC delle schede di rete dell'Access Point.

(1) UPLINK (to AP):

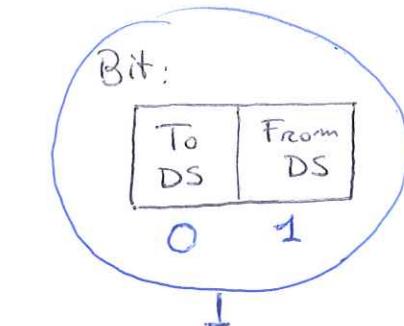
- Address 1 : BSSID = MAC dell'AP
- Address 2 : source = SA
- Address 3 : "vere destinazioni" = DA



Indica che va in UPLINK

(2) DLINK (from AP):

- Address 1: wireless RX = DESTINATION = DA
- Address 2: wireless source = AP = BSSID
- Address 3: "vere" Sorgente = SA



Indicano che vado im DOWNLINK

Ho davvero bisogno di Address 3 im DOWNLINK?

Sì, poiché potrai dover mandare un ACK proprio alla rete stazione sorgente e non all'AP, per esempio in una comunicazione end-to-end.

EXTENDED SERVICE SET (ESS)

Estensione a più celle radio (BSS) connesse, quindi ho più AP's connessi tra loro via cavo (ETH).

Gestisco le trasmissioni come se gli AP's si comportassero da SWITCH, quindi ho che sia le porte cablate che le porte wireless sono sulle stesse switched LAN.

La convenzione è di chiamare tutti gli Access Point connessi con un unico NOME, detto SSID (Service Set Identifier).

Quindi, è DISTRIBUTION SYSTEM, concettualmente, garantisce la CONNELLIVITÀ FISICA:
È peccetto deve poter arrivare a destinazione.

INDIRIZZAMENTO:

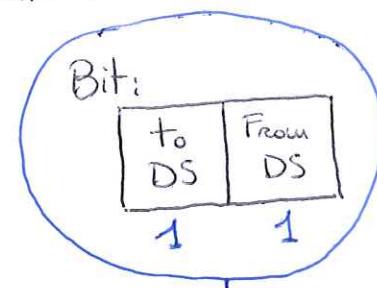
Ho sempre bisogno dei 3 indirizzi:
(UPLINK)

{ Addr. 1 : BSSID #1 (il MIO AP)
 Addr. 2 : SA (io)
 Addr. 3 : DA finale → Non ho bisogno di sapere dove sia, ci pensa il Distribution System

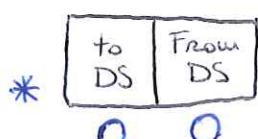
TRASMISSIONE TRA 2 AP's:

Questa volta ho 4 indirizzi! 2 AP's + Real SOURCE + Real DEST.

- Addr. 1 : RA = Receiver Addr. = BSSID #2
- Addr. 2 : TA = Transmitter Addr. = BSSID #1
- Addr. 3 : DA = Destination
- Addr. 4 : SA = Real Source



Indica che sto comunicando tra AP's del Distribution System (DS) o DS



* = Invio di peccetti "AD HOC" (IBSS) → No Distribution System

LA RITRASMISSIONE DEI PACCHETTI

Come gestire gli ERRORI in RICEZIONE?

- (1) FORWARD Error Correction: rinforzo la trasmissione con più bits al posto di 1, così sono in grado di CORREGGERE gli errori
→ Troppo overhead!

(2) RITRASMISSIONE:

Inserisco alle fine delle trame 2-4 bytes di **FCS** (Frame Check Sequence) in grado di RILEVARE (DETECTION) se ci sono stati errori e RITRASMETTO il pacchetto.

• CRC: Cyclic Redundancy Check

Tipologie di FCS per fare ERROR DETECTION. Vediamo CRC 8, con $m = 8$ bit di controllo.

- 1) Prendere il DATO ed ESTENDERLO con $m (=8)$ bit di 0;
- 2) Vedere il dato come un POLINOMIO (ogni 1 è x elevato alla posizione)
C'è un POLINOMIO DIVISORE standard: in CRC 8 = $x^8 + x^2 + x + 1$, che è
 $(1) \underline{\underline{0000\ 0111}} \rightarrow$ il 1° uno si omette, perché si deve essere 1
- 3) Hex: **[0x07]**

- 3) Dividere il dato shiftato di m bit (esteso) per il POLINOMIO DIVISORE:

$$\boxed{\text{CRC} = \text{RESTO}} \rightarrow \text{DIVISIONE TRA POLINOMI in GF(2)!}$$

- 4) Per verificare che non ci siano stati errori:
cioè, se de' RESTO = 0.

$$\frac{\text{DATO} + \text{RESTO}}{\text{DIVISORE}} = Q(x) + R(x) \quad ||_0$$

* Esempio:

$$\text{DATA: } 10\ 0110\ 0101 \rightarrow x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$$

$$\text{CRC 8: } (1)0000\ 0111 \rightarrow x^8 + x^2 + x + 1$$

$$\text{Estendo DATA: } 10\ 0110\ 0101\ \underline{\underline{0000\ 0000}} \rightarrow x^8 \cdot \text{DATA} = x^{17} + x^{16} + x^{13} + x^{10} + x^8$$

$$\text{Divisione: } \rightarrow x^9 + x^6 + x^5 + x^3 + x + \frac{(x^4 + x^2 + x)}{(x^8 + x^2 + x + 1)} \left. \right\} \rightarrow \frac{\text{RESTO}}{\text{DIVISORE}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{CRC} = x^4 + x^2 + x} \rightarrow 0001\ 0110$$

$$\text{DATO} + \text{CRC} = \frac{10\ 0110\ 0101\ \underline{\underline{00010110}}}{(1)0000\ 0111} \pmod{2} = x^9 + x^6 + x^5 + x^3 + x + \boxed{0}$$

$$R(x) = 0 \rightarrow \underline{\underline{\text{OK}}}!!$$

ARQ: Automatic Retransmission Request

Oltre ad inviare ACK, posso anche inviare NACK (Negative ACK) quando rilevo un errore; oppure posso introdurre un RTO (Retransmission Time Out) entro il quale, se non ricevo un ACK, RITRASMETTO.

PROBLEMA: se ho le perdite di un ACK e le cause del Time out il pacchetto viene ritrasmesso, il ricevitore lo riceve 2 volte.

Come capire se è un pacchetto uguale o una ritrasmissione?

↓
NUMERARE I PACCHETTI

• MODELLO LINK-LEVEL

Assumo che tra le 2 stazioni SRC e DST ci siano linee di capacità fissa C , misurate in bit/sec. Abbiamo 2 possibili soluzioni:

(1) Stop & Wait:

Mando un pacchetto per volta!

$$Ho: T_{TX} + \text{Delay di propagazione} + E(\text{tempo di processamento}) + T_{TX} \text{ dell'ACK} + E$$

Chiamo RTT = Round Trip Time : tempo di ANDATA di MSG fino al RITORNO dell'ACK

$$\text{thr.} = \frac{\text{MSG}}{\text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{C} + \frac{\text{ACK}}{C} + 2E}$$

Se, idealmente: $E \rightarrow 0$, $\text{ACK} \rightarrow 0$, ho un UPPER BOUND:

$$\text{thr}_{\max} = \frac{\text{MSG}}{\text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{C}}$$

Definisco, è EFFICIENZA:

$$\eta = \frac{\text{thr}}{C} = \frac{1}{\frac{\text{RTT}}{\text{MSG/C}} + 1} < 1$$

GESTIONE DEGLI ERRORI :

Il vero problema è SETTARE IL TIMEOUT, idealmente: $TO = RTT + \frac{ACK}{C} + 2E$, ma è complicato se non si conosce l'RTT.

Se TO fosse troppo corto, avrei rischio di ritrasmettere pacchetti già ricevuti e rischierei che ACK e MSG's potrebbero non corrispondere correttamente, quindi un'inconsistenza del protocollo.

SOLUZIONE : NUMERARE ANCHE GLI ACK

Assumendo una probabilità di perdita di un MSG pari a P , avrei:

$$P(\text{successo immediato}) = 1-p$$

$$P(\text{successo 2^e TX}) = p(1-p)$$

$$P(\text{successo 3^e TX}) = p^2(1-p)$$

Posso calcolare il THROUGHPUT come: $\text{thr} = \frac{\text{size of message}}{\mathbb{E}[\text{message delivery time}]} = \frac{\text{MSG}}{\mathbb{E}[\#\text{tx}] \cdot (\text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{C})}$

$$\mathbb{E}[\#\text{tx}] = \sum_{i=0}^{\infty} P^{i-1}(1-p) \cdot i = (1-p) \sum_{i=1}^{\infty} P^{i-1} \cdot i = (1-p) \cdot \frac{1}{(1-p)^2} = \frac{1}{1-p}$$

$$\Rightarrow \text{thr} = \frac{\text{MSG} (1-p)}{\text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{C}}$$

Se l'RTT è elevato
ho limiti di throughput

(2) PIPELINING (Tx CONTINUA):

Con un protocollo STOP & WAIT ho limiti di thr dovuti all'RTT: il problema è che invio un pacchetto e devo aspettare l'ACK.

→ INVIO PIÙ TRAME ($W > 1$) → Protocoli: SLIDING WINDOWS

REGOLA: NON PIÙ DI W messaggi "IN VOLO"

• Per avere TX CONTINUA: tempo di TX di \geq tempo TX di + RTT
 $\frac{W \cdot \text{MSG}}{\text{C}} \geq \text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{\text{C}}$

→ * CONDIZIONE DI TX CONTINUA:

$$W \cdot \frac{\text{MSG}}{\text{C}} \geq \text{RTT} + \frac{\text{MSG}}{\text{C}}$$

• Se ho TX CONTINUA \rightarrow $thr = C$, MA SOLO se NON considero HEADER nei pacchetti.

* In caso di header : Pacchetto = Header + Payload = H + P

Quindi :

$$thr = \min \left(\frac{W \cdot P}{RTT + \frac{(H+P)}{C}}, \frac{C \cdot P}{H+P} \right)$$

* Si mette il minimo perché NON HA SENSO superare la capacità massima, quindi il tempo di ciclo : $RTT + \frac{MSG}{C}$

Date le condizioni :

$$W \cdot \frac{MSG}{C} \geq RTT + \frac{MSG}{C}$$

Moltiplicando entrambi i membri per C :

$$\begin{aligned} W \cdot MSG &\geq C \cdot RTT + \cancel{MSG} \\ \Downarrow \\ W_{bit} &\quad \text{PRODOTTO BANDA-RITARDO} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Trescavibile se } W \text{ o RTT} \\ \text{molto grandi} \end{array}$$

$W_{bit} = W \cdot MSG = \# \text{ bit che posso tenere in valo}$

$$W_{bit} \approx C \cdot RTT$$

Ie PRODOTTO BANDA-RITARDO mi dice, in termini di bit, quanto deve essere grande la mia finestra di trasmissione (W) per poter avere un utilizzo vicino al 100% delle linee! In altre parole è numero di bit per saturare il canale.

PROTOCOLLO Go Back N

Se ho un ERRORE (in TX CONTINUA) e ricevo un NACK relativo ad un pacchetto, la mia SLIDING WINDOW si fermerà e ripartirà dall'inizio, ovvero ritrasmetterò quel pacchetto e TUTTI I SUCCESSIVI.

• SEQUENCE NUMBER : 6 bits $\rightarrow N = 2^6$ valori, si ripete modulo N (p.es. 0, 1, 2, ..., 7)

• FINESTRA DI TRASMISSIONE : $W \leq N-1$

lavoro con 2 puntatori

- pacchetto di cui sto aspettando è l'ACK
- pacchetto che sto trasmettendo

• PIGGYBACKING:

L'ACK rappresenta OVERHEAD sul canale di ritorno → viene EMBEDDATO su una trama di ritorno

Su ogni pacchetto c'è un # di sequenze che lo identifica e un # di ACK, che indica l'ultimo pacchetto ricevuto:

# seq.	# ACK	---
--------	-------	-----

• ATTENZIONE: l'ACK è CUMULATIVO!

• PROTOCOLLO SELECTIVE REPEAT (SR):

Aggiunge un tipo di ACK → SACK = Selective ACK → NON è CUMULATIVO

Se ricevo un NACK di un pacchetto, RITRASMETTO SOLO QUELLO:
per i successivi ricevuti li BUFFERIZZO e mando dei SACK; una volta ricevuto
l'ACK cumulativo che mi assicura di aver corretto tutto il precedente posso
riprendere e scorrere la FINESTRA da dove era rimasta.

→ Dovendo BUFFERIZZARE → Ho bisogno di una FINESTRA IN RICEZIONE
 W_R

Ho l'importante relazione:

$$W_S + W_R \leq N$$

Inoltre, la scelta ottimale è scegliere $W_S = W_R$.

NOTA: in GBN ho $W_R = 1$ e $W_S = N - 1$, poiché non ho bisogno di bufferizzare e mi basta una finestra di 1 pacchetto in RICEZIONE.

PROTOCOLLO HDLC

Protocollo di livello 2 (Datalink); fornisce i seguenti servizi:

- 1) Trasmissione di frame : FRAMING ;
- 2) Error detection e ritrasmissione ;
- 3) Controllo di flusso (NON presente in ETH e Wi-Fi).

• FRAMING: abbiamo a disposizione tutte le linee per noi: non ho più il PACCHETTO → divido le trame inserendo dei FLAG

• HDLC Frame Format:

FLAG (1B)	Address (1-m B)	Control (1-2 B)	INFORMATION (Variable)	FCS (2-4 B)	FLAG (1B)
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	----------------	--------------

• FLAG di HDLC: 0111 1110 = 0x7e

Per poter trasmettere il byte 0x7e come CONTENUTO, e non come FLAG, devo fare STUFFING:

1) BIT STUFFING:

Ogni volta che vedo cinque 1 consecutivi inserisco uno 0; comunque leggermente l'overhead non va bene.

Poi è compito del RICEVITORE fare DE-STUFFING:

· dopo aver letto 5 bit di 1:

- se leggo 0 → lo RIMUOVO
- se leggo 10 → è un FLAG
- se leggo 11 → ho un ERRORE



2) BYTE STUFFING:

Ogni volta che devo inserire il BYTE 0x7E come contenuto, lo faccio precedere dello byte 0x7D, che però a questo punto diventa anche lui riservato.

ESCAPE SYMBOL

Quando voglio inserire 0x7E oppure 0x7D, metto prima l'escape symbol 0x7D e poi 0x5E oppure 0x5D → cioè faccio lo XOR con 0x20

0010 0000

dB e dBm

- Decibel (dB): unità logaritmica dell'intensità; indice la POTENZA perde
o guadagnate tra 2 SEGNALI → E' UN RAPPORTO!

$$10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Se $P_A = 1 \text{ Watt}$, $P_B = 50 \text{ mW}$:

$$\rightarrow 10 \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_B} \right) = 10 \log_{10} (20) \approx 13 \text{ dB}$$

$\Rightarrow P_A = 13 \text{ dB}$ più grande di P_B

- dBm: valore assoluto della POTENZA, in rapporto al valore di riferimento di 1 mW :

$$\text{Power in dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Power}}{1 \text{ mW}} \right)$$

Esempi:

$$10 \text{ mW} = 10 \log_{10} \left(\frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{10^{-3} \text{ W}} \right) = 10 \text{ dBm}$$

$$100 \text{ mW} = 10 \log_{10} \left(\frac{100 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) = 20 \text{ dBm}$$

$$26 \text{ dBm} = \dots$$

Ragiono così:

$$3 \text{ dBm} \approx 10 \log_{10} (2) \rightarrow \text{aumentare di } 3 \text{ dBm vuol dire moltiplicare per 2}$$

$$10 \text{ mW} \rightarrow 10 \text{ dBm}$$

$$20 \text{ dBm} \rightarrow 100 \text{ mW}$$

$$23 \text{ dBm} \rightarrow 200 \text{ mW}$$

$$26 \text{ dBm} \rightarrow 400 \text{ mW}$$

$$\Rightarrow 26 \text{ dBm} = 400 \text{ mW}$$

$$2 \text{ W} = 10 \log_{10} \left(\frac{2 \text{ W}}{10^{-3} \text{ W}} \right) = -33,01 \text{ dBm}$$

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{segnalet}}}{P_{\text{rumore}}} = -3 \text{ dB} \rightarrow \text{vuol dire che il RUMORE è DOPPIO del SEGNALE}$$

\uparrow

SIGNAL - NOISE RATIO

- POTENZA TRASMESSA: in dBm

- POTENZA RICEVUTA: in dBm

- PATH LOSS: in dB. E' le potenze perdute:

$$\text{Loss} = \frac{P_r(d)}{P_t}$$

Reporto tra power received e power transmitted

Se lo voglio in dB, avrei un rapporto tra logaritmi che divente differenze:

$$\text{Loss [dB]} = P_r [\text{dBm}] - P_t [\text{dBm}]$$

- DISTANZA DI RIFERIMENTO:

Se so i parametri delle potenze ricevute e distanze d_0 , posso conoscerli a qualsiasi distanza d :

$$P_r(d) = \text{costante} \cdot \frac{1}{d^2} \quad ; \quad P_r(d_0) = \text{costante} \cdot \frac{1}{d_0^2}$$

MA E' LA STESSA COSTANTE! I guadagni d'antenne, le frequenze, etc. sono costanti

$$\rightarrow \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} = \frac{d_0^2}{d^2} \rightarrow P_r(d) = P_r(d_0) \cdot \frac{d_0^2}{d^2} \rightarrow \text{in SCALA NORMALE}$$

Im dBm:

$$P_r(d) [\text{dBm}] = P_r(d_0) [\text{dBm}] + 20 \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)$$

In realtà, le Potenze non scende come $1/d^2$, bensì come $1/d^\eta$:

$$P_r(d) \propto d^{-\eta} \quad , \quad \text{con } 3,5 \leq \eta \leq 4,1 \text{ in genere}$$

Quindi:

$$P_r(d) [\text{dBm}] = P_r(d_0) [\text{dBm}] + 20 \eta \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)$$

$$L_p = 20 \eta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

E' il 2° addendo cambiato di segno

Maggiore è il PATH LOSS,
maggiorre è la perdita e
e' ATTENUAZIONE

CELLA RADIO

Come determiniamo una cella radio?

Date la Potenza Trasmessa P_t [dBm] ed una Potenza di Soglia P_{th} [dBm], che mi definisce la minima potenza da ricevere per performance accettabili, posso calcolare il PATH LOSS come:

$$L_p [\text{dB}] = P_t [\text{dBm}] - P_{th} [\text{dBm}]$$

E tramite le η -law propagation formulae posso trovare il raggio R della cella a cui sento una potenza P_{th} :

$$P_r(10\text{mt}) = 0,1 \text{W} ; P_{th} = -50 \text{dBm} ; \eta = 3,7$$

$$\Rightarrow P_r(10\text{mt}) = 0,1 \text{W} = 10 \log_{10} \left(\frac{10^2 \text{W}}{10^{-3} \text{W}} \right) = 20 \text{dBm} \quad \text{Ho invertito il segno}$$

$$P_{th} = -50 \text{dBm} = P_r(R) [\text{dBm}] = P_r(10\text{mt}) [\text{dBm}] - 10\eta \log_{10} \left(\frac{R}{10\text{mt}} \right)$$

$$\Rightarrow -50 \text{dBm} = 20 \text{dBm} - 37 \log_{10} \left(\frac{R}{10\text{mt}} \right)$$

$$\Rightarrow 10^{\frac{70}{37}} = \frac{R}{10\text{mt}} \Rightarrow R = 10 \cdot 10^{\frac{70}{37}\text{mt}} = \boxed{779,63 \text{ m}} \approx 780 \text{ m}$$

* MA purtroppo non è proprio così: a distanza $R = 780 \text{ m}$ non sentirei -50dBm , è solo un VALOR MEDIO → il 50% del tempo non riesco a demodulare peccetti!

Cio' è dovuto alle FLUTTUAZIONE STATISTICA delle POTENZA (FADING), causate da varie interferenze di segnale; shadowing, riflessione del segnale, diffrazione, scattering, ...

Ci sono due tipi di FADING:

- 1) SLOW FADING: quando la distanza tra BS e MS è dell'ordine dei km;
- 2) FAST FADING: quando la distanza tra BS e MS è dell'ordine dei metri.

* IL VALOR MEDIO ad una distanza d si calcola con i MODELLI DI ATTENUAZIONE ($\propto d^{-n}$) ed è DETERMINISTICO!

Poi bisogna sommare i MODELLI STATISTICI dello SLOW FADING

DISTRIBUZIONE
GAUSSIANA
LOGARITMICA

MODELLIZZAZIONE DENO Slow FADING

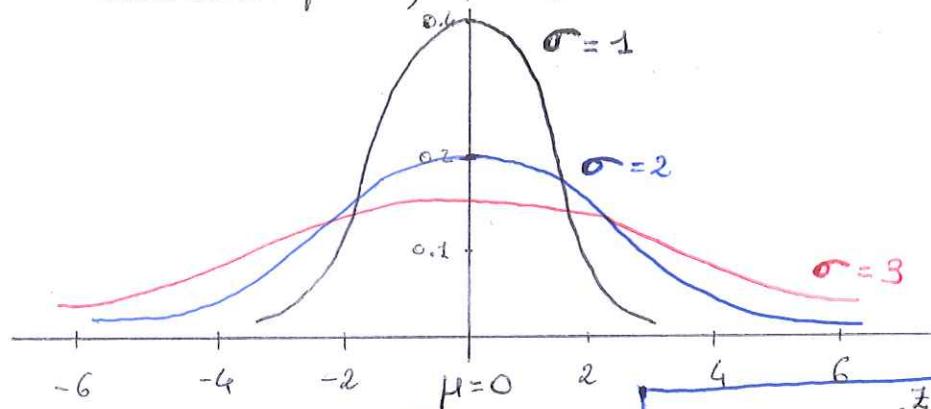
$$P_r(d) = \underbrace{10 \log_{10} (P_r(d_0)) + 10 \eta \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right)}_{\text{DETERMINISTIC } (\propto d^{-\eta})} + Y$$

VARIABILE ALEATORIA

Y è una VARIABILE ALEATORIA GAUSSIANA, uscita in SCALA LOGARITMICA, poiché lo shadowing è misurato in dB.

Ho una DEVIAZIONE STANDARD σ_{dB} .

Standard: valor medio $\mu = 0$, $\sigma = 1$.



Densità:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

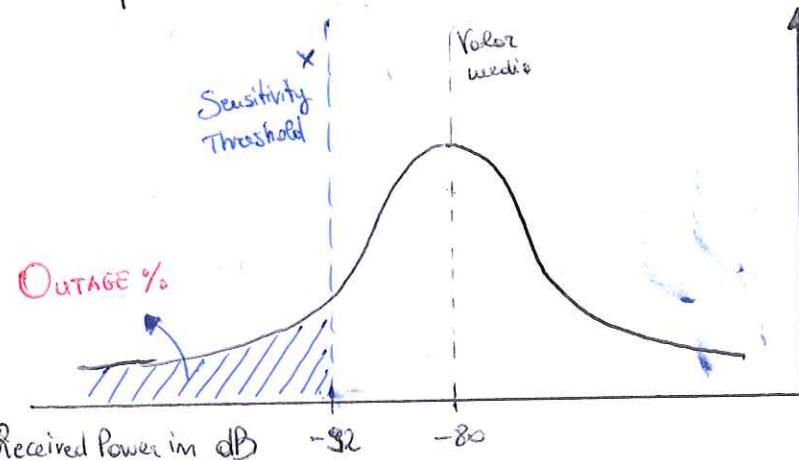
$$P(X \leq z) = \int_{-\infty}^z f_X(x) dx$$

- Nel nostro caso $\mu = 0$; Più è grande σ e più ho probabilità di DEVIARE dal valor medio.

PROBABILITÀ DI OUTAGE:

E' la probabilità di essere fuori servizio: avviene quando

$$P_{\text{ric}} < P_{\text{th}}$$



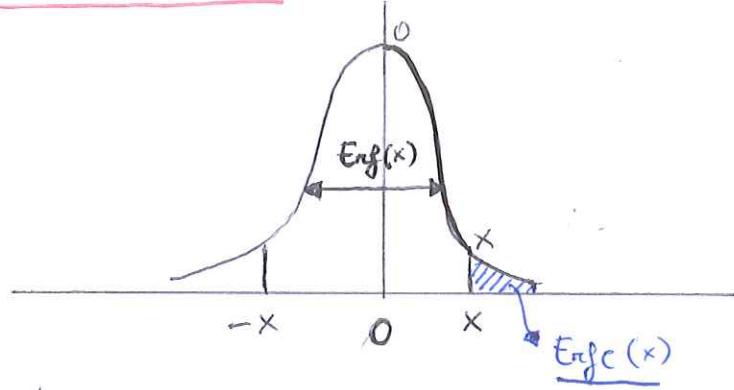
- Il Valor medio -80 dBm lo ottengo con il MODELLO DI ATTENUAZIONE

$$\bullet P(\text{outage}) = P(\text{Pot. ricevuta} \leq -82 \text{ dB})$$

ERROR FUNCTION (Erf / Erfc)

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$



Vediamo cos'è $\operatorname{erf}(x)$; il 2 davanti è l'integrale lo si usa per integrare da $-x$ a x , poiché la funzione è simmetrica:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x e^{-t^2} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2(\frac{1}{\sqrt{2}})^2}} dt$$

$$e^{-t^2} = e^{-\frac{t^2}{2}} =$$

$$= e^{-\frac{t^2}{2 \cdot (\frac{1}{\sqrt{2}})^2}}$$

La GAUSSIANA era: $P(|Y| \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \cdot \int_{-x}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

→ Basta prendere $\mu=0$, $\sigma = 1/\sqrt{2}$.

L' $\operatorname{erf}(x)$ è una GAUSSIANA con DEVIAZIONE STANDARD $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

CALCOLO DELL'OUTAGE:

$$P_{\text{out}} = \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{2}$$

1) Converto la distribuzione normale:

$$\gamma = \frac{P_{\text{th}} - P_{\text{on}}}{\sqrt{2} \sigma_{\text{dB}}} < 0$$

DIVIDO ANCHE PER $\sqrt{2}$!

$$g = -\gamma > 0$$

2) Velutare la probabilità di stare in $[-g; g]$: $\operatorname{Prob.}[-g; g] = \operatorname{erf}(g) = -\operatorname{erf}(-g)$

3) P_{out} lo trovo dividendo per 2 la prob. di stare in $[-g; g]$ complementata

$$P_{\text{out}} = \frac{\operatorname{erfc}(g)}{2}$$

• Esempio:

$$P_{\text{av}} = -78 \text{ dBm} ; P_{\text{th}} = -81 \text{ dBm} ; \sigma_{\text{dB}} = 5,6 ;$$

Qual è la probabilità di outage?

$$\gamma = \frac{P_{\text{th}} - P_{\text{av}}}{\sqrt{2} \cdot \sigma} = \frac{-13 \text{ dBm}}{\sqrt{2} \cdot 5,6 \text{ dB}} = -1,64 \Rightarrow g = 1,64$$

$$P_{\text{out}} = \frac{\text{erfc}(\gamma)}{2} = \frac{0,020}{2} = 0,01 = 1\%$$

• FADING MARGIN:

Si definisce margine di FADING ricevute a BORDO CELLA meno le Potenze di Soglia, entrambe in dBm.

$$M = P_r(R) - P_{\text{th}}$$

(in dB), come le Potenze

• Esempio:

$$P_r(\text{out}) = 0,1 \text{ W} = 10 \text{ mW} ; P_{\text{th}} = -50 \text{ dBm} ; M = 3,7$$

3) Se usiamo un FADING MARGIN $M = 6 \text{ dB}$, quel è il raggio delle celle?

$$P_r(R) = P_r(\text{out})_{[\text{dBm}]} - 20 \gamma \log_{10} \left(\frac{R}{10 \text{ mW}} \right) = P_{\text{th}} + M$$

$$\Rightarrow 20 \text{ dBm} - 3,7 \log_{10} \left(\frac{R}{10 \text{ mW}} \right) = -50 \text{ dBm} + 6 \text{ dBm}$$

$$\Rightarrow \frac{R}{10 \text{ mW}} = 10^{\frac{64}{3,7}} \Rightarrow R = 10 \cdot 10^{\frac{64}{3,7} \text{ mW}} = 536,63 \text{ mW}$$

2) Se $\sigma_{\text{dB}} = 4 \text{ dB}$, quel è P_{out} a BORDO CELLA?

$$P_{\text{out}}(R) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_r(R) - P_{\text{th}}}{\sqrt{2} \sigma_{\text{dB}}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{M}{4\sqrt{2} \text{ dB}} \right) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{3}{2\sqrt{2}} \right) = 0,866$$

$$0,866 = \frac{0,1338}{2} = 0,0669 = 6,69\%$$

• Esempio:

$$P_r(\text{out}) = 20 \text{ dBm} ; P_{\text{th}} = -50 \text{ dBm} ; M = 3,7 ; \sigma_{\text{dB}} = 4 \text{ dB}$$

Per avere $P_{\text{out}} = 2\%$ che raggio R e che fading margin M devo avere?

$$P_{\text{out}} = 0,02 = \frac{\text{erfc} \left(\frac{M}{\sqrt{2} \sigma} \right)}{2} \Rightarrow \text{erfc} \left(\frac{M}{\sqrt{2} \sigma} \right) = 0,04 \xrightarrow{\text{Tabelle}} \frac{M}{\sqrt{2} \cdot 4 \text{ dB}} = 1,45$$

$$\Rightarrow M = \sqrt{2} \cdot 4 \text{ dB} \cdot 1,45 = 8,20 \text{ dB}$$

$$20 \text{ dBm} - 3,7 \log_{10} \left(\frac{R}{10 \text{ mW}} \right) = -50 \text{ dBm} + 8,20 \text{ dB} \Rightarrow R = 10 \cdot 10^{\frac{63,8}{3,7} \text{ mW}} = 467,8 \text{ mW}$$

Esercizio:

- Shadowing lognormale, $\sigma_{dB} = 5 \text{ dB}$
- User outage: 2% @ 400 m; 80% @ 1000 m
- Attenuation law: $d^{-\eta}$

CALCOLARE η ?

$$P_{out} = 0,02 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r(400 \text{ m}) - P_{th}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{dB}} \right) \Rightarrow \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r(400) - P_{th}}{5\sqrt{2} \text{ dB}} \right) = 0,04$$

TABELLA

$$\frac{P_r(400) - P_{th}}{5\sqrt{2} \text{ dB}} = 1,45 \Rightarrow P_r(400 \text{ m}) - P_{th} = 10,27 \text{ dB}$$

$$P_{out} = 0,80 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r(1000) - P_{th}}{\sqrt{2} \cdot 5 \text{ dB}} \right) \Rightarrow$$

Outage pari ad 80% vuol dire che $P_{th} < P_r(1000)$; Per avere una x positiva, devo invertire e calcolare la probabilità di complemento 20%

$$\rightarrow P_{out} = 0,20 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th} - P_r(1000)}{5\sqrt{2} \text{ dB}} \right) \Rightarrow \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th} - P_r(1000)}{5\sqrt{2} \cdot 5 \text{ dB}} \right) = 0,40$$

TABELLA

$$\rightarrow P_{th} - P_r(1000) = 5\sqrt{2} \text{ dB} \cdot 0,59 = 4,17 \text{ dB}$$

$$\rightarrow P_r(400) - P_{th} + P_{th} - P_r(1000) = (10,27 + 4,17) \text{ dB} = \underbrace{14,44 \text{ dB}}$$

$$L_p = 20 \eta \log_{10} \left(\frac{1000 \text{ m}}{400 \text{ m}} \right) = 14,44 \text{ dB}$$

$$\rightarrow \eta \cdot \log_{10} \left(\frac{5}{2} \right) = 1,444 \text{ dB} \Rightarrow \boxed{\eta = 3,62}$$

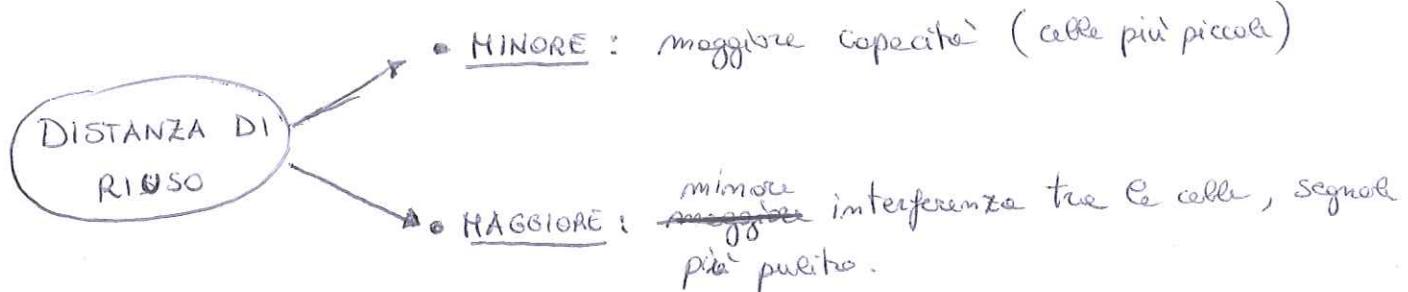
COPERTURA CELLULARE

Anziché avere un'unica grande cella radio, è meglio avere più celle con più stazioni base, vere più piccole, assegnando ad ogni cella gruppi di frequenze diverse.

Ovviamente, per poter coprire tutte le zone, ci sarà un pattern ripetuto delle celle, detto CLUSTER; così facendo, AUMENTO LA CAPACITÀ e RIDUCO LA POTENZA di TX.

Tuttavia bisogna gestire l'HANDOVER, cioè il movimento degli utenti.

- DISTANZA DI RIUSO: distanza tra celle con lo stesso gruppo di frequenze



Bisogna trovare il giusto compromesso

- PATTERNS DI RIUSO:

Se la GEOMETRIA è REGOLARE, la distanza di riuso D dipende solo dalle dimensioni del CLUSTER K ; in particolare:

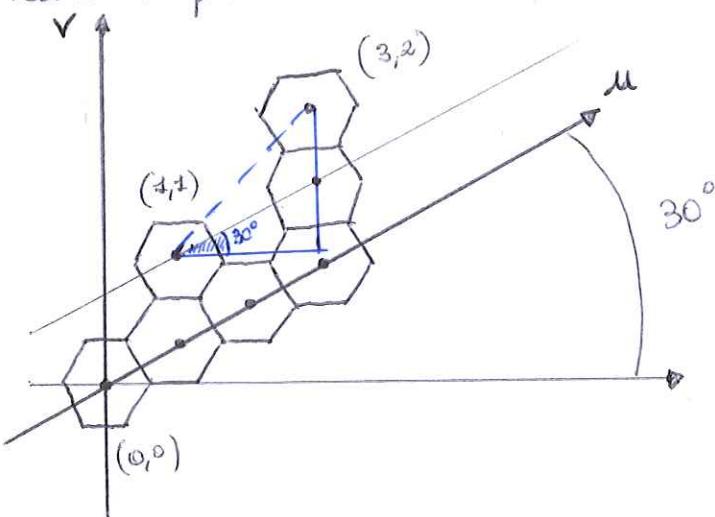
$$D = R \cdot \sqrt{3K}$$

dove R è il RAGGIO CERCA.

Si definisce FATTORE DI RIUSO le distanze di riuso normalizzate rispetto al raggio altre e dipendente solo da K :

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3K}$$

Vediamo il perché: consideriamo delle COORDINATE OBLIQUE (30°):



Assumiamo di avere 2 celle (u_1, v_1) e (u_2, v_2) : calcoliamo le distanze:

$$D = \sqrt{[(u_2 - u_1) \cos 30^\circ]^2 + [(v_2 - v_1) + (u_2 - u_1) \sin 30^\circ]^2}$$

per il Teorema di Pitagora.

Svolgendo:

$$D = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + 2(u_2 - u_1)(v_2 - v_1) \sin 30^\circ} = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2 + 2\Delta u \Delta v} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Sono TUTTI} \\ \text{NUMERI INTERI} \end{array}$$

Quindi, calcolando le distanze di tutte le celle (i, j) dalla cella $(0, 0)$:

$$D = \sqrt{i^2 + j^2 + ij} \cdot \left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} R\right) \text{ considerando anche il raggio delle celle che volano.}$$

↑
2. Apotema

$$\Rightarrow D = \sqrt{i^2 + j^2 + ij} \cdot \sqrt{3} R$$

$$D_R = \sqrt{i^2 + j^2 + ij}, \text{ con } R = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

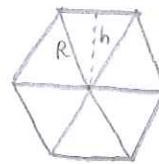
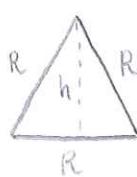
Quindi:

CLUSTER: $K = D_R^2 = i^2 + j^2 + ij$ e dunque $D = \sqrt{3k} \cdot R$

- ATTENZIONE: essendo che $i = j$ sono INTERI, non tutti i cluster sono possibili, ma solo:

$$k \in \{1, 3, 4, 7, 12, 9, 13, \dots\}$$

FORMULE:



$$h = \sqrt{R^2 - \frac{R^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2} R$$
$$A_{\text{eseg}} = 6 \cdot \left(\frac{R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} R}{2} \right) = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2$$

Co-CHANNEL INTERFERENCE (CCI)

CO-CHANNEL INTERFERENCE (CCI): somme delle interferenze delle celle che usano le stesse frequenze.

Si considerano solo le celle del 1° anello \rightarrow Con geometria esagonale sono sempre 6

• (SNR): Signal to Noise Ratio: $\frac{S}{N} = \frac{\text{Signal Power (S)}}{\text{Noise Power (Ns)} + \text{Interfering Signal Power (I)}}$

Se Ns è trascurabile:

$$\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{\text{Signal Power (S)}}{\text{Interfering Signal Power (I)}}$$

* Aumentando la Potenza trasmessa P_t , il rapporto non cambia, ma Ns diventa trascurabile.

ASSUNZIONI:

- 1) Consideriamo solo il 1° quello di tutti interferenti: $N_I = 6$, per gesur esponenz;
- 2) N_s trascurabile: $\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I}$;
- 3) Legge di propagazione $d^{-\eta}$, in genere con $\eta \approx 4$;
- 4) Le Stazioni Radio Base (BS) hanno tutti gli stessi parametri, P_{Tx} , quando d'antenne, etc...;
- 5) Segnale per le stazioni mobile e bordo celle, quindi MS è raggiro R di distanze da BS;
- 6) Distanze dalle BS interferenti pari a $D =$ distanze di riuso.

$$\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I} = \frac{\text{cost.} \cdot R^{-\eta}}{\sum_{k=1}^{N_I} \text{cost.} \cdot D^{-\eta}} = \frac{1}{N_I} \left(\frac{R}{D} \right)^{-\eta} = \frac{1}{N_I} \left(\frac{D}{R} \right)^{\eta} = \frac{1}{N_I} q^{\eta}$$

→ Il risultato dipende solo del Frequency Reuse Factor q .

$$\text{Ricordando che: } D = \sqrt{3k} \cdot R \Rightarrow q = \frac{D}{R} = \sqrt{3k}$$

$$\Rightarrow \frac{S}{N} \approx \frac{1}{N_I} q^{\eta} = \frac{1}{N_I} (\sqrt{3k})^{\eta} = \frac{1}{N_I} (3k)^{\eta/2}$$

Quindi:

$$\boxed{\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I} = \frac{1}{N_I} (3k)^{\eta/2}}$$

• Dato il CCI, quindi il SNR → Posso conoscere la dimensione del CLUSTER K !

Esempio 1:

TARGET CONDITIONS: $\frac{S}{I} = 9 \text{ dB}$; $\eta = 4$

$$\frac{S}{I} = 9 \text{ dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{I} \right) \Rightarrow \frac{9}{10} = \log_{10} (9 \text{ dB}) \Rightarrow \frac{S}{I} = 10^{\frac{9}{10}} = 7,94 \approx 8$$

$$\frac{S}{I} = \frac{(3k)^{\eta/2}}{N_I} \quad \begin{cases} \eta=4 \\ N_I=6 \end{cases} = \frac{(3k)^2}{6} = \frac{3}{2} k^2 \Rightarrow k = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{S}{I}} = \sqrt{\frac{16}{3}} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \approx 2,30$$

$$\rightarrow k \approx 2,30 \Rightarrow \boxed{k=3}$$

Esempio 2 (in dB):

$$\text{TARGET CONDITIONS} = \frac{S}{I} = 18 \text{ dB} ; \eta = 4,2$$

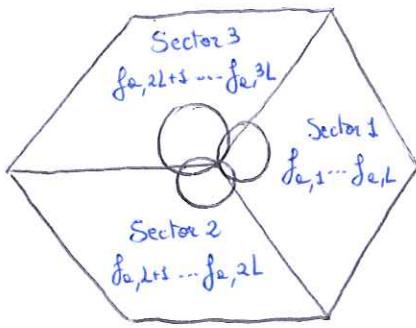
$$\frac{S}{I} [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{(3k)^{\eta/2}}{6} \right) = 10 \log_{10} ((3k)^{\eta/2}) - 10 \log_{10} (6) = \\ = 5\eta \log_{10} (3k) - 10 \log_{10} (6)$$

$$\Rightarrow 5\eta \log_{10} (3k) = 18 \text{ dB} + 10 \log_{10} (6)$$

$$\Rightarrow \log_{10} (3k) = \frac{25,48 \text{ dB}}{5 \cdot 4,2} = 1,227 \text{ dB} \Rightarrow k = \frac{1}{3} \cdot 10^{1,227} = 5,62$$

$$\Rightarrow k > 5,62 \Rightarrow \boxed{k=7}$$

SETTORIZZAZIONE



Ogni cella viene divisa in SETTORI con ANTENNE DIREZIONALI e ogni settore usa FREQUENZE DIVERSE:

- così diminuisce l'interferenza di bordo del settore
- Settorizzazione riduce il numero di interferenti N_I , quindi RIDUCE IL CCI e AUMENTA IL SNR;
- CONTRO: aumenta la gestione dell'handover

CELLE TRISSETTORIZZATE:

$$\boxed{N_I = 2}$$

$$\left[\frac{S}{I} \right]_{120^\circ} = \frac{R^{-\eta}}{2D^{-\eta}} = 3 \cdot \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}}$$

I_m dB:

$$\left[\frac{S}{I} \right]_{120^\circ} \text{dB} = \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}} \text{dB} + 10 \log_{10} (3) \text{ dB} = \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}} \text{dB} + 4,77 \text{ dB}$$

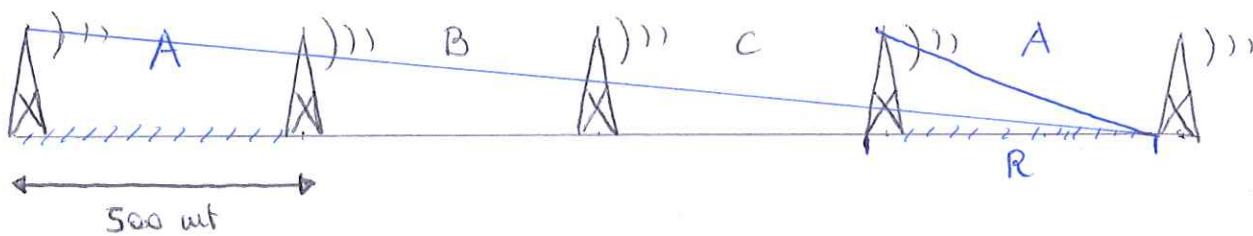
$$\rightarrow \boxed{3 \text{ SETTORI} = 4,77 \text{ dB IMPROVEMENT}}$$

Esercizio (Topologie Difficili!)

Un operatore radiomobile deve coprire un percorso autostradale con stazioni distanti 500 ut tra loro. Il segnale si ottiene come $d^{-\eta}$, con $\eta=3$. È necessario impostare un rapporto segnale / interferenza maggiore o uguale a 19 dB.

Nelle ipotesi di CELLE SETTORIALI (anteerne trasmettono in un'unica direzione), quante FREQUENZE occorrono per coprire il tratto autostradale?

* GEOMETRIA LINEARE



$$P_{TX} \propto d^{-\eta}, \eta=3 ; \frac{S}{I} \geq 19 \text{ dB}$$

$$\text{CCI} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{interference}}} = \frac{\text{cost} \cdot R^{-\eta}}{\text{cost} \cdot [(\# \text{fr.} + 1) \cdot R^{\eta}]^{\frac{1}{\eta}}} = \frac{R^{-\eta}}{R^{\eta} (\eta+1)^{\frac{1}{\eta}}} = (\eta+1)^{-\frac{1}{\eta}}$$

Poiché la distanza delle celle interferente precedente è di
 $\# \text{ celle diversi} = \# \text{ frequenze}$
più c'è l'intera celle ripetute, in quanto le CCI si calcola a BORDO CELLA

dove $R = \text{raggio cella} = \text{dist. tre antenne} = 500 \text{ ut}$

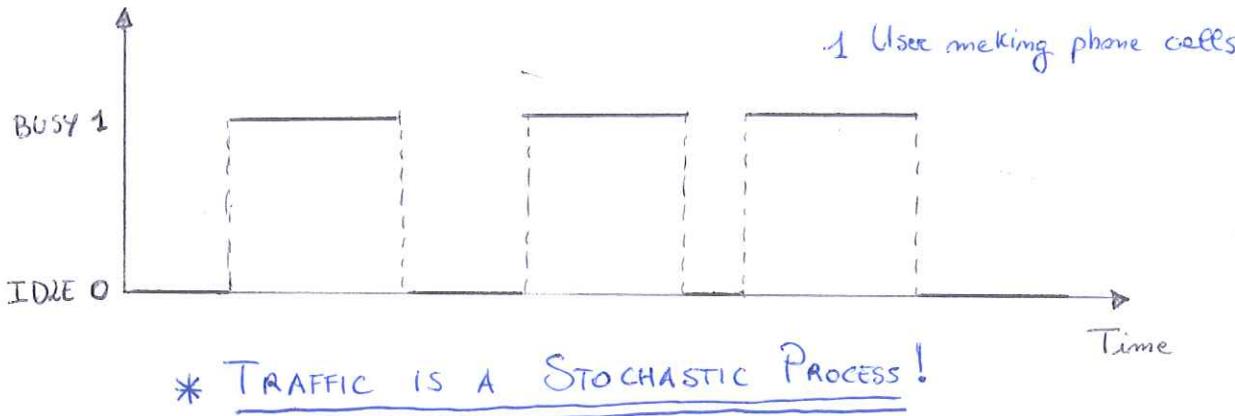
Ora: $\text{CCI} \geq 19 \text{ dB}$, quindi:

$$(\eta+1)^{-\frac{1}{\eta}} = 10^{\frac{19}{10}} \log_{10} (\eta+1) \geq 19 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow \eta \geq 10^{\frac{19}{10}} - 1 = 3,298 \Rightarrow \boxed{\eta = 4}$$

OK!!!

BASIC TELETRAFFIC CONCEPTS



• CARATTERIZZAZIONE DEL TRAFFICO :

Definiamo l'INTENSITÀ DI TRAFFICO:

$$1) \quad A_i = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\text{duration of busy time in } \Delta t}{\Delta t}$$

$$2) \quad A_i = \boxed{\lambda \cdot \tau} \quad , \text{ dove } \lambda = \# \text{ chiamate nell'unità di tempo } \Delta t \quad \tau = \text{durezza media delle chiamate in } \Delta t$$

- 3) $A_i = \text{Probabilità che, in un tempo RANDOMICO } t, \text{ l'utente sia in stato BUSY}$
- 4) $A_i = E[\text{Processo Stocastico}]$, valore medio.

* Le equivalenze valgono Solo se il TRAFFICO È STAZIONARIO, cioè non dipende dal punto delle giornate, ma è costante tutto il giorno.

Per esempio: 1 chiamata per ora delle durezze medie di 120 secondi:

$$\rightarrow \lambda = \frac{1}{60 \text{ min}} = \frac{1}{3600 \text{ s}} ; \quad \tau = 120 \text{ s}$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{1}{3600 \text{ s}} \cdot 120 \text{ s} = \frac{1}{30} \text{ Erl} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Unità di Misura: ERLANG} \\ \text{ma è ADIMENSIONALE} \end{array}$$

• PIÙ DI 1 UTENTE:

Se per un utente avrei 2 stati (idle e busy), per N utenti avrò (N+1) stati! se sono attivi 0, 1, ..., N utenti.

Consideriamo un istante di tempo randomico t. Quale è la PROBABILITÀ di trovare K utenti attivi?

Supponiamo che $N=4$; ogni utente ha probabilità di essere

$$\left. \begin{array}{l} \text{ATTIVO} = A_i \\ \text{INATTIVO} = 1 - A_i \end{array} \right\}$$

- $P(0) = (1-A_i)(1-A_i)(1-A_i)(1-A_i) = (1-A_i)^4$
- $P(1) = 4 A_i (1-A_i)^3$
- $P(2) = \binom{4}{2} A_i^2 (1-A_i)^2 = 6 A_i^2 (1-A_i)^2$
- $P(3) = 4 A_i^3 (1-A_i)^3$
- $P(4) = A_i^4$

E' chiaro che è una **DISTRIBUZIONE BINOMIALE**:

$$P[k \text{ active calls}] = \binom{N}{k} A_i^k (1-A_i)^{N-k}$$

$$E[\text{active calls}] = N \cdot A_i := A \rightarrow \text{VALORE MEDIO DELLE CHIAMATE ATTIVE}$$

Esempio:

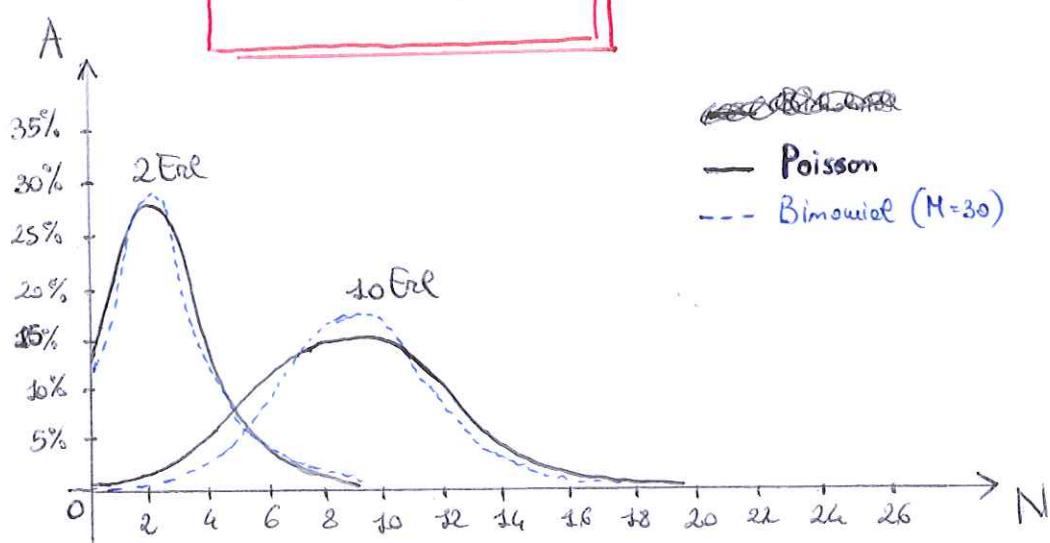
$$N = 30 \text{ utenti} ; \lambda = \frac{\text{1 call}}{\text{1 h}} ; \tau = 4 \text{ min}$$

$$A_i = \lambda \cdot \tau = \frac{1}{60 \text{ min}} \cdot 4 \text{ min} = \frac{1}{15} \text{ Erl / utente}$$

$$A = N \cdot A_i = 30 \cdot \frac{1}{15} \text{ Erl} = 2 \text{ Erl} \rightarrow \text{MEDIAMENTE, ho 2 utenti attivi!}$$

Quando il numero degli utenti N è molto alto ($N \rightarrow +\infty$) si ha una BUONA APPROSSIMAZIONE con una **DISTRIBUZIONE DI POISSON**:

$$P_k(A) = \frac{A^k}{k!} e^{-A} \quad , \text{ dove } A := \text{TRAFFICO OFFERTO MEDIO}$$



NUMERO LIMITATO DI CANALI

Cosa succede se il numero di canali C è minore del numero di utenti M ?

→ C'è Possibilità di blocco;

Assunzione: Blocked Calls Cleared: le chiamate vengono bloccate senza essere riprovate.

Probabilità di blocco = $P[\text{block}] = P[C \text{ accepted calls}]$

Conosciamo una formula per il TRAFFICO OFFERTO: $P[k \text{ offered calls}]$;

dobbiamo trovare un'espressione per il TRAFFICO ACCETTATO $P[k \text{ ACCEPTED calls}]$.

Si può dimostrare, tramite Teoria delle Code, che:

$P[k \text{ calls accettate}] \propto P[k \text{ calls offerte}] \cdot \text{costante}$,
cioè RISCALATO.

Si dimostra che:

$$P[k \text{ calls in the system}, k \in \{0, C\}] = \frac{P[k \text{ offered calls}]}{\sum_{i=0}^C P[i \text{ offered calls}]}$$

Quindi:

$$P[\text{full system}] = P[C \text{ accepted calls}] = \frac{P[C \text{ offered calls}]}{\sum_{i=0}^C P[i \text{ offered calls}]}$$

→ DISTRIBUZIONE DI ERLANG

È una DISTRIBUZIONE DI POISSON "tranciata" e riscalata (NORMALIZZATA)

Esplicitando i conti:

$$P(k \text{ calls accettate}) = \frac{P(k \text{ utenti offerti})}{\sum_{i=0}^C P(i \text{ utenti offerti})} = \frac{\frac{A^k}{k!} \cancel{\times}^k}{\sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!} \cancel{\times}^k}$$

$$\Rightarrow P(k \text{ utenti accettati}) = \frac{A^k / k!}{\sum_{i=0}^C (A^i / i!)}$$

• Blocking Probability \rightarrow ERLANG-B :

$$P(\text{blocco}) = P(C \text{ utenti accettati}) = \frac{\frac{A_o^c}{c!}}{\sum_{i=0}^c \left(\frac{A_o^i}{i!} \right)} = E_{1,c}(A_o)$$

dove ; $A_o := \text{TRAFFICO OFFERTO MEDIO}$.

Quindi :

$$\Pi_{\text{block}} = \frac{\frac{A_o^c}{c!}}{\sum_{i=0}^c \left(\frac{A_o^i}{i!} \right)} = E_{1,c}(A_o)$$

FORMULA DI
ERLANG-B

• GRADE OF SERVICE (GOS) :

Vogliamo avere come TARGET di supportare gli utenti con un certo GRADO DI SERVIZIO (GOS), cioè un upper-bound per la PROBABILITÀ DI BLOCCO.

Dati : C canali , traffico OFFERTO A_o e un GOS target B :

$$B(A_o, c) = E_{1,c}(A_o) \rightarrow \text{Tabelle Erlang-B}$$

\Rightarrow Posso ottenere C conoscendo A_o e un target di blocco B dalle Tabelle inverse!

• Esempio:

$C=16$; $GOS = B \leq 1\%$ in condizioni normali.

$A_o = 1,35 \cdot A_o = 11,88 \text{ Erl} \approx 12 \text{ Erl}$

Durante una partita si prevede un INCREMENTO di TRAFFICO OFFERTO del 35%.

Durante una partita si prevede un INCREMENTO di TRAFFICO OFFERTO del 35%.

1) Se l'operatore non facesse nulla , quale sarebbe $P[\text{perdite}]$?

Tabelle Erl-B : $(C=16, B=0,01) \rightarrow A_o = 8,875 \text{ Erl}$

\Rightarrow In festa : $A_o' = 1,35 \cdot A_o = 11,88 \text{ Erl} \approx 12 \text{ Erl}$

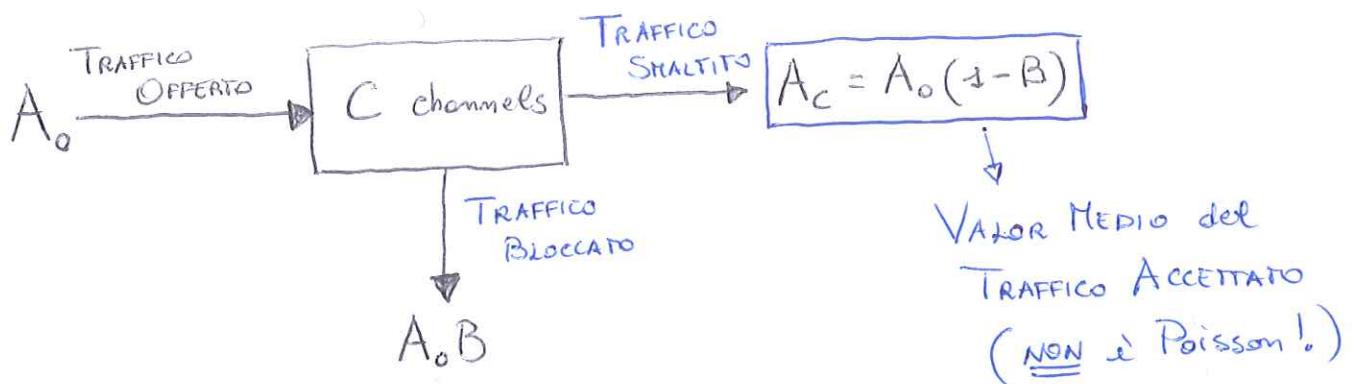
Tab. Erl-B : $(C=16, A_o = 12 \text{ Erl}) \rightarrow P[\text{perdite}] = B' = 0,0604 = 6,04\%$

2) Quanti canali aggiungere per mantenere $GOS \leq 1\%$?

Tab. Erl-B diretta : colonna 12 Erl \rightarrow scendo fin quando non arrivo a meno di 0,01

\Rightarrow ottengo $C' = 20$, \Rightarrow # canali supplementari = $C' - C = 4$

• CHANNEL USAGE EFFICIENCY:



- EFFICIENZA: Traffico SHALTATO su CAPACITA':

$$\boxed{\eta = \frac{A_c}{C} = \frac{A_o(1 - E_{1,C}(A_o))}{C}}$$

Se le probabilità di blocco è molto bassa ($B = E_{1,C}(A_o)$) : $\eta \approx \frac{A_o}{C}$, cioè il rapporto tra il valor medio del numero di utenti e le capacità (numero di canali) del sistema.

Esempio Precedente: $A_o^1 = 12 \text{ Erl} \Rightarrow A_c^1 = A_o^1(1 - B^1) = 12 \text{ Erl} (1 - 0,06) = \underline{11,28 \text{ Erl}}$

• Esercizio:

$$P_{perdite} = B = 3\% ; \eta = 48,34\%$$

1) Quanti operatori sono assunti nel call center ($C = ?$)?

$$\eta = \frac{A_s}{C} = \frac{A_o(1 - B(A_o, C))}{C} = 0,4834$$

Devo ANDARE A TENTATIVI, perché non conosco A_o e non conosco C :

$$\begin{cases} A_o \cdot 0,97 = C \cdot 0,4834 \\ B(A_o, C) = 0,03 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} A_o = 0,4833 C \\ B = 0,03 \end{cases}$$

Tabelle Erl-B inverse: colonna $B = 0,03$, scendo fino a trovare A_o e C tali

che A_o sia poco meno del 50% di C :

$$\rightarrow C = 8, A_o = 3,9865 \text{ Erl} ; \text{ infatti: } \frac{A_o}{C} = 0,4823 \rightarrow \underline{\text{ok!}} \Rightarrow \boxed{C=8}$$

2) Quel è la riduzione delle duree medie di chiamata che permetterebbe al gestore di licenziare un operatore, mantenendo lo stesso GOS del 3%?

$$C = 4 ; A_o = \lambda \cdot \tau \quad \text{Tabelle Iuri: } (C=4, B=0,03) \rightarrow A_o^1 = \frac{\lambda \cdot \tau^1}{\lambda} = 3,2487 \text{ Erl}$$

$$\Rightarrow \frac{A_o^1}{A_o} = \frac{\lambda \cdot \tau^1}{\lambda \cdot \tau} = \frac{\tau^1}{\tau} = \frac{3,2487}{3,9865} = 0,815 \Rightarrow 1 - 0,815 = 0,185 \Rightarrow \boxed{1,85\%}$$

Riduzione di τ

3) Rimuendo nel caso (1), quanti operatori complessivamente potrebbero essere licenziati, mantenendo un GOS = 3%, se R gestore AGGREGASSE il traffico di 3 CALL CENTER SITIZI?

$$A_0 \approx 4 \text{ Erl}; C = 8; B = 0,03$$

$$\text{Sommando 3, otteni: } C = 24, A_0 = 12 \text{ Erl} \rightarrow \underline{B = 0,00079}$$

$$\text{Per avere } B = 0,03 \text{ con } A_0 = 12 \text{ Erl} \rightarrow C = 18$$

$$\Rightarrow \# \text{ licenziabili} = 24 - 18 = \boxed{6}$$

INGLOBARE AIUTA!

Esercizio:

$$C = 252 \text{ channels}, \text{ densità} = S = 80 \text{ Erl} / \text{Km}^2; \text{ GOF} = B \leq 2\%$$

Attenuazione come $d^{-\eta}$, con $\eta = 3,4$. BS's TRISETTORIZZATE.

1) A che distanza H bisogna posizionare 2 BS's ADIACENTI, garantendo un CCI $\geq 14 \text{ dB}$?

$$14 \text{ dB} = 10 \log_{10} (\text{CCI}) \Rightarrow \text{CCI} = 10^{14/10} = 25,12$$

$$\text{CCI} = \frac{(3k)^{\eta/2}}{N_I} = \frac{1}{2} \cdot (3k)^{1.7} \geq 25,12 \Rightarrow (3k)^{1.7} \geq (50,24)^{10} \Rightarrow k \geq \frac{1}{3} \cdot (50,24)^{10/1.7} = 3,33$$

$$\Rightarrow \boxed{k=4} \rightarrow 252 \text{ frequenze in TOT} \Rightarrow \begin{cases} 252/4 = 63 & \text{63 fr./cella} \\ 63/3 = 21 & \text{21 fr./settore} \end{cases}$$

• In 1 settore: $C = 21, B = 0,02$

$\Rightarrow A_0(C, B) = 14,036 \text{ Erl}$, conoscendo la densità, posso trovare l'AREA SETTORE!

$$14,036 : x = 80 : \frac{8}{3} \text{ Km}^2$$

$$\Rightarrow x = \frac{14,036}{80} \text{ Km}^2 = 0,175 \text{ Km}^2$$

\rightarrow posso ottenere il RAGGIO CELLA:



$$2 \cdot \frac{R \cdot \sqrt{3}R}{2} = 0,175 \text{ Km}^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 0,175 \text{ Km}^2} = 0,450 \text{ Km} = \boxed{450 \text{ m}}$$

Le distanze tra 2 celle ADIACENTI è 2 volte l'APOTEMA:

$$H = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} R = \sqrt{3} \cdot 450 \text{ m} = \boxed{779,6 \text{ m}}$$

2) Quale sarebbe il valore in dB ~~per~~ del CCI per un utente posto a distanza $\frac{H}{3}$ da una delle stazioni RADIO BASE?

• ATTENZIONE: di solito il CCI si calcola a BORDO CELLA:

$$CCI = \frac{\text{cost.} \cdot R^m}{\sum_{i=1}^{N_I} \text{cost.} D^m} = \frac{R^m}{N_I \cdot D^m}$$

→ A distanza $\frac{H}{3}$:

$$CCI = \frac{(H/3)^{-m}}{N_I \cdot D^{-m}} = \frac{\left(\frac{R\sqrt{3}}{3}\right)^{-m}}{2 \cdot (R\sqrt{3})^{-m}} = \frac{\left(\frac{1}{3}\right)^{-3,4}}{2 \cdot 2^{-3,4}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{6}\right)^{-3,4} = 223,34$$

$$\Rightarrow CCI [\text{dB}] = 10 \log_{10} (223,34) = [23,44 \text{ dB}]$$

Poisson VS Traffico Piccato

$$P_{\text{ACCETTATO}}(k) = \begin{cases} 0 & \text{se } k > C \\ \frac{A_0^k}{k!} & \text{se } 0 \leq k \leq C \\ \sum_{i=0}^C \frac{A_0^i}{i!} & \end{cases} \rightarrow \text{Non è più una dist. di Poisson}$$

come per A_0 (Pofferto (A_0)) .

Tipicamente, il TRAFFICO BLOCCATO non viene perso, ma viene smistato verso altri sistemi, per questo è chiamato anche TRAFFICO DI TRABOCCHI

Poisson: $P(k) = \frac{A_0^k}{k!} e^{-A_0}$, che ha V.M. (Veloc. Medio) = $\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \frac{A_0^i}{i!} e^{-A_0} = A_0$

VARIANZA: $\text{Var} = \sum_{i=0}^{\infty} (i - \text{V.M.})^2 \cdot P(i)$

- TRAFFICO ACCETTATO (LIVELLATO): se $\text{Var} < \text{Poisson}$
- TRAFFICO BLOCCATO (PICCATO): se $\text{Var} > \text{Poisson}$



• Poisson = Tempo d'arrivo delle chiamate;

ESPOENZIALE NEGATIVA: Tempo di interarrivo tra le chiamate

$$\begin{aligned} \text{V.M.} &= \frac{1}{\lambda} \\ \text{Var} &= \frac{1}{\lambda^2} \end{aligned}$$

- Coefficiente di Variazione: $c.v. = \frac{\text{Var}}{(\text{V.M.})^2} = \frac{1/\lambda^2}{1/\lambda^2} = 1$

DISTRIBUZIONE:

• PICCATA: se $c.v. > 1$

• LIVELLATA: se $c.v. < 1$

(R4) $\eta = 43,5 \quad \sigma_{dB} = 5 \quad P_{out} = 0,02 \text{ a } 300 \text{ m}\mu$

$d = ?$ per $P_{out} = 60\%$

$$0,02 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r(300) - P_{th}}{5\sqrt{2}} \right) \Rightarrow P_r(300) - P_{th} = 5\sqrt{2} \cdot 1,4522 = 10,26 \text{ dB}$$

Poiché outage > 50% , vuol dire che $P_r(d) < P_{th}$; calcolo il complementare:

$$0,40 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th} - P_r(d)}{5\sqrt{2}} \right) \Rightarrow P_{th} - P_r(d) = 5\sqrt{2} \cdot 0,4731 = 1,26 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow P_r(300) - P_r(d) = P_{th} + P_{th} = 11,52 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow P_r(d) - P_r(300) = -10 \log_{10} \left(\frac{d}{300 \mu} \right) = -11,52 \text{ dB} \Rightarrow d = 640,12 \text{ m}$$

(R5) $jammer = 3000 \mu s \quad P_{fallible} = 60\%$

$P = 1500 \text{ Bytes} , 11 \text{ Mbps} \quad \text{Basic Rate} = 2 \text{ Mbps}$

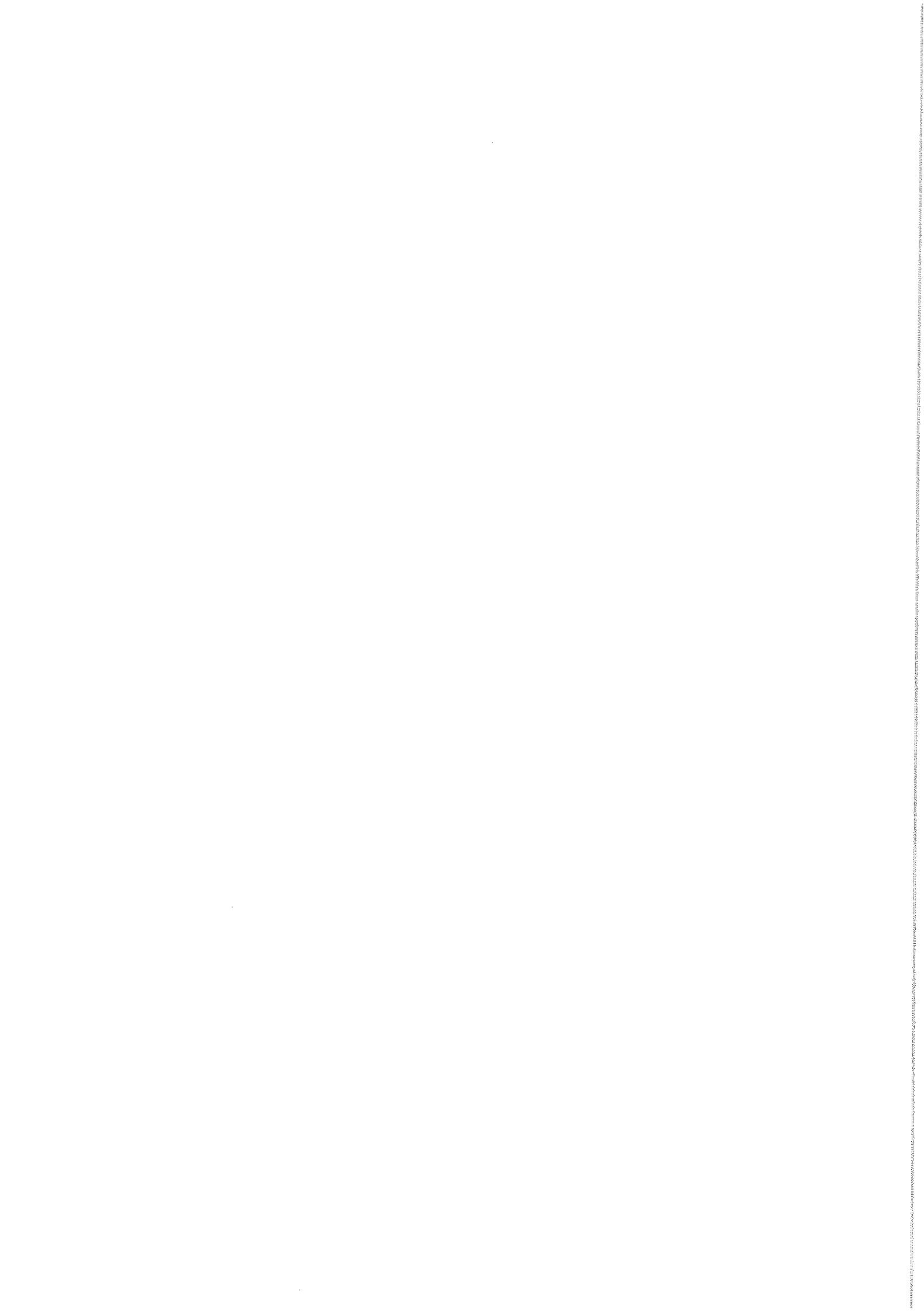
$$C_1 = \left(192 + \frac{1528 \cdot 8}{11} + 10 + 192 + \frac{14 \cdot 8}{2} + 50 + 310 \right) \mu s = 1821 \mu s$$

$$C_2 = (192 + 3000 + 310) \mu s = 3502 \mu s$$

$$thr = \frac{\frac{1500 \cdot 8 \cdot 0,6 \text{ bit}}{0,6 \cdot C_1 + 0,4 \cdot 3502 \mu s}}{\frac{7200 \text{ bit}}{2553,4 \mu s}} = 2,82 \text{ Mbps}$$

(R5) FACOLTATIVO :

$$C_2 = (192 + 3000 + 630) \mu s = 3822 \mu s$$



Andreea Pepe , matricola 0267020

(R6) $C_{\text{modem}} \quad N = 376 \text{ utenti} \quad \lambda_i = 6 \text{ call/giorno} = \frac{1}{6} \text{ h}$
 $\tau_i = \frac{1}{6} \text{ h}$

$$\text{Rate} = 160327 \text{ bit/s} \quad P = 750 \text{ bytes}$$

$$C_{\text{max}} = 3 \text{ Mbps} \quad E[\tau] = \frac{1}{\mu - \lambda} = 10 \text{ ms} = 10^{-2} \text{ s}$$

1) $A_i = \frac{1}{6K} \cdot \frac{1}{6} K = \frac{1}{36} \text{ Erl} \quad ; \quad A_0 = N \cdot A_i = 16 \text{ Erl}$

$$\mu = \frac{3 \cdot 10^6 \text{ bit/s}}{750 \cdot 8 \text{ bit}} = 500 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \mu - \lambda = 100 \text{ s}^{-1} \Rightarrow \lambda = 400 \text{ s}^{-1}$$

$$P = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{4}{5} \Rightarrow A_s = \frac{P \cdot C_{\text{max}}}{\text{Rate}} = 14,968 \text{ Erl}$$

$$\Rightarrow A_s = A_0 (1-B) \Rightarrow 1-B = \frac{A_s}{A_0} \Rightarrow B = 1 - \frac{A_s}{A_0} = \boxed{0,0644} = B$$

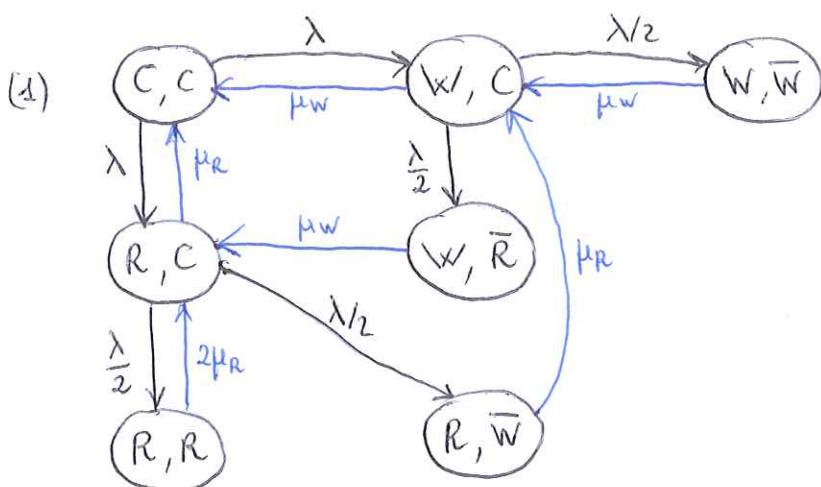
Dalle tabelle: $\boxed{C=20}$

2) Per $B=0,01$ e $A_0 = 16 \text{ Erl}$, $C' = 25$

Quindi $\boxed{\Delta C = 5 \text{ modem in più}}$

(R7)

$$\text{Sie } \lambda = \frac{1}{\tau_c} ; \mu_w = \frac{1}{\tau_w} ; \mu_R = \frac{1}{\tau_R}$$



(2)

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\lambda \pi_{cc} = \mu_w \cdot \pi_{wc} + \mu_R \pi_{rc} \\ \frac{\lambda}{2} \pi_{w\bar{c}} = \mu_w \cdot \pi_{w\bar{w}} \\ \dots \\ \sum_i \pi_i = 1 \end{array} \right.$$

(3) $E[\tau] = \frac{E[N]}{\lambda_{\text{acc.}}}$

(4) $P(\text{effizie}) = \frac{\frac{\lambda}{2} \pi_{wc} + \frac{\lambda}{2} \pi_{wc} + \frac{\lambda}{2} \pi_{rc}}{\lambda (2\pi_{cc} + \pi_{rc} + \pi_{wc})}$

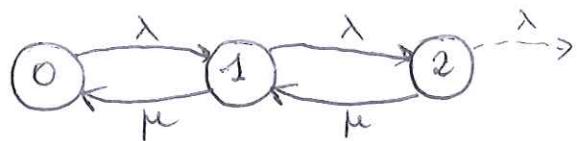
$$= \boxed{\frac{\lambda \pi_{wc} + \frac{\lambda}{2} \pi_{rc}}{2\lambda \pi_{cc} + \lambda \pi_{rc} + \lambda \pi_{wc}}}$$

(K8)

$$M/M/1/2$$

$$\lambda = 3 \text{ p/s}$$

$$\mu = 4 \text{ p/s}$$



c) $P(T < 2) = P_0 + P_1 = \frac{(\lambda t)^0}{0!} e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} = (1 + 2,25) e^{-2,25} = 0,3425$

b) $P_{\text{blocco}} = \pi_2 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \cdot \pi_0 ; \quad \pi_0 (1 + p + p^2) = 1 \Rightarrow \pi_0 = 0,432$

$$\Rightarrow \boxed{\pi_2 = 0,243}$$

(c) $E[T] = \frac{E[N]}{\lambda_{\text{acc}}} = \cancel{\frac{\pi_0 + \pi_1 + \pi_2}{\lambda_{\text{acc}}}} = \frac{\frac{\lambda}{\mu} \pi_0 + \frac{2\lambda^2}{\mu^2} \pi_0}{\lambda (1 - P_{\text{blocco}})} = \frac{0,81}{1,704} = 0,475$

(d) ~~$(\cancel{\pi_0}) (1 - \lambda) \cdot \pi_1 = \lambda \pi_0 \cdot \frac{\lambda}{\mu} (1 - \lambda) \pi_1$~~

