

**Materiale didattico
per il recupero
di Telecomunicazioni**

Classe 3D

A.S. 2013 - 2014

Istruzioni

Il seguente file contiene una parte di appunti per il ripasso degli argomenti e una serie di schede con esercizi da risolvere e tabelle da compilare e consegnare al docente il giorno dell'esame.

Le schede da svolgere e consegnare sono le seguenti:

- *Scheda delle unità di misura delle grandezze elettriche*
- *Scheda con gli esercizi di analisi dei circuiti logici*
→ *4 quesiti*
- *Scheda con gli esercizi di sintesi dei circuiti logici mediante forme canoniche*
→ *6 quesiti*
- *Scheda di riepilogo delle caratteristiche dei mezzi trasmissivi*

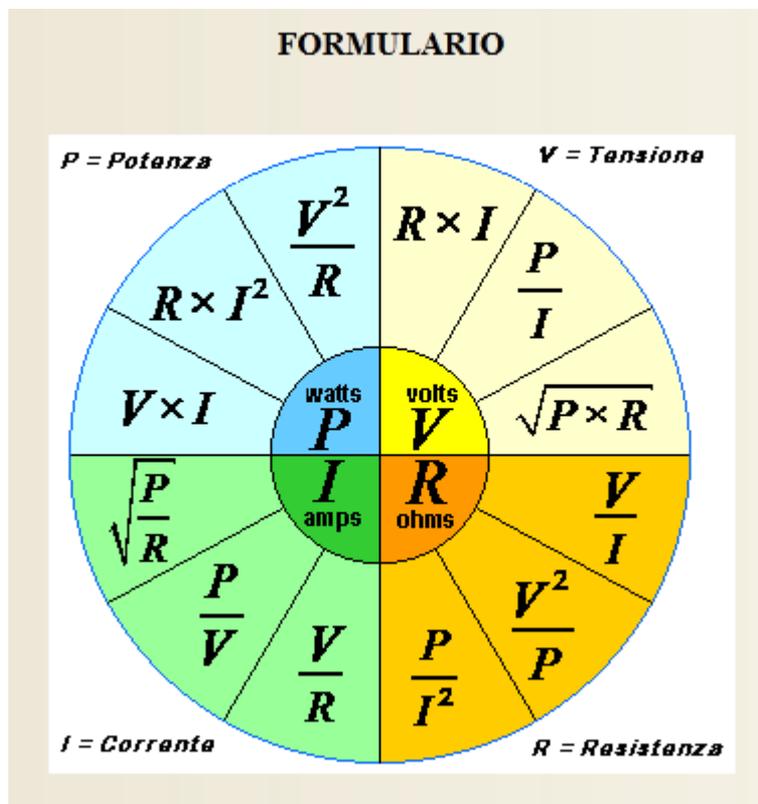
Grandezze elettriche di base

L'intensità di corrente è la carica elettrica in movimento nel circuito, cioè la quantità di elettroni, che passa in un secondo attraverso una sezione del conduttore. Maggiore è la sezione, maggiore è l'intensità della corrente che può percorrerlo. Per misurare l'intensità di corrente si usa uno strumento detto amperometro e il valore ottenuto con la misurazione viene espresso in Ampère

Si chiama resistenza l'opposizione che un materiale presenta a lasciarsi attraversare dalla corrente elettrica. La resistenza dipende dal materiale di cui è fatto il conduttore. Ad esempio, il rame, è un buon conduttore. Per misurare la resistenza si usa l'ohmetro l'unità di misura è l'ohm.

La tensione elettrica rappresenta, in pratica, quella forza che, appena può, mette in movimento gli elettroni, cioè genera la corrente elettrica. E' quindi il lavoro necessario per spostare una carica da un punto A ad un punto B. Per misurare la tensione si usa il voltmetro e l'unità di misura è il volt.

La potenza è definita come il lavoro compiuto nell'unità di tempo. L'unità di misura della Potenza è il Watt che abbreviato si indica con la lettera W.



I SEGNALI SINUSOIDALI

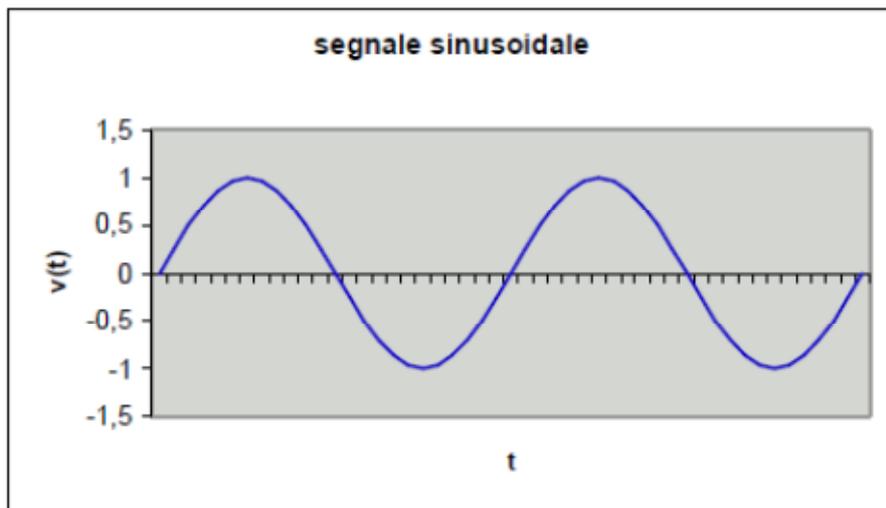
I segnali sinusoidali sono i segnali più importanti nello studio dell'elettronica e dell'elettrotecnica. La forma d'onda sinusoidale è una funzione matematica indispensabile per interpretare molti fenomeni fisici come: le oscillazioni di un pendolo, le vibrazioni di una corda, il movimento di una massa collegata ad una molla, la propagazione delle onde elettromagnetiche, ecc.

I segnali sinusoidali alternati

Un segnale si dice alternato se rispetta tre proprietà:

- è variabile
- è periodico, ovvero ripete se stesso dopo un determinato tempo detto periodo
- è a media nulla, ovvero l'area della sua parte positiva è uguale all'area della sua parte negativa.

Lo strumento fondamentale per l'osservazione dei segnali elettrici è l'oscilloscopio. Se visualizziamo un segnale proveniente da un generatore sinusoidale, vedremo la seguente forma d'onda:



I parametri fondamentali dei segnali sinusoidali sono:

- l'ampiezza, cioè il valore istantaneo del segnale; il valore massimo di ampiezza è detto valore di picco; l'ampiezza non ha un'unità di misura predefinita ma dipende dal tipo di segnale in esame;
- il periodo T che corrisponde alla durata di un segnale completo (si misura in secondi);
- la frequenza f che dà il numero di cicli che si ripetono in un secondo; esiste una relazione inversa tra periodo e frequenza, cioè: $f = 1/T$ (si misura in hertz Hz);
- la fase che rappresenta la frazione di periodo trascorsa rispetto ad un tempo fissato. Si tratta di un particolare istante durante lo svolgersi di un fenomeno periodico, sia esso un moto o un segnale elettrico, che viene misurato tramite un angolo, detto angolo di fase. Quindi la sua unità di misura è il grado oppure il radiante

Rappresentazione analitica dei segnali sinusoidali

La matematica ci mette a disposizione delle funzioni teoriche che corrispondono perfettamente alla forma d'onda che stiamo trattando. I nostri segnali si chiamano, infatti, sinusoidali perché prendono il nome dalle funzioni goniometriche seno e coseno. Dal punto di vista matematico esse hanno valori diversi in corrispondenza di determinati angoli, ma dal punto di vista elettronico

questo conta poco, in quanto seno e coseno hanno lo stesso andamento grafico nel tempo ma sfasato di 90° .

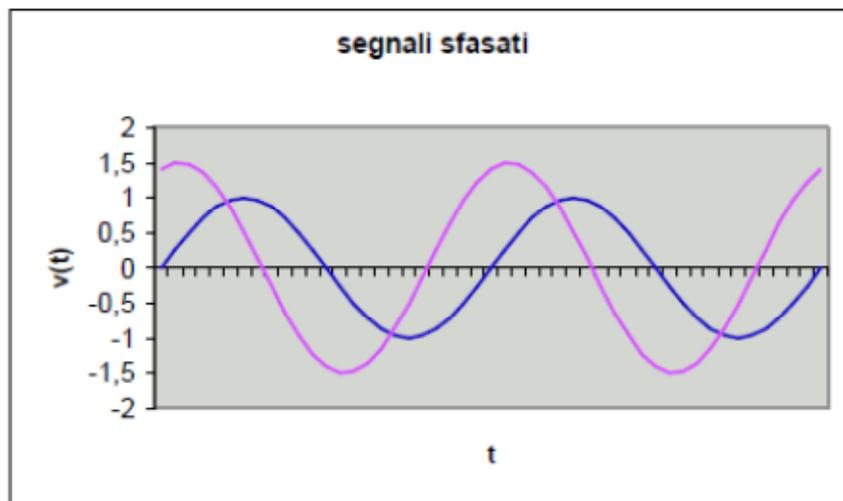
Quando vogliamo rappresentare un segnale sinusoidale elettrico scriveremo le seguenti relazioni:

$$v(t) = V_M \text{sen}(\omega t) = V_M \text{sen}(2\pi f t)$$

$$i(t) = I_M \text{sen}(\omega t) = I_M \text{sen}(2\pi f t)$$

La grandezza ω prende il nome di pulsazione del segnale. Si ha: $\omega = 2\pi f$

Se ad esempio abbiamo i seguenti due segnali:



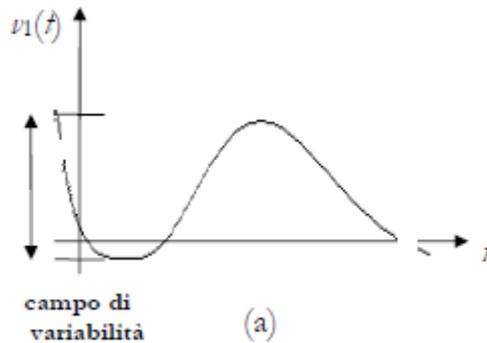
Essi hanno lo stesso periodo T (e quindi la stessa frequenza), ma il segnale con valore di picco maggiore ($V_{M1} = 1.5 \text{ V}$) anticipa di un tempo t_a rispetto al segnale con valore di picco minore ($V_{M2} = 1 \text{ V}$). Possiamo dire anche che esiste uno sfasamento angolare j_a .

Scheda – Unità di misura

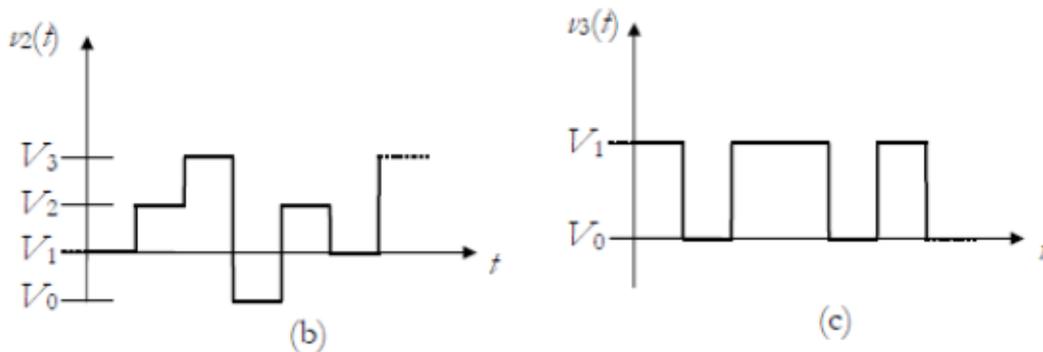
Grandezza	Nome unità di misura	Simbolo
<i>Ampiezza</i>		
<i>Capacità elettrica</i>		
<i>Carica elettrica</i>		
<i>Energia</i>		
<i>Fase</i>		
<i>Frequenza</i>		
<i>Impedenza</i>		
<i>Intensità di corrente elettrica</i>		
<i>Lavoro</i>		
<i>Periodo</i>		
<i>Potenza elettrica</i>		
<i>Pulsazione angolare</i>		
<i>Resistenza elettrica</i>		
<i>Tensione elettrica</i>		
<i>Valore di picco</i>		

Segnali analogici e digitali

Si definisce analogico un segnale che può assumere infiniti valori nel campo di variabilità del segnale stesso. I segnali analogici sono così denominati poiché nel rappresentare una grandezza di origine, come ad es. un suono, variano seguendo l'andamento di quest'ultima, ovvero « in analogia » con essa.



Si definisce digitale (dall'inglese digit, cifra), o numerico, un segnale che può assumere solo un numero limitato di valori; un caso particolare si ha quando i valori possibili sono due: in tal caso si parla di segnale digitale binario



I segnali digitali o numerici sono così definiti in quanto idonei a rappresentare sequenze di cifre associate ai possibili livelli.

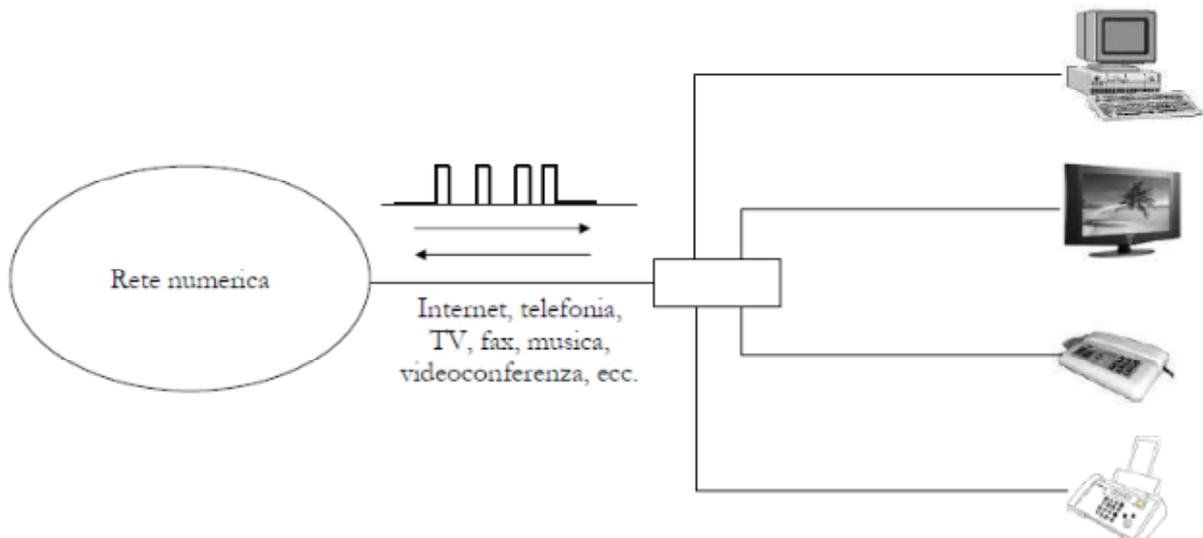
Il segnale di fig. b può essere interpretato come la sequenza 1 - 2 - 3 - 0 - 2 - ...; il segnale di fig. c può essere interpretato come la sequenza 1 - 0 - 1 - 1 - 0 - ... le cui cifre, per la caratteristica che hanno di poter assumere solo due valori, sono dette cifre binarie o bit (contrazione di binary digit).

Vantaggi dei sistemi digitali

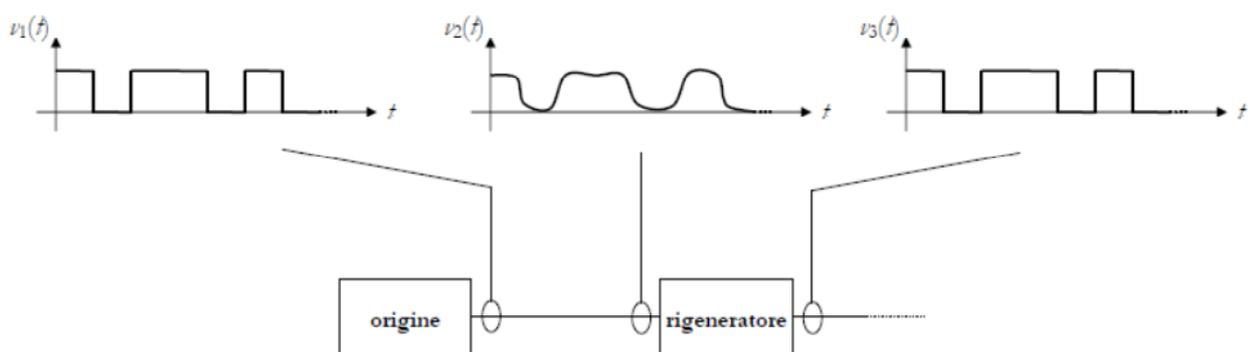
Le tecniche digitali, oggi dominanti nella trasmissione o memorizzazione dell'informazione (basti pensare alla telefonia mobile, al campo della registrazione e riproduzione musicale, alle trasmissioni televisive), sono destinate a divenire di uso esclusivo per diversi motivi.

Uno dei più importanti è che la conversione dei segnali audio-video in un uguale formato (serie di bit), identico a quello della trasmissione dati, ha uniformato ciò che in un sistema di telecomunicazioni deve essere trasferito da un punto all'altro, creando la premessa per l'impiego

di un'unica rete di telecomunicazioni per tutti gli scambi di informazione: trasmissione dati, telefonia, TV, fax, canali musicali, videoconferenza, ecc.



Il segnale trasmesso può essere ricostruito senza errori dal ricevitore, purché la degradazione subita nella trasmissione non sia così grande da non permettere la corretta interpretazione delle cifre binarie ricevute; in particolare è sempre possibile interporre lungo il canale di trasmissione rigeneratori a distanze opportune, in modo da limitare la degradazione del segnale:



Il segnale può essere facilmente elaborato dai sistemi di calcolo digitali; può essere memorizzato in maniera più efficiente mediante supporti sempre più piccoli e sicuri e garantire grossi vantaggi nella copia, nella durata, nella ricerca delle informazioni.

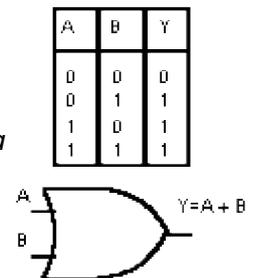
Inoltre, il segnale può essere gestito mediante l'uso di elettronica a componenti integrati con evidenti vantaggi nei costi, nell'affidabilità e nella manutenzione rispetto a quella a componenti discreti; è possibile generare segnali che includono informazioni aggiuntive di qualsiasi tipo (si pensi ad es. alla riproduzione video in cui è possibile selezionare la lingua dell'audio e dei sottotitoli); l'informazione può essere crittografata, e cioè resa decodificabile solo mediante una chiave numerica, in modo flessibile e senza perdita di qualità; il segnale può viaggiare su fibra ottica, dove sono consentite trasmissioni a frequenza di cifra elevatissima.

Porte logiche

Le principali parti elettroniche dei computer sono costituite da circuiti digitali che, come è noto, elaborano segnali logici basati sullo 0 e sull'1. I mattoni fondamentali dei circuiti logici sono, appunto, le porte logiche. Ogni porta logica ha una o più variabili di ingresso ed una sola variabile di uscita. Le variabili di ingresso e di uscita sono di tipo digitale per cui è possibile inserire in una tabella tutte le possibili combinazioni che si possono verificare tra le variabili di ingresso. L'uscita assume il valore 0 oppure il valore 1 in corrispondenza di ciascuna combinazione delle variabili di ingresso in funzione della definizione assegnata.

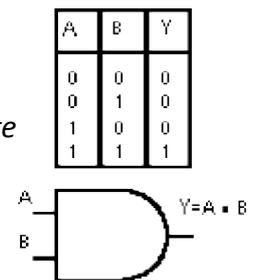
1. Somma logica OR

Si effettua su due o più variabili, l'uscita assume lo stato logico 1 se almeno una variabile di ingresso è allo stato logico 1. Nel caso di due variabili di ingresso A e B, detta Y la variabile di uscita, si scrive: $Y=A+B$ e si legge A or B.



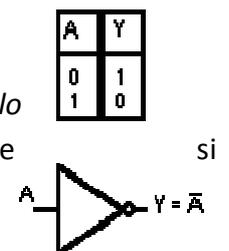
2. Prodotto logico AND

Si effettua su due o più variabili, l'uscita assume lo stato logico 1 solo se tutte variabile di ingresso sono allo stato logico 1. Nel caso di due variabili di ingresso A e B, detta Y la variabile di uscita, si scrive: $Y=A \cdot B$ e si legge A and B.



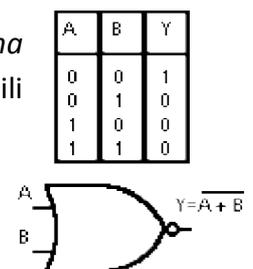
3. Negazione (NOT)

Si effettua su una sola variabile. L'uscita assume il valore logico opposto a quello applicato in ingresso. Detta A la variabile di ingresso la negazione si scrive: $Y = \bar{A}$ e si legge A negato oppure A complementato.



4. Somma logica negata NOR

Si effettua su due o più variabili, l'uscita assume lo stato logico 0 se almeno una variabile di ingresso è allo stato logico 1. In tutti gli altri casi $Y=1$. Per due variabili di ingresso A e B: $Y = \overline{A+B}$ e si legge A nor B.



5. Prodotto logico negato NAND

Si effettua su due o più variabili, l'uscita assume lo stato logico 0 se tutte le variabili di ingresso sono allo stato logico 1. In tutti gli altri casi $Y=1$.

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Per due variabili di ingresso A e B: $Y = A \cdot B$ e si legge A nand B.



6. OR esclusivo XOR

A differenza delle precedenti porte logiche, l'XOR opera su due soli ingressi. L'uscita vale 1 se gli ingressi assumono valore diverso, vale 0 se gli ingressi sono tra loro uguali. La funzione logica si scrive: $Y = A \oplus B$ e si legge A or esclusivo B oppure A diverso da B.

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



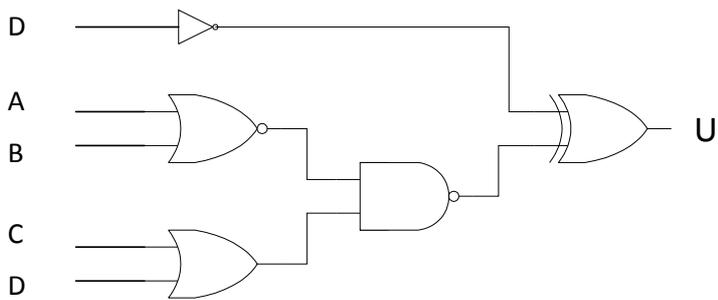
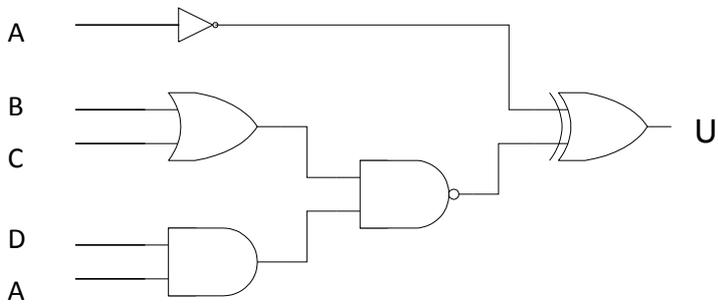
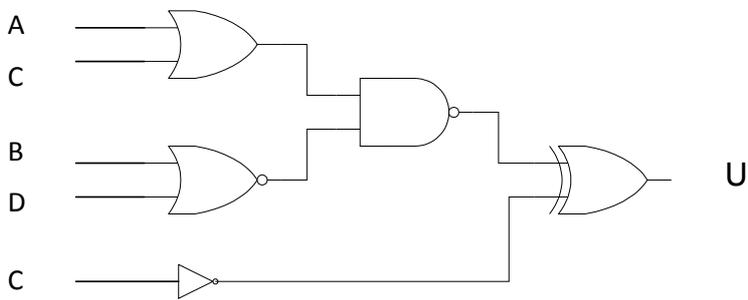
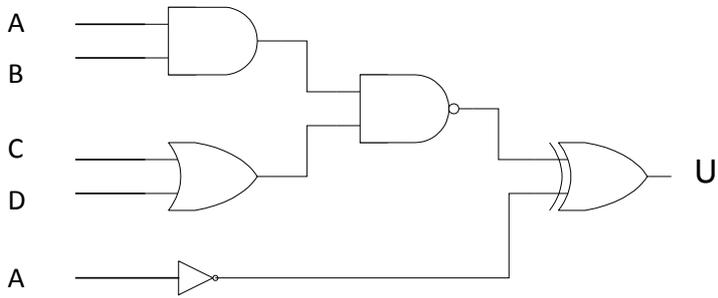
7. NOR esclusivo XNOR

Anche la porta XNOR opera su due soli ingressi. L'uscita vale 1 se gli ingressi assumono valore uguale, vale 0 se gli ingressi sono tra loro diversi. La funzione logica si scrive: $Y = A \otimes B = \overline{A \oplus B}$ e si legge A nor esclusivo B oppure A coincidente con B.

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1



**Analizzare i seguenti circuiti logici
determinando la loro tabella di verità**



Sintesi di circuiti logici mediante forme canoniche

Il processo di sintesi di una rete combinatoria richiede che i requisiti funzionali della rete vengano espressi in modo non ambiguo, per evitare un comportamento inatteso dalla rete, e che sia possibile arrivare a definire lo schema logico della rete da realizzare mediante opportuni metodi di sintesi. Una volta specificata la funzione attesa da una rete combinatoria, si tratta di individuare metodi per sintetizzare la rete combinatoria stessa, cioè per derivarne lo schema logico in termini di porte logiche e di struttura di interconnessione fra queste. Le uscite di una rete combinatoria sono funzioni booleane degli ingressi, ma non del tempo: cambiano gli ingressi ed immediatamente cambiano le uscite. Queste funzioni booleane possono essere scritte in vari modi ma vi sono delle espressioni che vengono considerate standard. Per far ciò definiamo i mintermini (o prodotto fondamentale) e i maxtermini. (o somma fondamentale). Considerando una riga della tabella di verità:

- Si definisce mintermine il prodotto logico delle variabili booleane prese in forma diretta o complementata a seconda se assumono valore 1 o 0.
- Si definisca maxtermine la somma logica delle variabili booleane prese in forma diretta o negata a seconda se assumono valore 0 o 1.

Con n variabili abbiamo 2^n mintermini e maxtermini.

X	Y	Z	Product Term	Symbol
0	0	0	$\overline{X}\overline{Y}\overline{Z}$	m_0
0	0	1	$\overline{X}\overline{Y}Z$	m_1
0	1	0	$\overline{X}Y\overline{Z}$	m_2
0	1	1	$\overline{X}YZ$	m_3
1	0	0	$X\overline{Y}\overline{Z}$	m_4
1	0	1	$X\overline{Y}Z$	m_5
1	1	0	$XY\overline{Z}$	m_6
1	1	1	XYZ	m_7

X	Y	Z	Sum Term	Symbol
0	0	0	$X+Y+Z$	M_0
0	0	1	$X+Y+\overline{Z}$	M_1
0	1	0	$X+\overline{Y}+Z$	M_2
0	1	1	$X+\overline{Y}+\overline{Z}$	M_3
1	0	0	$\overline{X}+Y+Z$	M_4
1	0	1	$\overline{X}+Y+\overline{Z}$	M_5
1	1	0	$\overline{X}+\overline{Y}+Z$	M_6
1	1	1	$\overline{X}+\overline{Y}+\overline{Z}$	M_7

Le forme Standard o canoniche con le quali le funzioni booleane possono essere scritte sono:

SOMMA DI PRODOTTI o somma canonica o SP: costituita dalla somma logica dei mintermini associati alle righe della tabella nella quale l'uscita assume valore 1. Si individuano quindi le righe per cui l'uscita f ha valore 1, si scrivono tanti prodotti quante sono le righe individuate. Si sommano i prodotti considerando che ogni prodotto è il mintermine relativo alla riga. Si negano gli zeri.

SOMMA DI PRODOTTI

a	b	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$F = \overline{a}b + a\overline{b}$

PRODOTTI DI SOMMA

PRODOTTO DI SOMME o prodotto canonico o PS: costituita dal prodotto logico dei maxtermini associati alle righe della tabella nelle quali l'uscita assume valore 0. Si individuano quindi le righe per cui l'uscita f ha valore 0, si

a	b	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$F = (a + b)(\overline{a} + \overline{b})$

scrivono tanti prodotti quante sono le righe individuate. Si effettua il prodotto delle somme considerando che ogni somma è il maxtermine relativo alla riga. Si negano gli 1.

Prendiamo in esempio la funzione espressa nella seguente tabella di verità

#	w	x	y	z	f
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	0
8	1	0	0	0	0
9	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0
12	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1
15	1	1	1	1	1

La somma canonica SP della funzione specificata è la seguente:

$$\sum_1 (1,5,9,13,14,15) = \overline{w} \overline{x} \overline{y} z + \overline{w} x \overline{y} z + \overline{w} x y \overline{z} + w x \overline{y} z + w x y \overline{z} + w x y z$$

Il prodotto canonico PS della funzione specificata è il seguente:

$$\prod_0 (0,2,3,4,6,7,8,10,11,12) = (w + x + y + z) (w + x + \overline{y} + z) (w + x + \overline{y} + \overline{z}) (w + \overline{x} + y + z) (w + \overline{x} + \overline{y} + z) (w + \overline{x} + \overline{y} + \overline{z}) (\overline{w} + x + y + z) (\overline{w} + x + \overline{y} + z) (\overline{w} + x + \overline{y} + \overline{z}) (\overline{w} + \overline{x} + y + z)$$

Nel disegno dello schema valgono le seguenti regole:

- Ogni negato è una porta NOT
- Ogni + è una porta OR
- Ogni prodotto è una porta AND
- La forma SP termina sempre con una porta OR, la forma PS sempre con una porta AND
- La forma SP avrà tante AND quanti sono i mintermini e quindi le uscite che valgono 1; la forma PS avrà tante OR quanti sono i maxtermini e quindi le uscite che valgono 0

**Sintetizzare le seguenti tabelle di verità
usando le forme canoniche**

A	B	C	U1
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

A	B	C	U2
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

A	B	C	U3
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

A	B	C	D	U4
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0

A	B	C	D	U5
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

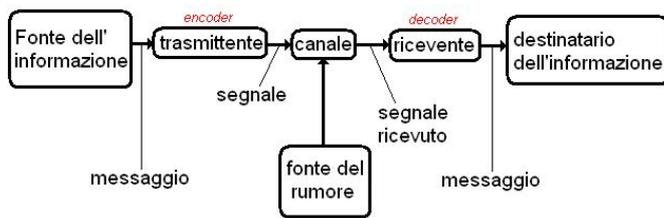
A	B	C	D	U6
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Componenti elettronici fondamentali

Alimentatore	<i>Circuito elettronico in grado di fornire una tensione costante</i>
Amplificatore	<i>Circuito elettronico che aumenta l'ampiezza del segnale di ingresso di un fattore costante detto guadagno o amplificazione</i>
Attuatore	<i>Dispositivo in grado di trasformare un segnale elettrico in un segnale fisico</i>
Circuito integrato	<i>Circuito elettronico formato da un certo numero di componenti (anche elevato) realizzato su una sola basetta di semiconduttore nello stesso processo tecnologico</i>
Condensatore	<i>Componente elettrico in grado di accumulare una certa quantità di carica elettrica delimitata dal valore della sua capacità</i>
Demultiplexer	<i>Circuito digitale che permette il trasferimento della sua unica linea di ingresso in una sola delle sue linee di uscite, in base ad un codice di selezione</i>
Diode	<i>Componente elettronico in grado di permettere il passaggio di corrente in una sola direzione</i>
Filtro	<i>Circuito elettronico che opera una selezione in frequenza, permettendo il passaggio dei segnali aventi una certa banda di frequenza e bloccando (o attenuando) gli altri</i>
Filtro passa-alto	<i>Circuito elettronico che permette il passaggio dei segnali che hanno frequenza superiore alla sua frequenza di taglio</i>
Filtro passa-banda	<i>Circuito elettronico che permette il passaggio dei segnali che hanno frequenza comprese tra le sue due frequenze di taglio</i>
Filtro passa-basso	<i>Circuito elettronico che permette il passaggio dei segnali che hanno frequenza inferiore alla sua frequenza di taglio</i>
Flip flop	<i>Circuito elettronico digitale in grado di memorizzare un bit</i>
Generatore	<i>Dispositivo elettrico in grado di fornire energia</i>
Latch	<i>Circuito elettronico digitale in grado di memorizzare un bit</i>
Multiplexer	<i>Circuito digitale che permette il trasferimento sulla sua unica linea di uscita di una sola delle sue linee di ingresso, in base ad un codice di selezione</i>
Oscillatore	<i>Circuito privo di segnale di ingresso in grado di generare un segnale periodico di tipo sinusoidale, rettangolare o triangolare</i>
Registro	<i>Circuito digitale in grado di memorizzare N bit</i>
Resistore	<i>Chiamato impropriamente resistenza, è un tipo di componente elettrico destinato a fornire una specifica resistenza elettrica al passaggio della corrente elettrica.</i>
Trasduttore	<i>Dispositivo in grado di trasformare un segnale fisico in un segnale elettrico</i>

Schema generale di un sistema di Telecomunicazioni

Lo schema generale di un sistema di Telecomunicazioni è stato formulato nel 1949 da *Shannon e Weaver* ed



è stato poi ripreso anche in altre discipline basate sul concetto di comunicazione. Un esempio potrebbe essere il dialogo tra noi e un'altra persona: quando noi parliamo il nostro cervello è la fonte dell'informazione, la voce il trasmittente, le vibrazioni sonore il canale della comunicazione, l'orecchio di chi ascolta il recettore e il suo cervello il destinatario del

messaggio.

La *fonte* o *sorgente* è l'origine dell'informazione. Generalmente l'informazione è di tipo analogico, in quanto niente nasce in formato digitale; spesso non si tratta neanche un segnale elettrico e in questo caso è necessario un trasduttore per acquisirlo e per renderlo fruibile da un sistema elettronico. La sorgente crea un messaggio che il trasmittente o trasmittitore trasforma in segnali. Il blocco *trasmittitore* contiene vari sottoblocchi:

- Il *blocco di condizionamento*, che ha lo scopo di adattare il segnale ai circuiti successivi, effettuando vari tipi di operazioni, tra cui l'amplificazione che ha lo scopo di elevare i livelli dei segnali e il filtraggio che ne modifica il contenuto frequenziale in base alle necessità (inoltre i filtri si occupano anche di risolvere problematiche come l'aliasing e di ridurre il rumore);
- Il *blocco di codifica (encoder)*, che ha lo scopo di adattare i simboli da trasmettere al canale su cui devono viaggiare. Esistono tre tipologie di codifica:
 - *Codifica di linea*, che ha l'obiettivo di fissare il numero di livelli del segnale;
 - *Codifica di sorgente*, che serve a fissare la rappresentazione binaria dei simboli emessi;
 - *Codifica di canale*, che serve a garantire l'integrità della trasmissione in un canale rumoroso.
- Il *modulatore*, che si occupa di rendere il segnale idoneo alla trasmissione sul canale. La problematica nasce dal fatto che segnali informativi sono in prevalenza di natura passa-basso (sono concentrati per lo più a basse frequenze), mentre i canali trasmissivi che più comunemente si utilizzano per poter trasmettere più segnali modulati contemporaneamente sono tipicamente di natura passa-banda cioè trasmettono in una banda a frequenza diversa da quella del segnale informativo originario. In sostanza, occorre convertire in frequenza lo spettro del segnale informativo. Inoltre l'impiego di questa tecnica permette di trasmettere segnali elettrici a grande distanza e senza sovrapposizione di altre informazioni grazie a tecniche correlate di moltiplicazione. La modulazione è conveniente per le seguenti ragioni:
 - si può traslare la banda del segnale informativo nella banda del canale di comunicazione;
 - se i segnali devono essere trasmessi mediante onde radio (comunicazione wireless) è necessario che l'antenna (in trasmissione come in ricezione) abbia una lunghezza proporzionale alla lunghezza d'onda. In banda base (cioè alle basse frequenze del segnale modulante), ad esempio per un segnale audio, λ è pari a 15km, quindi realizzare antenne di queste dimensioni sarebbe improponibile;
 - modulando a frequenze diverse, è possibile far transitare su un mezzo trasmissivo più segnali;
 - il segnale modulato può essere codificato così da ridurre gli effetti del rumore, in quanto la natura del segnale stesso è tale da concentrare il suo spettro nelle frequenze più basse, mentre i mezzi trasmissivi hanno un miglior rendimento a frequenze più elevate o comunque diverse dalla banda base del segnale originario;
 - si ha infine una semplificazione dei circuiti adottati per la trasmissione e la ricezione.

Dal punto di vista della realizzazione pratica, la modulazione consiste in un insieme di tecniche finalizzate ad imprimere il segnale informativo, detto modulante su di un altro segnale, detto portante, sviluppato ad alta frequenza (la frequenza della portante deve essere molto maggiore della frequenza della modulante). Il risultato di questa composizione è la modulazione che consiste nella conversione del segnale modulante dalla banda base di partenza alla cosiddetta banda traslata, a frequenza molto più alta. In sostanza il segnale portante si occupa del trasporto dell'informazione che è costituito dal segnale

modulante e lo fa variando uno dei suoi parametri (ampiezza, frequenza o fase) in funzione dei valori dell'informazione da trasmettere.

Una volta modulato e codificato, il segnale è pronto per essere trasmesso sul canale. Il canale dipende dal mezzo trasmissivo usato, ad esempio linee di trasmissione (doppini intrecciati, cavi coassiali...), fibre ottiche oppure attraverso lo spazio libero, via antenne. Il canale agisce sul segnale, attenuandone la potenza e intervenendo come se fosse un filtro passa basso. Inoltre, è caratterizzato dalla presenza di segnali non voluti che vanno a sovrapporsi al segnale informativo da trasmettere e che ne rendono più difficile la ricezione. Generalmente si parla di rumore quando i segnali non voluti sono interni al sistema stesso (cioè sono causati dai sistemi elettronici oppure da imperfezioni dei materiali) mentre si parla di disturbi quando i segnali non voluti sono esterni al sistema (disturbi atmosferici, disturbi elettromagnetici causati da altri sistemi posti nelle vicinanze, ostacoli costituiti dalla morfologia del territorio o da manufatti umani...).

Una volta superato il canale, il segnale giunge al ricevitore che ha il compito di convertirlo nel messaggio da consegnare al destinatario. Anche il ricevitore è costituito da sottoblocchi:

- un blocco di condizionamento, avente anche qui lo scopo di adattare il segnale ai blocchi successivi e costituito spesso da amplificatori e filtri;
- un blocco di decodifica (decoder), avente lo scopo di recuperare i simboli che sono stati codificati per essere adattati alla trasmissione sul canale trasmissivo;
- un demodulatore, che si occupa di ricevere il segnale modulato e separare il segnale informativo (modulante) dal segnale portante e quindi spostare il segnale dalla banda traslata alla banda base di partenza.

Infine, il messaggio viene consegnato al destinatario, dopo essere eventualmente anche trasformato in analogico mediante un convertitore o in una grandezza fisica, con un attuatore.

I problemi del canale reale

I problemi caratteristici di un canale reale usato per trasmissioni analogiche sono tre: distorsione, rumore e interferenza. Si parla di **distorsione** quando il canale attenua in modo non costante rispetto alla frequenza e sfasa in modo non proporzionale ad essa. Il risultato della distorsione è una deformazione del segnale.

Esistono più tipi di distorsione:

- **Spettrale o lineare:** l'attenuazione delle armoniche è variabile (**distorsione spettrale di ampiezza**) oppure lo è il loro sfasamento (**distorsione spettrale di fase**).
- **Armonica o non lineare:** il segnale ricevuto non è più una funzione lineare delle armoniche di partenza, ma un loro sviluppo in serie. Se il segnale è composto da più sinusoidi, inoltre, si ottengono contributi aggiuntivi di frequenze f_2-f_1 , f_2+f_1 , f_2-2f_1 , f_2+2f_1 , ecc...

Per **rumore** si intende un segnale variabile statisticamente, indipendente dall'informazione e che si sovrappone ad essa. Esistono due tipi di rumore:

- **Esterno**, dovuto principalmente a disturbi atmosferici e a disturbi elettromagnetici causati da altri sistemi elettronici vicini.
- **Interno**, che può dipendere da vari fenomeni:
 - La casualità del movimento degli elettroni all'interno dei componenti (**Rumore termico**) e la natura statistica della corrente elettrica che viene generata (**Rumore granulare o shot**); entrambi sono rumori di tipo **bianco** (cioè un rumore che agisce uniformemente sulle frequenze del segnale)
 - Le imperfezioni delle superfici dei componenti elettronici (**Rumore flicker**, o **rosa** perché agisce solo sulle armoniche a bassa frequenza)
 - **Alte frequenze** (proporzionale a f^2)

Per **interferenza** si intende la sovrapposizione non desiderata di due segnali informativi. Un esempio è la **diafonia** che avviene quando i segnali sono trasmessi su coppie di fili che viaggiano nello stesso cavo ed è dovuta ad induzione elettromagnetica o ad accoppiamento capacitivo.

I mezzi trasmissivi

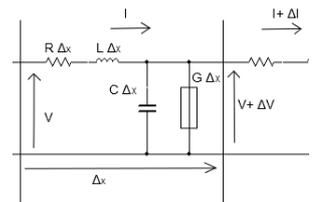
Linee di trasmissione

Per linee di trasmissione si intendono linee metalliche costituite generalmente da due conduttori attraverso cui si propagano segnali di tensione e corrente elettrica; tra queste i più usati sono il doppino intrecciato e il cavo coassiale.

Il doppino è fatto da due fili metallici (ricoperti da un isolante) intrecciati al fine di ridurre i disturbi dovuti ai campi elettromagnetici esterni (le correnti indotte vanno in verso opposto e tendono ad annullarsi). Esso viene usato nelle terminazioni d'utente delle linee telefoniche, nelle reti LAN e ha basso costo, buona flessibilità e leggerezza; i principali svantaggi sono l'elevata attenuazione soprattutto a medie e alte frequenze e la sensibilità ai disturbi elettromagnetici. Inoltre, poiché nei cavi ci sono spesso coppie di doppini, si creano interferenze reciproche dannose (diafonia).

Il cavo coassiale è costituito da due conduttori coassiali (uno in cui viaggia il segnale e l'altro che funge da schermo elettromagnetico) separati da un isolante. Il segnale risulta, quindi, protetto dai disturbi elettromagnetici esterni e non irradia all'esterno, evitando diafonia. Di contro, abbiamo un costo superiore e maggiore rigidità per cui viene usato solo dove il doppino non va bene, ovvero nelle trasmissioni ad alta frequenza, nei collegamenti tra strumenti di misura e nell'acquisizione di segnali deboli.

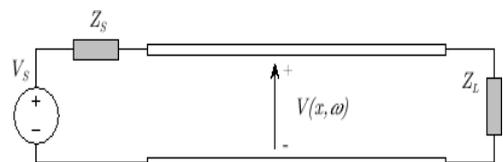
Le linee di trasmissione hanno proprietà elettriche dipendenti dalla lunghezza del cavo e possono essere schematizzate utilizzando le costanti primarie R , C , L e G dipendenti dalle caratteristiche fisiche del cavo (materiale, dimensioni, forma, ecc...) e le costanti secondarie γ (costante di propagazione) e Z_0 (impedenza caratteristica della linea). Si nota che:



- i segnali elettrici sono composti da due onde che viaggiano sulla linea, la prima diretta (che si propaga e attenua lungo x) e la seconda riflessa (in verso opposto);
- l'onda di corrente è puntualmente data dal rapporto tra l'onda di tensione e Z_0 ;
- γ influenza il mondo con cui i segnali si attenuano e si sfasano;
- l'attenuazione e lo sfasamento sono descritti da due costanti α e β (se non sono costanti si ha distorsione).

Si consideri una linea con Z_0 , originata da un generatore e chiusa su un carico Z_L su cui inviare il segnale.

All'inizio della trasmissione ci saranno soltanto le onde dirette I_+ e V_+ , mentre alla fine ci dovrebbero essere soltanto I_L e Z_L di rapporto pari a Z_L . Se $Z_L = Z_0$ si ha una continuità tra le relazioni delle onde durante il cavo e alla terminazione e in questo caso tutte le onde vengono assorbite (*condizione di adattamento della linea*);



se invece ciò non si verifica la linea risulta disadattata e compaiono onde riflesse I_- e V_- , in modo analogo a quello che succede con le onde meccaniche. La riflessione degrada la trasmissione perché non tutta l'informazione trasmessa arriva a destinazione, bensì viene rimandata al mittente dove, se di potenza adeguata, può provocare danni agli apparati di trasmissione.

Per determinare l'entità della riflessione si usano i coefficienti di riflessione $\rho_v = V_-/V_+$ e $\rho_i = I_-/I_+$ che in modulo assumono un valore compreso tra 0 e 1. Si ha anche che $\rho_v = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$.

La potenza ricevuta sul carico è data dalla differenza tra la potenza inviata e quella riflessa, cioè $P_L = P_G(1 - |\rho_v|^2)$, con un rendimento $\eta = (1 - |\rho_v|^2)$. Per un cavo adattato il rendimento è del 100%, mentre diminuisce nel caso di riflessione, fino a 0% nel caso di riflessione totale.

Quando l'onda riflessa giunge alla sorgente può causare ancora riflessione, dovuta alla discontinuità di impedenza tra Z_G e Z_0 . In questo caso al segnale diretto si somma una specie di eco che degrada ulteriormente la trasmissione. Per evitare ciò serve un adattamento di impedenza anche in sorgente.

Un ulteriore fenomeno, in condizioni di disadattamento, è causato dalla sovrapposizione delle onde dirette e riflesse che si propagano in direzioni opposte, che provoca una terza onda chiamata *onda stazionaria* che resta confinata all'interno del cavo. Maggiore è il disadattamento, maggiore è l'ampiezza dell'onda stazionaria e quindi la perdita di potenza ai fini della comunicazione in quanto l'energia staziona lungo la linea invece di giungere a destinazione.

Il vuoto e le antenne

Dato un conduttore filiforme percorso da corrente, per la *legge di Ampere* si genera un campo magnetico perpendicolare al conduttore; per la *legge di Faraday* la variazione del campo magnetico provoca un campo elettrico perpendicolare al flusso magnetico; la variazione di questo campo elettrico produce un altro campo magnetico e così via: in tal modo viene creata un'onda elettromagnetica, che quindi è caratterizzata dalla perpendicolarità dei due campi e conseguente perpendicolarità della direzione di propagazione al piano formato da essi (si parla di *onde trasversali TEM* che hanno la stessa natura della luce e quindi si propagano nello spazio alla velocità $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$. Nel vuoto tale velocità è massima e pari a circa 300000 km/s).

Per segnali sinusoidali di frequenza f , si verifica che la *lunghezza d'onda* $\lambda=c/f$ che è un parametro importante in quanto usato per classificare le onde e per realizzare le antenne. Le lunghezze d'onda inferiori al metro sono dette *microonde*.

Idealmente le onde nello spazio si propagano in linea retta, mentre nell'atmosfera la propagazione dipende sia dalla frequenza dei segnali che dagli strati attraversati. L'atmosfera è divisa in tre zone:

- *troposfera* (fino a 10-12 km, in cui c'è l'influenza dei fenomeni meteorologici)
- *stratosfera* (fino a 60 km, poco influente sulla propagazione per la sua natura a bassa densità gassosa)
- *ionosfera* (fino a 400 km, caratterizzata da presenza disomogenea di cariche libere determinate dalle radiazioni solari; le onde a frequenza inferiore a 30 Mhz vengono rimbalzate e ritornano sulla superficie terrestre, per rifrazione e diffrazione; quelle a frequenza superiore vengono lasciate propagare anche se attenuate debolmente).

Per queste interazioni con l'atmosfera e la superficie, le onde possono propagarsi come

- *onde dirette* (c'è visibilità tra trasmittente e ricevente e rifrazione dell'aria)
- *onde di superficie* (seguono la curvatura della superficie terrestre e sono soggette a attenuazioni, riflessioni dipendenti dalla natura e dalla forma della superficie)
- *onde spaziali* (dirette verso la ionosfera e poi riflesse sulla terra, se esiste un angolo sufficiente di incidenza detto angolo limite; necessariamente si crea una zona del silenzio).

Un fenomeno importante è il *fading* che è un'attenuazione imprevista dell'onda dovuta a fenomeni atmosferici o a sovrapposizione di riflessioni dello stesso segnale che segue diversi percorsi (*multipath fading*).

Le *antenne* sono i dispositivi che permettono di irradiare le onde elettromagnetiche nello spazio e di intercettare le onde e trasformarli in segnali elettrici. Le proprietà di radiazione dell'antenna rimangono invariate sia in trasmissione che in ricezione. L'antenna più semplice può essere realizzata da un tratto di linea terminata su un circuito aperto con i conduttori aperti a 90°: in tal modo si generano onde nello

spazio circostante. Per massimizzare la corrente che percorre l'antenna bisogna dimensionare la lunghezza in modo che sia pari ad $\frac{1}{4} \lambda$, quindi $\frac{1}{2} \lambda$ considerando le due parti.

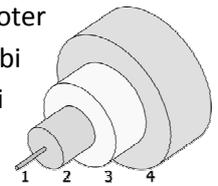
Un'antenna si dice *isotropica* se emette radiazione in maniera omogenea in tutte le direzioni spaziali (fronte d'onde sferico); in realtà, ogni antenna ha direzioni di propagazione privilegiate e altre verso cui emette campi deboli o nulli che vengono descritte tramite un *diagramma di radiazione*; questo aspetto viene descritto dal parametro direttività. Il *guadagno* dell'antenna è il rapporto tra la potenza che dovrebbe emettere una antenna isotropica per irradiare la stessa potenza e la potenza realmente emessa dall'antenna nella direzione di massima propagazione.

Si supponga di avere un collegamento di due antenne caratterizzate da guadagni G_{rx} e G_{tx} .

Quando si usa un'antenna per ricevere, la potenza ricevuta non è uguale a quella trasmessa a causa di una serie di attenuazioni. L'*attenuazione dello spazio libero* è quella dovuta solo all'irraggiamento delle onde nello spazio e dipende dalle caratteristiche del mezzo, dalla distanza e dalla frequenza dell'onda. In decibel si ha che $Asl = 32,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f)$, mentre la potenza ricevuta è $Prx = Ptx + Gtx + Grx - Asl$. Questo vuol dire che la potenza è dipendente dal tipo di antenna usata, attraverso i guadagni e le direzioni di propagazione.

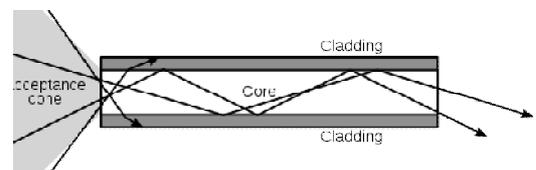
Fibre ottiche

Le fibre ottiche sono filamenti di materiali vetrosi o polimerici, realizzati in modo da poter condurre al loro interno la luce (propagazione guidata). Sono flessibili, immuni ai disturbi elettrici ed alle condizioni atmosferiche più estreme, e poco sensibili a variazioni di temperatura. Hanno un diametro avente circa le dimensioni di un capello e pesano molto poco: un chilometro di fibra ottica pesa meno di 2 kg, esclusa la guaina che la ricopre.



Le fibre ottiche permettono di convogliare e guidare al loro interno un campo elettromagnetico di frequenza sufficientemente alta (in genere vicina all'infrarosso) con perdite limitate. Ogni fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro (silice o polimeri plastici): un nucleo centrale, o *core*, ricoperto da un mantello o *cladding*, realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso; in particolare il cladding deve avere un indice di rifrazione minore rispetto al core per permettere la riflessione totale del fascio all'interno della fibra e impedire che il segnale venga rifratto nel mantello.

La luce entra nel core ad un certo angolo (angolo limite) e si propaga mediante una serie di riflessioni alla superficie di separazione fra core e cladding, grazie alla differenza degli indici di rifrazione. All'esterno vi è una guaina protettiva polimerica detta *jacket* che serve a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione ed evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno. I tipi di fibre si distinguono per diametro del core, indici di rifrazione, caratteristiche del materiale.



Nelle fibre ottiche avviene un fenomeno di riflessione totale interna, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente inferiore ad un angolo critico, cioè finché la fibra non compie curve troppo brusche.

All'interno di una fibra ottica il segnale può propagarsi in modo rettilineo oppure essere riflesso un numero molto elevato di volte. Le *fibre monomodali* consentono la propagazione di luce secondo un solo modo, quelle *multimodali* consentono la propagazione di più modi. Le fibre multimodali permettono l'uso di

dispositivi più economici, ma subiscono il fenomeno della dispersione intermodale, per cui i diversi modi si propagano a velocità leggermente diverse, e questo limita la distanza massima a cui il segnale può essere ricevuto correttamente. Le fibre monomodali di contro hanno un prezzo molto più elevato rispetto alle multimodali, ma riescono a coprire distanze e a raggiungere velocità nettamente superiori.

Attenuazione

Idealmente le fibre ottiche sono un mezzo di trasmissione perfetto. In pratica, però, intervengono dei fenomeni fisici che causano comunque delle perdite della potenza lungo la fibra; tali perdite, solitamente valutate statisticamente in termini di attenuazione specifica ovvero in db/km, sono dovute a:

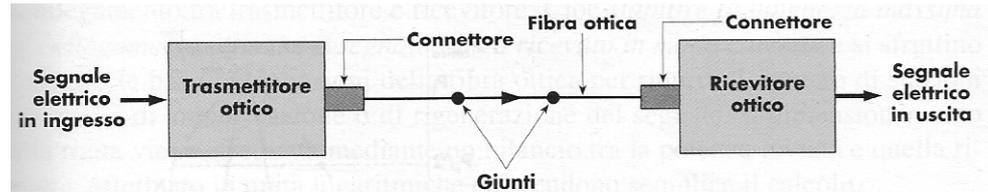
- proprietà intrinseche del mezzo e presenza di impurità all'interno del materiale;
- Perdite specifiche delle guide dielettriche. Non sono dovute al tipo di luce utilizzata ma sono legate alle deformazioni e alle discontinuità presenti nella guida; i fenomeni principali sono:
 - Curvatura della guida dielettrica; perdita legata all'angolo di curvatura della guida.
 - Corrugazioni della guida dielettrica che si possono creare durante la lavorazione della guida.
 - Imperfezioni nella fabbricazione come particelle di polvere, microvuoti e fessurazioni.
 - Dispersione. Viste le elevate frequenze dovrebbero essere possibili velocità di trasmissione molto elevate. In pratica, però, intervengono dei fattori fisici che causano distorsione limitando la velocità di trasmissione possibile. Esistono tre tipologie di dispersione:
 - Dispersione modale: esiste perché il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato. Vi saranno modi attraverso cui il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi. A causa di questo, la forma del segnale originario viene dilatata nel tempo, e se la frequenza è troppo alta può arrivare a confondersi con l'impulso seguente, impedendo dunque di leggere il segnale originario correttamente.
 - Dispersione cromatica: esiste perché la luce trasmessa in fibra dal trasmettitore non è perfettamente monocromatica, ma si compone di fasci di luce di colore diverso cioè frequenze e quindi velocità diverse. Può capitare che il fascio luminoso di colore rosso (più veloce) si confonda con il fascio luminoso di colore violetto (più lento) dell'impulso inviato precedentemente, rendendo impossibile la decodifica del segnale.
 - Dispersione di polarizzazione: fenomeno dovuto ad asimmetrie del core cilindrico della fibra dovute a loro volta a stress meccanici o imperfezioni della fibra stessa durante il processo di produzione.

Le fibre ottiche sono un componente essenziale nell'industria delle telecomunicazioni, anche se ancora in corso di ulteriore evoluzione tecnologica. Basti pensare infatti che tutte le dorsali principali della rete telefonica e di Internet, compresi i collegamenti intercontinentali sottomarini, sono già in fibra ottica. I principali vantaggi delle fibre rispetto ai cavi in rame sono:

- bassa attenuazione (quindi trasmissione su lunga distanza senza ripetitori);
- grande velocità di trasmissione (dell'ordine dei Tb/s);
- immunità da interferenze elettromagnetiche;
- assenza di diafonia: la luce rimane confinata in fibra e non crea interferenza;
- peso e ingombro modesto, buona flessibilità;
- ottima resistenza a condizioni climatiche avverse.

Per effettuare un collegamento in fibra ottica, per prima cosa è necessario trasformare i segnali elettrici forniti dagli apparati elettronici in segnali luminosi adatti a viaggiare nella fibra ottica. Nei trasmettitori

ottici, oltre a modulatori e amplificatori ottici, si utilizzano dei dispositivi che fungono da trasduttori e i più comuni sono i diodi LED e i diodi LASER; i primi sono vantaggiosi per il costo basso, per il maggior tempo di



vita e per la minore sensibilità alla temperatura mentre i vantaggi dei secondi sono la direzionalità e la monocromaticità. La fibra è collegata al trasmettitore mediante un connettore, mentre i vari tratti di fibra sono connessi tra di loro mediante dei giunti che, per quanto applicati con apparecchiature di precisione causano una inevitabile discontinuità nella linea. Per questo motivo sia i connettori che i giunti introducono perdite durante la trasmissione. La fibra è collegata nuovamente mediante un connettore al ricevitore ottico il quale, oltre a contenere i demodulatori, si occupa di convertire il segnale luminoso in segnale elettrico, fungendo da attuatore, mediante dispositivi come i fotodiodi PIN.

Nella realizzazione di un collegamento in fibra ottica una delle principali questioni riguarda stabilire la massima lunghezza per avere una ricezione affidabile. Affinchè si verifichi questo la potenza ricevuta non deve essere troppo inferiore a quella trasmessa, cioè non deve essere troppo importante il contributo delle attenuazioni. La potenza ricevuta in decibel può essere calcolata mediante la seguente formula:

$$P_R = P_T - \alpha L - 2 \alpha_c - n_G \alpha_G - M - D$$

dove:

- P_R e P_T sono rispettivamente la potenza ricevuta e quella trasmessa
- αL è il contributo dovuto all'attenuazione causata dalla lunghezza del collegamento (coefficiente di attenuazione della fibra per la lunghezza del collegamento)
- α_c è l'attenuazione nei connettori
- n_G è il numero di giunti, mentre α_G è l'attenuazione nei giunti
- M è il margine di sicurezza che tiene conto del fatto che ci può essere un incremento delle perdite e delle attenuazioni a causa del degrado delle prestazioni del trasmettitore o di riparazioni della linea (ad esempio inserimento di nuovi giunti o connettori)
- D è detta penalità aggiuntiva e tiene conto della dispersione cromatica che interviene fortemente nel caso di trasmissioni ad alte frequenze (bit rate superiori a 100 Mb/s)

Le fibre utilizzate per collegamenti medio-lunghi (0,5-40km) sono tutte fibre monomodali, mentre quelle multimodali possono essere utilizzati per brevi collegamenti fino a 2km con costi di fabbricazione inferiori.

Mezzo trasmissivo	Tipi	Vantaggi	Svantaggi	Problematiche	Usi applicativi
Linee di trasmissione					
Antenne					
Fibre ottiche					