



LICEO SCIENTIFICO E LINGUISTICO DI CECCANO

Esame di Stato di Liceo Scientifico

Indirizzo: Scienze Applicate

Elaborato: Ambito Scientifico

Da Analogico a Digitale

Relatore

Prof.ssa M. Rosaria Di Salvatore

Candidato

Maura Francesco

Docente di riferimento

Prof.ssa Annalisa Gaetani

Indice

1 Problema	3
1.1 Costruzione della funzione	4
1.2 Studio di Funzione	5
1.3 Grafico della funzione	8
1.4 Calcolo integrale	9
2 Circuito RL	10
2.1 Intensità di corrente in un circuito RL	10
2.1.1 Intensità di corrente alla chiusura del circuito	10
2.1.2 Intensità di corrente all'apertura del circuito	12
2.2 Analisi della funzione	13
3 Dal problema alla teorie	15
3.1 Circuiti in corrente alternata	15
3.1.1 Circuito puramente Ohmico	15
3.1.2 Circuito puramente capacitivo	16
3.1.3 Circuito puramente induttivo	18
3.1.4 Diagramma dei fasori	19
3.2 Definizione di integrali e relativi esempi	20
3.2.1 Definizione di integrale improprio convergente	20
3.2.2 Definizione di integrale improprio divergente	21
3.2.3 Definizione di integrale improprio indeterminato	21
3.3 Campo magnetico di un Solenoide dal teorema di Ampére	22
3.4 Il paradosso di Ampére e la soluzione di Maxwell	23
4 Dalla valvola termoionica al computer quantistico	27
4.1 Il primo componente elettronico attivo: <i>"la valvola termoionica"</i> .	27
4.2 Il transistor	29
4.3 Transistor ad effetto di campo	31
4.4 Il computer quantistico	33
5 The first example of an intelligent machine: the creature of Viktor Frankenstein	35
5.1 The Story:	35
6 Questioni etiche e morali: può un super-computer pensare come un umano?	38
6.1 Principi di autovalutazione etica	38
6.2 La nascita della "macchina intelligente"	38
6.2.1 Il test di Turing	38
6.2.2 Prove a confutazione del test	39
6.3 La nascita e la critica dell'intelligenza artificiale	39

1 Problema

Il bit è la più piccola unità di informazione e designa uno dei due stati che codificano le informazioni all'interno dei computer: la *presenza* oppure *l'assenza* di un segnale elettrico. Il funzionamento dei circuiti elettrici di tutti i calcolatori moderni è basato su questi due stati elementari $[0,1]$ assunti dalla unità di informazione memorizzabile in un calcolatore. Ovviamente, la rappresentazione di informazioni più complesse richiede l'uso di un *insieme di bit*. La concettualizzazione di un'unità di misura delle informazioni è stata introdotta da *Claude Shannon* nel 1948. Lavorando nei laboratori Bell Labs negli anni '40, ha pubblicato un documento in due parti sul *Bell Systems Technical Journal*, luglio e ottobre 1948, intitolato "*A Mathematical Theory of Communication*". Questi concetti hanno fondato la teoria dell'informazione che si è concentrata sulla quantificazione, la memorizzazione e le applicazioni nella tecnologia per la comunicazione di informazioni o dati (dette anche TIC). Prendendo in prestito il termine "*bit*", da John Tukey, il suo collega di lavoro ai Bell Labs che ha contratto il termine *cifra binaria*, Shannon ha descritto l'uso di bit per rappresentare 2 stati possibili, ponendo così le basi della teoria dell'informazione. Nella versione digitale del segnale per l'onda elettromagnetica di partenza abbiamo una prima conversione in segnale elettrico nell'*apparecchio ricevitore*, ma immediatamente dopo una volta digitalizzato esso è convertito in numeri interi rappresentativi della sua ampiezza. Ora ci basta trasmetterli al destinatario, il quale per utilizzarli non dovrà fare altro che ritrasformare ogni numero in un segnale elettrico proporzionale al suo valore, e quindi inviarlo ad un trasmettitore. Nella linea di trasmissione per un circuito integrato digitale abbiamo la presenza di un'induttanza distribuita lungo la pista; per tanto detto un segnale si propaga in una linea trasferendo energia alla componente induttiva.

In **Figura 1** abbiamo un circuito *RLC* in caso di smorzamento critico (nel circuito sono presenti un'induttanza $L = 2.0H$, una resistenza $R = 2\Omega$ ed una batteria con $f.e.m. = 3V$), la corrente che circola al variare del tempo t misurato in secondi, con $t \geq 0$ s è rappresentata dalla legge

$$i(t) = (2t + b)e^{a-t} \quad (1)$$

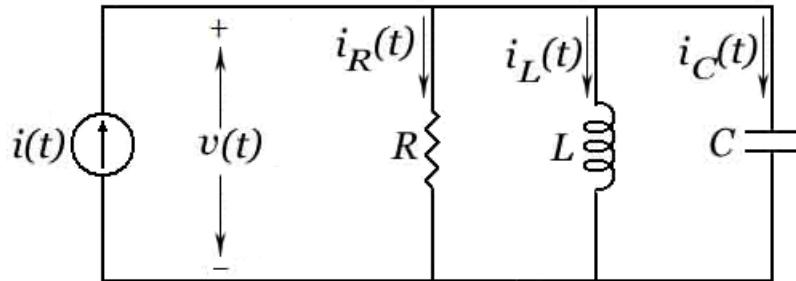


Figura 1: *Circuito RLC in condizioni di smorzamento critico*

Il candidato:

- a) Determini il valore dei parametri a, b , diversi da 0, sapendo che la funzione (1) all'istante $t = 0.5 \text{ s}$ presenta un massimo assoluto e che per $t = 1.5 \text{ s}$ abbia un punto di flesso con valore della corrente pari in modulo a $4\sqrt{e} \text{ A}$
- b) Sostituiti nella (1) ai parametri i valori trovati $a = 2eb = 1$, effettui lo studio completo della funzione e tracci il grafico nel piano cartesiano $\{O; t; i\}$. Infine calcoli l'area della parte di piano delimitata dalla funzione (1) con i parametri corretti e dalle rette $x = 0, x = 2$ e l'asse delle ascisse.

1.1 Costruzione della funzione

Per determinare i due parametri dell'equazione (1), è necessario costruire un sistema di due equazioni.

La prima equazione ci viene fornita indirettamente dalla presenza del punto di massimo assoluto per $t = 0.5s$, in quel punto infatti la derivata prima della funzione sarà 0. La seconda equazione deriva dalla sostituzione del punto di flesso e del valore che la funzione $i(t)$ assume in tale punto. La derivata prima della funzione è:

$$\frac{d}{dt}(2t + b)e^{a-t} = e^{a-t}(-2t - b + 2) \quad (2)$$

Se ora calcoliamo la derivata della funzione in 0 otteniamo il punto di massimo assoluto, eguagliandola poi alla coordinata x del punto di massimo otteniamo la prima equazione parametrica del sistema.

$$y' \left(\frac{1}{2} \right) = e^{a-\frac{1}{2}} \left(-2 \frac{1}{2} - b + 2 \right) = 0 \quad (3)$$

$$y' \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{\sqrt{e}}{e} e^a (1 - b) \quad (4)$$

$$\frac{\sqrt{e}}{e} e^a (1 - b) = 0 \quad (5)$$

L'equazione (5) per *la legge dell'annullamento del prodotto* risulterà uguale a 0 se uno dei due termini è 0. Pertanto si ha:

$$e^a = 0 \wedge 1 - b = 0 \quad (6)$$

$$e^a = 0 \rightarrow a \neq 0 \quad (7)$$

$$b = 1 \quad (8)$$

Dopo aver calcolato il parametro b , costruiamo la seconda equazione del sistema. Sappiamo che in $x = \frac{3}{2}$ la funzione vale $4\sqrt{e}$. Basterà quindi sostituire il punto in questione alla funzione e ricavare a .

$$i \left(\frac{3}{2} \right) = \left(2 \frac{3}{2} \right) e^{a-\frac{3}{2}} \quad (9)$$

Moltiplico

$$i \left(\frac{3}{2} \right) = 4e^{a-\frac{3}{2}} \quad (10)$$

applico la proprietà delle potenze

$$i \left(\frac{3}{2} \right) = 4 \frac{e^a}{e^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

poiché

$$i \left(\frac{3}{2} \right) = 4\sqrt{e} \quad (12)$$

ne deriva

$$4\sqrt{e} = 4 \frac{e^a}{e^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

semplifico e isolo e^a .

$$e^a = e^2 \quad (14)$$

Giungo alla conclusione che $e^a = e^2$ se e solo se $a = 2$, quindi

$$\begin{cases} a = 2 \\ b = 1 \end{cases} \quad (15)$$

che sostituite alla funzione iniziale (1) si ottiene

$$i(t) = (2t + 1)e^{2-t} \quad (16)$$

1.2 Studio di Funzione

Dominio: Lo studio di funzione parte dall'analisi del dominio. La funzione essendo polinomiale, ha come dominio l'asse dei reali, ma siccome dobbiamo analizzarla per valori di $t \geq 0$ il dominio sarà dunque $D : [0, +\infty)$

Intersezioni con gli assi: Per conoscere i punti di intersezione con gli assi poniamo prima $t = 0$ e poi $i(t) = 0$

$$\begin{cases} t = 0 \\ i(t) = (2t + 1)e^{2-t} \end{cases} \quad (17)$$

Che diventa

$$\begin{cases} t = 0 \\ i(t) = (2 \cdot 0 + 1)e^{2-0} \end{cases} \quad (18)$$

infine

$$\begin{cases} t = 0 \\ i(t) = e^2 \end{cases} \quad (19)$$

L'intersezione con l'asse y risulta essere pertanto il punto $(0; e^2)$
Poniamo ora $i(t) = 0$

$$\begin{cases} i(t) = 0 \\ (2t + 1)e^{2-t} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

L'equazione $(2t + 1)e^{2-t}$, per la legge dell'annullamento del prodotto, è uguale a 0 nei casi in cui il primo o il secondo termine siano nulli.

Essendo che il secondo termine, ossia e^{2-t} non è mai uguale a 0 l'unica soluzione è $2t + 1 = 0$, quindi con $t = -\frac{1}{2}$

$$\begin{cases} i(t) = 0 \\ t = -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (21)$$

L'intersezione con l'asse x non appartiene al dominio, quindi per $t \geq 0$ la funzione non interseca l'asse x.

Simmetrie: dall'analisi del dominio non si evincono simmetrie evidenti

Segno della funzione: per analizzare l'andamento della funzione andiamo a studiare il segno.

$$(2t + 1)e^{2-t} > 0 \quad (22)$$

La soluzione della disequazione è $t > -\frac{1}{2}$, ma siccome il dominio è $t \geq 0$, $i(t) > 0 \quad \forall t \in \mathbb{R}$. La funzione dunque è sempre positiva, l'insieme di positività è $(0; +\infty)$

Limiti agli estremi del dominio: definiamo ora l'andamento della funzione con $t \rightarrow +\infty$.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (2t + 1)e^{2-t} = +\infty \cdot e^{+\infty} = +\infty \cdot 0 = 0 \quad (23)$$

Si può facilmente evincere che tale limite risulta essere lo stesso che descrive un asintoto orizzontale, che è del tipo

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = l \quad \text{con } l \in \mathbb{R} \quad (24)$$

Asintoti: dall'analisi del dominio non si riscontrano evidenti asintoti verticali, l'asintoto orizzontale coincide con l'asse x.

Derivata prima della funzione: la derivata prima della funzione è

$$\frac{d}{dt} (2t + 1)e^{2-t} = e^{2-t}(-2t + 1) \quad (25)$$

Dominio della derivata prima: Il dominio coincide con quello della funzione e si escludono punti di non derivabilità.

Studio del segno della derivata prima: per delineare l'andamento della funzione studiamo il segno della derivata prima.

$$e^{2-t}(-2t + 1) > 0 \quad (26)$$

Primo termine maggiore o uguale di 0: $e^{2-t} > 0 \quad \forall t \in \mathbb{R}$

Secondo termine maggiore o uguale di 0: $-2t + 1 > 0 \quad t > \frac{1}{2}$

Ponendo ora le soluzioni in un diagramma dei segni si ottiene

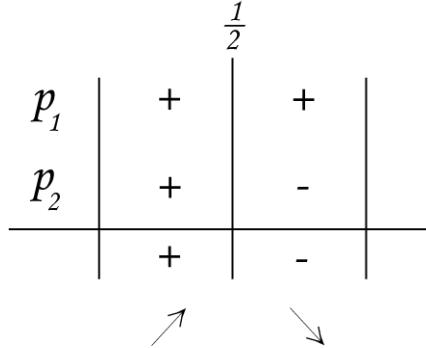


Figura 2: La funzione avrà dunque massimo assoluto in $t = \frac{1}{2}$ con una crescenza per $0 \leq t < \frac{1}{2}$ e una decrescenza per $t > \frac{1}{2}$

Derivata seconda: lo studio del segno della derivata seconda ci permette di definire gli intervalli in cui la concavità della funzione cambia. Calcoliamo la derivata:

$$\frac{d}{dt} e^{2-t}(-2t+1) = e^{2-t}(2t-3) \quad (27)$$

Dominio della derivata seconda: il dominio della derivata seconda coincide con il dominio della derivata prima e della funzione, pertanto si escludono punti di non derivabilità.

Studiamone ora il segno:

$$e^{2-t}(2t-3) > 0 \quad (28)$$

Primo termine maggiore o uguale di 0: $e^{2-t} > 0 \quad \forall t \in \mathbb{R}$

Secondo termine maggiore o uguale di 0: $2t-3 > 0 \quad t > \frac{3}{2}$

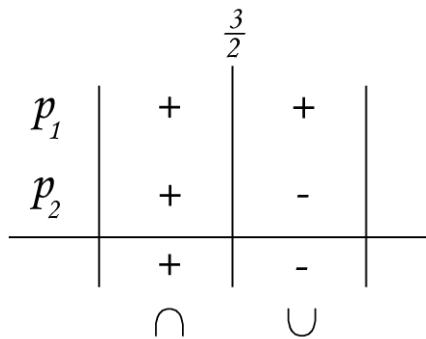
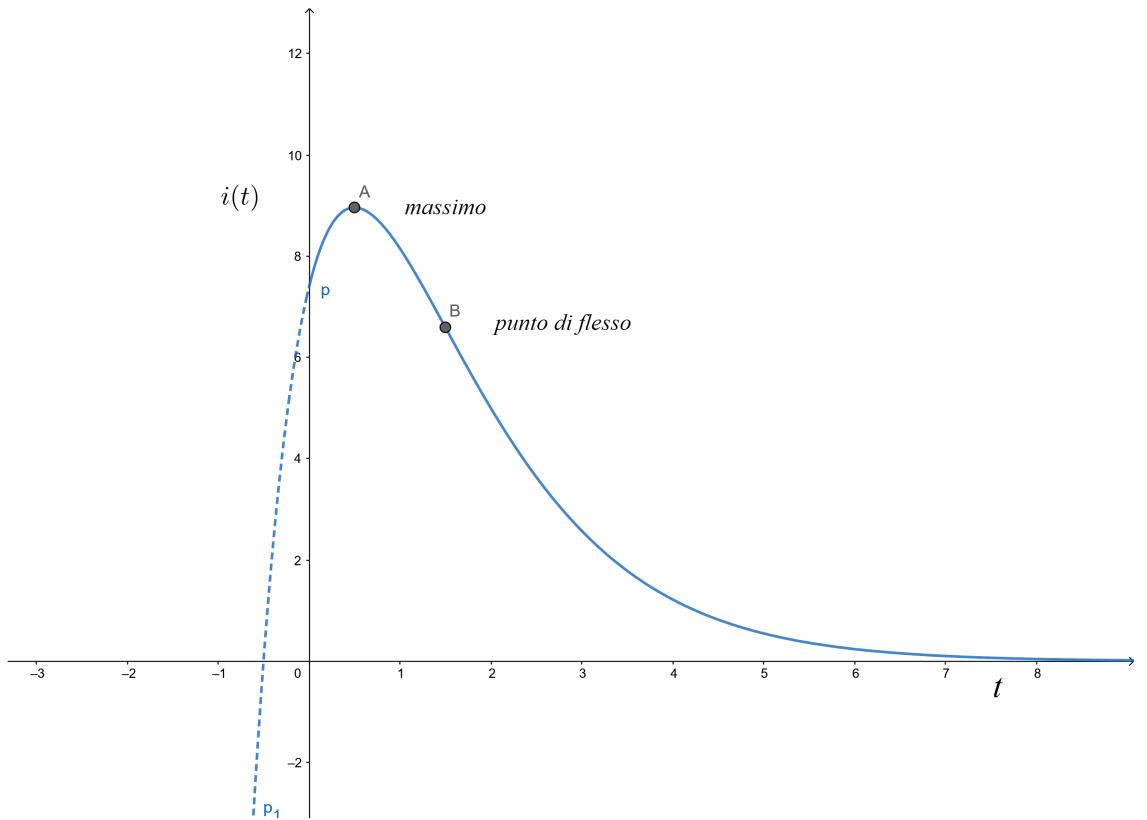


Figura 3: La funzione presenta concavità verso l'alto per $0 \leq t < \frac{3}{2}$ e una concavità verso il basso per $t > \frac{3}{2}$

1.3 Grafico della funzione

Dall'analisi della funzione risulta il seguente grafico:



1.4 Calcolo integrale

Per calcolare l'area sottesa ad una curva in un dato intervallo occorre utilizzare l'operazione di integrale definito.

Graficamente corrisponde a quanto segue:

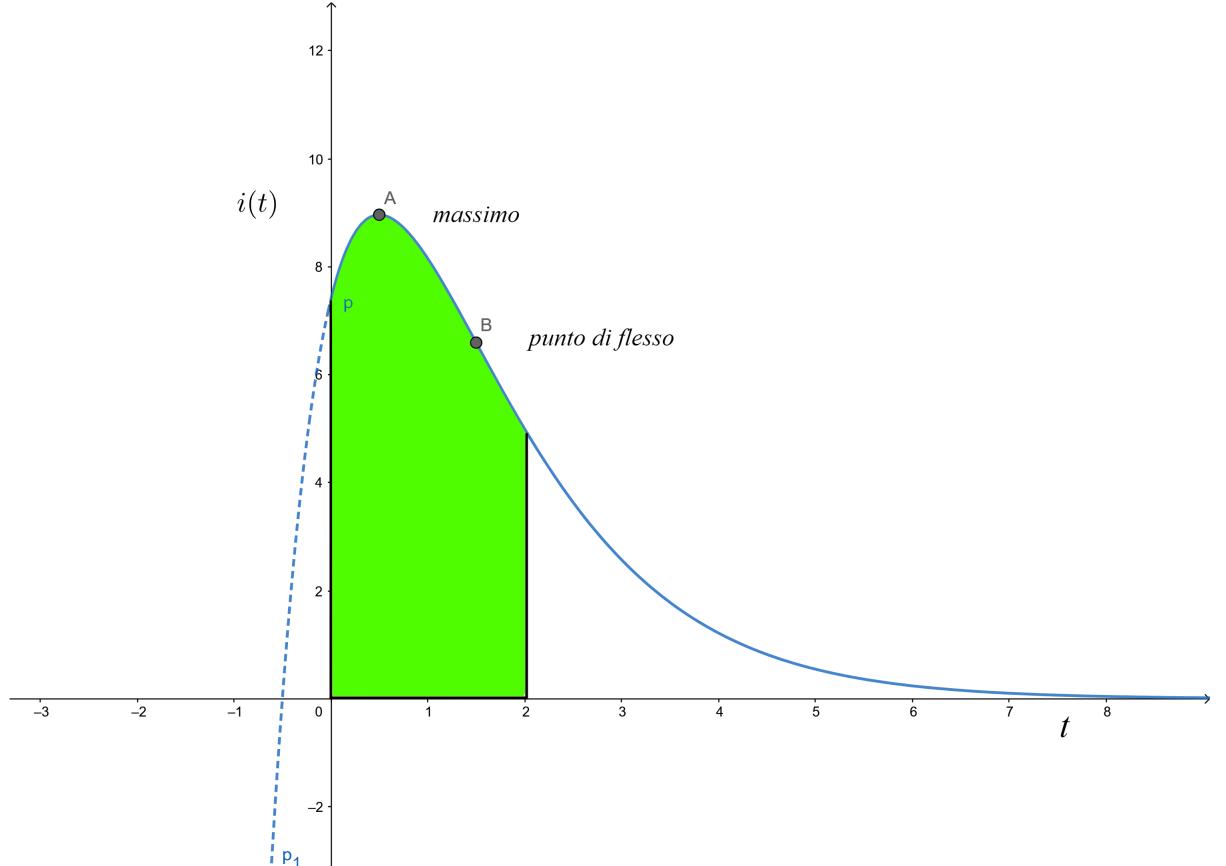


Figura 4: Rappresentazione grafica dell'integrale

Andiamo a costruire il nostro integrale:

$$A_{rea} = \int_0^2 (2t+1)e^{2-t} \quad (29)$$

$$\int_0^2 (2t+1)e^{2-t} = \left[-e^{2-t}(2t+3) \right]_0^2 \quad (30)$$

Dunque l'area sottesa alla figura nell'intervallo $[0; 2]$ risulta essere:

$$A_{rea} = \left[-e^{2-t}(2t+3) \right]_0^2 = \left[-e^{2-2}(2 \cdot 2 + 3) \right] - \left[-e^{2-0}(2 \cdot 0 + 3) \right] = 3e^2 - 7 \quad (31)$$

2 Circuito RL

Successivamente al circuito viene eliminato il condensatore (si veda la Figura 5 per il circuito circuito senza batteria e vedi Figura 6 per il collegato alla batteria.)

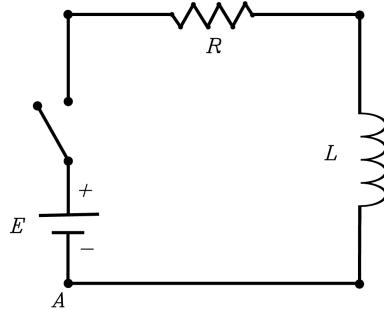


Figura 5: Circuito RL aperto

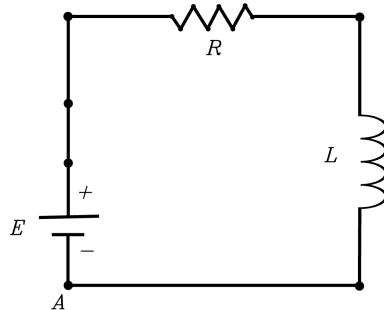


Figura 6: Circuito RL chiuso

Il candidato:

- c) Ricavi la funzione che rappresenta l'intensità di corrente $i(t)$ sia in fase di chiusura che in fase di apertura del circuito.
- d) Indichi il dominio, la positività, i limiti agli estremi del dominio, la derivata prima e la derivata seconda della corrente in fase di chiusura
- e) Calcoli l'integrale della funzione precedente per $t \rightarrow +\infty$

2.1 Intensità di corrente in un circuito RL

2.1.1 Intensità di corrente alla chiusura del circuito

Per ricavare la legge che descrive il passaggio della corrente occorre utilizzare la legge di *Kirchoff* per le maglie di un circuito:

$$V_A + f_{e.m.} - Ri - L \frac{di}{dt} = V_A \quad (32)$$

V_A essendo in entrambi i membri dell'equazione si semplifica, riconducendo l'equazione a

$$f_{e.m.} - Ri - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (33)$$

Portiamo il termine $-L \frac{di}{dt}$ a secondo membro:

$$f_{.e.m.} - Ri = L \frac{di}{dt} \quad (34)$$

Ci troviamo dinanzi ad un'equazione differenziale del primo ordine a variabili separabili. Procediamo dunque a separare le variabili:

$$\frac{f_{.e.m.} - Ri}{di} = \frac{L}{dt} \quad (35)$$

inverto

$$\frac{1}{f_{.e.m.} - Ri} di = \frac{1}{L} dt \quad (36)$$

passo agli integrali:

$$\int \frac{1}{f_{.e.m.} - Ri} di = \int \frac{1}{L} dt \quad (37)$$

il secondo membro trattasi di integrale elementare, il primo possiamo ricondurlo ad una forma nota:

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \ln[f(x)] \quad (38)$$

abbiamo dunque far comparire la derivata del denominatore al numeratore.

Poiché il denominatore $f_{.e.m.} - Ri$ ha come derivata prima $-R$ basterà moltiplicare e dividere per $-R$ l'integrale:

$$\int -\frac{1}{R} \frac{R}{f_{.e.m.} - Ri} di = \int \frac{1}{L} dt \quad (39)$$

Portiamo $-\frac{1}{R}$ fuori dall'integrale in quanto costante

$$-\frac{1}{R} \int \frac{R}{f_{.e.m.} - Ri} di = \int \frac{1}{L} dt \quad (40)$$

Svolgiamo l'integrale al primo membro con la risoluzione (35) e l'integrale elementare a secondo membro.

$$-\frac{1}{R} \ln(f_{.e.m.} - Ri) = \frac{1}{L} t + c \quad (41)$$

Porto $-\frac{1}{R}$ a secondo membro

$$\ln(f_{.e.m.} - Ri) = -\frac{R}{L} t + c \quad (42)$$

Passo agli esponenziali

$$f_{.e.m.} - Ri = e^{-\frac{R}{L} t + c} \quad (43)$$

Applico la proprietà delle potenze $a^{b+c} = a^b \cdot a^c$

$$f_{.e.m.} - Ri = e^{-\frac{R}{L} t} \cdot e^c \quad \text{dove } e^c = k \quad (44)$$

sostituisco e^c con k

$$f_{.e.m.} - Ri = e^{-\frac{R}{L} t} \cdot k \quad (45)$$

isolo il termine della corrente elettrica i .

$$i = \frac{f_{e.m.}}{r} - \frac{k}{r} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (46)$$

Ora vado ad analizzare il circuito nell'istante in cui viene chiuso, a $t = 0$ anche la corrente elettrica $i = 0$

$$\begin{cases} t = 0 \\ i = 0 \\ \frac{f_{e.m.}}{R} - \frac{k}{R} = 0 \end{cases} \quad (47)$$

se

$$\frac{f_{e.m.}}{R} = \frac{k}{R} \Rightarrow f_{e.m.} = k \quad (48)$$

sostituisco k all'equazione (46)

$$i = \frac{f_{e.m.}}{r} - \frac{f_{e.m.}}{r} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (49)$$

Raccolgo il termine $\frac{f_{e.m.}}{R}$

$$i = \frac{f_{e.m.}}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (50)$$

Il termine $\frac{f_{e.m.}}{R}$ rappresenta l'*extracorrente di apertura*, ossia quando $t = 0$

Quod erat demonstrandum

2.1.2 Intensità di corrente all'apertura del circuito

Per la legge di *Kirchoff* sui nodi di un circuito, all'apertura del circuito il potenziale nel punto A deve essere lo stesso presente nel circuito stesso.

$$V_A - L \frac{di}{dt} - Ri = V_A \quad (51)$$

Semplificando V_A si ottiene

$$-L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (52)$$

$$L \frac{di}{dt} = -Ri \quad (53)$$

Ci troviamo di nuovo dinanzi ad un'equazione differenziale a variabili separabili. Procediamo dunque a separare le variabili incrementali:

$$\frac{1}{i} di = -\frac{R}{L} dt \quad (54)$$

Passando agli integrali si ottiene

$$\int \frac{1}{i} di = - \int \frac{R}{L} dt \quad (55)$$

Entrambi sono integrali elementari

$$\ln(i) = -\frac{R}{L} t + c \quad (56)$$

Passando agli esponenziali si ottiene

$$i = e^{-\frac{R}{L}t+c} \quad (57)$$

Applico la proprietà delle potenze $a^{b+c} = a^b \cdot a^c$

$$i = e^{-\frac{R}{L}t} \cdot e^c \quad \text{dove } e^c = k \quad (58)$$

Sostituisco k

$$i = e^{-\frac{R}{L}t} \cdot k \quad (59)$$

Nell'istante in cui si va ad aprire il circuito il tempo sarà nullo, quindi $t = 0$. Se $t = 0$ la corrente elettrica i varrà k , siccome la corrente è costante essa varrà $\frac{f_{e.m.}}{R}$. Riassumendo

$$\begin{cases} t = 0 \\ i = k \\ i = \frac{f_{e.m.}}{R} \\ k = \frac{f_{e.m.}}{R} \end{cases} \quad (60)$$

Sostituisco k con $\frac{f_{e.m.}}{R}$ nell'equazione (59) ed ottengo

$$i = \frac{f_{e.m.}}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (61)$$

Quod erat demonstrandum

2.2 Analisi della funzione

Calcolo di: dominio, segno, limiti agli estremi del dominio, derivata prima e seconda della funzione $i(t)$.

Dominio: essendo la funzione $i(t)$ esponenziale, l'intervallo in cui essa risulterà definita sarà tutto \mathbb{R} :

$$D : \forall t \in \mathbb{R} \rightarrow (-\infty; +\infty) \quad (62)$$

Segno della funzione: per studiare il segno della funzione basterà porla maggiore o uguale di 0:

$$\frac{f_{e.m.}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \geq 0 \quad (63)$$

Tolgo $\frac{f_{e.m.}}{R}$ in quanto costante

$$1 - e^{-\frac{R}{L}t} \geq 0 \quad (64)$$

$$e^{-\frac{R}{L}t} \leq 1 \quad (65)$$

Passo ai logaritmi

$$-\frac{R}{L}t \leq \ln 1 \quad (66)$$

$$-\frac{R}{L}t \leq 0 \quad (67)$$

Svolgo

$$t \geq 0 \quad (68)$$

L'insieme di positività risulterà essere dunque $I.P.(0; +\infty)$ mentre l'insieme di negatività $I.N.(-\infty; 0)$

Limiti agli estremi del dominio: ricordando che il dominio è $(-\infty; +\infty)$ calcoliamo prima

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \frac{f_{e.m.}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = -\infty \quad (69)$$

e dopo

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{f_{e.m.}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{f_{e.m.}}{R} \quad (70)$$

Il termine $\frac{f_{e.m.}}{R}$ è definito come corrente di regime.

Derivata prima: la derivata prima di $i(t)$ risulta essere semplice:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{f_{e.m.}}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{f_{e.m.}}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (71)$$

Derivata seconda:

$$\frac{di'(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{f_{e.m.}}{L} e^{-\frac{R}{L}t} = -\frac{f_{e.m.} \cdot R}{L^2} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (72)$$

Calcolo dell'integrale della funzione tra 0 e $+\infty$: vado a costruire l'integrale definito

$$\int_0^{+\infty} \frac{f_{e.m.}}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (73)$$

sposto fuori dall'operazione di integrale i termini che non dipendono da t

$$\frac{f_{e.m.}}{R} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (74)$$

svolgo l'integrale:

$$-\frac{f_{e.m.} \cdot L}{R^2} \int_0^{+\infty} -\frac{R}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (75)$$

$$-\frac{f_{e.m.} \cdot L}{R^2} \left[e^{-\frac{R}{L}t} \right]_0^{+\infty} \quad (76)$$

$$-\frac{f_{e.m.} \cdot L}{R^2} \left\{ \left[e^{-\frac{R}{L}(+\infty)} \right] - \left[e^{-\frac{R}{L} \cdot 0} \right] \right\} \quad (77)$$

che facilmente risulta essere

$$\frac{f_{e.m.} \cdot L}{R^2} \quad (78)$$

3 Dal problema alla teorie

1. Si descrivano i circuiti puramente ohmico, puramente capacitivo, puramente induttivo in corrente alternata. Si fornisca una rappresentazione grafica della tensione e dell'intensità di corrente e si dia una rappresentazione anche attraverso il diagramma dei fasori.
2. Si dia la definizione di integrale improprio convergente, divergente indeterminato fornendo alcuni esempi.
3. Si enuncia il teorema della circuitazione di Ampère e lo si utilizzi per ricavare il modulo del campo magnetico generato da un solenoide percorso da corrente.
4. Si spiega perché il teorema di Ampère conduce a un paradosso e come questo paradosso è stato superato da Maxwell.

3.1 Circuiti in corrente alternata

3.1.1 Circuito puramente Ohmico

Un circuito *puramente ohmico*, oltre al generatore, contiene solamente dei resistori. Definiamo R come la loro resistenza equivalente in cui è inclusa anche la resistenza interna del generatore

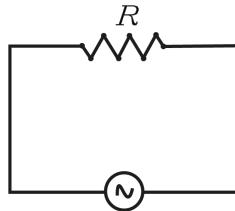


Figura 7: Circuito AC puramente resistivo

In questo tipo di circuito i valori istantanei di $f_{e.m.}(t)$ e di $i(t)$ sono legati alla *prima legge di Ohm*, cioè essi sono tra loro direttamente proporzionali:

$$f_{e.m.}(t) = R \cdot i(t) \quad (79)$$

ricavando $i(t)$ si ottiene

$$i(t) = \frac{f_{e.m.}(t)}{R} \quad (80)$$

per il diagramma dei fasori (alla sezione 3.1.4) sappiamo che

$$f_{e.m.}(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (81)$$

l'equazione finale diventa

$$i(t) = \frac{f_0}{R} \sin(\omega t) \quad (82)$$

La proporzionalità diretta che intercorre tra $f_{e.m.}$ e $i(t)$ implica che se una vale 0 anche l'altra sarà nulla, e quando una delle due giungerà al suo punto massimo anche l'altra farà lo stesso. Possiamo dire perciò che nel caso di circuito *puramente ohmico* la corrente elettrica e la forza elettromotrice saranno *in fase*.

$$f_{e.m.}(t) \propto i(t) \quad (83)$$

per il grafico si veda la pagina seguente

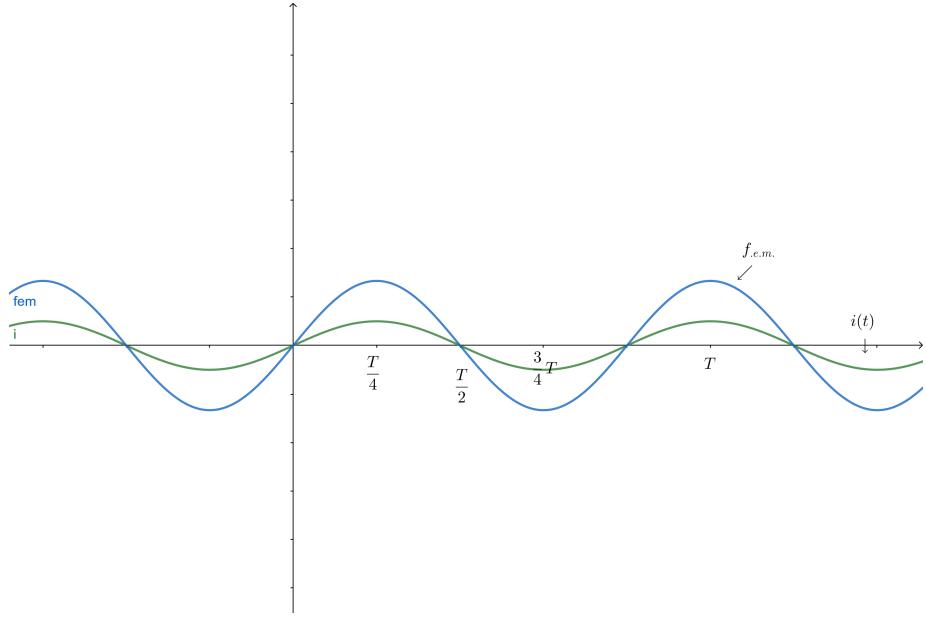


Figura 8: Grafico della $f_{e.m.}$ e di $i(t)$

3.1.2 Circuito puramente capacitivo

In circuito a corrente continua, dove sono presenti un condensatore e un generatore, vi è passaggio di corrente fintanto che il condensatore non si sia caricato completamente. In un circuito a corrente alternata, il generatore cambia continuamente il verso della corrente. In questo caso, sebbene il circuito sia *puramente capacitivo*, in esso passa sempre corrente, in un verso oppure nell'altro.

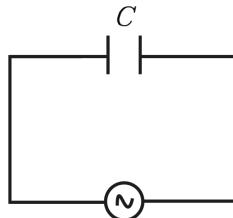


Figura 9: Circuito AC puramente capacitivo

Poiché C è la capacità del condensatore e $q(t)$ è la sua carica istantanea, la differenza di potenziale istantanea tra le sue armature risulterà essere:

$$\Delta V(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (84)$$

Visto che le armature sono collegate direttamente al generatore, la differenza di potenziale $\Delta V(t)$ sarà pari alla forza elettromotrice $f_{e.m.}(t)$ del generatore, quindi vale l'equazione

$$f_{e.m.}(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (85)$$

da cui deriva

$$q(t) = C f_{e.m.}(t) \quad (86)$$

La carica q che all'istante t è accumulata nel condensatore è quella che dall'istante 0 fino a t ha attraversato in uno stesso verso ogni sezione trasversale dei fili del circuito. Per la definizione di intensità di corrente sappiamo che

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{df_{e.m.}(t)}{dt} \quad (87)$$

utilizzando la formula (81) ed eseguendo le opportune sostituzioni si ottiene

$$i(t) = C \frac{d[f_0 \sin(\omega t)]}{dt} = \omega C f_0 \cos(\omega t) \quad (88)$$

per l'identità $\sin(x + \frac{\pi}{2}) = \cos x$, derivata dagli archi associati, si ottiene che

$$i(t) = \omega C f_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (89)$$

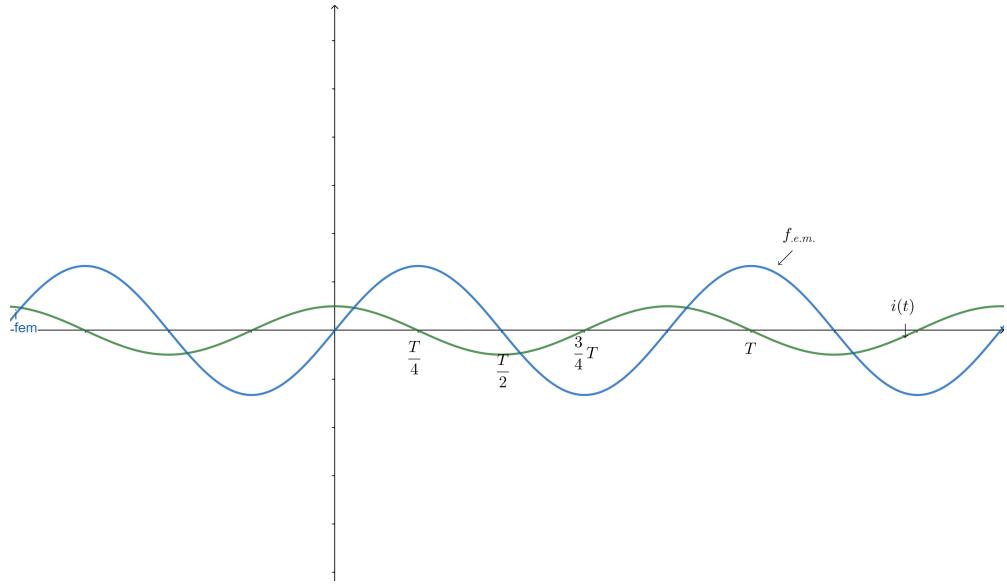


Figura 10: Grafico della $f_{e.m.}$ e di $i(t)$ nel circuito capacitivo

3.1.3 Circuito puramente induttivo

In un circuito puramente induttivo è presente solo un generatore di corrente alternata ed un induttore L

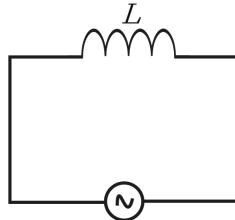


Figura 11: Circuito AC puramente induttivo

Indicando con $f_{e.m.}(t)$ la forza elettromotrice all'istante t , con $i(t)$ l'intensità di corrente e con L l'induttanza presente nel circuito, grazie alla *legge delle maglie di Kirchoff* possiamo ricavare la seguente equazione:

$$V_A + f_{e.m.}(t) - L \frac{di(t)}{dt} = V_A \quad (90)$$

semplificando V_A si ottiene

$$f_{e.m.}(t) - L \frac{di(t)}{dt} = 0 \quad (91)$$

Ci troviamo di fronte ad *un'equazione differenziale a variabili separabili*, procediamo dunque a risolverla:

$$f_{e.m.}(t) dt = L di(t) \quad (92)$$

Sostituendo a $f_{e.m.}(t)$ l'equazione (81) si ottiene

$$f_0 \sin(\omega t) dt = L di(t) \quad (93)$$

passiamo agli integrali:

$$\int f_0 \sin(\omega t) dt = \int L di(t) \quad (94)$$

che banalmente risulta essere

$$-f_0 \frac{1}{\omega} \cos(\omega t) + c = L i(t) + c \quad (95)$$

da cui ricavando $i(t)$ si ottiene

$$i(t) = -f_0 \frac{1}{\omega L} \cos(\omega t) \quad (96)$$

dall'analisi matematica dell'equazione si evince che sia l'intensità di corrente che la forza elettromotrice hanno la stessa pulsazione ω e in tal senso anche lo stesso periodo T . Si nota però che le due grandezze, $f_{e.m.}(t)$ e $i(t)$, non sono direttamente proporzionali.

In base all'identità goniometrica $\sin(x - \frac{\pi}{2}) = -\cos x$, facendo le opportune sostituzioni all'equazione (96), si ottiene la seguente equazione:

$$i(t) = f_0 \frac{1}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (97)$$

Si nota facilmente che $i(t)$ e $f_{e.m.}(t)$ sono sfasate di $\frac{1}{4}$ di periodo; infatti la costante di fase ϕ nella $f_{e.m.}(t)$ risulta essere 0, mentre in $i(t)$ è

$$\phi = -\frac{\pi}{2} \quad (98)$$

Per tale ragione lo sfasamento è $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$ e quindi si nota facilmente che corrisponde ad $\frac{1}{4}$ di periodo.

Possiamo perciò concludere che la corrente in un circuito puramente induttivo oscilla in ritardo di un quarto di periodo rispetto alla forza elettromotrice.

per il grafico si veda la pagina seguente

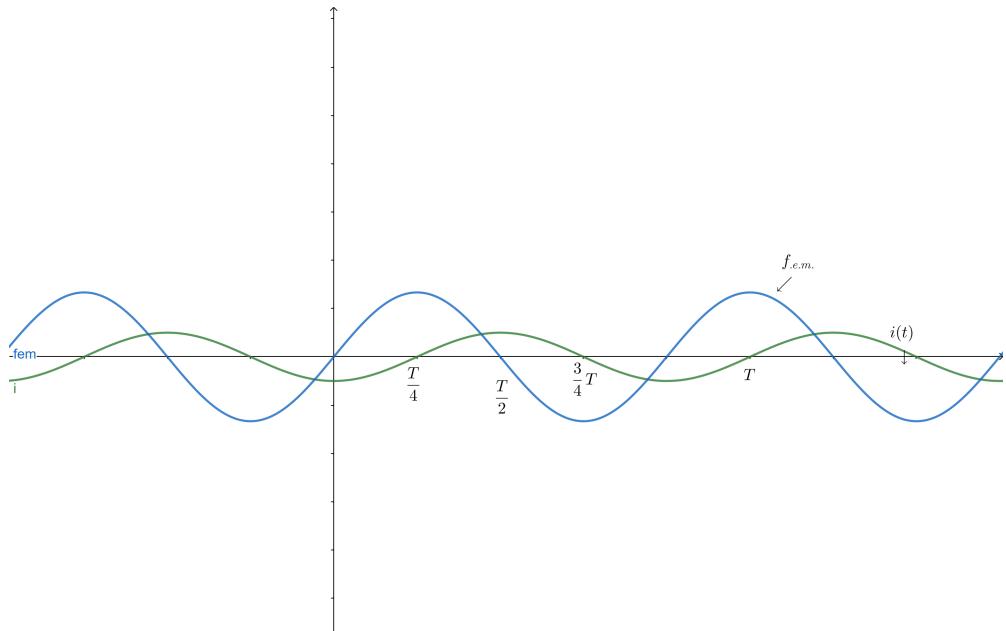


Figura 12: Grafico della $f_{e.m.}$ e di $i(t)$ nel circuito induttivo

3.1.4 Diagramma dei fasori

Un modo pratico di rappresentare una tensione alternata, e la sua corrispondente corrente, prevede l'uso di **vettori di fase** che ruotano in verso antiorario. Tali vettori vengono comunemente chiamati *fasori*.

I fasori permettono di utilizzare la relazione che intercorre tra il moto ciroclare uniforme e il moto lineare sinusoidale. I vettori di fase hanno le seguenti proprietà (figura 13) in cui è riportato un fasore \vec{V} che ruota attorno all'origine:

- *velocità angolare ω* : il vettore ruota in verso antiorario attorno all'origine del sistema di riferimento con velocità angolare ω pari alla *pulsazione della grandezza alternata in analisi (intensità o f.e.m.)*
- *lunghezza V* : rappresenta l'ampiezza massima della grandezza alternata in analisi
- *proiezione sull'asse y* : rappresenta istante per istante il valore $V \sin(\omega t)$

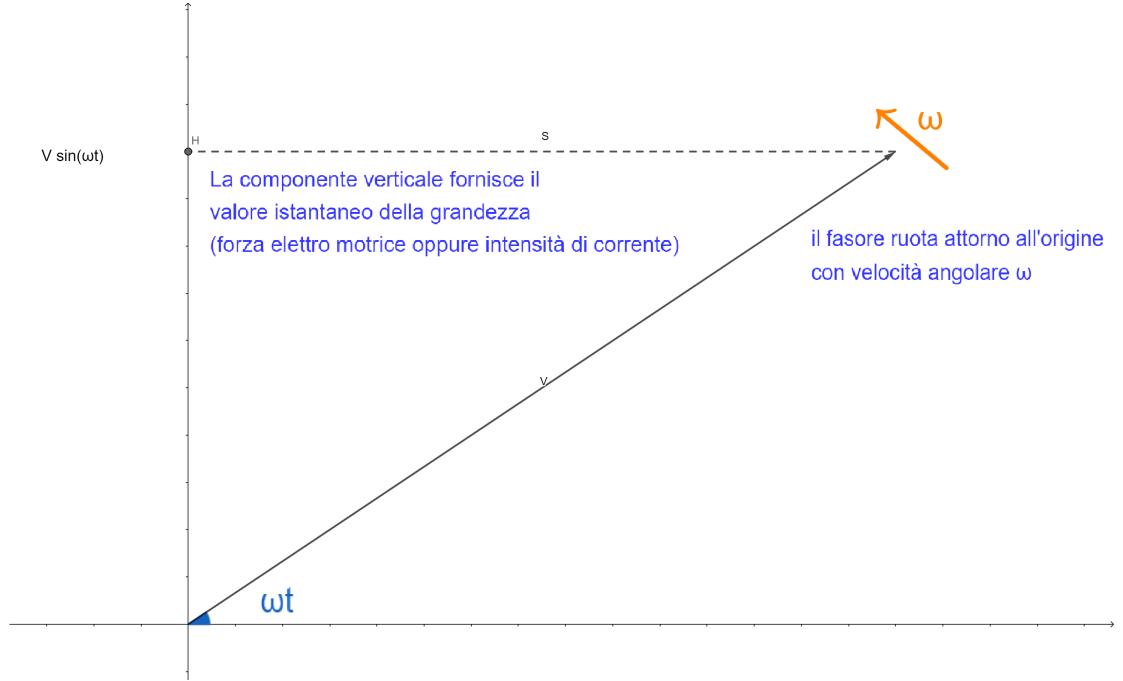


Figura 13: Grafico dei fasori

3.2 Definizione di integrali e relativi esempi

3.2.1 Definizione di integrale improprio convergente

Un integrale si definisce improprio convergente quando un estremo di integrazione è infinito e l'integrale ha risultato finito:

$$\int_a^{\pm\infty} f(x) = l \quad (99)$$

Dove $l \in \mathbb{R}$.

Si può fornire come esempio la celebre *Tromba di Torricelli*, **Figura 14 nella pagina successiva**, un solido ottenuto dalla rotazione lungo l'asse x della curva di equazione $y = \frac{1}{x}$ con $x \geq 1$.

Il volume di tale sfera è ottenuto con il seguente integrale:

$$V_{volume} = \pi \int_1^{\pm\infty} \frac{1}{x^2} dx \quad (100)$$

Svolgendo si ottiene

$$\pi \lim_{z \rightarrow +\infty} \int_1^z \frac{1}{x^2} dx \quad (101)$$

Risolvendo l'integrale elementare si ha

$$\pi \lim_{z \rightarrow +\infty} \left(-\frac{1}{x} \right) \Big|_1^z \quad (102)$$

Proseguendo

$$\pi \lim_{z \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \quad (103)$$

Poiché se $z \rightarrow +\infty$, $\frac{1}{z} \rightarrow 0$ il risultato dell'integrale sarà:

$$V_{volume} = \pi \quad (104)$$

3.2.2 Definizione di integrale improprio divergente

Un integrale si definisce improprio convergente quando un estremo di integrazione è infinito e l'integrale ha risultato infinito:

$$\int_a^{\pm\infty} f(x) = \pm\infty \quad (105)$$

Analogamente alla situazione precedente si può fornire un esempio con la celebre *Tromba di Torricelli*. In questo caso la superficie esterna della rotazione della curva $y = \frac{1}{x}$ risulta essere ∞

La regola per il calcolo dell'area si dimostra essere:

$$\int_1^{+\infty} 2\pi f(x) \sqrt{1 + f(x)^2} \quad (106)$$

Che applicata alla curva $\frac{1}{x}$ diventa:

$$\int_1^{+\infty} 2\pi \frac{1}{x} \sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} = +\infty \quad (107)$$

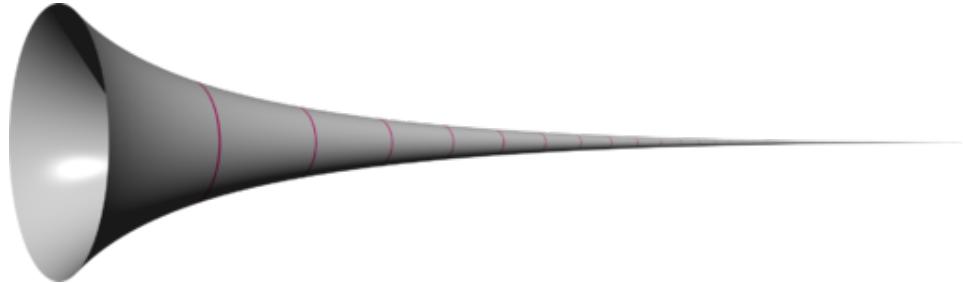


Figura 14: Rappresentazione della *Tromba di Torricelli*, o *di Gabriele*

3.2.3 Definizione di integrale improprio indeterminato

Un integrale si definisce improprio indeterminato quando un estremo di integrazione è $\pm\infty$ e il risultato dell'integrale non esiste. Ad esempio:

$$\int_{-\infty}^{\pi} \cos x \, dx \quad (108)$$

svolgendo si ottiene

$$\int_{-\infty}^{\pi} \cos x \, dx = \lim_{z \rightarrow -\infty} \int_z^{\pi} \cos x \, dx = \lim_{z \rightarrow -\infty} [\sin x]_z^{\pi} = \lim_{z \rightarrow -\infty} [\sin \pi - \sin z] = -\sin(-\infty) \quad (109)$$

Poiché per $z \rightarrow -\infty$, $-\sin x$ oscilla costantemente tra -1 e $+1$, tale limite non esiste e quindi l'integrale improprio è **indeterminato**.

3.3 Campo magnetico di un Solenoide dal teorema di Ampère

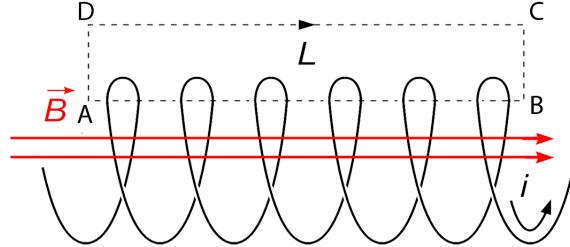


Figura 15:

Il campo magnetico all'interno del solenoide è costante ed uniforme, con direzione e verso solidali all'asse del solenoide. Per calcolarlo ci affidiamo al Teorema di Ampère:

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \mu_0 \cdot \sum_{k=1}^n i_k \quad (110)$$

La circuitazione lungo una superficie γ di un campo magnetico \vec{B} è pari al prodotto tra la costante dielettrica nel vuoto e il valore delle correnti concatenate.

Sappiamo però che il teorema di Ampère definisce la circuitazione come

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \sum_{k=0}^n \vec{B} \cdot l_k \quad (111)$$

La circuitazione lungo una superficie γ di un campo magnetico \vec{B} è pari alla somma dei prodotti scalari tra il campo magnetico e i lati del rettangolo come in figura 15:

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \vec{B}_{AB} \cdot \vec{AB} + \vec{B}_{BC} \cdot \vec{BC} + \vec{B}_{DC} \cdot \vec{DC} + \vec{B}_{AD} \cdot \vec{AD} \quad (112)$$

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \vec{B}_{AB} \cdot AB \cdot \cos \widehat{AB} + \vec{B}_{BC} \cdot BC \cdot \cos \widehat{BC} + \vec{B}_{DC} \cdot DC \cdot \cos \widehat{DC} + \vec{B}_{AD} \cdot AD \cdot \cos \widehat{AD} \quad (113)$$

Si ha però che

$$\cos \widehat{AB} = 1; \cos \widehat{BC} = 0; \vec{B}_{DC} = 0; \cos \widehat{AD} = 0 \quad (114)$$

e sostituendo si ottiene

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = B \cdot AB \quad (115)$$

dove AB corrisponde al generico lato della spira rettangolare che posso prendere grande a piacimento, quindi possiamo chiamarlo l

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = B \cdot l \quad (116)$$

Tornando alla formula (110), possiamo esprimere la sommatoria delle correnti concatenate come il prodotto della densità lineare del solenoide per il numero di spire (che rappresentano l'apporto di corrente) per il valore in modulo della corrente:

$$\sum_{k=1}^n i_k = n_s \cdot l \cdot i \quad (117)$$

sostituendo la (117) alla (110) si ottiene

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \mu_0 \cdot n_s \cdot l \cdot i \quad (118)$$

siamo quasi giunti alla conclusione, a questo punto basterà eguagliare la (118) con la (116) per ottenere

$$\mu_0 \cdot n_s \cdot l \cdot i = \mu_0 \cdot n_s \cdot l \cdot i \quad (119)$$

semplificando l ed isolando B si ottiene il campo magnetico di un solenoide

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot i \quad (120)$$

essendo n il numero di spire per unità di lunghezza del solenoide, può essere espresso anche come il rapporto tra il numero di spire del solenoide e la sua lunghezza l :

$$n = \frac{N}{l} \quad (121)$$

e quindi analogamente la formula risolutiva può essere scritta anche

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot i \quad (122)$$

3.4 Il paradosso di Ampère e la soluzione di Maxwell

Il *teorema di Ampère* enuncia che la circuitazione Γ lungo una linea chiusa γ è pari al prodotto di μ_0 , *costante dielettrica nel vuoto*, e la sommatoria delle correnti concatenate alla linea.

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_S) = \mu_0 \cdot \sum_{k=1}^n i_k \quad (123)$$

Per correnti concatenate ad una linea chiusa si intendono tutte quelle correnti che attraversano in qualunque verso, una qualsiasi superficie che abbia come bordo il cammino chiuso γ , come in figura 16

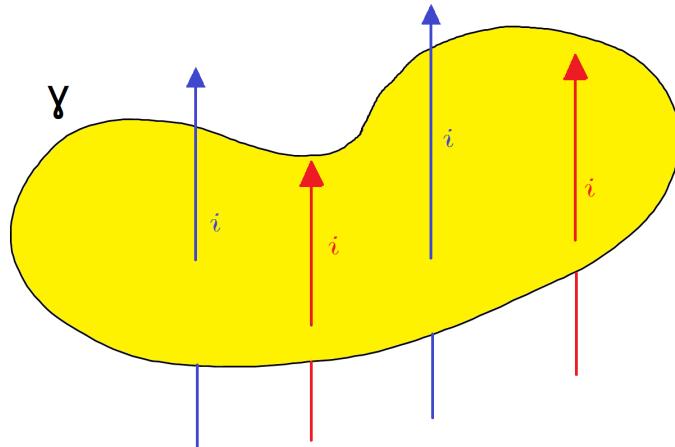


Figura 16: Rappresentazione grafica delle correnti concatenate ad una linea chiusa γ

La circuitazione del campo magnetico è inoltre data dalla formula

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \sum_{k=0}^n \vec{B} \cdot l_k \quad (124)$$

Si consideri un condensatore in fase di carica. La *circuitazione* del campo magnetico lungo la linea chiusa γ può fare uso di qualunque superficie che abbia come bordo il cammino chiuso. Nel caso particolare si sono scelte due superfici S_1 e S_2 . Il paradosso sta nel fatto che la circuitazione del campo magnetico dipende dalla scelta della superficie.

Nel caso di S_1 la superficie è quella circolare avente come bordo γ e avente come corrente concatenata i (figura 17)

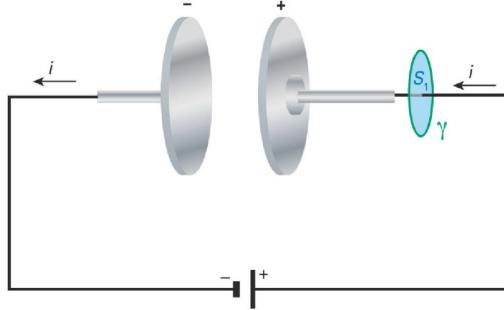


Figura 17: Superficie S_1

La circuitazione del caso in esame è pertanto

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \sum_{k=0}^n \vec{B} \cdot l_k = \mu_0 \cdot i \quad (125)$$

Consideriamo ora la superficie S_2 (figura 18)

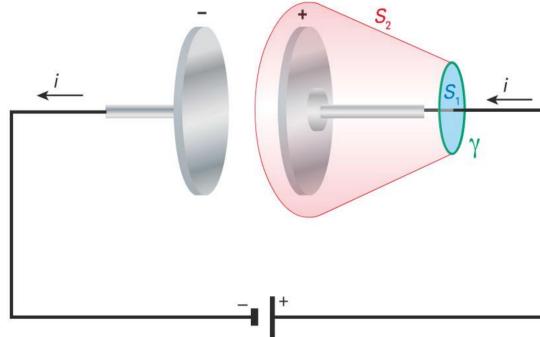


Figura 18: Superficie S_2

Andiamo ora a calcolare la *circuitazione* di S_2

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \sum_{k=0}^n \vec{B} \cdot l_k = 0 \quad (126)$$

siamo giunti ad un paradosso. Pur avendo la stessa linea chiusa γ , considerando due superfici diverse si hanno due differenti circuitazioni. Maxwell per questo motivo tentò di risolvere tale paradosso giungendo a modificare la legge di Ampere, generalizzandola.

Sappiamo che il campo elettrico nel condensatore vale

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{S \cdot \epsilon_0} \quad (127)$$

la corrente i che carica un condensatore scaturisce una variazione della quantità della carica ΔQ e conseguentemente una variazione del campo elettrico del condensatore pari a

$$\Delta E = \frac{\Delta Q}{\epsilon_0 \cdot S} \quad (128)$$

da cui ricavando ΔQ si ottiene

$$\Delta Q = \Delta E \cdot \epsilon_0 \cdot S \quad (129)$$

essendo la corrente nel condensatore pari a

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (130)$$

sostituendo la (129) si ottiene

$$i = \frac{\epsilon_0 \cdot \Delta E \cdot S}{\Delta t} \quad (131)$$

sapendo che $\Delta \Phi_S(\vec{E}) = S \cdot \Delta E$, si arriva a

$$i = \epsilon_0 \cdot \frac{\Delta \Phi_S(\vec{E})}{\Delta t} \quad (132)$$

tal equazione però rappresenta la corrente *media*, per la corrente istantanea occorre utilizzare le derivate:

$$i = \epsilon_0 \cdot \frac{d \Phi_S(\vec{E})}{dt} \quad (133)$$

questa particolare espressione viene definita *corrente di spostamento*.

La corrente i che fluisce nel conduttore produce un campo magnetico e di conseguenza la circuitazione è diversa da zero.

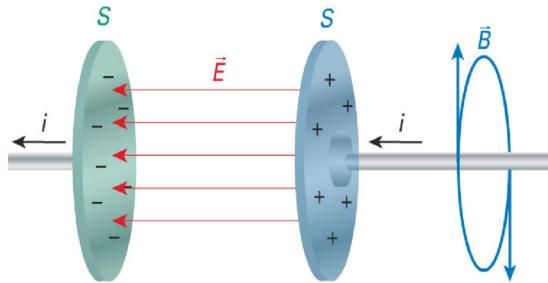


Figura 19: Campo magnetico al di fuori del condensatore

Maxwell ipotizzò che un campo elettrico variabile nel tempo $\vec{E}(t)$ produce un campo magnetico, anch'esso variabile nel tempo $\vec{B}(t)$ che comporta una circuitazione diversa da zero lungo la linea chiusa che ha come contorno S (figura in alto). La legge di Ampere con la modifica apportata da Maxwell (*legge di Ampere-Maxwell*) è la seguente:

$$\Gamma_\gamma(\vec{B}_s) = \mu_0 \cdot i + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d \Phi_S(\vec{E})}{dt} \quad (134)$$

In forma matematicamente più corretta, utilizzando gli integrali di linea, si giunge alla formula finale:

$$\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (135)$$

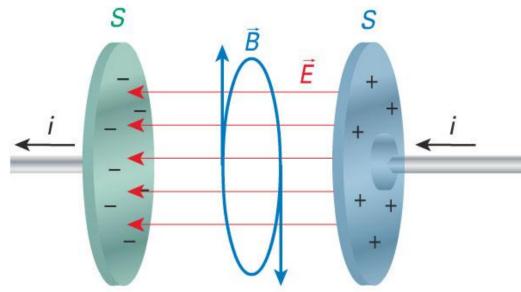


Figura 20: Campo magnetico varibile all'interno del condensatore

Dall'analisi fisica della seguente equazione possiamo arrivare alla conclusione che:
"Campi elettrici variabili nel tempo producono campi magnetici variabili nel tempo che a loro volta producono campi elettrici variabili nel tempo", che corrisponde alla definizione di onda elettromagnetica

4 Dalla valvola termoionica al computer quantistico

4.1 Il primo componente elettronico attivo: "la valvola termoionica"

La valvola termoionica (*o tubo a vuoto, Figura 21*) è stato il primo componente elettronico *attivo* inventato. Per *attivo* si intende un componente che, grazie a una fonte esterna di energia, fornisce in uscita un segnale amplificato. Il funzionamento in linea di massima è semplice: il catodo emette elettroni per *effetto termoionico*; il flusso di elettroni, cioè la corrente elettrica, passa fra il catodo e un altro elettrodo, l'anodo, controllato dalla tensione a cui sono poste alcune parti metalliche (griglie) frapposte tra i due elettrodi. Poiché il flusso di corrente è dovuto agli elettroni (non a ioni), taluni chiamano il dispositivo valvola termoelettronica.



Figura 21: Rappresentazione della *Esempio di valvola termoionica pentodo*

Funzionamento: Il tubo termoionico è costruttivamente simile alla comuniissima lampadina del tipo a incandescenza, infatti non è altro che un involucro di vetro (in alcuni modelli è di metallo o di ceramica), nel quale è fatto il vuoto, contenente un filamento metallico portato all'incandescenza (tra i 1.000 e i 3.000 °C) facendolo attraversare da una corrente elettrica. Differentemente dalla lampadina, contiene uno o più elementi metallici (a forma di griglia o di schermi), collegabili dall'esterno. Il filamento metallico, o meglio un tubicino metallico che lo avvolge, nel caso di riscaldamento indiretto, è chiamato catodo. L'elemento metallico più esterno è chiamato anodo. Eventuali elementi intermedi sono chiamati griglie. Il principio di funzionamento del tubo termoionico è quello dell'emissione termoionica: ogni metallo, soprattutto ad alte temperature, emette elettroni, cariche elettriche elementari di segno negativo. Se il catodo è polarizzato negativamente rispetto all'anodo, ovvero se il catodo è collegato al polo negativo di una batteria e l'anodo a quello positivo, si stabilirà un flusso di elettroni, ossia una corrente elettrica, tra catodo e anodo (perché gli elettroni vengono attratti dall'anodo). Se la polarizzazione è opposta, nessuna corrente elettrica passerà tra catodo e anodo, perché l'anodo respingerà gli elettroni. Il risultato è quello di un dispositivo in grado di far passare la corrente in un solo senso, detto diodo usato principalmente come rivelatore o come raddrizzatore. Nei primi tipi di valvola, il catodo era a riscaldamento diretto, ossia il catodo era costituito dal filamento stesso.

Il sistema venne abbandonato, visti i problemi legati alla necessità di far lavorare i catodi a tensioni diverse (vedi valvole multiple, doppi triodi, triodi-pentodi). Il compito di scaldare il catodo è oggi affidato a un filamento simile a quello delle lampadine a bassa tensione, inserito all'interno di un tubetto in lega di nichel rivestito di elementi che favoriscono l'emissione elettronica (ossidi di bario, stronzio, torio ecc.), che costituisce il catodo. Questa soluzione, detta a riscaldamento indiretto, consente inoltre di alimentare i filamenti di differenti valvole di un'apparecchiatura con una fonte comune, solitamente un avvolgimento secondario apposito di un trasformatore. Il collegamento tra i filamenti può essere in serie o in parallelo. Se tra catodo e anodo viene posta una griglia metallica, è intuitivo che se questa è polarizzata positivamente rispetto al catodo, ma di meno rispetto all'anodo, gli elettroni emessi dal catodo vi saranno attratti e quindi passeranno attraverso

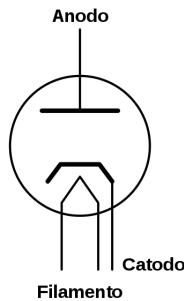


Figura 22: Schema di funzionamento di una valvola termoionica

le maglie della griglia per raggiungere l'anodo. Contrariamente, se la griglia è polarizzata negativamente, questa respingerà gli elettroni provenienti dal catodo. Pertanto, applicando una tensione variabile tra catodo e griglia, si otterrà un passaggio di corrente tra catodo e anodo che seguirà, amplificandolo, l'andamento del segnale applicato alla griglia stessa. L'effetto risultante è quello di un'amplificazione di tensione.

Un tubo termoionico siffatto si dice triodo, figura 23.

Dopo il triodo, con l'aggiunta di altre griglie, sono stati costruiti gli amplificatori di corrente: tetrodo, pentodo, eptodo (quest'ultimo usato di solito come convertitore di frequenza), così chiamati in base al numero degli elettrodi di controllo. Essi sono stati i primi dispositivi elettronici fondamentali per l'amplificazione dei segnali elettrici, dagli albori dell'elettronica, compiendo quelle funzioni oggi quasi interamente realizzate dai transistor, comunque in alcuni settori dell'HI-FI e dell'elettronica di potenza specie in alta frequenza, impieghi Radar, sono ancora di largo impiego.



Figura 23: Il primo triodo realizzato

Cenni storici: L'effetto dell'emissione termoionica di elettroni da parte di metalli portati all'incandescenza era già stato scoperto in Inghilterra nel 1873 e fu quindi studiato attentamente dall'inglese *Owen Willans Richardson* che per questo ricevette nel 1928 il Premio Nobel per la Fisica. Fu un altro inglese, *John Ambrose Fleming*, che inventò il diodo nel 1904 e un inventore americano, *Lee De Forest*, a inventare il triodo nel 1906. *Guglielmo Marconi*, genio italiano, fu tra i primi a riconoscere l'importanza dei tubi termoionici e a farne uso nei suoi *apparati rice-trasmettenti*.

Durante la seconda guerra mondiale furono realizzati *tubi termoionici* per applicazioni militari, più robusti e che potevano sostenere urti notevoli. Radio *rice-trasmettitori* e strumentazione elettronica utilizzanti questo tipo di tubi termoionici, ma dal progetto più moderno, furono impiegati dagli Stati Uniti anche nella guerra del Vietnam: i nuovi tubi si chiamavano *Nuvistor*, e furono l'ultima versione del tubo termoionico prima della *definitiva obsolescenza*.



Figura 24: Esempio di valvola in funzione

4.2 Il transistor

Il transistor, termine inglese contrazione di *trans(fer) e (re)sistor*, è un dispositivo a semiconduttore largamente usato nell'elettronica analogica.

Invenzione: Il fisico e ingegnere Julius Edgar Lilienfeld progettò il primo transistor in Canada nel 1925, descrivendo un dispositivo simile all'attuale transistor ad effetto di campo (*che tratteremo più avanti*). Tuttavia, Lilienfeld non pubblicò alcuna ricerca a tal proposito e nel 1934 l'inventore tedesco Oskar Heil brevettò un dispositivo molto simile.

Storia: Il primo transistor era realizzato con due elettrodi, le cui punte, *molto sottili* e distanti tra loro *alcuni centesimi di millimetro*, per la precisione *da 127 a 50 micron*, erano premute sulla superficie di una piastrina di un cristallo di germanio molto puro. La tecnica del contatto puntiforme era già nota ed utilizzata per la costruzione dei diodi rivelatori. Provvisoriamente, dato che il transistor funzionava in modo analogo ad un triodo, venne chiamato *triodo a stato solido*. Il nome definitivo deriva dall'unione dei termini "TRANSconductance" e "resISTOR". Il primo prototipo funzionante fu realizzato nel mese di dicembre del 1947 da due ricercatori dei laboratori Bell Labs: *Walter Brattain e John Bardeen* del gruppo di ricerca guidato da *William Shockley*.

Era questo il transistor a contatti puntiformi (a punte), mentre si deve a *William Shockley* l'ideazione, nel gennaio 1948, e la formulazione, nella primavera dell'anno successivo, della teoria del transistor a giunzione, chiamato inizialmente dallo stesso Shockley, nel suo diario di laboratorio, "*sandwich transistor*". Nel 1956, i tre ricercatori furono insigniti del *premio Nobel per la Fisica*, con la motivazione «per le ricerche sui semiconduttori e per la scoperta dell'effetto transistor. Già verso la fine degli anni '50, la produzione di transistor si orientò verso l'utilizzo del *silicio* come elemento semiconduttore, e, negli anni '70, il transistor al germanio divenne obsoleto.



Figura 25: Una riproduzione del primo transistor creato

Descrizione e funzionamento: I tipi di contenitori del dispositivo si sono moltiplicati e, negli anni, sono stati usati materiali come *la ceramica, il metallo, la plastica o assemblaggi misti*. Negli anni '60, venne usato anche il vetro: il produttore europeo Philips racchiudeva i suoi dispositivi di piccola potenza, in un'ampollina cilindrica in vetro verniciata in nero, riempita di grasso al silicone. Nel caso il dispositivo avesse dissipazione maggiore, il dispositivo era ricoperto semplicemente da un cappuccio in alluminio. Nel tempo, molti tipi di contenitori sono andati in disuso a favore di geometrie più efficienti nello smaltimento del calore prodotto. I dispositivi di potenza attuali per bassa frequenza, compresi alcuni tipi di diodi e di IC, vengono assemblati nel contenitore standard definito TO-3, provvisto di due flange forate adatte al fissaggio sul dissipatore tramite una coppia di viti. Realizzato in acciaio, rame, o alluminio, con temperatura ambiente di 25 °C è in grado di trasferire al dissipatore, 300 watt di potenza termica. Il transistor è composto da un materiale semiconduttore al quale sono applicati tre terminali che lo collegano al circuito esterno.

Il funzionamento del transistor è basato sulla giunzione p-n, scoperta casualmente da *Russell Ohl* il 23 febbraio 1939.

Principali funzioni: Le principali funzioni che gli vengono affidate all'interno di un circuito elettronico sono:

1. L'amplificazione di un segnale in entrata.
2. Il funzionamento da interruttore (switcher).

Il funzionamento da interruttore trova come impiego fondamentale quello di formare degli insiemi (dell'ordine di milioni di unità) per comporre i "microprocessori", che sono alla base dell'informatica e del calcolo computazionale. I transistor presenti nei microprocessori sono del tipo "a effetto di campo". Si tratta di un substrato di materiale semiconduttore drogato, solitamente in silicio, al quale sono applicati quattro terminali: il gate, il source, il drain ed il bulk; quest'ultimo, se presente, è generalmente connesso al source e se non presente è connesso al terminale esterno del gate. Il principio di funzionamento del transistor ad effetto di campo si fonda sulla possibilità di controllare la condutività elettrica del dispositivo, e quindi la corrente elettrica che lo attraversa, mediante la formazione di un campo elettrico al suo interno. Il processo di conduzione coinvolge solo i portatori di carica maggioritari, pertanto questo tipo di transistore è detto unipolare.

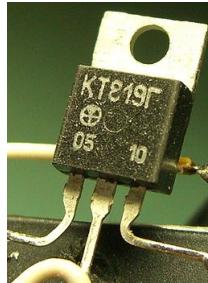


Figura 26: un transistor bipolare

4.3 Transistor ad effetto di campo

In elettronica il transistor a effetto di campo, abbreviato FET, dall'inglese field-effect transistor, è un tipo di transistor largamente usato nel campo dell'elettronica digitale e diffuso, in maniera minore, nell'elettronica analogica. È la parte fondamentale dei *microprocessori*, in quanto il suo stato logico è alla base del linguaggio macchina, ossia il bit.

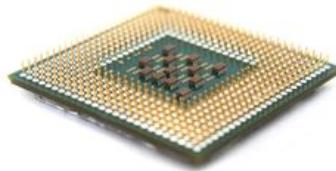


Figura 27: un microprocessore in commercio, all'interno sono contenuti oltre 5 miliardi di transistor a effetto di campo

Descrizione: Si tratta di un substrato di materiale semiconduttore drogato, solitamente in silicio, al quale sono applicati quattro terminali: il gate, il source, il drain ed il bulk. Quest'ultimo, se presente, è generalmente connesso al source, se non è presente invece esso è connesso al terminale esterno del gate. Il principio di funzionamento del transistor ad effetto di campo si fonda sulla possibilità di controllare la condutività elettrica del dispositivo, e quindi la corrente elettrica che lo attraversa mediante la formazione di un campo elettrico al suo interno. Il processo di conduzione coinvolge solo i portatori di carica maggioritari, pertanto questo tipo di transistor è detto unipolare.

Il transistor ad effetto di campo viene realizzato affiancando il terminale di gate da due regioni di silicio drogati in maniera opposta al bulk, che costituiscono i terminali di drain e source. Tali diffusioni costituiscono una giunzione p-n, un contatto tra i blocchi di tipo P e di tipo N ed è priva di portatori liberi. Ai due lati della giunzione vi è una differenza di potenziale costante, chiamata tensione di built-in, che deve mantenere una polarizzazione inversa per il funzionamento del dispositivo.

Struttura: La regione di substrato compresa tra i due terminali drain e source è detta regione di canale, ed è caratterizzata da una lunghezza di canale L e da una larghezza di canale W , misurate rispettivamente lungo la direzione parallela e perpendicolare rispetto al verso della corrente che percorre il canale. Tale regione fornisce un percorso conduttivo tra i due terminali ed è separata dal gate da un sottile strato solitamente composto da biossido di silicio.

Funzionamento: In un transistor FET (figura 28) l'effetto transistor si ottiene tramite il campo elettrico indotto dalla tensione applicata tra il terminale di gate e l'estremità opposta del semiconduttore, detto bulk, che è generalmente posto al potenziale di source. Tale differenza di potenziale crea un canale di conduzione nel silicio attraverso il quale i portatori di carica si spostano dal source al drain nel caso di un FET a canale N, dal drain al source nel caso di un FET a canale P. L'applicazione di una tensione al gate permette quindi di controllare il passaggio di cariche tra il source e il drain, e quindi la corrente elettrica che attraversa il dispositivo.

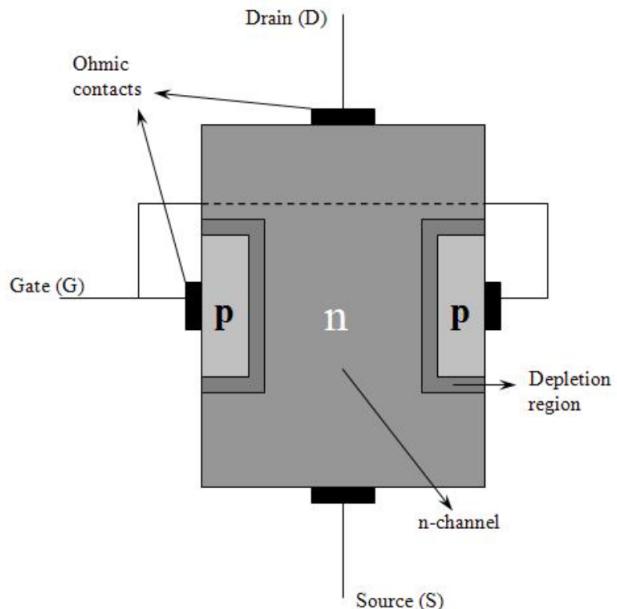


Figura 28: Schema di funzionamento di un transistor JFET

La prima legge di Moore:

La complessità di un microcircuito, misurata ad esempio tramite il numero di transistor per chip, raddoppia ogni 18 mesi e quadruplica ogni 3 anni.

La legge è tratta da un'osservazione empirica di David House, direttore esecutivo di Intel, commentando la precedente osservazione di Gordon Moore, cofondatore di Intel con Robert Noyce. Nel 1965, Gordon Moore, che all'epoca era a capo del settore R&D della Fairchild Semiconductor e tre anni dopo fondò la Intel, scrisse infatti un articolo su una rivista specializzata nel quale illustrava come nel periodo 1959-1965 il numero di componenti elettronici (ad esempio i transistor) che formano un chip fosse raddoppiato ogni anno (nel 1975 venne riformulata in "ogni 18 mesi"). Moore, grazie alla sua supposizione poi diventata legge, è stato dunque tra coloro che hanno dato il via alla corsa all'evoluzione dei processori.

I limiti della prima legge di Moore I limiti della prima legge di Moore starebbero solo nel raggiungimento dei limiti fisici imposti per la riduzione delle dimensioni dei transistor, e quindi della scala di integrazione, al di sotto dei quali si genererebbero effetti 'parassiti' indesiderati di natura quantistica nei circuiti elettronici. Tali limiti sarebbero peraltro già stati raggiunti con la generazione dei processori Pentium al di sopra del quale l'unico modo possibile e praticabile

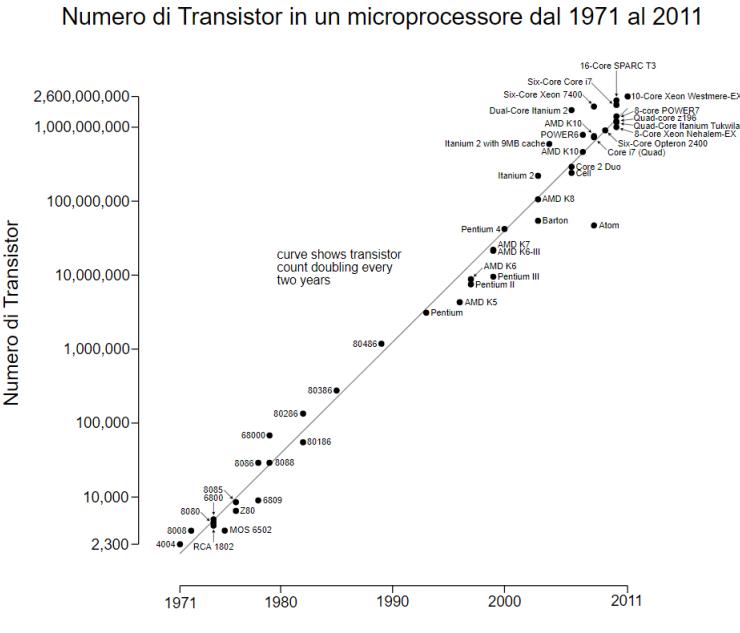


Figura 29: Grafico cartesiano della prima legge di Moore

per aumentare le prestazioni di calcolo è rappresentato dalla tecnologia multicore ovvero dall'accoppiamento in parallelo di più processori come avviene peraltro nei supercalcolatori dei centri di calcolo.

4.4 Il computer quantistico

Il computer quantistico (*in inglese: quantum pc*), è un tipo di calcolatore che al posto dei classici *bit* ottenuti da ogni singolo transistor, è formato da una base logica chiamata *QBit*.

Che cos'è un QBit? Per definire il qubit è indispensabile introdurre innanzi tutto il concetto nuovo di quanto di informazione, cioè la più piccola porzione in cui una qualsiasi informazione codificata può essere scomposta; è quindi l'unità di misura dell'informazione codificata. Così come il bit è il quanto di informazione della computazione classica, la computazione quantistica si basa su un concetto analogo: il quantum bit. Al pari del bit, il qubit è un oggetto matematico con sue specifiche proprietà. Il vantaggio nel trattare i qubit come entità astratte risiede nella libertà di costruire una teoria generale della computazione quantistica che non dipende dagli specifici sistemi utilizzati per la sua realizzazione.

In cosa è utilizzato un computer quantistico?

Le applicazioni odierne di una macchina computazionale quantistica sono molte e variegate, basti pensare che un Computer Quantistico riesce ad elaborare più informazioni contemporaneamente e in parallelo, garantendo così la risoluzione di problemi matematici in tempi-uomo utili. Ad esempio nel 2019 Google ha raggiunto quella che viene chiamata *Quantum Supremacy*, ossia la *Supremazia Quantistica*, risolvendo in appena 200 secondi un problema matematico che avrebbe impiegato svariate **decine di migliaia di anni** per essere risolto dal più potente supercomputer al mondo.

Gli ambiti in un utilizzo futuro, in alcuni anche attuale, del calcolo quantistico sono molteplici:



Figura 30: il *core* di un computer quantistico

- **apprendimento automatico:** machine learning migliorato grazie a una struttura previsionale più rapida (*dovuta al calcolo parallelo*). Gli esempi includono macchine di Boltzmann (*ossia modelli grafici probabilistici*), apprendimento semi-supervisionato, apprendimento non supervisionato e apprendimento profondo (*Deep Learning*);
- **intelligenza artificiale:** calcoli più veloci potrebbero migliorare la percezione, la comprensione e la diagnosi dei guasti del circuito/classificatori binari;
- **chimica:** nuovi fertilizzanti, catalizzatori, prodotti chimici per batterie apporteranno *enormi miglioramenti* nell'utilizzo delle risorse;
- **biochimica:** nuovi farmaci, farmaci su misura, *medicina personalizzata*
- **finanza:** il calcolo quantistico potrebbe consentire le cosiddette “*simulazioni Monte Carlo*” più rapide e complesse; ad esempio nell’ambito del trading, instabilità del mercato, ottimizzazione dei prezzi e strategie di copertura finanziaria
- **medicina e salute:** il *sequenziamento del DNA*, l’ottimizzazione del trattamento con radioterapia, il rilevamento del tumore al cervello, potrebbero essere eseguiti in pochi secondi anziché in ore o settimane.
- **informatica:** funzioni di *ricerca multidimensionale* più veloci; ad esempio, *ottimizzazione delle query*, calcoli matematici e simulazioni.



Figura 31: Un modulo di D-Wave, *la quantum platform* con oltre 2000 QBit

5 The first example of an intelligent machine: the creature of Viktor Frankenstein

5.1 The Story:

This is the story of the birth of a monster made by Doctor Victor Frankenstein. A day, when he was fifteen years old, during a thunderstorm, a flash of lightning hit a tree and in a few seconds the tree was reduced to a hollow piece of black wood two meters high. From that he wanted to find out all he could about electricity and its incredible power. When he was seventeen years old his mother died. After some time he left home to go to University. His obsession with mystery life encouraged him to work hard, he was completely absorbed by his studies and for two years he never took a day off and wrote fewer and fewer letters to his family. One day he had found the secret of life; even more, he had found out how to generate life but he couldn't imagine what it led to.

He worked undisturbed in a laboratory for a year, at the end he had created a monster: its skin and its eyes were yellow, its long dark hair and its white teeth were almost beautiful but the rest of the face was very ugly. The arms and the legs were enormous and it was two and a half meters tall. Frankenstein wanted to destroy it but he wanted to know if he was really capable of putting life into it. He joined the body to the wires from a machine that could send the electricity by it. After two days of waiting there was a violent thunderstorm and with the first flash of lightning the creature began to move. It was even uglier and more horrible now it was alive. Victor ran out of the laboratory and locked the door. Then he went to turn around and at the railway station he met his friend Henry.

They went to live together but Victor was involved with that creature, to whom give life. He stayed two months in his bed then he decided to return home. His father, before that he returned, sent him a letter where he wrote that his brother, William, was dead. He was murdered in the park near Geneva. Frankenstein returned home and he understood that the murderer of his brother was his monster. But the police thought that the murderer was Justine. So he decided to kill the monster.

One morning he met his monster and he wanted to kill him, but the monster asked him to listen to his story. He told him that he didn't want to kill his brother but Victor never loved him and he was very lonely. At the first time he began to turn around a village but when the people saw him they screamed and ran away. So one day decided to stay in an empty hut that he founded. It was warm and dry so he decided to stay there. In the wall there was a hole and through it he could see a family: father and two children; they were happy and he wanted to go with them but he knew that they would chase him away. One day he saw his reflection in the water and he understood why the people escaped: his face was horrible. So he stayed hidden. He began to know many things about the family and all the world and he taught himself to speak; then he decided to go to speak with the father because he was blind and he couldn't see his face but when his sons arrived he had to go away. So he went away, the only other person that he knew was Frankenstein because he read his name on his bag and he decided to go find him. Along the way he saw a young girl follow into the river so he saved her but her father chased him away. When he was near Geneva he went to the park, where there was a little boy, the monster thought that he was too little to be afraid so he searched to speak with him. But the child was afraid and he said that he'll call his father, Mr. Frankenstein. The boy started screaming and he put his around his neck to stop him but he died. The monster asked Frankenstein to create a companion for him because he was alone, he promised that he would go and live far away where people do not live and Frankenstein had to accept. Frankenstein and Henry went to England but of course he knew nothing of the work that Frankenstein had to do.



Figura 32: An illustration of the monster

They went together to Scotland for a walking holiday. After that Victor went to a Scottish Island and after two months the woman monster was ready to come alive but he thought that she didn't promise, at that moment he saw the monster at the window. Victor took a knife and began to destroy the creature. The monster was desperate and he said to Frankenstein that he'll destroy his hopes of happiness. The next morning he went away from the Island and the judge told him that his friend Henry had been strangled on the beach. Frankenstein returned at home and he married Elizabeth. At the end of the wedding they went at their hotel she went on before of him and when he arrived on she was died. The monster was the murderer of William, Henry and Elizabeth. Victor decided that he had to follow his monster and kill him. And so he followed him across the world. He left his traces and messages and he is never far behind the monster. But Frankenstein was dying and he asked at Captain Walton to follow him and kill him. Victor Frankenstein died soon after finishing his story. Later, the captain heard a voice coming from his cabin and new it was the monster. He heard that the monster wanted to die and when he opened the door he watched as the monster jumped out of the cabin window into a boat and he disappeared into the darkness.

“L'intelligenza non può essere presente senza capire. Nessun computer ha alcuna consapevolezza di quello che fa.”

ROGER PENROSE

6 Questioni etiche e morali: può un super-computer pensare come un umano?

6.1 Principi di autovalutazione etica

Prima di effettuare questa riflessione che coinvolge mezzo secolo di scoperte, occorre fare una piccola premessa: un'invenzione, un progetto devono rispettare i tre principi di autovalutazione etica:

- risolvere un problema senza crearne uno nuovo
- qualunque progetto disumanizzante non è scientificamente, moralmente ed eticamente accettabile
- il progetto può agevolare una funzione propria dell'uomo ma non deve mai sostituirla

In questi anni mi è capitato parecchie volte di ricorrere all'autovalutazione etica. Ad ogni competizione a cui partecipo, infatti, è presente una commissione bioetica volta a valutare l'operato dei Teams e vigilare su questi principi fondanti.

6.2 La nascita della "macchina intelligente"

Tutta la storia dell'informatica moderna parte da Alan Turing, l'uomo che ha permesso il salvataggio di moltissime vite umane, lavorando giorno e notte per realizzare un computer in grado di forzare i messaggi tedeschi cifrati, per far sì che venissero decriptate informazioni sensibili sui luoghi di attacco dei tedeschi e sugli ordini provenienti da Berlino. Si tratta del primo calcolatore complesso, chiamato *Colossus*, realizzato nel 1944. Turing ha definito un concetto importantissimo per l'informatica moderna: la *Macchina di Turing* (una macchina in grado di leggere *n istruzioni* e dare *n risultati*), ha anche definito un Test, *detto test di Turing*, per validare se una macchina è in grado di esibire un comportamento intelligente.

6.2.1 Il test di Turing

Turing prende spunto da un gioco, chiamato "*gioco dell'imitazione*", a tre partecipanti: un uomo A, una donna B, e una terza persona C. Quest'ultima è tenuta separata dagli altri due e tramite una serie di domande deve stabilire qual è l'uomo e quale la donna. Dal canto loro anche A e B hanno dei compiti: A deve ingannare C e portarlo a fare un'identificazione errata, mentre B deve aiutarlo. Affinché C non possa disporre di alcun indizio (*come l'analisi della grafia o della voce*), le risposte alle domande di C devono essere dattiloscritte o similarmemente trasmesse.

Il test di Turing si basa sul presupposto che una macchina si sostituisca ad A. Se la percentuale di volte in cui C indovina chi sia l'uomo e chi la donna è simile prima e dopo la sostituzione di A con la macchina, allora la macchina stessa dovrebbe essere considerata intelligente, dal momento che - in questa situazione - sarebbe indistinguibile da un essere umano.

Per macchina intelligente Turing ne intende una in grado di pensare, *ossia capace di concatenare idee e di esprimerle*. Per Turing, quindi, tutto si limita alla *produzione di espressioni non prive di significato*.

In un articolo scritto da Turing, riprendendo il Cogito cartesiano, si legge:

«Secondo la forma più estrema di questa opinione, il solo modo per cui si potrebbe essere sicuri che una macchina pensa è quello di essere la macchina stessa e sentire se si stesse pensando. [...] Allo stesso modo, la sola via per sapere che un uomo pensa è quello di essere quell'uomo in particolare. [...] Probabilmente A crederà "A pensa, mentre B

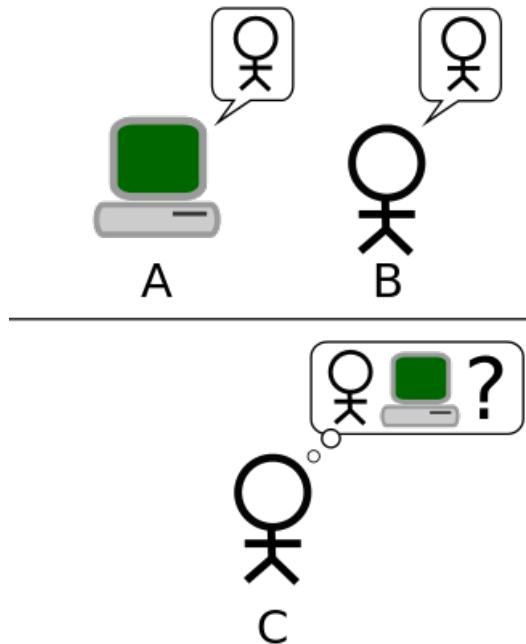


Figura 33: Rapprpesentazione grafica del test di Turing

no", mentre per B è l'esatto opposto "B pensa, ma A no". Invece di discutere in continuazione su questo punto, è normale attenersi alla educata convenzione che ognuno pensi.»

Le macchine di Turing sono macchine a stati finiti in grado di simulare altre macchine a stati discreti. Una macchina per sostenere il test dev'essere programmata considerando la descrizione di un uomo in termini discreti (stati interni, segnali, simboli). Dalla complessità del software, si legge tra le righe dell'articolo, emergono le funzioni intellettuali. Su questa aspettativa si fonda una disciplina nota come intelligenza artificiale il cui scopo è la costruzione di una macchina in grado di riprodurre le funzioni cognitive umane.

6.2.2 Prove a confutazione del test

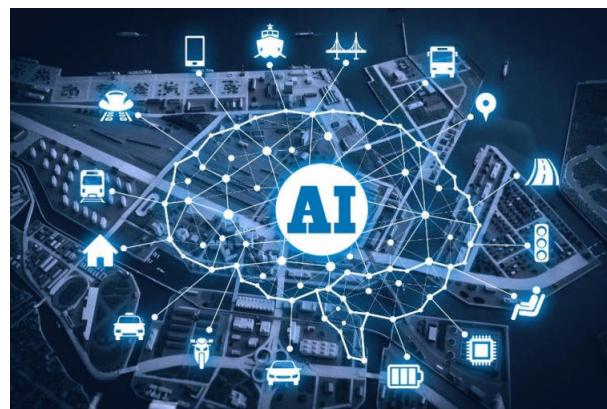
Il test di Turing è stato via via riformulato durante gli anni. Le ragioni sono varie e passano dall'imprecisione della formulazione originale, al sorgere di nuovi problemi relativi alla definizione di macchina intelligente. A volte semplici programmi, come ad esempio ELIZA (un programma che emula un terapista), hanno costretto a riformulare i criteri del test perché inadeguati o troppo facilmente soddisfatti da programmi evidentemente non pensanti.

Il filosofo John Searle ha proposto una modifica al test di Turing, che ha preso il nome di stanza cinese, sostenendo l'inattendibilità del test di Turing come prova sufficiente a dimostrare che una macchina o un qualsiasi sistema informatico siano sistemi dotati di vera intelligenza, sia che questi abbiano superato o no tale test.

6.3 La nascita e la critica dell'intelligenza artificiale

L'intelligenza artificiale è una disciplina dell'informatica che mira a realizzare una "*macchina pensante*". Il processo realizzativo parte dal creare un algoritmo che prenda in analisi vari input (diretti o indiretti), li analizza e restituisce un'istruzione. La peculiarità di questo tipo di macchina è la possibilità di programmarla per apprendere e da sola rilascerà output senza alcun intervento esterno. Siamo

arrivati, dal punto di vista tecnologico, ad un livello mai visto prima. Basti pensare agli assistenti vocali, piccole "Macchine di Turing" che prendono come input la nostra voce e la elaborano fornendoci un risultato, come accendere una luce oppure vedere una telecamera. Lo sviluppo dell'intelligenza artificiale e, conseguentemente, del "Deep Learning" (apprendimento profondo, radicato) potrebbero essere un punto di svolta per l'umanità, come un pericolo "più grande del nucleare" (come citava Elon Musk qualche tempo fa). Possiamo davvero arrivare al punto di creare un computer che emuli il nostro cervello? La risposta è No. Il nostro cervello è una macchina biologica che non lavora su stati logici o digitali, non assume valori tra 0 e 1, ma assume un comportamento "intelligente". Le cellule si adattano in base agli stimoli esterni, senza alcuna "programmazione"; il nostro cervello immagazzina ricordi, ci permette di fare calcoli, ci fa esprimere i nostri sentimenti, ci fa piangere, ridere, scherzare. Noi esseri umani, siamo una realtà biologica al di fuori della tecnologia. La nostra coscienza, non è programmata in alcun modo, si evolve con noi e determina la nostra personalità.



“L'uomo rimane il più straordinario dei computer.”

JOHN FITZGERALD KENNEDY

