

# **Libri di testo e consultazione**

**Microelettronica 2/ed**

**Parte 3 – Elettronica Digitale**

Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock

**McGraw-Hill -2004-**

**Microelettronica 3/ed**

Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock

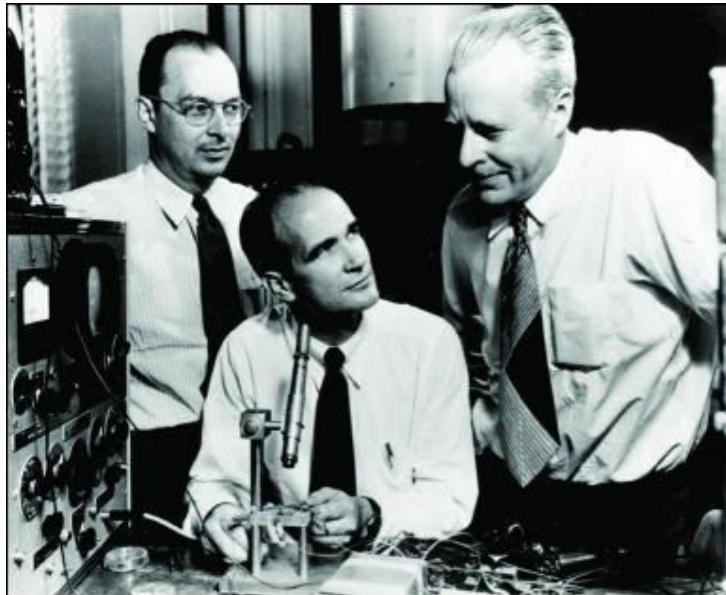
**McGraw-Hill - 2008-**

**Elettronica Digitale 3/ed**

Paolo Spirito

**McGraw-Hill -2006-**

# L'inizio dell'era dell'elettronica moderna



Bardeen, Shockley, e Brattain nei Laboratori Bell – Brattain e Bardeen inventarono il transistore bipolare nel 1947.



Il primo transistore bipolare al germanio. Approssimativamente 50 anni dopo, l'elettronica rappresenta il 10% (4 trilioni di dollari) del prodotto interno lordo mondiale (PIL).

# Tappe fondamentali dell'elettronica

- |           |   |      |   |
|-----------|---|------|---|
| 1874      | Braun inventa il raddrizzatore a stato solido.                              | 1958 | Kilby e Noyce sviluppano i circuiti integrati                           |
| 1906      | DeForest inventa il triodo a vuoto.   | 1961 | Primo circuito integrato commercializzato dalla Fairchild Semiconductor |
| 1907-1927 | Primi circuiti radio sviluppati con diodi e triodi.                         | 1963 | Si forma l'IEEE dall'unione di IRE e AIEE                               |
| 1925      | Lilienfeld brevetta il dispositivo ad effetto di campo                      | 1968 | Primo amplificatore operazionale integrato                              |
| 1947      | Bardeen e Brattain ai Laboratori Bell inventano il transistore bipolare.    | 1970 | Cella DRAM a un transistore inventata da Dennard alla IBM.              |
| 1952      | Texas Instruments inizia la produzione commerciale di transistori bipolarì. | 1971 | Presentazione del processore Intel 4004.                                |
| 1956      | Bardeen, Brattain, e Shockley ricevono il premio Nobel.                     | 1978 | Prima memoria commerciale da 1-kilobit.                                 |
|           |   | 1974 | Presentazione del processore 8080.                                      |
|           |   | 1984 | Presentazione del chip di memoria da 1 Megabit.                         |
|           |   | 2000 | Alferov, Kilby, e Kromer vincono il premio Nobel                        |

# Evoluzione dei dispositivi elettronici

Tubi a vuoto



(a)

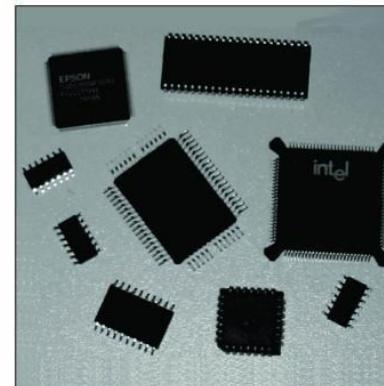


(b)

Circuiti  
Integrati  
SSI e MSI



(c)



(d)

Transistori

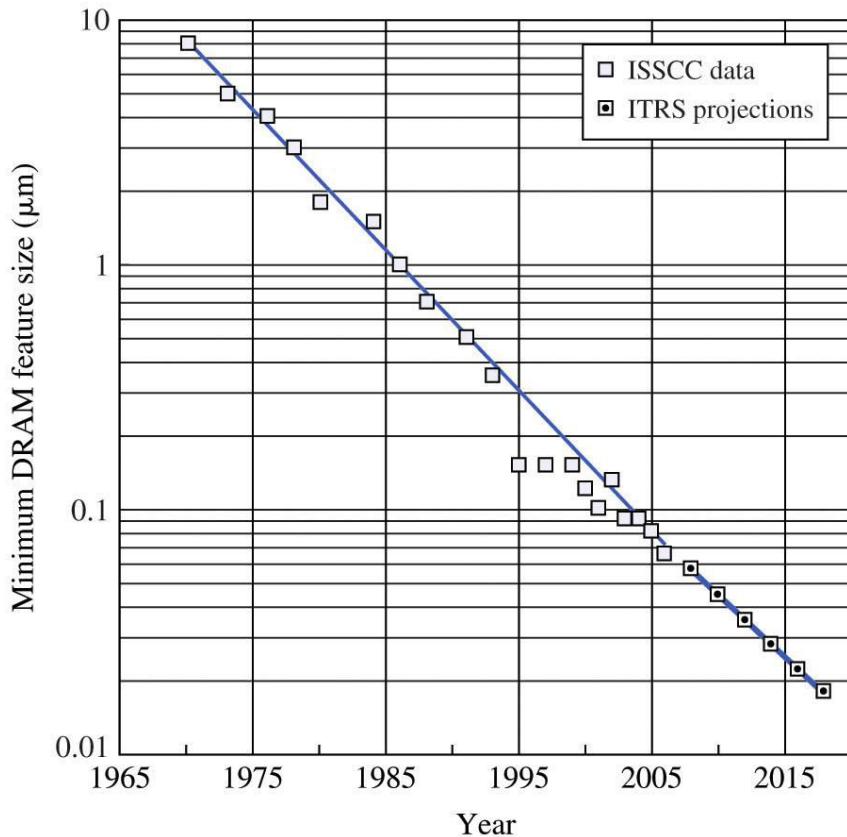
Circuiti  
Integrati  
VLSI in surface  
mount

# Diffusione della microelettronica

- Il circuito integrato fu inventato nel 1958.
- La produzione mondiale di circuiti integrati è più che raddoppiata ogni anno negli ultimi vent'anni.
- Ogni anno sono prodotti più transistori di quelli prodotti in tutti gli anni precedenti.
- Approssimativamente  $10^9$  transistori sono stati prodotti lo scorso anno.
- Nel mondo per ogni formica ci sono circa 50 transistori.

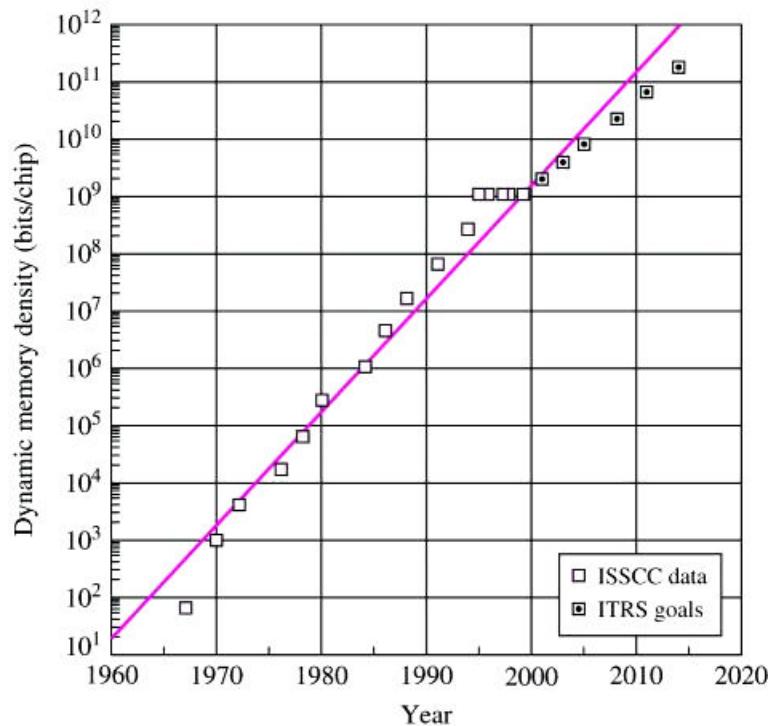
\*Fonte: Gordon Moore's Plenary address at the 2003 International Solid State Circuits Conference.

# Dimensione caratteristica dei dispositivi

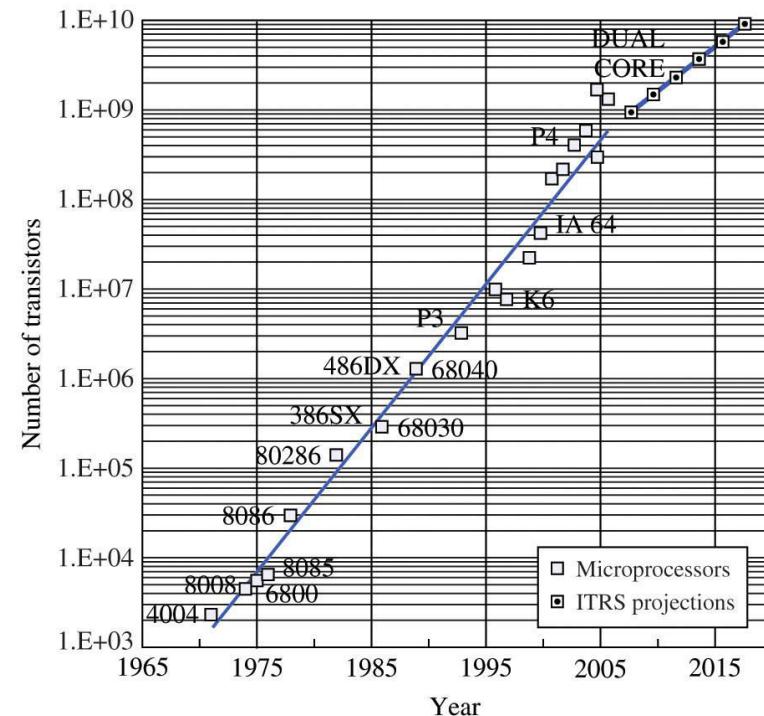


- Le innovazioni produttive consentono la riduzione della dimensione caratteristica.
- Minore dimensione caratteristica porta ad un maggior numero di transistori per unità di area e quindi ad una maggiore densità.

# Rapido incremento della densità in microelettronica

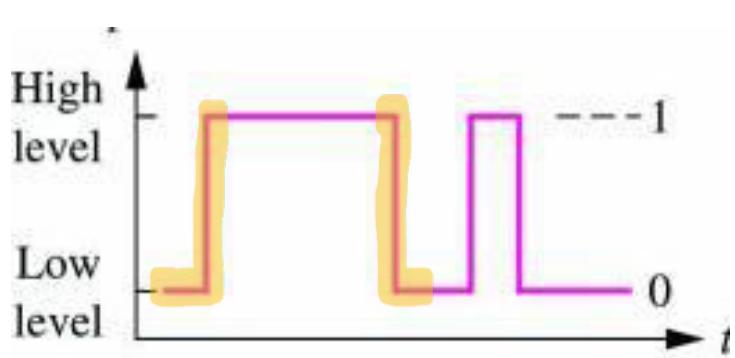
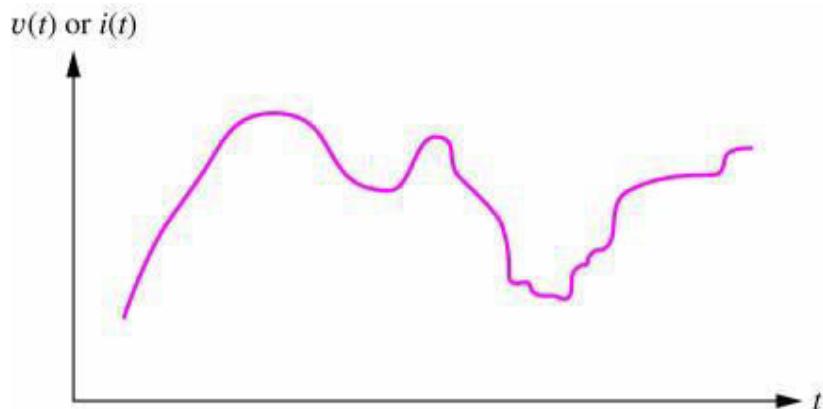


Densità dei circuiti di memoria nel tempo



Complessità dei microprocessori nel tempo

# Tipologie di segnali

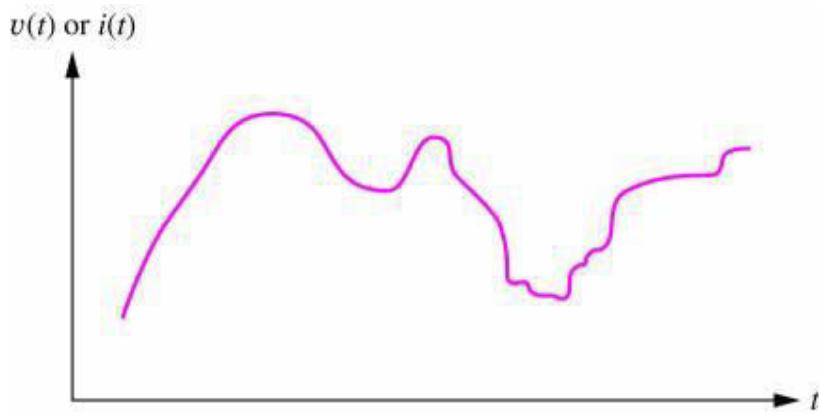


- I segnali analogici assumono valori continui – tipicamente tensione o corrente
- I segnali digitali assumono livelli discreti. Solitamente utilizziamo segnali binari che utilizzano solo due livelli.
- Un livello è definito 0 logico, mentre l'altro è definito 1 logico.

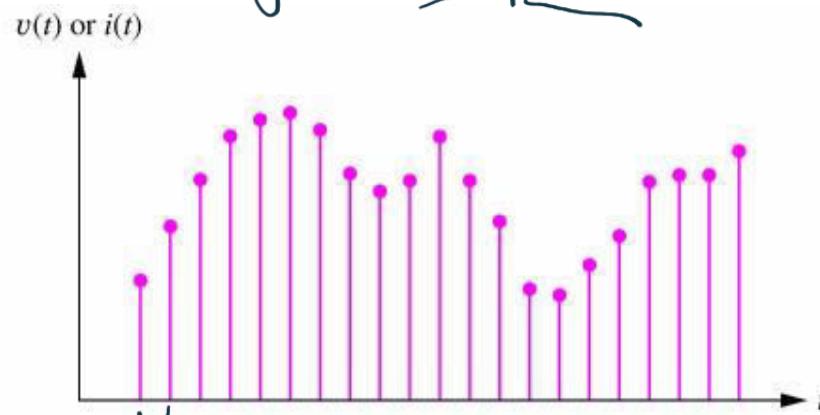
Digitale : Cifra binaria

E' ovvio che prendo info; At quanto  
piccolo per evitare perdita di  
info significativa?

# Segnali analogici e digitali



(a)



(b)

- I segnali analogici sono continui nel tempo e in tensione o corrente. (La carica può anche essere utilizzata come segnale di trasporto.)

- Dopo la digitalizzazione un segnale analogico diventa un insieme di valori discreti, separati da intervalli di tempo fissi.

T scelto su serie di Fourier del segnale,  
Se campiono con  $f = 2f_0$  max del nostro segnale  
non perdo info.

Però ora devo comprendere anche su asse Y. Ci serve una sfilza da 0 e 1 che ci rappresenta il valore. Intervalli continui non posso coprire.  
ERRORE DI QUANTIZZAZIONE non eliminabile, mentre di campionamento sì.

## CAMPIONAMENTO & QUANTIZZAZIONE

NORMALMENTE: Valore max (es. 1 volt) è lo diviso per numero di step:

$$\frac{1}{256} \text{ passo per la rappresentazione}$$

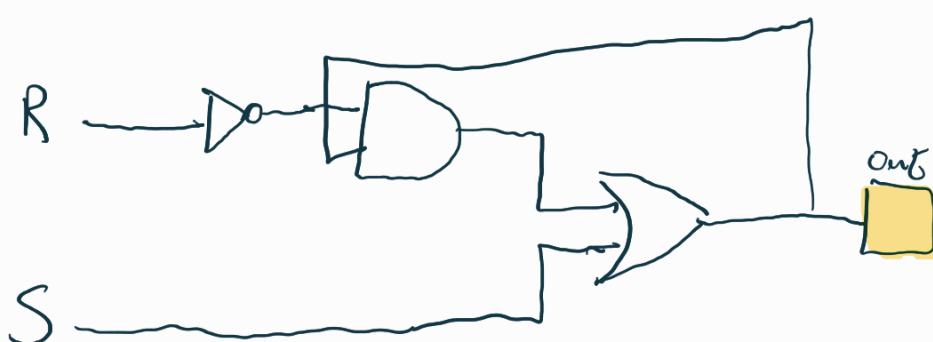
Real 100100

Th del campionamento

Problema del campionamento risolto con Teorema: frequenza di campionamento almeno al doppio del max della frequenza del nostro segnale (NON PERDO INFORMAZIONE)

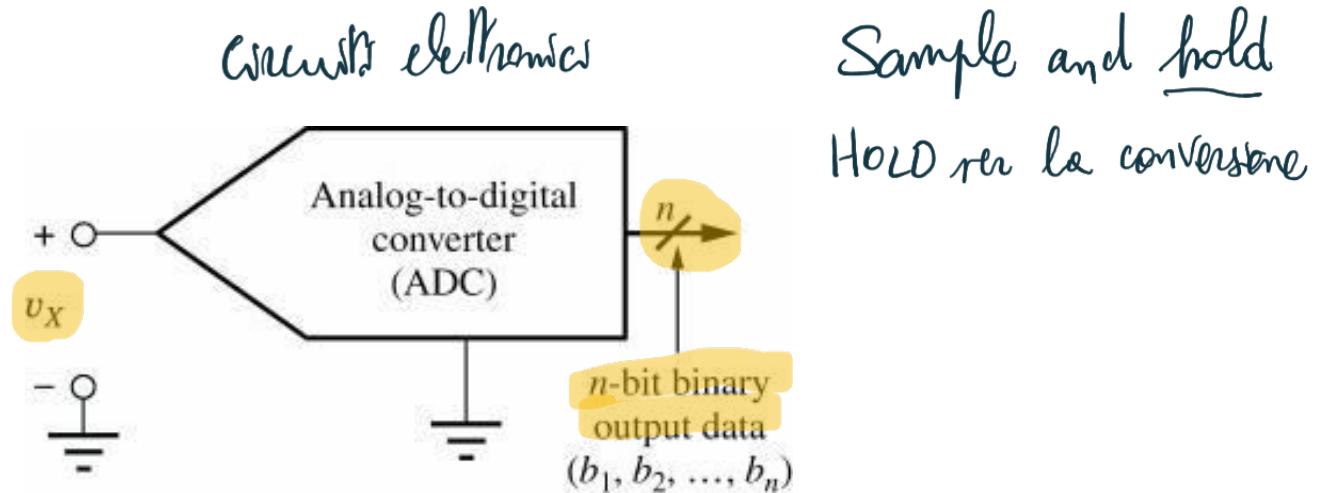
SEGNALI DIGITALI SONO PIÙ ROBUSTI:

Possiamo scegliere tra 0 o 1 - 0 c'è o non c'è.



(Non sento a più di 20KHz quindi i suoi bassi campionati a 40KHz)  
(Nota, il mio segnale può più contenere freq. > 20KHz. Se digitalizzo e riconverto ad analogico gli risulta, le frequenze che non sento sovranno la conversione: devo assicurarmi che oltre 20KHz non ci sia niente: passo con un FILTRO CIE (MOLTI SPETTRO))

# Conversione Analogico/Digitale (A/D)



- La tensione analogica in ingresso  $v_x$  è convertita al più vicino numero su n-bit.
- Per un convertitore a 4 bit, ingressi 0 ->  $v_x$  portano a uscite digitali 0000 -> 1111.
- L'uscita è un'approssimazione dell'ingresso a causa della limitata risoluzione dell'uscita a n-bit. L'errore si esprime come:

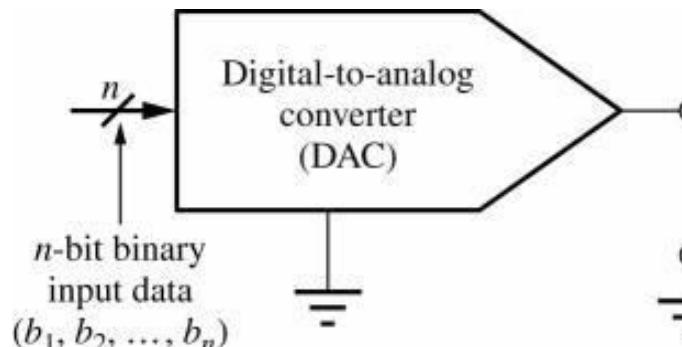
$$V_\varepsilon = \left| v_x - (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_n 2^{-n}) V_{FS} \right|$$

1 volt



Fondo scala

# Conversione Digitale/Analogica (D/A)



$V_{FS}$  = Tensione di Fondo Scala

- Per un convertitore D/A a  $n$ -bit, la tensione di uscita è:

$$V_O = (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_n 2^{-n}) V_{FS}$$

Sommatore

- La più piccola variazione di tensione possibile è conosciuta come bit meno significativo o LSB.

$$V_{LSB} = 2^{-n} V_{FS}$$

# Convenzioni sulle notazioni

↪ costanti nel tempo

- Segnale totale = Componenti continue + segnali varianti nel tempo

$$\begin{aligned} v_T &= V_{DC} + V_{sig} \\ i_T &= I_{DC} + i_{sig} \end{aligned}$$

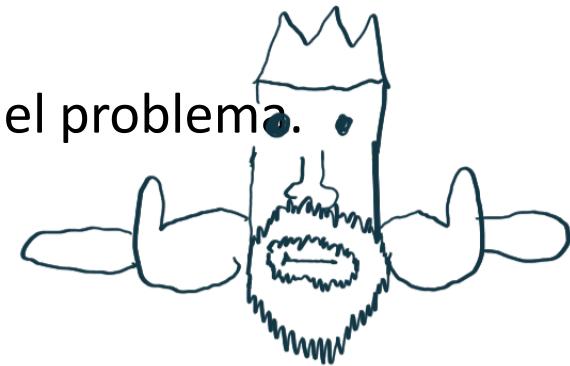
↑ Msm Pedice MAIUSC  
↓ Msc MAIUSC MAIUSC MIN

- Resistenza e conduttanza – R e G con lo stesso pedice rappresentano valori reciproci. Nelle formule sarà utilizzata la forma più conveniente

$$G_x = \frac{1}{R_x} \quad e \quad g_\pi = \frac{1}{r_\pi}$$

# Metodologia per la soluzione dei problemi

- Definire in **maniera chiara il problema.**
- **Elencare le informazioni e i dati a disposizione.**
- **Identificare le incognite richieste per la soluzione del problema.**
- Elencare le **ipotesi.**
- Sviluppare un **approccio alla soluzione.**
- Effettuare un'**analisi basata sull'approccio definito.**
- **Verificare i risultati e le ipotesi.**
  - Il problema è stato risolto? Tutte le incognite sono state identificate?
  - I calcoli sono corretti? Le ipotesi sono state soddisfatte?
- **Analizzare la soluzione.**
  - I risultati rispettano vincoli ragionevoli?
  - I valori sono realizzabili?
- Utilizzare l'**analisi assistita al calcolatore** per verificare i risultati.



# Quali sono valori numerici ragionevoli?

- Se l'alimentatore è da  $\pm 10$  V, un valore di tensione di 15 V (non rientra nella gamma di tensioni di alimentazione) non è accettabile.
- Generalmente le correnti in un circuito possono variare tra 1 uA e qualche centinaio di mA.
- Una corrente di 3.2A è probabilmente irragionevole e dovrebbe essere ricontrrollata.
- La tensione picco-picco dovrebbe essere compresa nell'intervallo di funzionamento dell'alimentatore.
- Se il valore calcolato non è realistico dovrebbe essere ricontrrollato. Ad esempio nel caso di una resistenza di 0.013 Ohm.
- Considerando le variazioni intrinseche in molti componenti elettronici, tre cifre significative sono una rappresentazione adeguata del risultato. Tre cifre significative saranno utilizzate nel testo.

Rispetto che Sembra l'ape mawa.

Modificare spettro di un segnale: Sopprimere o modificare alcune frequenze

# Spettro di frequenza di segnali elettronici

Insieme delle fr. gestibili da un dispositivo elettronico



- Segnali non periodici hanno spettri continui occupando spesso una vasta gamma di frequenze
- L'analisi di Fourier mostra che qualsiasi segnale periodico è composto da un insieme di segnali sinusoidali con differente ampiezza, frequenza e fase.
- L'insieme dei segnali sinusoidali è chiamato serie di Fourier.
- Lo spettro di frequenza di un segnale riporta l'ampiezza e la fase delle componenti del segnale in funzione della frequenza.

Bisogna cogliere quante sinusoidi ci bastano per rappresentare segnale

Più il segnale è spigoloso, più servono frequenze per descriverlo

# Frequenze di segnali comuni

- Suoni udibili 20 Hz - 20 KHz
  - Segnale TV a banda base 0 - 4.5 MHz
  - Radio FM 88 - 108 MHz
  - Televisione (Canali 2-6) 54 - 88 MHz
  - Televisione (Canali 7-13) 174 - 216 MHz
  - Comunicazioni navali e governative. 216 - 450 MHz
  - Telefoni cellulari e wireless 1710 - 2690 MHz
  - TV via satellite 3.7 - 4.2 GHz
  - Dispositivi Wireless 5.0 - 5.5 GHz

infrasound      →      ultrasound  
20 Hz - 20 KHz

0 - 4.5 MHz

88 - 108 MHz

54 - 88 MHz

174 - 216 MHz

- Comunicazioni navali e governative. 216 - 450 MHz

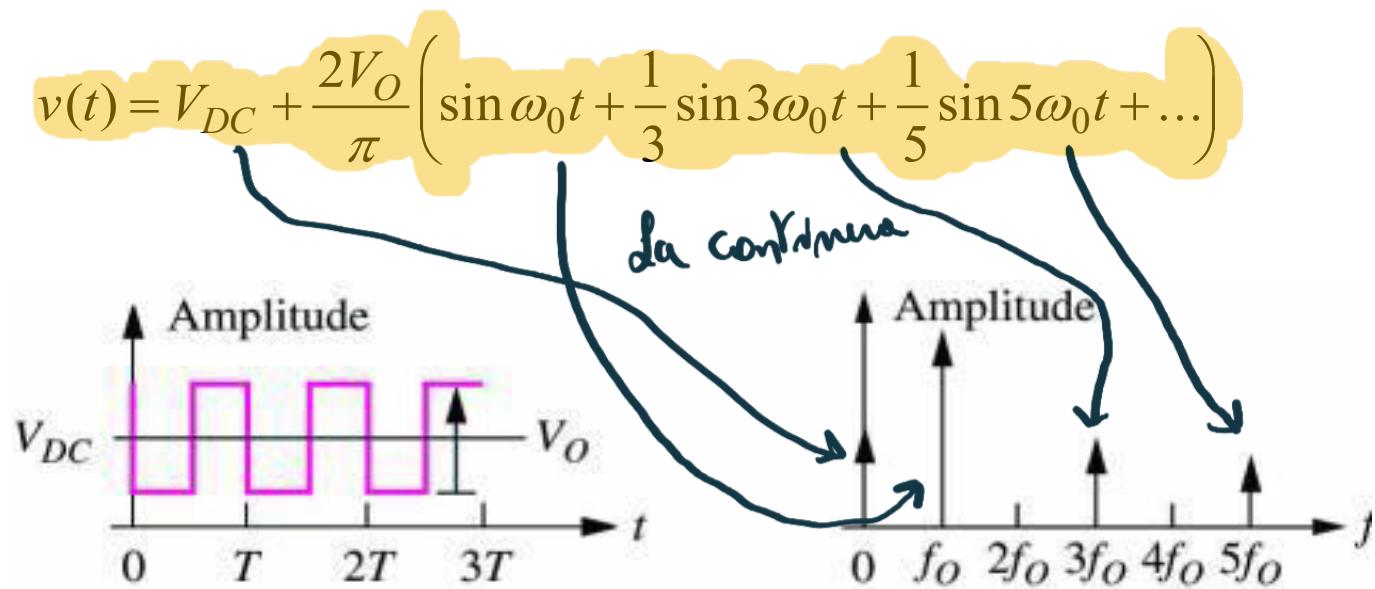
- Telefoni cellulari e wireless 1710 - 2690 MHz

- TV via satellite 3.7 - 4.2 GHz

- Dispositivi Wireless 5.0 - 5.5 GHz

# La serie di Fourier

- Qualsiasi segnale periodico contiene uno spettro discreto di componenti spettrali legate direttamente al periodo del segnale.
- Un'onda quadra è rappresentata dalla seguente serie di Fourier:



$\omega_0 = 2\pi/T$  (rad/s) è la frequenza angolare fondamentale e  $f_0 = 1/T$  (Hz) è la frequenza fondamentale del segnale.  $2f_0, 3f_0, 4f_0$  sono chiamate seconda armonica, terza armonica e così via.

# Variazione dei parametri nella progettazione circuitale

- Tutti i componenti elettronici hanno delle tolleranze di fabbricazione.
  - Le resistenze possono essere acquistate con tolleranze del  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$ , e  $\pm 1\%$ . (Le resistenze dei circuiti integrati hanno spesso tolleranze di  $\pm 10\%$ .)
  - I condensatori possono avere tolleranze asimmetriche di  $+20\%/-50\%$ .
  - I generatori di tensione tipicamente variano tra l'1% e il 10%.
- I parametri di un dispositivo inoltre variano in funzione dell'età e della temperatura.
- I circuiti devono essere progettati tenendo conto di queste variazioni.
- Utilizziamo l'analisi del caso peggiore e l'analisi Monte Carlo (statistica) per esaminare gli effetti della tolleranza sulle prestazioni del circuito.

# Modello matematico delle tolleranze

- Per variazioni simmetriche

$$P_{\text{nom}}(1 - \varepsilon) \leq P \leq P_{\text{nom}}(1 + \varepsilon)$$

- Per esempio, una resistenza da 10K con una tolleranza del  $\pm 5\%$  porta al seguente intervallo di valori:

$$10k(1 - 0.05) \leq R \leq 10k(1 + 0.05)$$

$$9,500 \Omega \leq R \leq 10,500 \Omega$$

$$P \in [\cdot, \cdot]$$

# Analisi dei circuiti con tolleranze

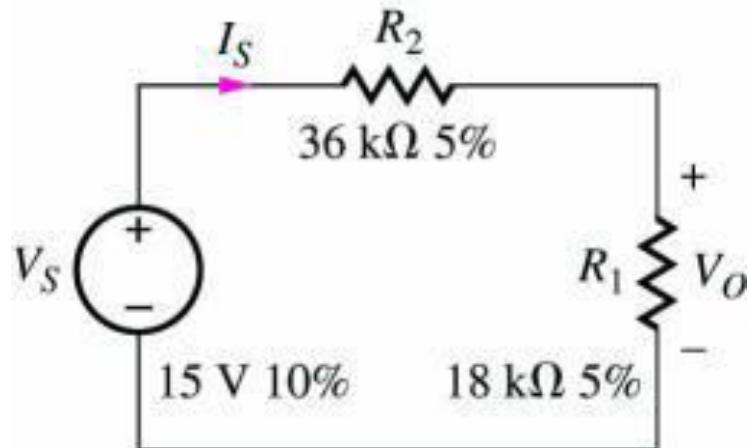
- **Analisi del caso peggiore** Tutti i componenti all'estremo
  - I parametri sono scelti in modo che le variabili di interesse assumano il valore massimo o minimo.
  - Questo approccio porta a sovradimensionare in quanto è raro che il caso peggiore si verifichi.
  - Risulta meno costoso scartare il caso peggiore che progettare per ottenere un'affidabilità del 100%.
- **Analisi Monte-Carlo**
  - I valori sono variati in maniera casuale per ottenere una statistica per le uscite desiderate.
  - Il progetto può essere ottimizzato per ridurre i guasti legati alla variazione dei valori rispetto a quelli relativi ad altri problemi.
  - In questo modo le problematiche di progetto sono meglio gestite rispetto all'approccio del caso peggiore.

# Esempio di analisi del caso peggiore

**Problema:** Determinare il valore nominale e il valore per il caso peggiore per la tensione e la corrente.

**Soluzione:**

- **Informazioni e dati noti:** Topologia del circuito e valori in figura.
- **Incognite:**  $V_O^{nom}$ ,  $V_O^{\min}$ ,  $V_O^{\max}$ ,  $I_S^{nom}$ ,  $I_S^{\min}$ ,  $I_S^{\max}$ .
- **Approccio:** Determinare i valori nominali, successivamente utilizzare i valori di  $R_1$ ,  $R_2$ , e  $V_S$  per generare i casi peggiori sull'uscita.
- **Ipotesi:** Nessuna
- **Analisi:** Prossime slide...



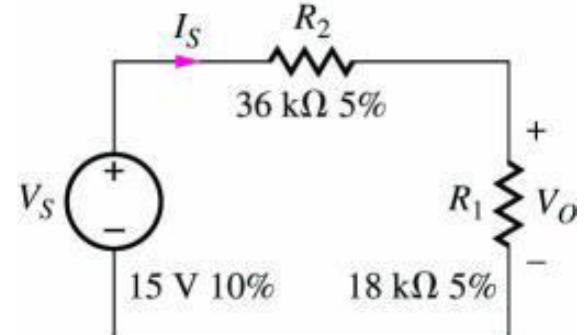
Valore nominale di  $V_O$ :

$$V_O^{nom} = V_S^{nom} \frac{R_1^{nom}}{R_1^{nom} + R_2^{nom}}$$
$$= 15V \frac{18k\Omega}{18k\Omega + 36k\Omega} = 5V$$

# Esempio di analisi del caso peggiore (cont.)

Valore nominale di  $I_S$ :

$$I_S^{nom} = \frac{V_S^{nom}}{R_1^{nom} + R_2^{nom}} = \frac{15V}{18k\Omega + 36k\Omega} = 278\mu A$$



Riscrivo  $V_O$  per facilitare l'individuazione dei valori per il caso peggiore.

$$V_O = V_S \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_S}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

$\nearrow +10\%$   $\nwarrow -5\%$

$V_O$  è massimizzata per i massimi valori di  $V_S$ ,  $R_1$  e il minimo di  $R_2$ .

$V_O$  è minimizzata per i minimi valori di  $V_S$ ,  $R_1$ , e il massimo di  $R_2$ .

$\nearrow -10\%$   $\nwarrow +5\%$

$$V_O^{\max} = \frac{15V(1.1)}{1 + \frac{36K(0.95)}{18K(1.05)}} = 5.87V$$

$\nearrow +5\%$   $\nwarrow -5\%$

$$V_O^{\min} = \frac{15V(0.95)}{1 + \frac{36K(1.05)}{18K(0.95)}} = 4.20V$$

$\nearrow +5\%$   $\nwarrow -5\%$

# Esempio di analisi del caso peggiore(cont.)

Se non va  
bene:



Corrente  $I_S$  nel caso peggiore:

$$I_S^{\max} = \frac{V_S^{\max}}{R_1^{\min} + R_2^{\min}} = \frac{15V(1.1)}{18k\Omega(0.95) + 36k\Omega(0.95)} = 322 \mu A$$

$$I_S^{\min} = \frac{V_S^{\min}}{R_1^{\max} + R_2^{\max}} = \frac{15V(0.9)}{18k\Omega(1.05) + 36k\Omega(1.05)} = 238 \mu A$$

**Verifica dei risultati:** I valori per il caso peggiore variano in un intervallo del 14-17 per cento al di sopra e al di sotto del valore nominale. La somma delle tolleranze dei tre elementi è pari al 20 per cento, quindi i valori ottenuti sembrano ragionevoli.

# Analisi Monte Carlo

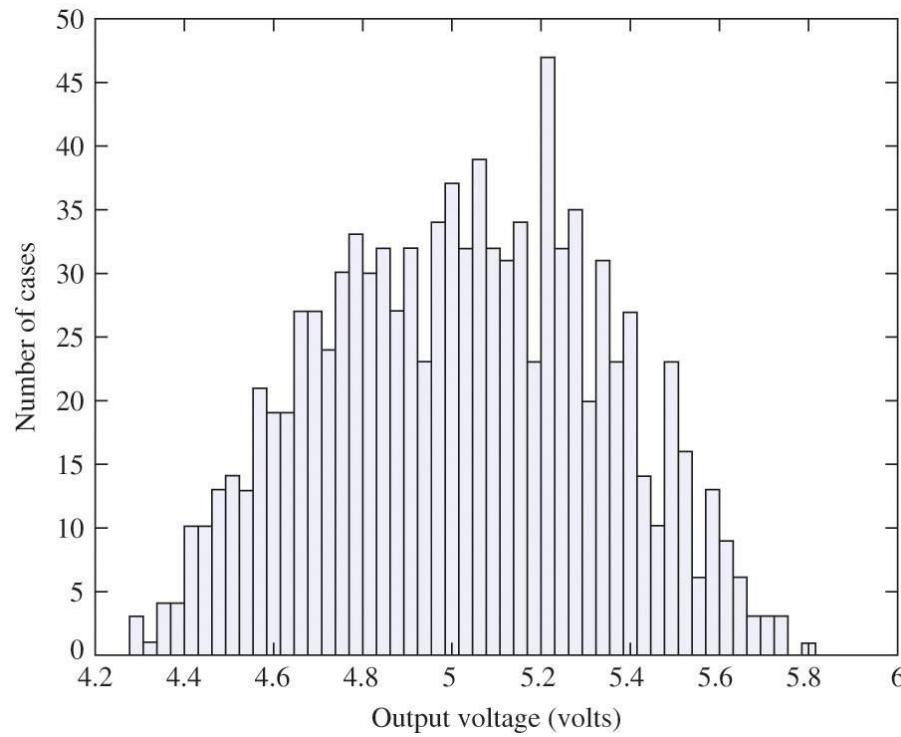
- I parametri sono variati in maniera casuale e vengono raccolte le statistiche.
- Utilizziamo programmi come MATLAB, Mathcad, SPICE o un foglio di calcolo per realizzare i calcoli statistici.
- Per esempio, con Excel®, una resistenza con una tolleranza del 5% può essere espressa come:

$$R = R_{nom}(1 + 2\epsilon(\text{RAND}() - 0.5))$$

0 → 1

La funzione RAND() restituisce numeri casuali uniformemente distribuiti tra 0 e 1.

# Risultati dell'analisi Monte Carlo



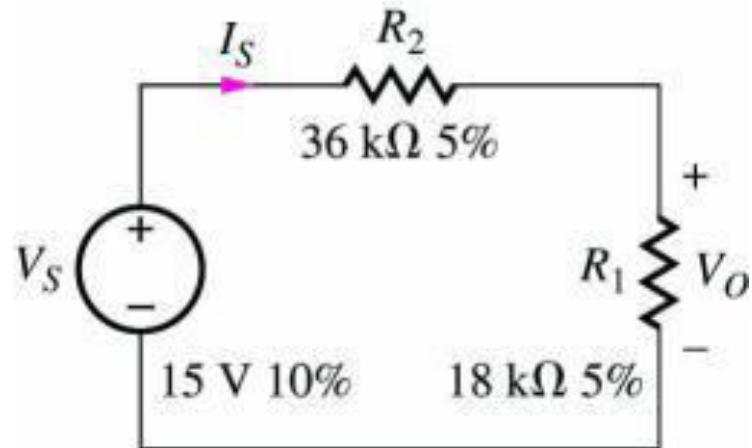
Iistogramma relativo a una simulazione con 1000 casi

# Esempio di analisi Monte Carlo

**Problema:** Effettuare l'analisi Monte Carlo e determinare il valore medio, la deviazione standard e i valori massimo e minimo per  $V_O$ ,  $I_S$ , e per la potenza erogata dal generatore.

**Soluzione:**

- **Informazioni e dati noti:** Topologia del circuito e valori in figura.
- **Incognite:** Il valore medio, la deviazione standard, i valori minimo e massimo per  $V_O$ ,  $I_S$ , e  $P_s$ .
- **Approccio:** Utilizzo un foglio di calcolo per valutare le equazioni del circuito con parametri casuali.
- **Ipotesi:** Nessuna.
- **Analisi:** Prossime slide...



Definizione dei parametri:

$$V_S = 15(1 + 0.2(RAND() - 0.5))$$

$$R_1 = 18,000(1 + 0.1(RAND() - 0.5))$$

$$R_2 = 36,000(1 + 0.1(RAND() - 0.5))$$

# Esempio di analisi Monte Carlo (cont.)

Definizione dei parametri:

$$V_S = 15(1 + 0.2(RAND() - 0.5))$$

$$R_1 = 18,000(1 + 0.1(RAND() - 0.5))$$

$$R_2 = 36,000(1 + 0.1(RAND() - 0.5))$$

Equazioni del circuito basate sui parametri Monte Carlo:

$$V_O = V_S \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_1 + R_2}$$

$$P_S = V_S I_S$$

Risultati (WC Worst-Case):

	Avg	Nom.	Stdev	Max	WC-max	Min	WC-Min
Vo (V)	4.96	5.00	0.30	5.70	5.87	4.37	4.20
Is (mA)	0.276	0.278	0.0173	0.310	0.322	0.242	0.238
P (mW)	4.12	4.17	0.490	5.04	--	3.29	--

# Coefficienti di temperatura

A quelle di prima dobbiamo aggiungere anche queste



- Molti parametri di un circuito sono legati alla temperatura.

→ ESPANSIONE IN SERIE DI POTENZE

$$P = P_{\text{nom}} (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2) \text{ dove } \Delta T = T - T_{\text{nom}}$$

$P_{\text{nom}}$  è definita a  $T_{\text{nom}}$

→ Amplitude di oscillaz. degli

- Molte versioni di SPICE consentono di specificare  $T_{\text{NOM}}, T, \text{TC1}(\alpha_1), \text{TC2}(\alpha_2)$ .  
Amplitude →  $+V_{th}$
- Modello di temperatura in SPICE per una resistenza:  
 $R(T) = R(T_{\text{NOM}}) * [1 + \text{TC1} * (T - T_{\text{NOM}}) + \text{TC2} * (T - T_{\text{NOM}})^2]$
- Molti altri componenti hanno modelli simili.

+ Resistenza

New semiconduttori + energia: + elettroni di conduzione