

Laboratorio di Elettronica

Esercizi della Lezione 1:

Simulazione circuitale con NGSPICE

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli"

E-mail: valentino.liberali@unimi.it, alberto.stabile@unimi.it

Milano, 24-25 marzo 2022

Contenuto

1 Simulazione di circuiti elettronici

2 SPICE

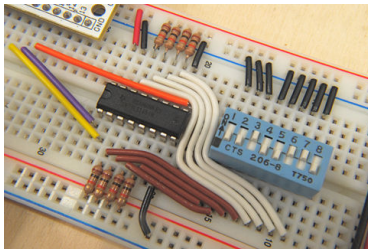
3 Analisi nodale

4 Analisi nodale modificata

5 Esercizi

Progettazione di circuiti elettronici

Fino a qualche decina di anni fa, i circuiti erano “semplici” e venivano progettati risolvendo manualmente le equazioni e realizzando prototipi su scheda con componenti discreti detta “*bread-board*” (perché assomiglia all’asse per tagliare il pane).



Bread-board per l'elettronica



Bread-board per il pane

Attualmente, questo approccio è impossibile, perché

- il numero di componenti elettronici è elevato
- le prestazioni dipendono dalle dimensioni di ciascun componente
- i componenti e le interconnessioni hanno un comportamento non ideale di cui bisogna tenere conto

Simulazione di circuiti elettronici

Si effettua una simulazione al calcolatore

- per **verificare il progetto** prima di realizzarlo
- per **ottimizzare i parametri** di progetto
- per **stimare gli effetti** dovuti alle variazioni dei parametri e agli *elementi parassiti*

Programmi per la simulazione circuitale:

- **SPICE**: Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (University of California at Berkeley)
- **ASTAP**: Advanced Statistical Analysis Program (IBM)
- **Spectre** (Cadence Design Systems)
- altri (ad es. **HSPICE**)

SPICE

SPICE =

= **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis

- Versione originale: University of California at Berkeley
- Linguaggio originale: FORTRAN (schede perforate)
- Formato originale di ingresso e uscita: solo testo (e solo caratteri maiuscoli)
- Nelle versioni successive: linguaggio C; interfacce grafiche di ingresso e uscita
- Numerose versioni commerciali e proprietarie

SPICE (Berkeley)

- SPICE è disponibile presso la University of California at Berkeley
- Il codice sorgente per UNIX (Linux, Solaris, etc.) è scaricabile da <http://embedded.eecs.berkeley.edu/pubs/downloads/spice/>
- L'ultima versione è **Spice3f5**:
file `spice3f5.tar.gz` (1.2 MB)

PSpice = SPICE per PC Windows

Prodotto dalla MicroSim, acquistata dalla Orcad, che a sua volta è stata acquistata dalla Cadence

- Esiste una versione “demo” compresa nel pacchetto Orcad, scaricabile (previa registrazione) dal sito: <https://www.orcad.com/orcad-free-trial>

NGSpice e LTspice

Next Generation SPICE è basato su SPICE Berkeley. Il codice sorgente è scaricabile da

<http://ngspice.sourceforge.net>

e l'ultima versione ha il numero 36 (30 dicembre 2021).

È disponibile per Linux, Windows e Mac.

LTspice è una versione di SPICE fornita da Analog Devices, che mette a disposizione anche i modelli dei propri componenti.

<https://www.analog.com/en/design-center/>

[/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html](https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html)

È disponibile solo per Windows e Mac.

PER GLI ESERCIZI PROPOSTI, SI CONSIGLIA DI USARE NGSPICE.

Nodo di riferimento

Il circuito da simulare **deve** sempre contenere un nodo di riferimento: (**GND** = GrouND), denotato negli schemi con il simbolo circuitale:



e indicato con il numero 0 o con il nome GND.

Tutte le tensioni vengono riferite a questo nodo.

Elementi circuitali in SPICE (1/2)

I tipi di elementi circuitali sono identificati da SPICE tramite l'*iniziale del nome*.

Componenti passivi:

- R** Resistore
- C** Condensatore
- L** Induttore
- K** Mutua induttanza
- T** Linea di trasmissione

Generatori (indipendenti e dipendenti):

- V** Generatore di tensione
- I** Generatore di corrente
- E** Voltage-controlled voltage source
- F** Current-controlled current source
- G** Voltage-controlled current source
- H** Current-controlled voltage source

Elementi circuitali in SPICE (2/2)

Dispositivi a semiconduttore:

- D** Diodo a giunzione
- Q** Transistore bipolare a giunzione (BJT)
- J** Transistore a effetto di campo a giunzione (JFET)
- M** Transistore a effetto di campo MOS (MOSFET)

Netlist SPICE (1/3)

La **netlist** è una descrizione del circuito in formato testo; contiene le stesse informazioni dello **schema circuitale**.

Netlist e schema sono due rappresentazioni di tipo **strutturale**: descrivono un circuito attraverso i **componenti** e le loro **interconnessioni**.

Nella descrizione **netlist** ad ogni nodo del circuito corrisponde un numero; il numero 0 è riservato al nodo di terra (GND) che deve essere sempre presente. Non è necessario che i nodi siano nell'ordine 1, 2, 3, ...

Netlist SPICE (2/3)

Per resistenze, capacità, induttanze e generatori indipendenti, il formato è:

Rxxxxxxx n+ n- valore

Cxxxxxxx n+ n- valore

Lxxxxxxx n+ n- valore

Vxxxxxxx n+ n- valore

Ixxxxxxx n+ n- valore

I nomi devono avere non più di 8 caratteri; SPICE non distingue tra maiuscole e minuscole (*Spectre invece sì!*).

I nodi + e - vanno sempre considerati secondo la convenzione degli utilizzatori.

I valori devono essere espressi nelle unità di misura del sistema internazionale:

R in ohm, C in farad, L in henry, V in volt, I in ampere.

Netlist SPICE (3/3)

Per i generatori controllati in tensione, il formato è:

```
Exxxxxxx n+ n- nc+ nc- valore
```

```
Gxxxxxxx n+ n- nc+ nc- valore
```

Per i generatori controllati in corrente, il formato è:

```
Fxxxxxxx n+ n- Vmeasure valore
```

```
Hxxxxxxx n+ n- Vmeasure valore
```

dove Vmeasure è il nome di un generatore di tensione nulla (cortocircuito) in cui passa la corrente di ingresso del generatore controllato.

SPICE calcola le tensioni in tutti i nodi (riferite al nodo 0), e le correnti in tutti i generatori di tensione. Per ottenere le correnti negli altri rami, bisogna inserire un generatore di tensione “fasullo”.

Valori dei parametri in SPICE

SPICE riconosce i numeri in formato intero, decimale (con il punto), scientifico, e tecnico (con i prefissi moltiplicativi per le unità di misura del SI).

Nome	Simbolo	Abbrev. SPICE	Valore
pico	p	P	10^{-12}
nano	n	N	10^{-9}
micro	μ	U	10^{-6}
milli	m	M	10^{-3}
kilo	k	K	10^3
mega	M	MEG	10^6
giga	G	G	10^9
tera	T	T	10^{12}

Il valore di una resistenza da $1\text{ k}\Omega$ si può scrivere:

1000, 1000.0, 1E3, 1K, 1KOHM (l'unità di misura OHM alla fine viene ignorata).

Tipi di analisi in SPICE

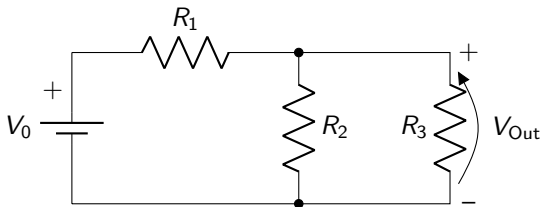
SPICE può effettuare questi tipi di analisi:

- .OP** Punto di lavoro (*operating point*)
- .DC** Caratteristica di trasferimento ingresso-uscita (in continua)
- .AC** Analisi in frequenza
- .TRAN** Risposta nel dominio del tempo (*transient*)
- .TF** Funzione di trasferimento
- .FOUR** Analisi di Fourier
- .DISTO** Distorsione armonica
- .NOISE** Analisi di rumore (*noise*)

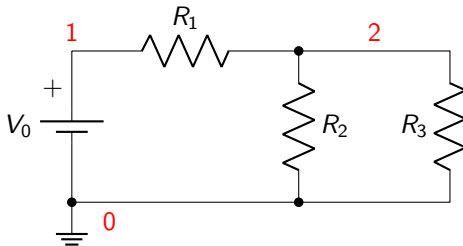
Esempio di netlist SPICE (1/3)

$V_0 = 9\text{ V}$, $R_1 = 500\ \Omega$, $R_2 = 1.2\text{ k}\Omega$, $R_3 = 1.8\text{ k}\Omega$.

Calcolare V_{Out} .



Esempio di netlist SPICE (2/3)



Si aggiunge il nodo di terra (0) e si numerano gli altri nodi.

Esempio di netlist SPICE (3/3)

```
*** CIRCUITO DI PROVA PER SPICE ***  
* LA PRIMA RIGA E` SEMPRE IL TITOLO  
* LE RIGHE DI COMMENTO COMINCIANO CON UN ASTERISCO  
V0 1 0 9V  
R1 1 2 500  
R2 2 0 1.2K  
R3 2 0 1.8K  
* PUNTO DI LAVORO (OPERATING POINT)  
.OP  
* L'ULTIMA RIGA E` SEMPRE ``.END``  
.END
```

Esecuzione di una simulazione con NGSpice

Per eseguire una simulazione con NGSpice e visualizzare i risultati:

- bisogna scrivere il file di ingresso (esempio: CIRCUITO.spi) con qualsiasi editor di testo
- per trovare il punto di lavoro in continua, il metodo più semplice è eseguire la simulazione in modalità “batch” (-b), specificando i nomi dei file di ingresso (-i) e di uscita (-o):

```
ngspice -b -i CIRCUITO.spi -o CIRCUITO.out
```

- si può effettuare una simulazione interattiva, in cui i comandi principali sono: source per selezionare il file di ingresso, op per eseguire la simulazione del punto di lavoro in continua, e print per stampare i risultati:

```
ngspice
```

```
ngspice 31 -> source CIRCUITO.spi
```

```
ngspice 31 -> op
```

```
ngspice 31 -> print V(1) V(2) V(3) ...
```

```
ngspice 31 -> quit
```

Analisi nodale

La soluzione del circuito si trova risolvendo un sistema di equazioni ottenute applicando le leggi di Kirchhoff (KCL e KVL) e usando la caratteristica V-I di ciascun elemento circuitale.

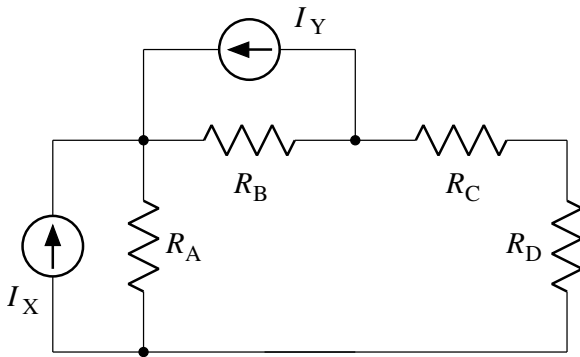
SPICE usa il metodo detto **ANALISI NODALE MODIFICATA** (*MNA = Modified Nodal Analysis*).

Il sistema di equazioni che descrive il circuito è costituito da:

- KCL applicata a tutti i nodi, tranne il nodo 0
- KVL applicata alle maglie contenenti i generatori di tensione

Se nel circuito non ci sono generatori di tensione, il metodo si riduce alla semplice **ANALISI NODALE**, che consiste nel risolvere il sistema di equazioni ottenuto applicando la KCL a tutti i nodi tranne il nodo 0.

Esempio 1: Analisi nodale (1/6)

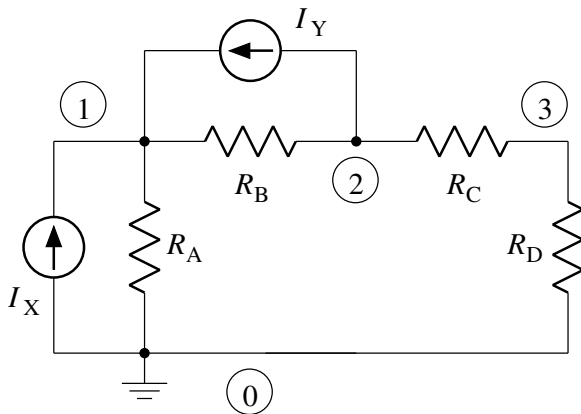


Ricaviamo la soluzione del circuito *in forma matriciale*.

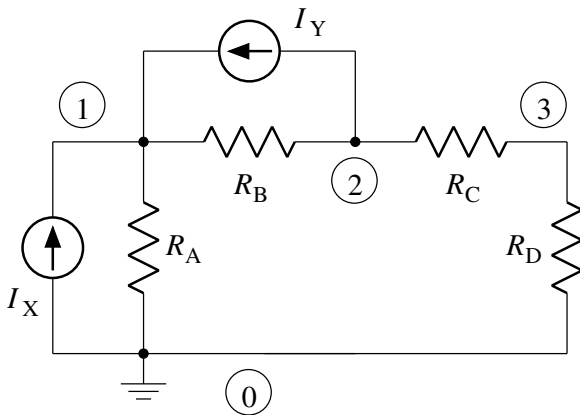
Siccome non ci sono generatori di tensione, basta scrivere la KCL per tutti i nodi tranne uno (il nodo di riferimento).

Esempio 1: Analisi nodale (2/6)

Si sceglie un nodo come nodo di riferimento (GND), e si numerano progressivamente tutti i nodi: 0 (= GND), 1, 2, ...



Esempio 1: Analisi nodale (3/6)



Per ogni nodo, tranne il nodo 0, si scrive la KCL:

$$\left\{ \begin{array}{l} \textcircled{1} : I_X + I_Y - \frac{1}{R_A}(V_1 - 0) - \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) = 0 \\ \textcircled{2} : \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) - \frac{1}{R_C}(V_2 - V_3) - I_Y = 0 \\ \textcircled{3} : \frac{1}{R_C}(V_2 - V_3) - \frac{1}{R_D}(V_3 - 0) = 0 \end{array} \right.$$

Esempio 1: Analisi nodale (4/6)

$$\begin{cases} I_X + I_Y - \frac{1}{R_A}(V_1 - 0) - \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) = 0 \\ \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) - \frac{1}{R_C}(V_2 - V_3) - I_Y = 0 \\ \frac{1}{R_C}(V_2 - V_3) - \frac{1}{R_D}(V_3 - 0) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}\right) V_1 - \frac{1}{R_B} V_2 = I_X + I_Y \\ -\frac{1}{R_B} V_1 + \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right) V_2 - \frac{1}{R_C} V_3 = -I_Y \\ -\frac{1}{R_C} V_2 + \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}\right) V_3 = 0 \end{cases}$$

Sistema di equazioni in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}\right) & -\frac{1}{R_B} & 0 \\ -\frac{1}{R_B} & \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right) & -\frac{1}{R_C} \\ 0 & -\frac{1}{R_C} & \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X + I_Y \\ -I_Y \\ 0 \end{bmatrix}$$

Esempio 1: Analisi nodale (5/6)

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}\right) & -\frac{1}{R_B} & 0 \\ -\frac{1}{R_B} & \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right) & -\frac{1}{R_C} \\ 0 & -\frac{1}{R_C} & \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X + I_Y \\ -I_Y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I}$$

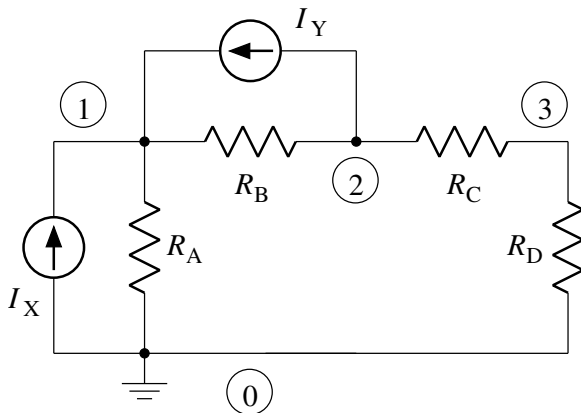
G è la **matrice delle conduttanze** (coefficienti):

ciascun elemento sulla diagonale principale G_{jj} è la somma delle conduttanze incidenti nel nodo j ; gli altri elementi G_{jk} sono le conduttanze tra le coppie di nodi (j, k) prese con il segno negativo; la matrice **G** è **simmetrica**.

V è il **vettore delle tensioni ai nodi** (incognite).

I è il **vettore delle correnti dei generatori in ciascun nodo** (termini noti): la corrente è positiva se entra nel nodo.

Esempio 1: Analisi nodale (6/6)

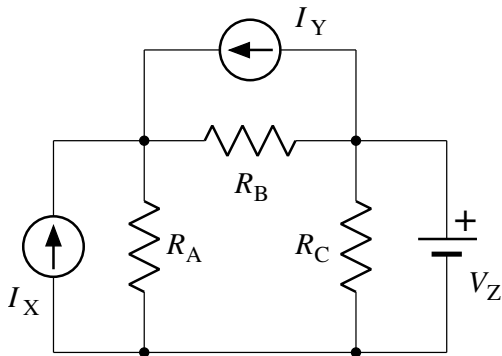


Da $\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I}$, moltiplicando *a sinistra* per \mathbf{G}^{-1} , si ha la soluzione:

$$\mathbf{V} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{I}$$

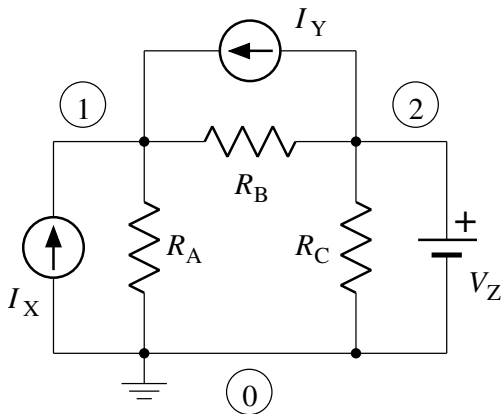
che esiste se la matrice \mathbf{G} è **invertibile**.

Analisi nodale modificata (1/5)



Se nel circuito sono presenti anche generatori di tensione, occorre scrivere ANCHE l'equazione della differenza di tensione tra i nodi ai capi di ciascun generatore di tensione.

Analisi nodale modificata (2/5)



$$\begin{cases} \textcircled{1} : I_X + I_Y - \frac{1}{R_A}(V_1 - 0) - \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) = 0 \\ \textcircled{2} : -I_Y - I_{V_Z} + \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) - \frac{1}{R_C}(V_2 - 0) = 0 \\ \textcircled{V_Z} : V_2 - 0 = V_Z \end{cases}$$

Analisi nodale modificata (3/5)

$$\begin{cases} I_X + I_Y - \frac{1}{R_A}(V_1 - 0) - \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) = 0 \\ -I_Y - I_{V_Z} + \frac{1}{R_B}(V_1 - V_2) - \frac{1}{R_C}(V_2 - 0) = 0 \\ V_2 - 0 = V_Z \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) V_1 - \frac{1}{R_B} V_2 = I_X + I_Y \\ -\frac{1}{R_B} V_1 + \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \right) V_2 + I_{V_Z} = -I_Y \\ V_2 = V_Z \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) & -\frac{1}{R_B} & 0 \\ -\frac{1}{R_B} & \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \right) & +1 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_{V_Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X + I_Y \\ -I_Y \\ V_Z \end{bmatrix}$$

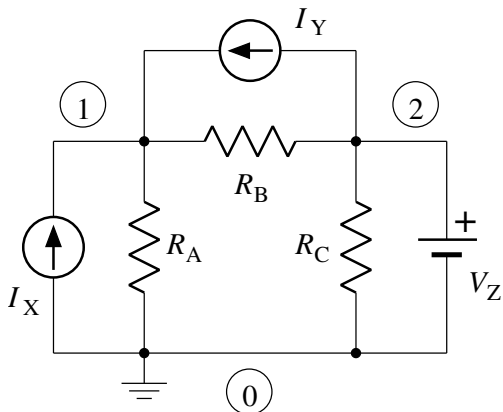
Analisi nodale modificata (4/5)

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}\right) & -\frac{1}{R_B} & \vdots & 0 \\ -\frac{1}{R_B} & \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}\right) & \vdots & +1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & +1 & \vdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdots \\ I_{V_Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X + I_Y \\ -I_Y \\ \cdots \\ V_Z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I}$$

Gli elementi della matrice \mathbf{G} non sono omogenei tra loro (ci sono anche numeri), e così pure gli elementi dei vettori \mathbf{V} e \mathbf{I} non sono omogenei tra loro (entrambi contengono sia tensioni sia correnti).

Analisi nodale modificata (5/5)



Anche in questo caso, la soluzione è:

$$\mathbf{V} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{I}$$

Esercizi

Per il partitore resistivo, scegliere valori diversi per le tre resistenze.

- 1 Ricavare il sistema di equazioni con il metodo dell'analisi nodale modificata.
- 2 Usare la applet www.falstad.com/circuit/e-voltdivide.html (modificando il circuito e inserendo i valori opportuni) per visualizzare le tensioni.
- 3 Simulare il circuito con NGSpice quando V è una tensione costante (ad esempio: $V = 10\text{ V}$), ricavando le tensioni in tutti i nodi.

