

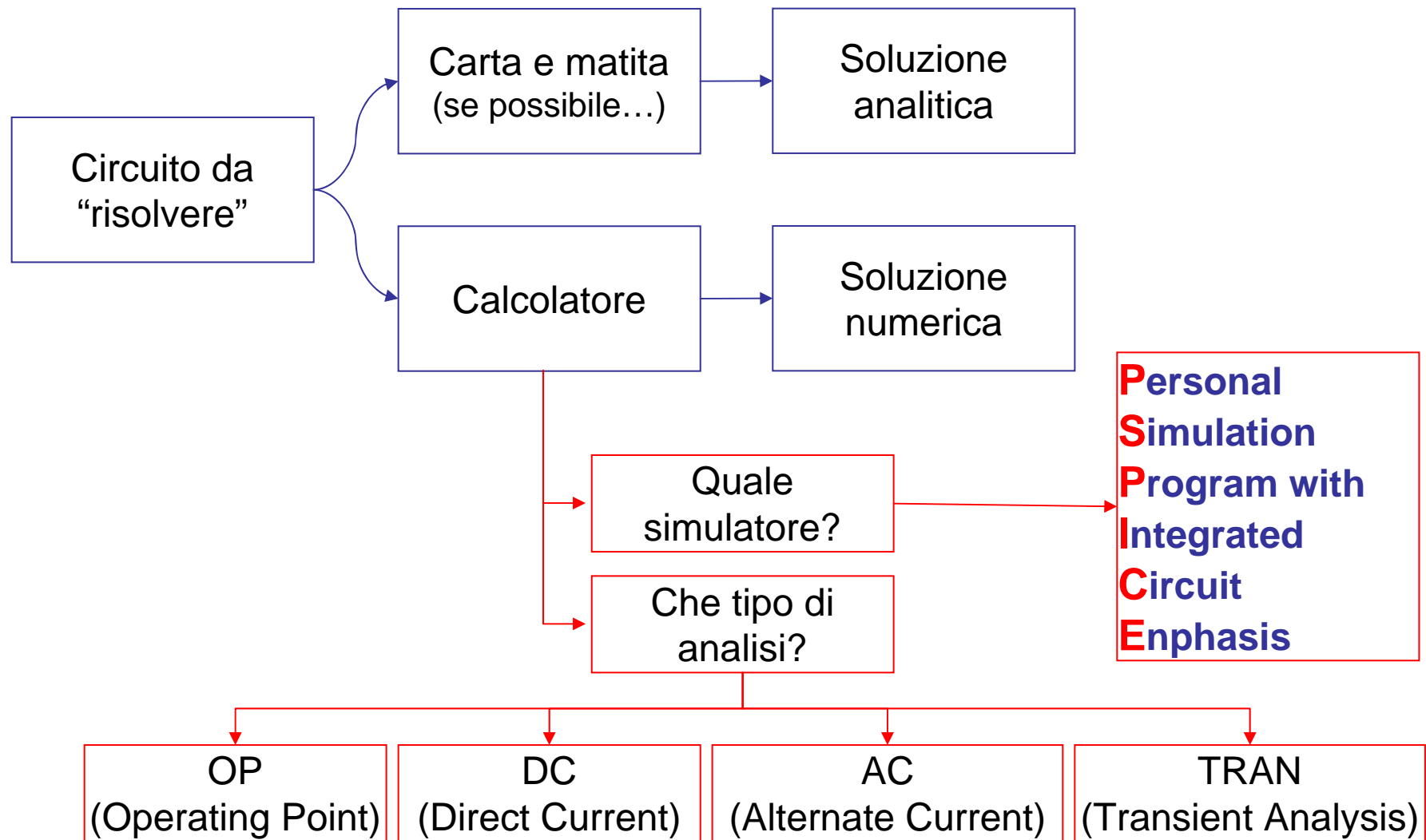
Elettrotecnica 1 – a.a. 2005/06

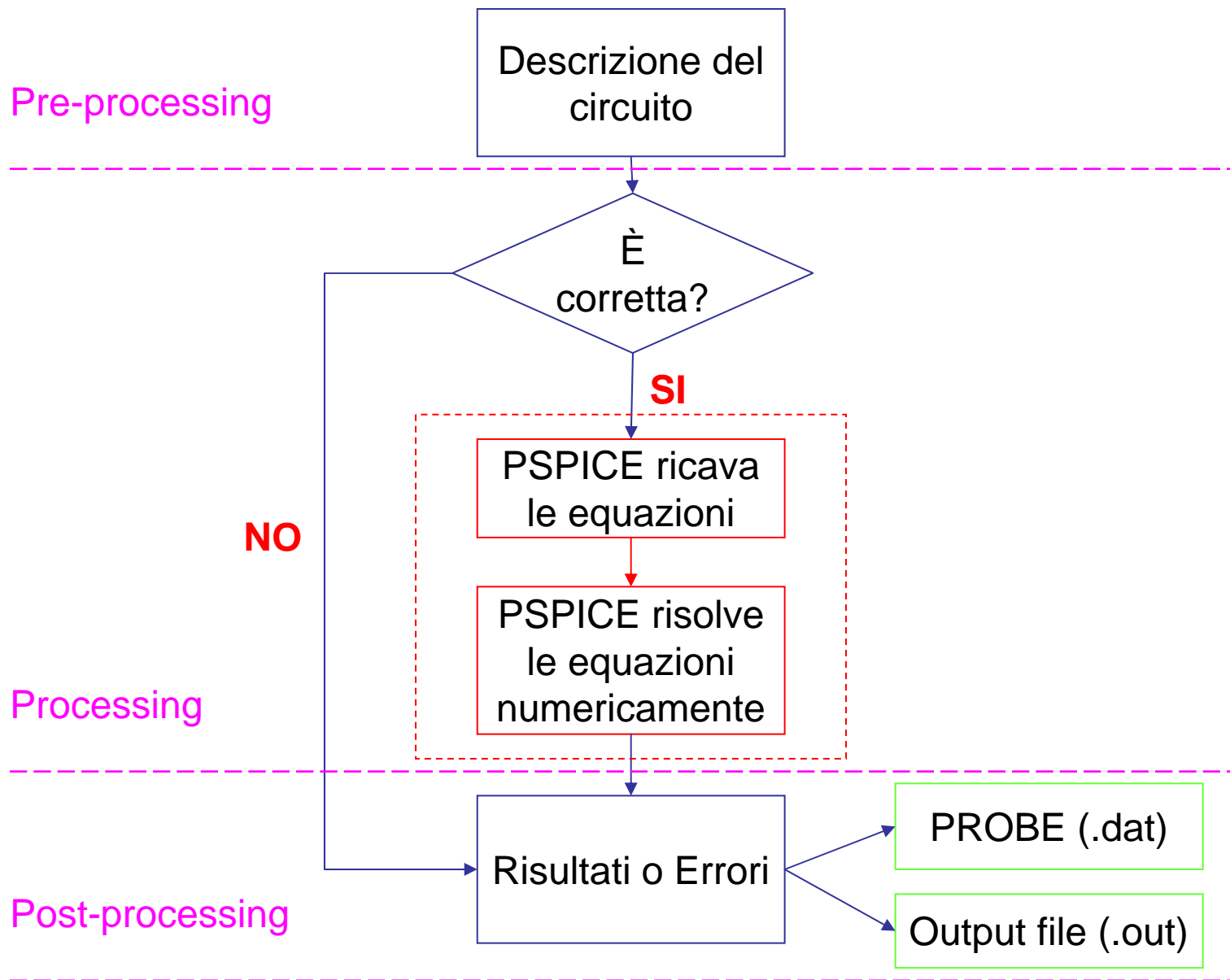
Prof. Marco Storace

***Introduzione alla Simulazione Numerica dei Circuiti***

Ing. Federico Bizzarri

- ✓ Il **progetto** di un circuito elettronico, per raggiungere il suo obiettivo, deve essere compatibile con opportune **specifiche**;
- ✓ come si può verificare se le specifiche sono rispettate e se l'obiettivo è stato raggiunto?
  - o realizzando un **prototipo** e facendo misure di laboratorio.
    - un prototipo “**discreto**” è impraticabile per le nuove tecnologie integrate perchè
      - in generale il circuito è composto da troppi componenti
      - un prototipo “discreto” non tiene conto di fenomeni fisici (parassiti) dovuti alle dimensioni;
    - un prototipo **integrato** è troppo costoso (almeno in fase preliminare)
  - o ricorrendo a **pacchetti software** per la simulazione dei circuiti al calcolatore.





- ✓ Per simulare un circuito è necessario generare un file **ASCII** con estensione **.cir**;
- ✓ Struttura del file:
  - o La **prima riga** è riservata al **titolo**;
  - o L'**ultima riga** deve contenere il comando **.END**;
  - o Le **righe di commento** devono avere come primo carattere **\*** ;
  - o Le **righe troppo lunghe** possono essere **spezzate**. Le **righe di continuazione** devono avere come primo carattere **+**;
  - o Tutte le righe tra la prima e l'ultima possono essere scritte in **ordine arbitrario**.

- ✓ Ciascun componente è rappresentato nel file da una riga del tipo

**<NOME> <NODI> [<PARAMETRI>] <VALORE>  
[<OPZIONI>]**

- ✓ Il **NOME** è arbitrario, a parte la **prima lettera** che ne indica il tipo.

**C** condensatore

**L** induttore

**R** resistore

**K** accoppiamento tra induttori

**I** generatore indipendente di corrente

**V** generatore indipendente di tensione

**E** generatore di tensione pilotato in tensione (VCVS)

**F** generatore di corrente pilotato in corrente (CCCS)

**G** generatore di corrente pilotato in tensione (VCCS)

**H** generatore di tensione pilotato in corrente (CCVS)

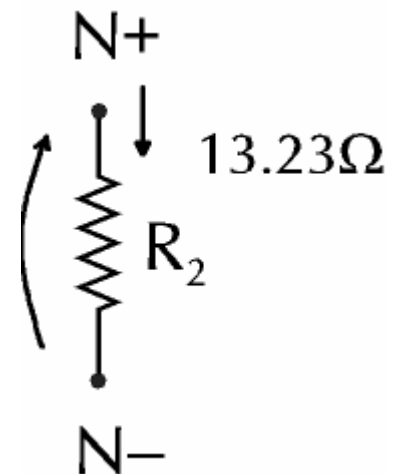
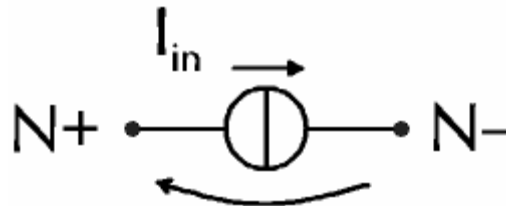
- ✓ Il campo **NODI** contiene il riferimento ai nodi del circuito ai quali è connesso ciascun componente

Per un bipolo  $\langle \text{NODI} \rangle \Rightarrow \langle \text{N+} \rangle \langle \text{N-} \rangle$

- ✓ SPICE usa la **convenzione normale** (o degli utilizzatori)
- ✓ A ciascun **nodo** deve essere assegnato un **numero**. Tale numero è **arbitrario** escluso il caso del nodo 0.

**NODO 0:**

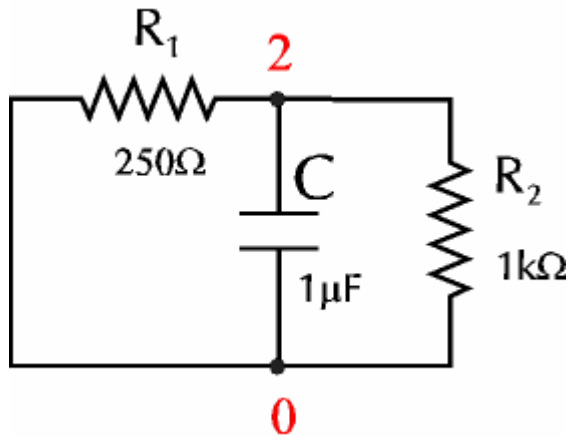
- o Deve essere sempre presente
- o Costituisce il riferimento per tutte le tensioni



- ✓ Il campo **VALORE** contiene
  - o Il valore della grandezza fisica associata a ciascun componente (**la dimensione fisica non si specifica**)
  - o La forma d'onda dei generatori indipendenti
- ✓ I valori numerici possono essere espressi
  - o Per esteso
  - o In notazione scientifica
  - o Usando suffissi di scala

<b>F</b>	femto	$10^{-15}$	<b>K</b>	kilo	$10^3$
<b>P</b>	pico	$10^{-12}$	<b>MEG</b>	mega	$10^6$
<b>N</b>	nano	$10^{-9}$	<b>G</b>	giga	$10^9$
<b>U</b>	micro	$10^{-6}$	<b>T</b>	tera	$10^{12}$
<b>M</b>	milli	$10^{-3}$			

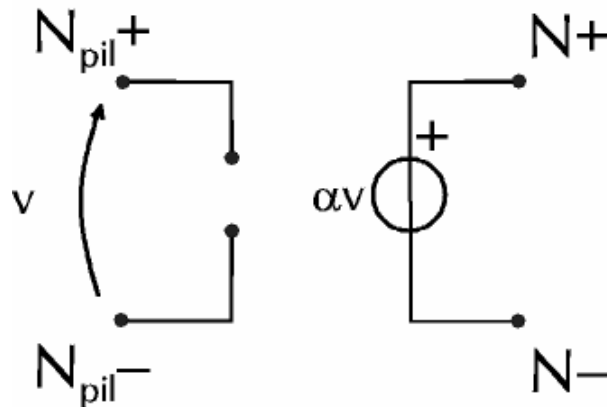




Esempio  
R1 2 0 250  
R2 2 0 1K  
C 2 0 1.0E-6  
\*commento...  
.end

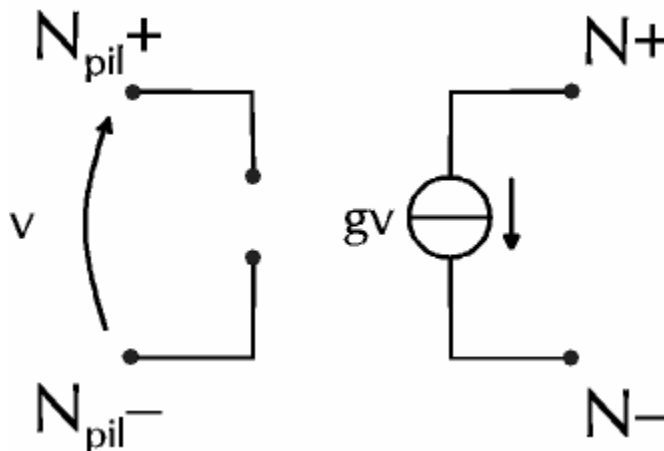
**Il file così strutturato è corretto ma non esegue alcuna simulazione!**

## Generatore di tensione controllato in tensione



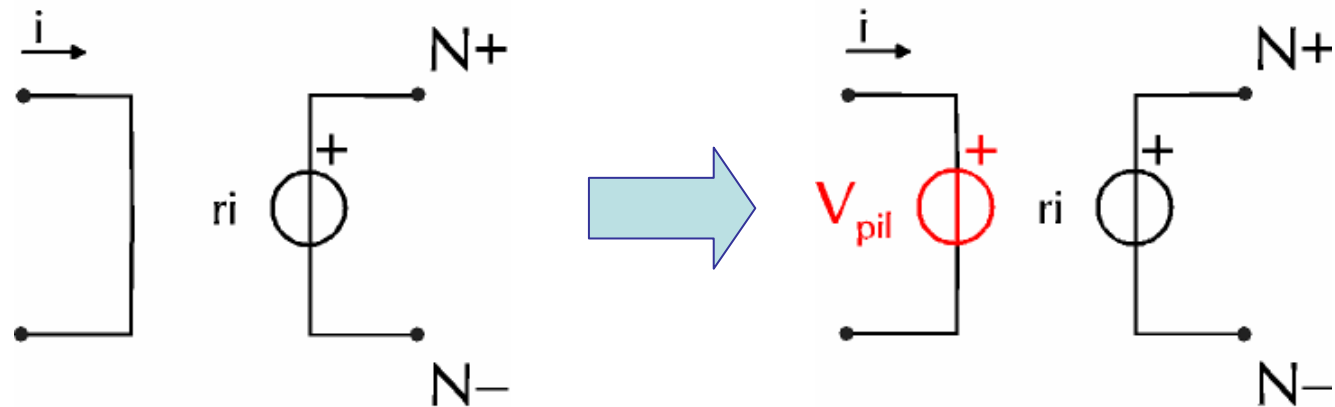
$E\langle\text{nome}\rangle \langle N+\rangle \langle N-\rangle \langle N_{pil+}\rangle \langle N_{pil-}\rangle \alpha$

## Generatore di corrente controllato in tensione



$G\langle\text{nome}\rangle \langle N+\rangle \langle N-\rangle \langle N_{pil+}\rangle \langle N_{pil-}\rangle g$

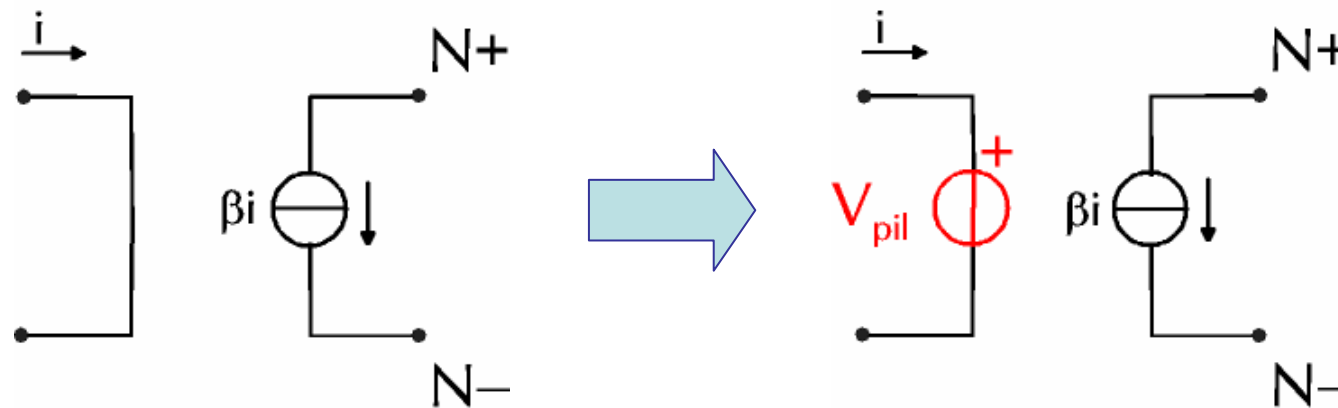
## Generatore di tensione controllato in corrente



H<nome> <N+> <N-> <V<sub>pil</sub>> r

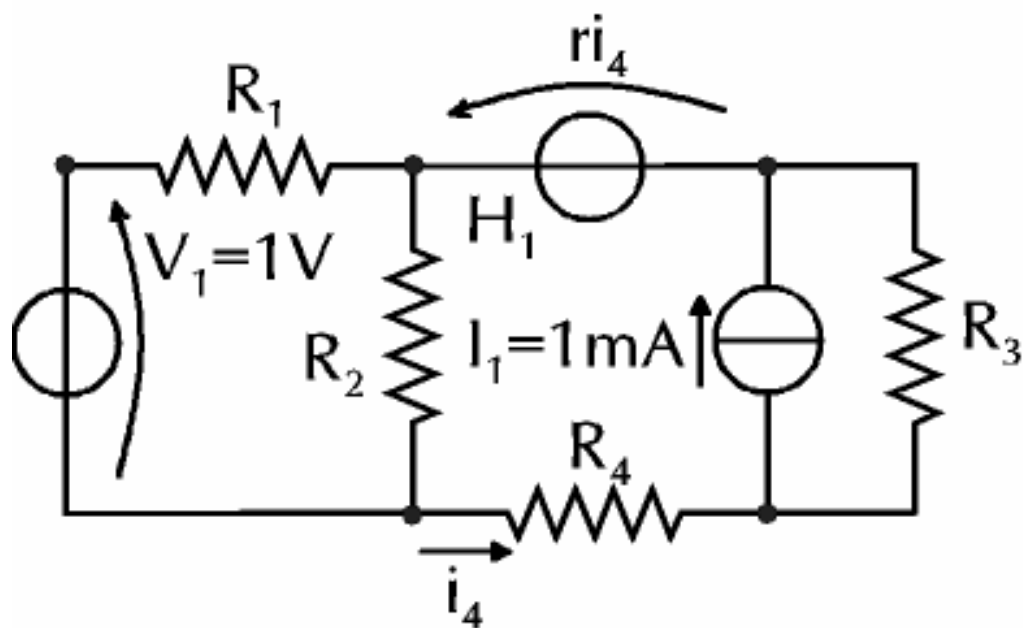
<V<sub>pil</sub>> è il nome di un generatore indipendente di tensione attraversato dalla corrente pilotante  $i$ . Come caso particolare,  $V_{pil}=0$  indica che il generatore indipendente attraversato dalla corrente pilotante  $i$  è un corto circuito.

## Generatore di corrente controllato in corrente



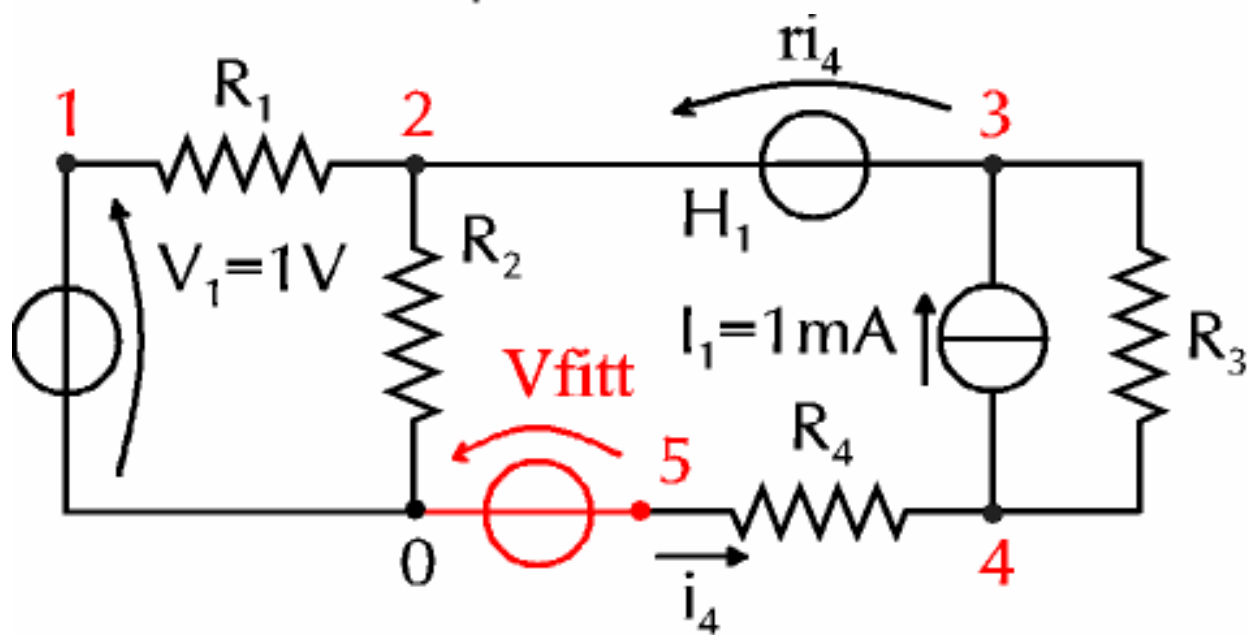
$F<nome> <N+> <N-> <V_{pil}> \beta$

$<V_{pil}>$  è il nome di un generatore indipendente di tensione attraversato dalla corrente pilotante  $i$ . Come caso particolare,  $V_{pil}=0$  indica che il generatore indipendente attraversato dalla corrente pilotante  $i$  è un corto circuito.



Esempio

```
V1 1 0 1
R1 1 2 2k
R2 2 0 2K
H1 2 3 Vfitt 1k
Vfitt 0 5 0
I1 4 3 0.001
R3 3 4 5k
R4 5 4 5k
.end
```



## Generatore indipendente di tensione

V<NOME> <N+> <N-> [ [DC] <value> ]  
+ [ AC <magnitude value> [phase value] ]  
+ [<forma d'onda>]

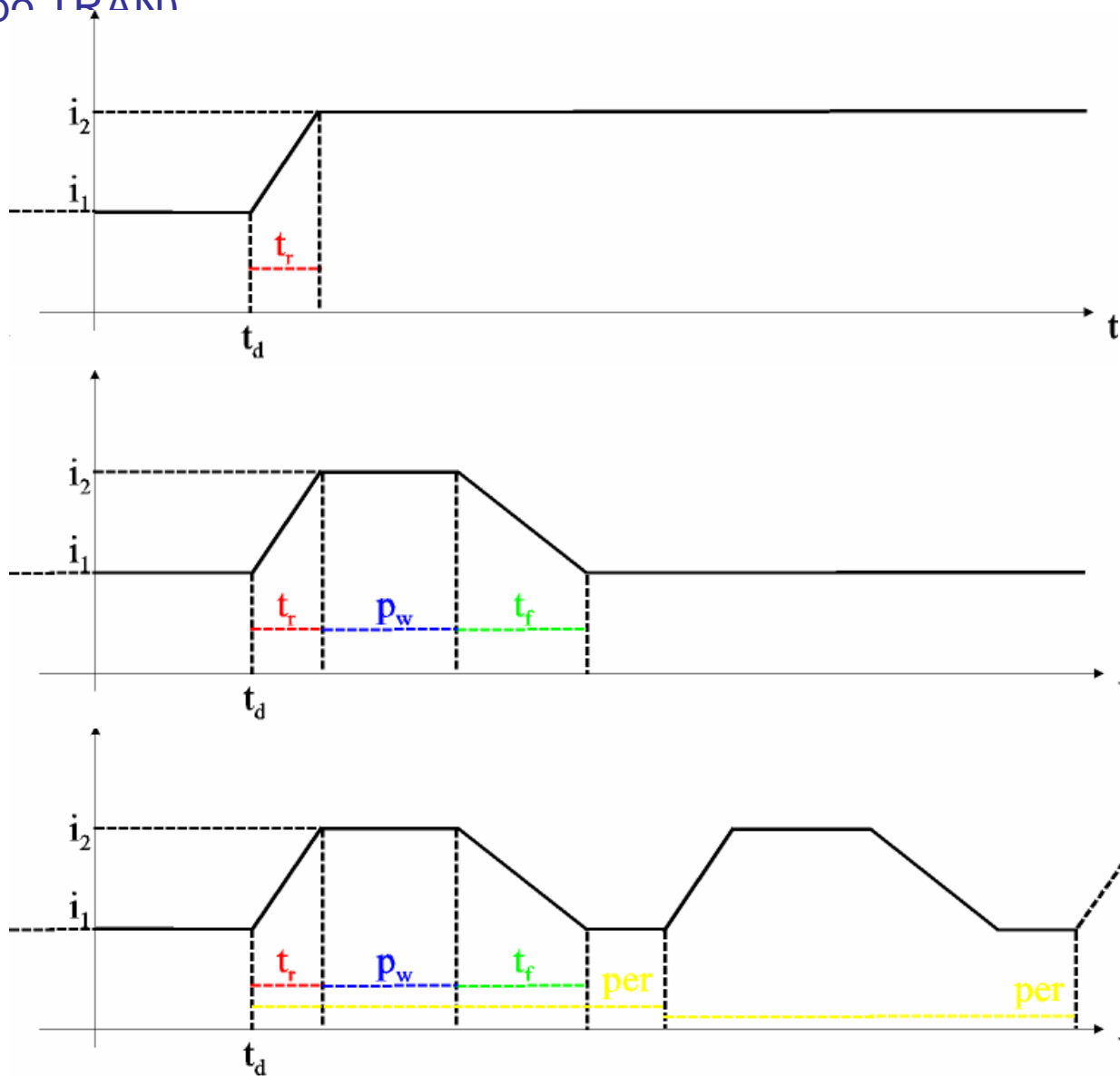
- o Con il campo DC si assegna al generatore un valore costante che sarà impiegato in analisi di tipo OP e DC (regime stazionario).
- o Con il campo AC si assegna ampiezza e fase di una sinusoide la cui frequenza sarà fatta variare con un'analisi di tipo AC (regime sinusoidale permanente).
- o Con il campo TRAN si assegnano forme d'onda specifiche da impiegare in analisi di tipo TRAN (analisi in transitorio).

## Generatore indipendente di corrente

I<NOME> <N+> <N-> [ [DC] <value> ]  
+ [ AC <magnitude value> [phase value] ]  
+ [<forma d'onda>]

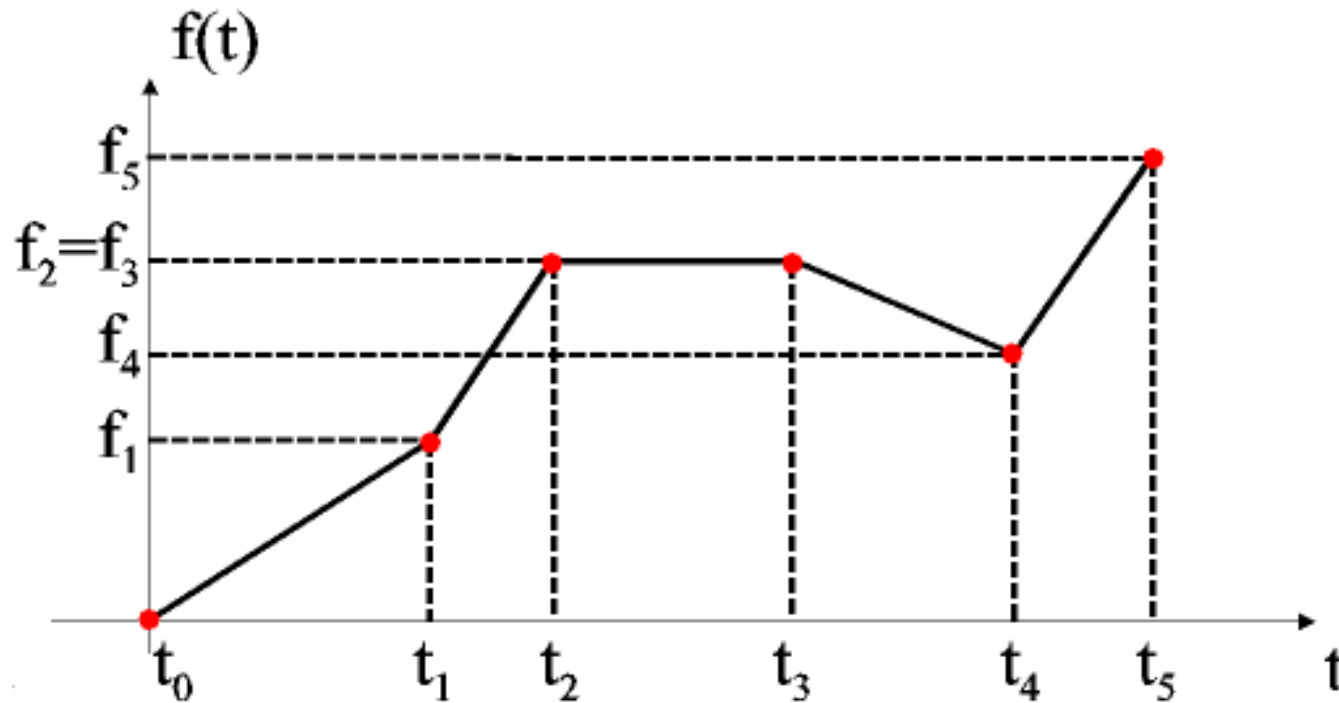
- o Con il campo DC si assegna al generatore un valore costante che sarà impiegato in analisi di tipo OP e DC (regime stazionario).
- o Con il campo AC si assegna ampiezza e fase di una sinusoide la cui frequenza sarà fatta variare con un'analisi di tipo AC (regime sinusoidale permanente).
- o Con il campo TRAN si assegnano forme d'onda specifiche da impiegare in analisi di tipo TRAN (analisi in transitorio).

**PULSE** ( $[<i_1> <i_2> <td> <tr>]$  [ $<tf> <pw> [<per>]]$ ) (da usare nel  
camp<sup>o</sup> TRAP)





PWL(<t<sub>0</sub>>, <f<sub>0</sub>>, ..., <t<sub>i</sub>>, <f<sub>i</sub>>, ..., <t<sub>n</sub>>, <f<sub>n</sub>>) (da usare nel campo TRAN)



SIN (<A<sub>0</sub>> <A<sub>1</sub>> <f> <t<sub>d</sub>>)  $\Rightarrow A_0 + A_1 \sin(2\pi f(t - t_d))$  (da usare nel campo TRAN)

## Dichiarazione di un sottocircuito

```
.SUBCKT <NOME SOTTOCIRCUITO> [NODI EXT]  
+ [PARAMS: < <nomep> = <valorep> > ]  
...  
.ENDS
```

oIl campo **NOME SOTTOCIRCUITO** specifica il nome della classe di sottocircuiti;

oIl campo **NODI EXT** specifica i nodi del sottocircuito che fungono da interfaccia verso l'esterno (il nodo 0 non può essere incluso in questa lista);

oIl campo opzionale **PARAMS** consente di specificare il nome **<nomep>** dei parametri (e il loro valore di default **<valorep>**) da passare al sottocircuito quando viene richiamato;

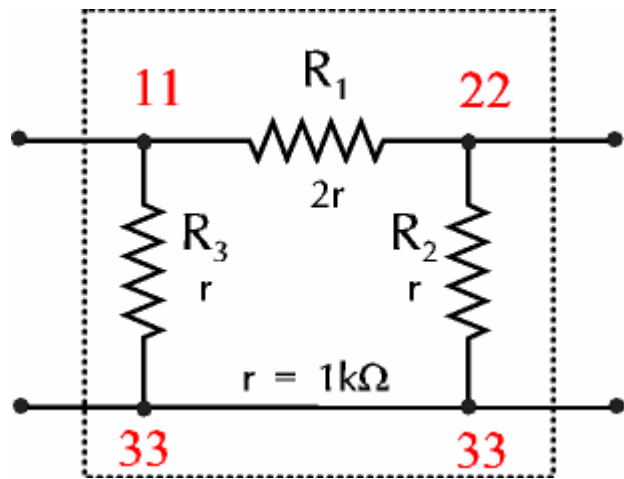
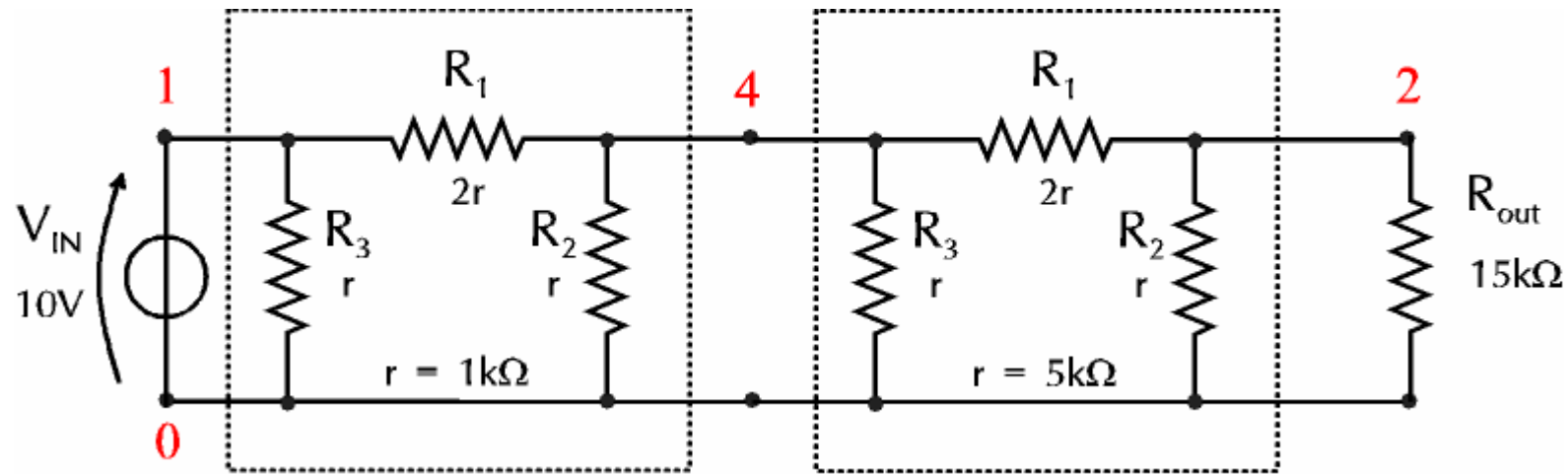
oAl posto di **...** si specifica la struttura del sottocircuito;

oIl comando **.ENDS** conclude la dichiarazione del sottocircuito.

- o Per richiamare un sotto circuito all'interno della descrizione del circuito principale si deve usare la seguente sintassi:

**X<NOME> <NODI> <NOME SOTTOCIRCUITO>**  
**+ [PARAMS: < <nomep> = <valorep> >]**

- o Il campo **NOME** specifica il nome del sottocircuito istanziato nel circuito principale;
- o Il campo **NOME SOTTOCIRCUITO** specifica la classe di sottocircuiti alla quale appartiene il sottocircuito istanziato;
- o Il campo **NODI** specifica i nodi del circuito principale da collegare ai nodi di interfaccia del sottocircuito;
- o Il campo opzionale **PARAMETRI** consente di specificare il nome **<nomep>** dei parametri (e il loro valore **<valorep>**) da passare al sottocircuito istanziato;



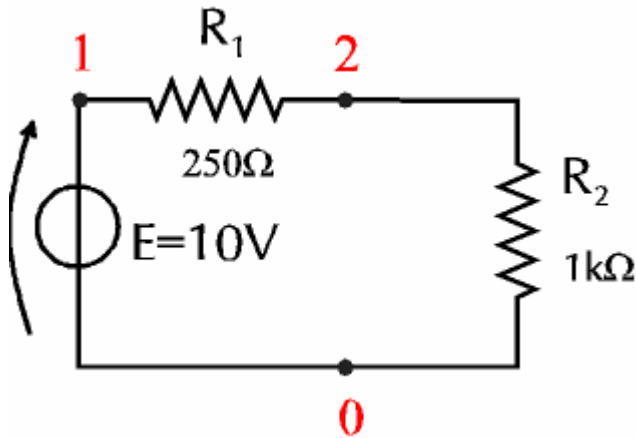
Esempio 0

```
.SUBCKT dueporte 11 22 33
+PARAMS: r=1k
R1 11 22 {2*r}
R2 22 33 {r}
R3 11 33 {r}
.ENDS
X1 1 4 0 dueporte
X2 4 2 0 dueporte PARAMS: r=5k
Vin 1 0 DC 10
Rout 2 0 15k
.end
```

## Analisi OP (Operating point) (non genera .dat)

### .OP

- o Il circuito viene risolto all'istante  $t = 0$ .
- o I componenti dinamici vengono sostituiti dal loro circuito equivalente in regime stazionario (+ eventuali condizioni iniziali).
- o Se non è specificato un valore DC, i generatori indipendenti di corrente e/o tensione tempovarianti, vengono sostituiti da generatori costanti al valore che le eventuali forme d'onda assumono in  $t = 0$ .
- o Sul file di uscita (.out) si possono leggere le tensioni dei nodi e la corrente nei rami per cui tale grandezza non sia deducibile dalla tensione ai nodi (es. generatore indipendente di tensione)



```
Esempio 1 .OP
R1  2 1 250
R2  2 0 1K
VE 1 0 DC 10 SIN(1 1 1k)
.OP
.end
```

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
( 1 )	10.0000	( 2 )	8.0000				

VOLTAGE SOURCE CURRENTS	
NAME	CURRENT
VE	-8.000E-03

**TOTAL POWER DISSIPATION 8.00E-02 WATTS**

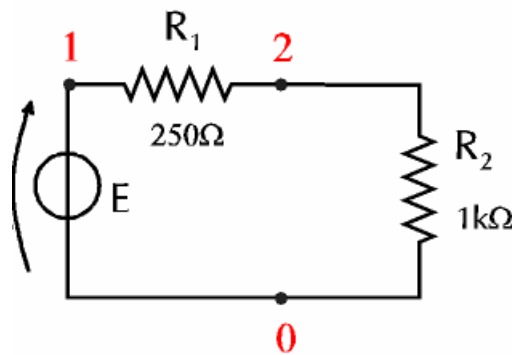
Dal file .out

## Analisi DC (Direct Current)

.DC <NOME> <Val\_in> <Val\_fin> <Val\_var>

.DC <NOME> LIST <valori>

- o Effettua analisi di tipo OP al variare del valore costante imposto, in regime stazionario, da un generatore indipendente di corrente o tensione.
- o NOME specifica il generatore che varia.
- o Gli altri generatori, se non è specificato un valore nel campo DC, assumono il valore costante che le forme d'onda ad essi associate hanno in  $t = 0$ .



Esempio 2 .OP

R1 2 1 250

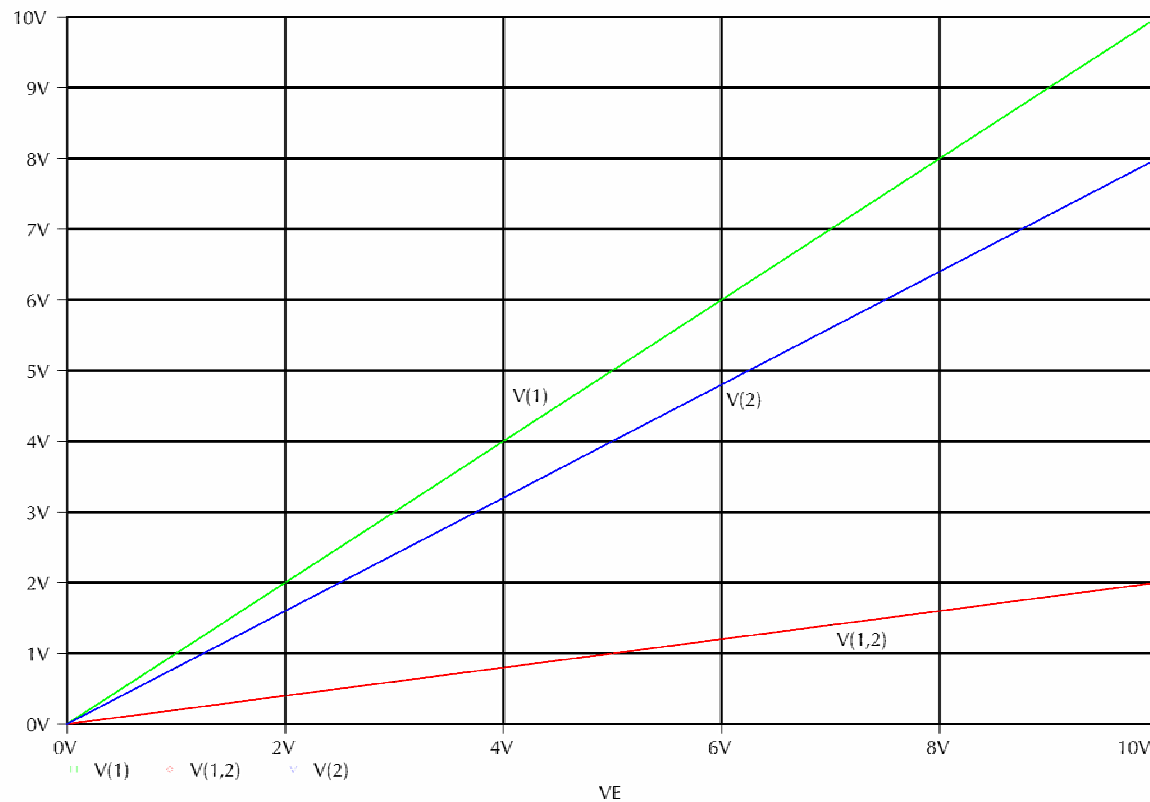
R2 2 0 1K

VE 1 0 DC 10

.DC VE 0 10 1

.PROBE

.end





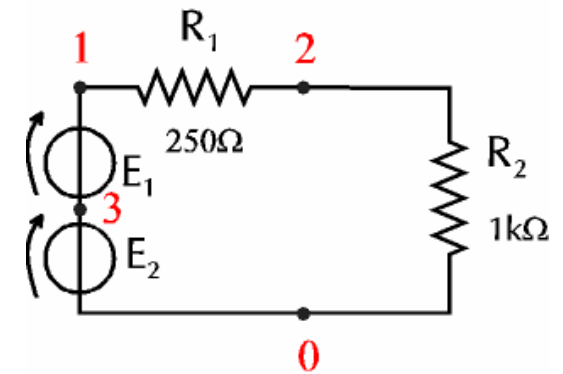
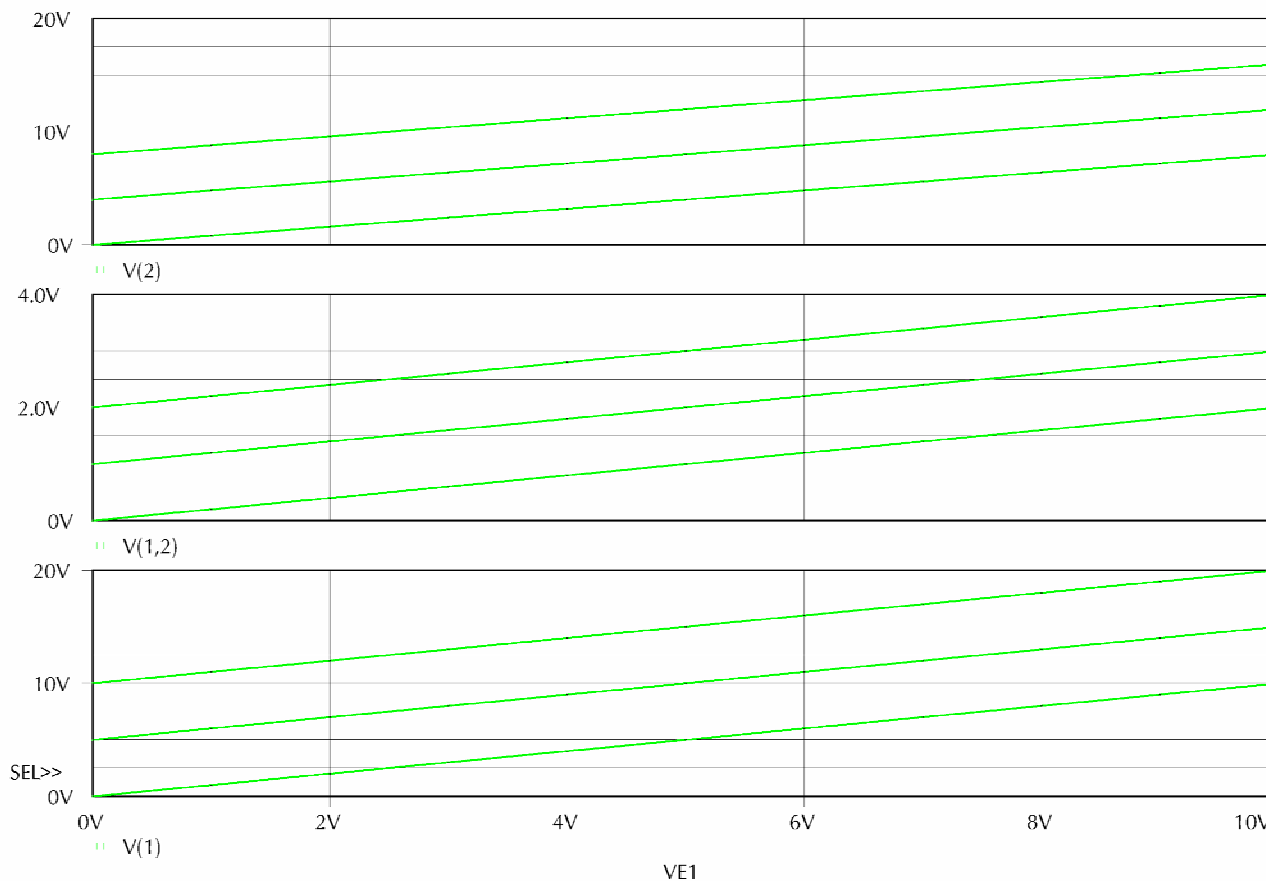
## Analisi DC NESTED (Direct Current)

.DC <NOME> <Val\_in> <Val\_fin> <Val\_var> <NOME>  
<Val\_in> <Val\_fin> <Val\_var>

.DC <NOME> LIST <valori> <NOME> <Val\_in> <Val\_fin>  
<Val\_var>

.DC <NOME> <Val\_in> <Val\_fin> <Val\_var> <NOME> LIST  
<valori>

Il tipo di analisi è lo stesso del comando .DC. Consente di specificare due generatori rispetto ai quali effettuare l'analisi. Per ogni valore del generatore “più esterno” (<NOME>) vengono fatte analisi .DC al variare di quello “più interno” (<NOME>).



```

Esempio 3 .OP
R1  2 1 250
R2  2 0 1K
VE1 1 3 DC 10
VE2 3 0 DC 0
.DC VE1 0 10 1
+VE2 LIST 0 5 10
.PROBE
.end

```

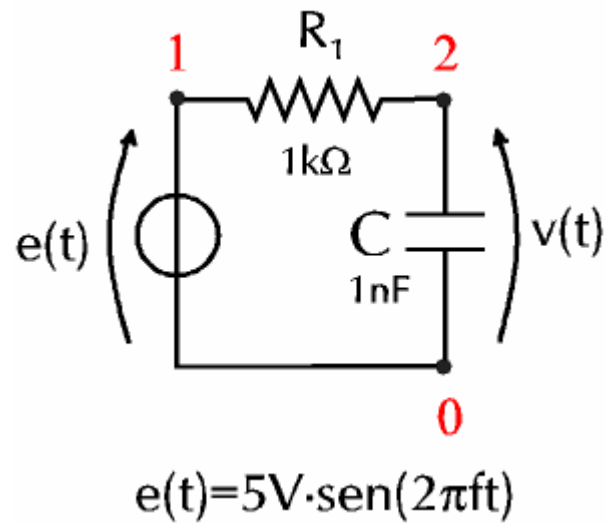
In questo esempio sono stati fatti variare due generatori di tensione ma sono possibili anche analisi miste (tensione e corrente) o solo corrente.

Sull'asse delle ascisse c'è la tensione imposta da  $VE1$  e le diverse curve sono parametrizzate da  $VE2$

## Analisi AC (Alternate Current)

**.AC <tipo di variazione> <n° punti> <f\_in> <f\_fin>**

Calcola la risposta in frequenza di un circuito in un dato intervallo di frequenze. In altre parole, risolve il circuito in condizione di regime sinusoidale permanente al variare della frequenza di generatori indipendenti di tensione e/o corrente. Tali generatori devono essere di tipo AC e deve essere specificata la loro ampiezza e la loro fase.



esempio

R1 1 2 1k

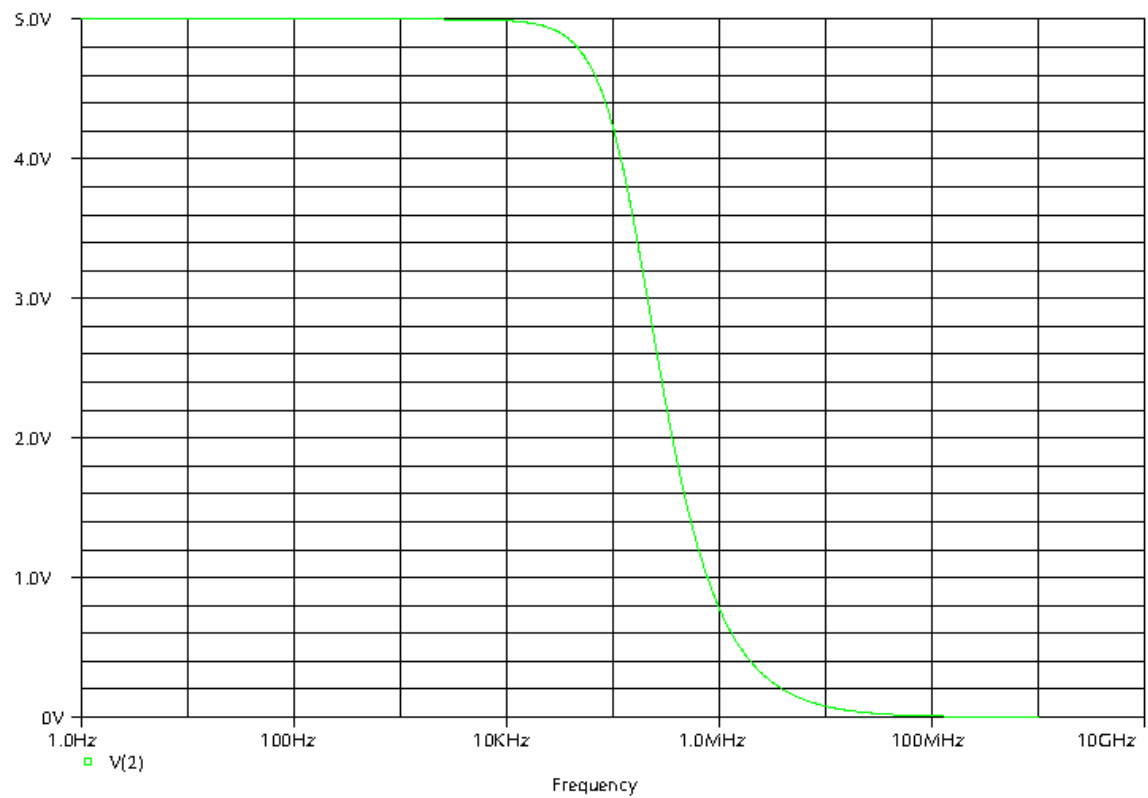
C 2 0 1.0E-9

Vin 1 0 AC 5

.AC DEC 100 1 1G

.PROBE

.end



## Analisi TRAN (Transient Analysis)

**.TRAN <passostampa> <T<sub>finale</sub>> [T<sub>iniziostampa</sub> [passomax]]**

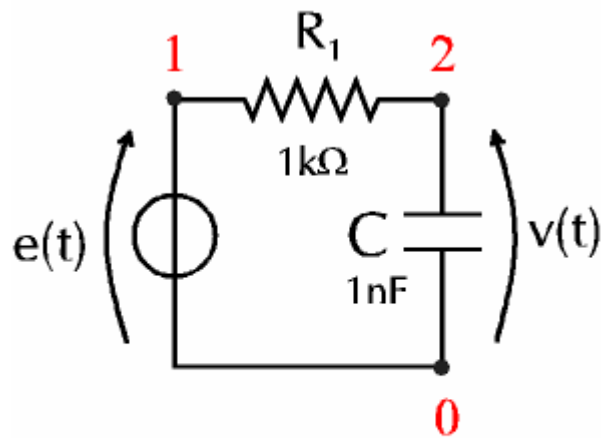
Effettua simulazioni di circuiti nel **dominio del tempo**. Assegnate le forme d'onda corrispondenti ai diversi generatori indipendenti di tensione e/o corrente presenti nel circuito, calcola l'evoluzione delle variabili volt–amperometriche del circuito da  $t = 0$  fino a  $t = T_{\text{finale}}$ .

Per svolgere questo tipo di analisi, PSPICE esegue, innanzi tutto, un'analisi di tipo OP per ricavare il valore iniziale delle variabili del circuito da assegnare in  $t = 0$ .

Per una corretta simulazione **.TRAN** è necessario dimensionare i 4 parametri di tale istruzione in base ai **TEMPI CARATTERISTICI** del circuito.

## TEMPI CARATTERISTICI:

- ✓ Costanti di tempo ( $\tau_i = 1/|\lambda_i|$ ,  $i=1,2,\dots$ )
- ✓ Periodo degli ingressi periodici
- o Da 0 a  $T_{\text{iniziostampa}}$  non sono prodotti risultati in uscita:
  - $T_{\text{iniziostampa}} = 0$  se interessa la risposta transitoria;
  - $T_{\text{iniziostampa}} = \sim 10 \cdot \max\{\text{costanti di tempo}\}$  se interessa soltanto la soluzione a regime;
- o  $T_{\text{finale}} = \sim 10 \cdot \max\{\text{tempi caratteristici}\}$ , non considerando i periodi degli ingressi periodici se interessa soltanto la risposta libera;
- o  $\text{passomax}$  = massimo valore del passo di integrazione (si può porre  $= \sim \min\{\text{tempi caratteristici}\}/1000$ );
- o  $\text{passostampa}$  = passo di stampa dei valori (ottenuti per interpolazione) sul file .out se si usa .PRINT, oppure,  $\text{passostampa} = \text{passo iniziale di integrazione} = \text{passomax}$ .



$$e(t) = 5V \cdot \sin(2\pi f t)$$

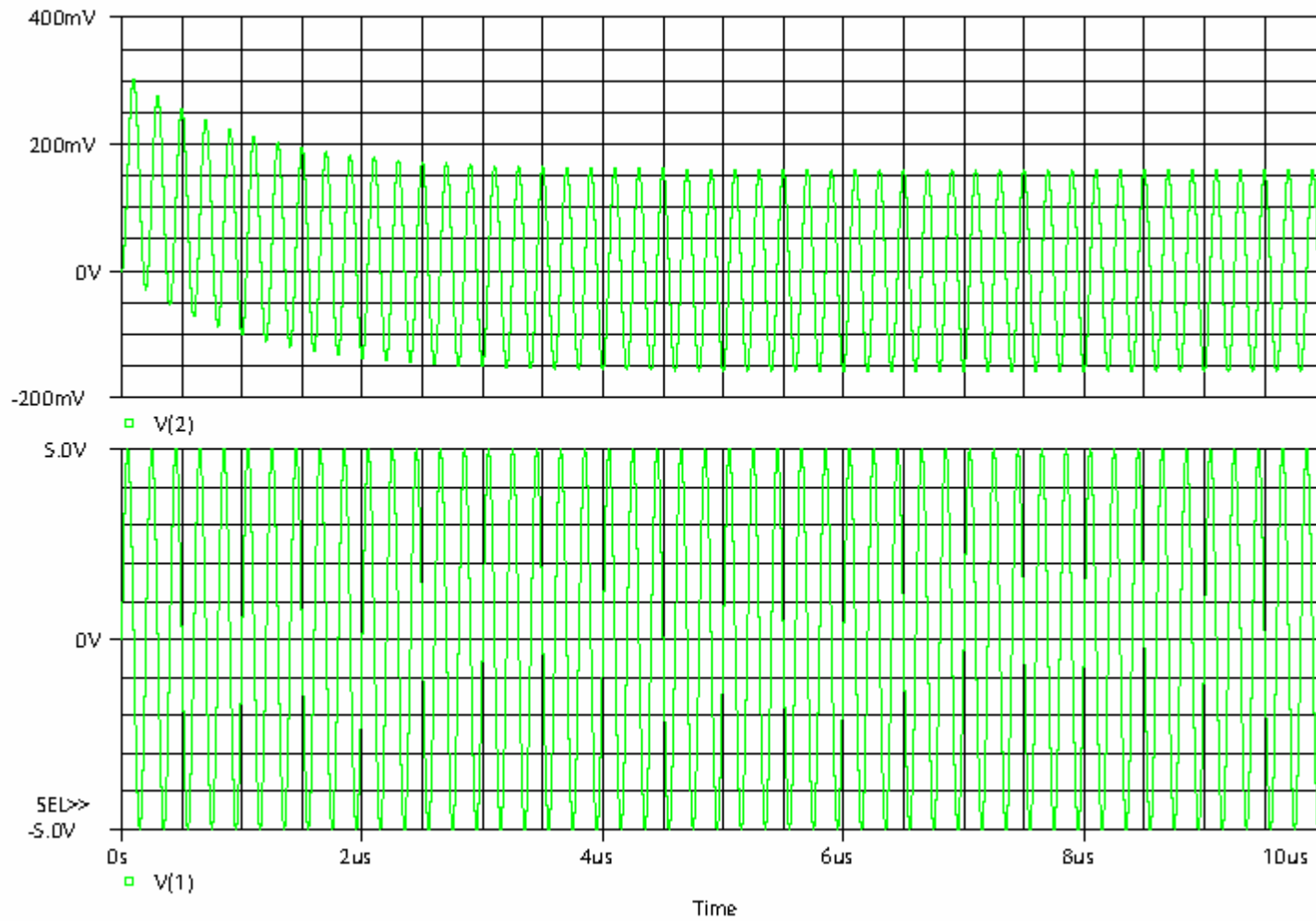
$$f = 5MHz$$

```
Esempio 4
R1  1 2 1k
C    2 0 1.0E-9
Vin 1 0 sin(0 5 5Meg 0)
.TRAN 0.2n 10u 0 0.2n
.PROBE
.end
```

## TEMPI CARATTERISTICI:

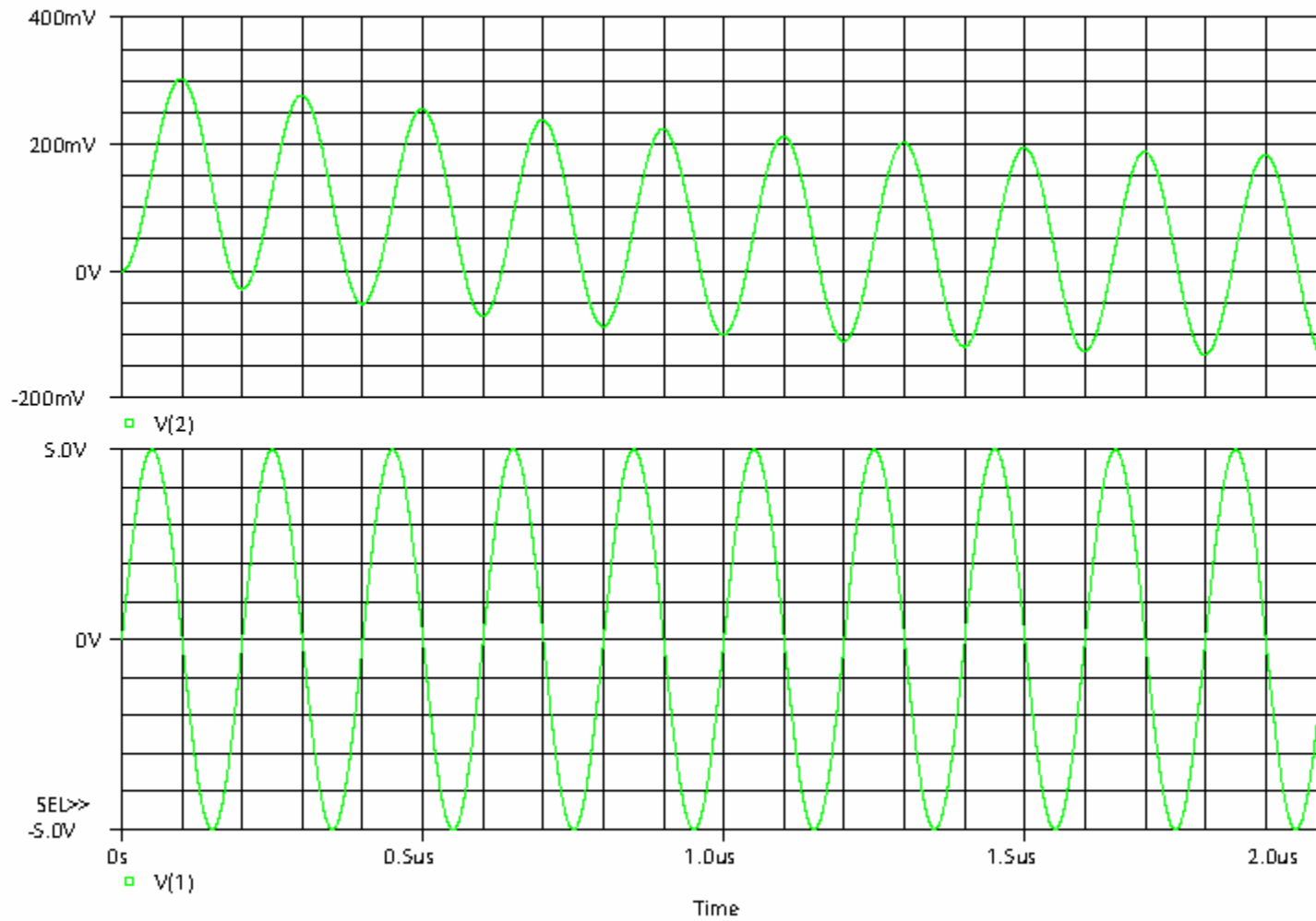
- ✓ Costanti di tempo:  $\tau_1 = 1/|\lambda_1| = R_1 C = 1\mu s$
- ✓ Periodo degli ingressi periodici:  $1/f = 0.2\mu s$

```
.TRAN 0.2n 10u 0 0.2n
```

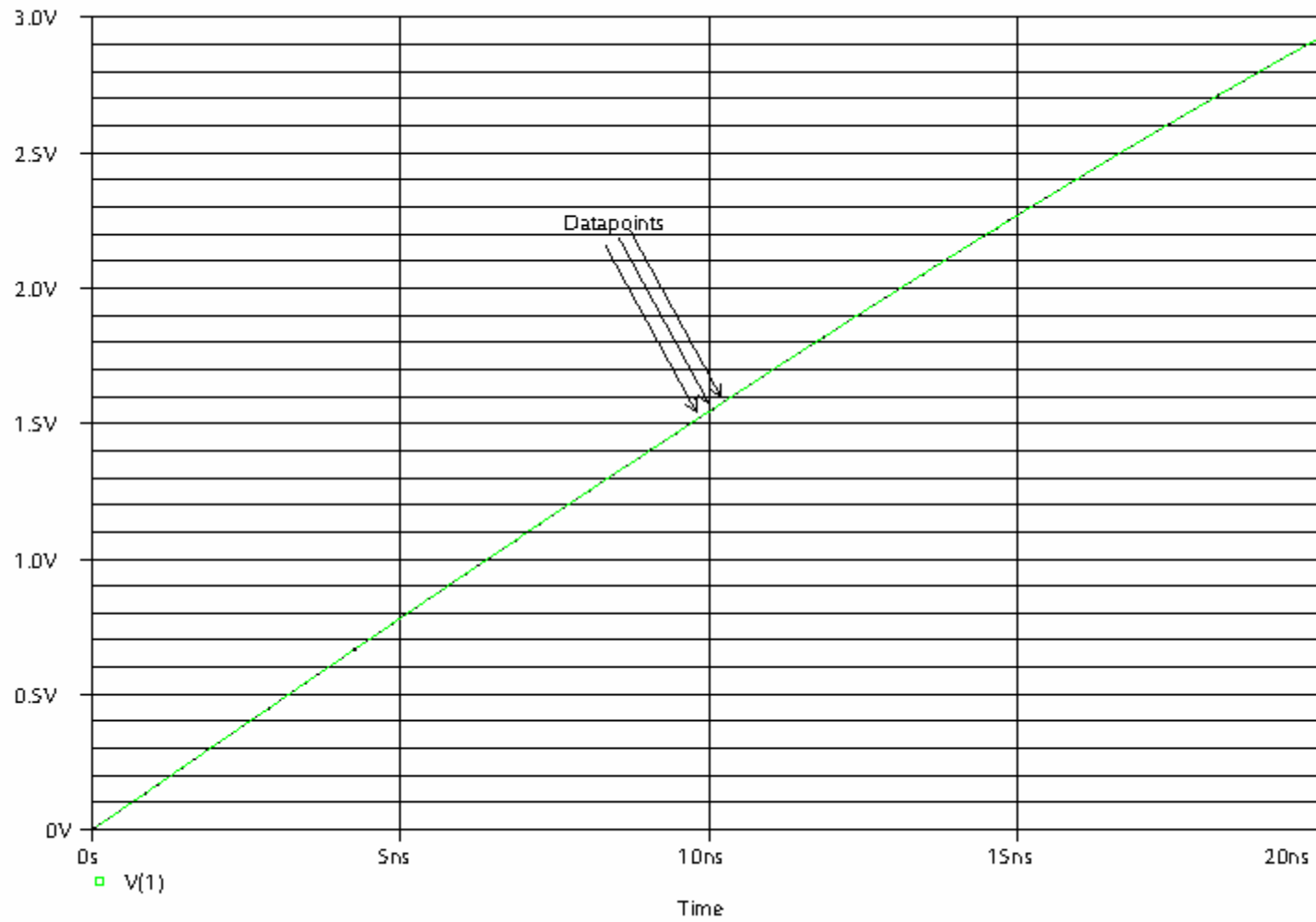




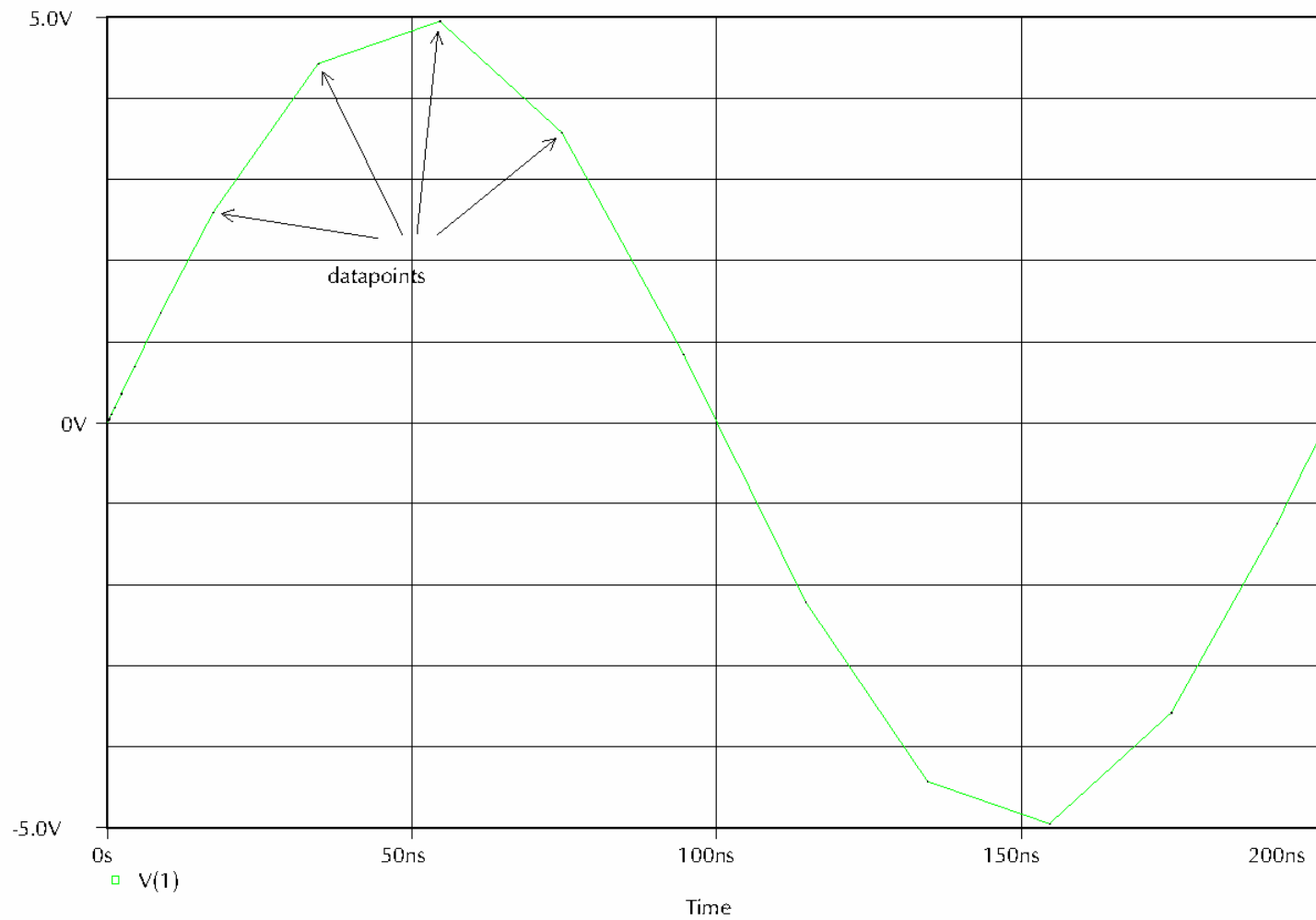
```
.TRAN 0.2n 2u 0 0.2n
```



```
.TRAN 0.2n 10u 0 0.2n
```

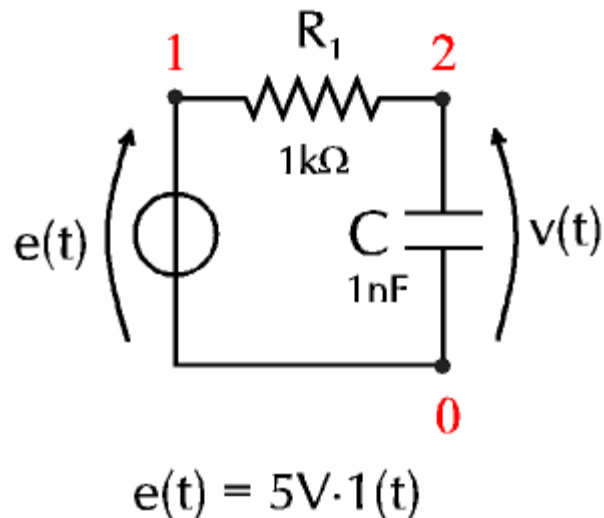


```
.TRAN 20n 10u 0 20n
```



## INGRESSI DISCONTINUI:

Alcuni ingressi (per esempio, gradino, onda rettangolare,...) presentano discontinuità di prima specie. Poiché in PSPICE non è possibile definire transizioni istantanee (e comunque non ha senso neppure dal punto di vista fisico) è necessario modellare le variazioni istantanee di tali segnali “come se fossero tali”.

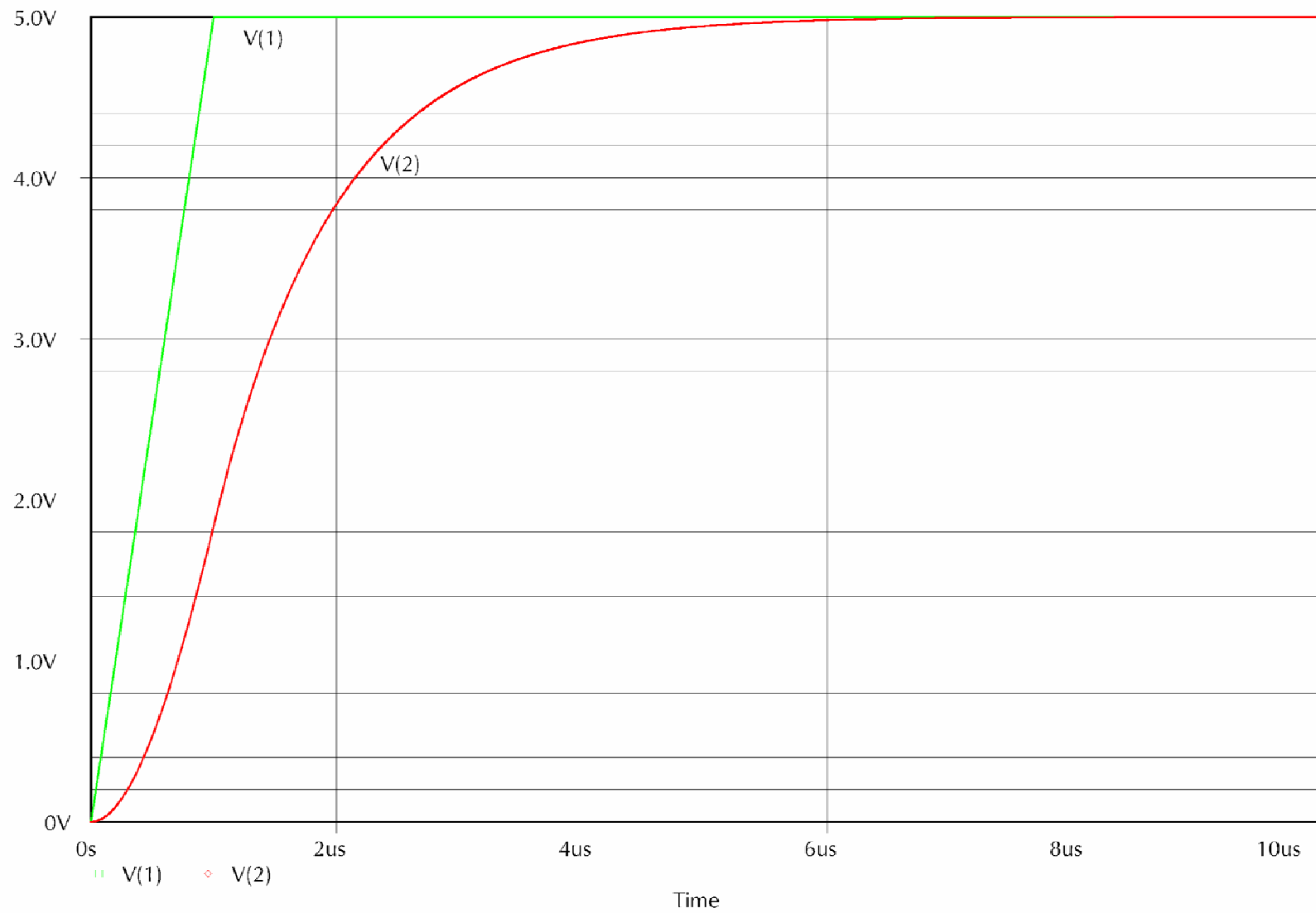


## TEMPI CARATTERISTICI:

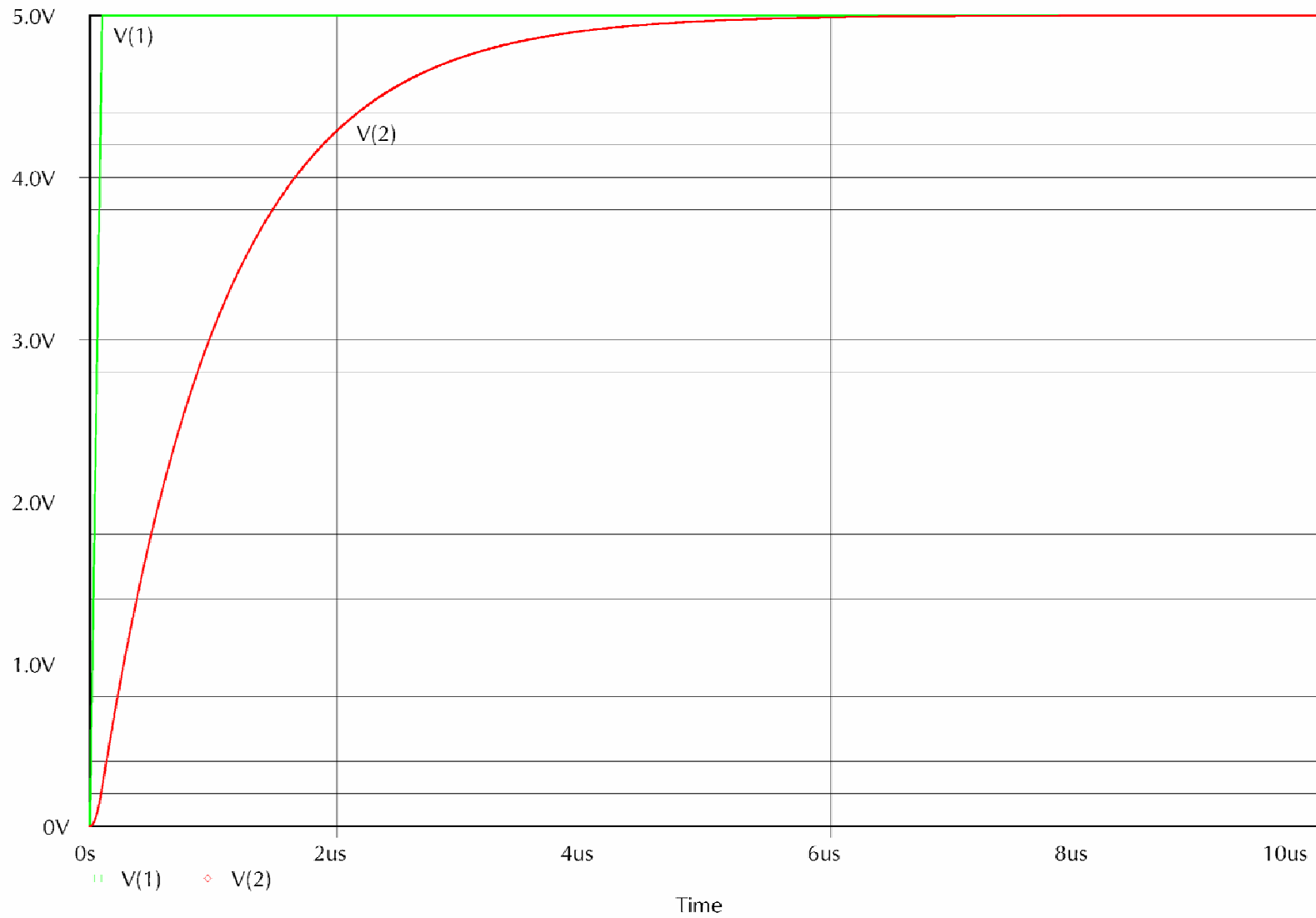
✓ Costanti di tempo:  $\tau_1 = 1/|\lambda_1| = R_1 C = 1\mu s$

```
Esempio 5
R1  1 2 1k
C   2 0 1.0E-9
Vin 1 0 pulse (0 5 0 1n)
.TRAN 1n 10u 0 1n
.PROBE
.end
```

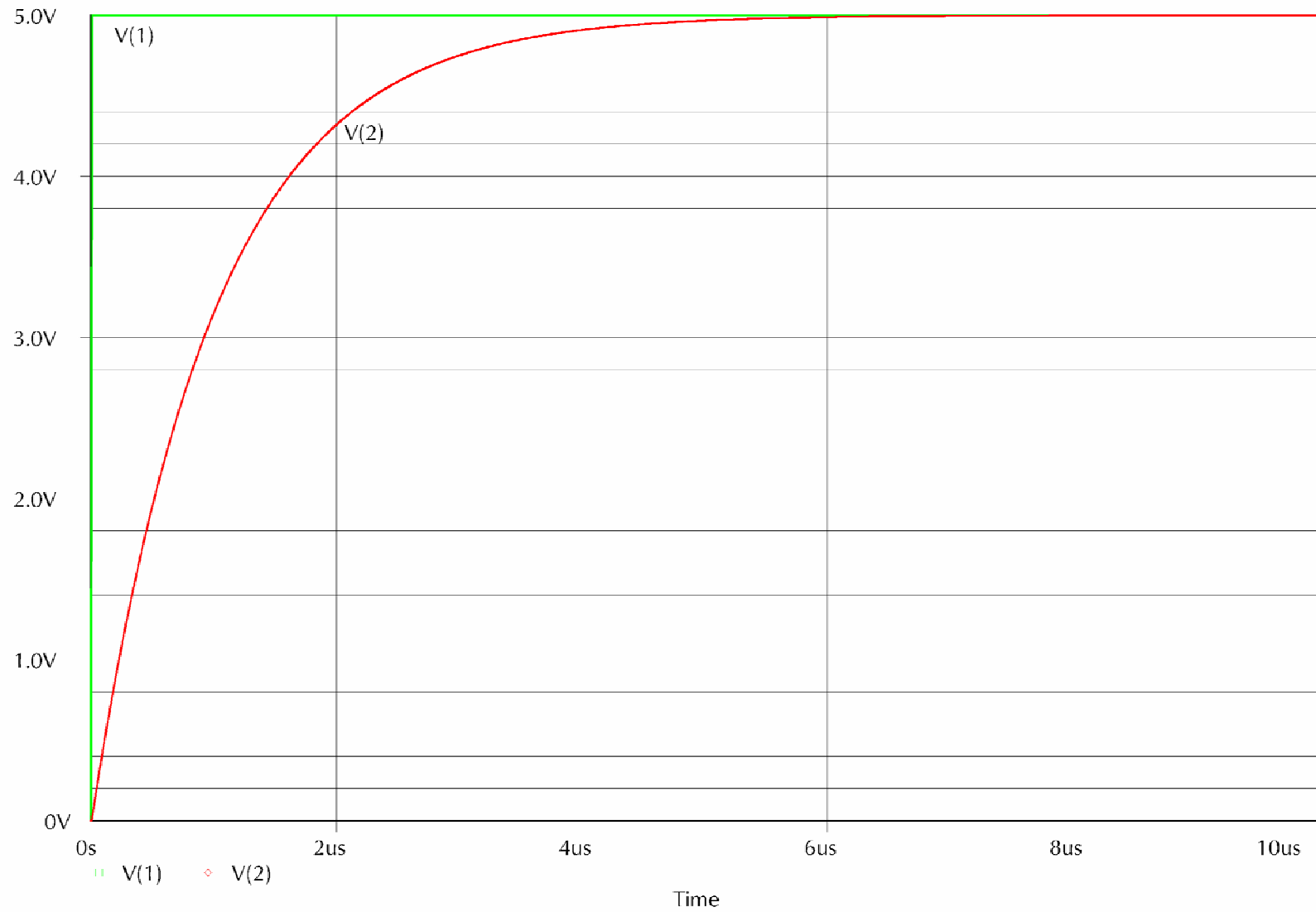
```
Vin 1 0 pulse (0 5 0 1u)
```



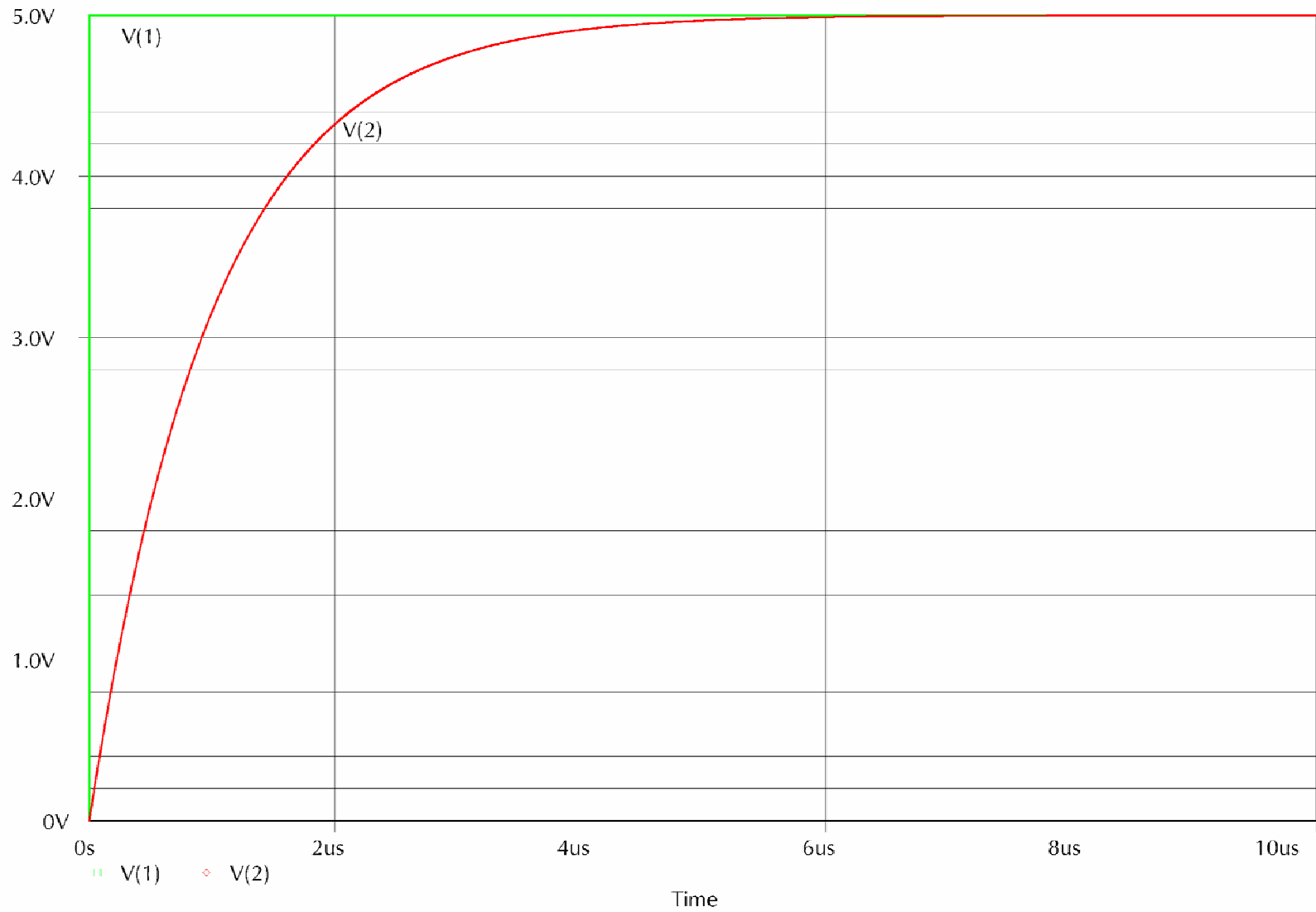
Vin 1 0 pulse (0 5 0 100n)



```
Vin 1 0 pulse (0 5 0 10n)
```



Vin 1 0 pulse (0 5 0 1n)





## INGRESSI DISCONTINUI (segue):

I tempi  $t_{\Delta}$  relativi alla salita o alla discesa degli ingressi, in corrispondenza di discontinuità di prima specie, devono essere impostati in modo tale da essere molto più piccoli dei tempi caratteristici del circuito.

$$t_{\Delta} = \min\{\text{tempi caratteristici}\}/1000$$

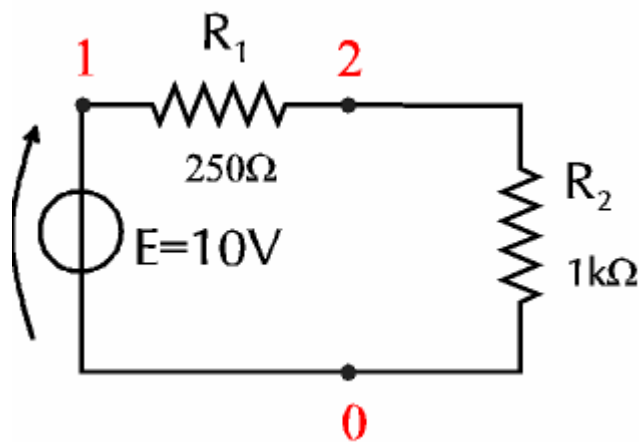
## Dichiarazione di un parametro

**.PARAM <<NOME> = <VALORE>>**

Permette di definire un parametro che può essere utilizzato nella descrizione del circuito per

- o Fare analisi di tipo parametrico

- o Facilitare la scrittura e successiva modifica del file .cir



Esempio 6

```
.PARAM r=1k
R1  2  1  {r/4}
R2  2  0  {r}
VE  1  0  DC  10
.OP
.end
```

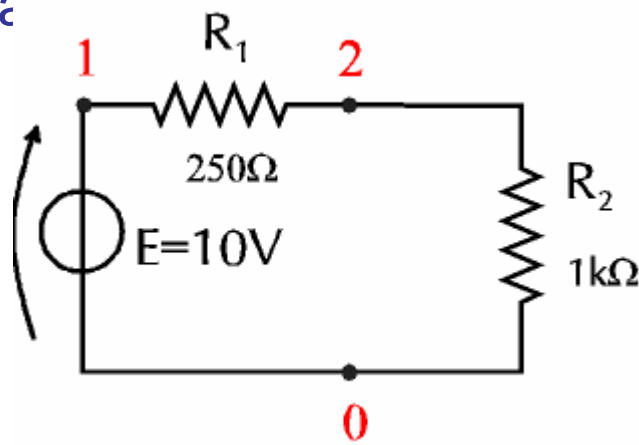
Il parametro dichiarato si richiama tra { } dentro le quali si possono inserire espressioni matematiche

## Analisi parametrica

`.STEP LIN PARAM <nome> <val_in> <val_fin>  
<val_var>`

`.STEP PARAM <nome> LIST <valori>`

Permette di ripetere tutte le analisi dichiarate all'interno del file .cir al variare di parametro definito dal comando .PARAM (il valore assegnato al parametro con tale istruzione viene ignorato)



Esempio 7

```
.PARAM r=1k
R1  2 1 {r/4}
R2  2 0 {r}
VE 1 0 DC 10
.STEP PARAM r LIST 1k 5K
.OP
.end
```



### Esempio 8

```
.PARAM r = 11
```

```
R1 2 1 {r}
```

```
R2 2 0 1k
```

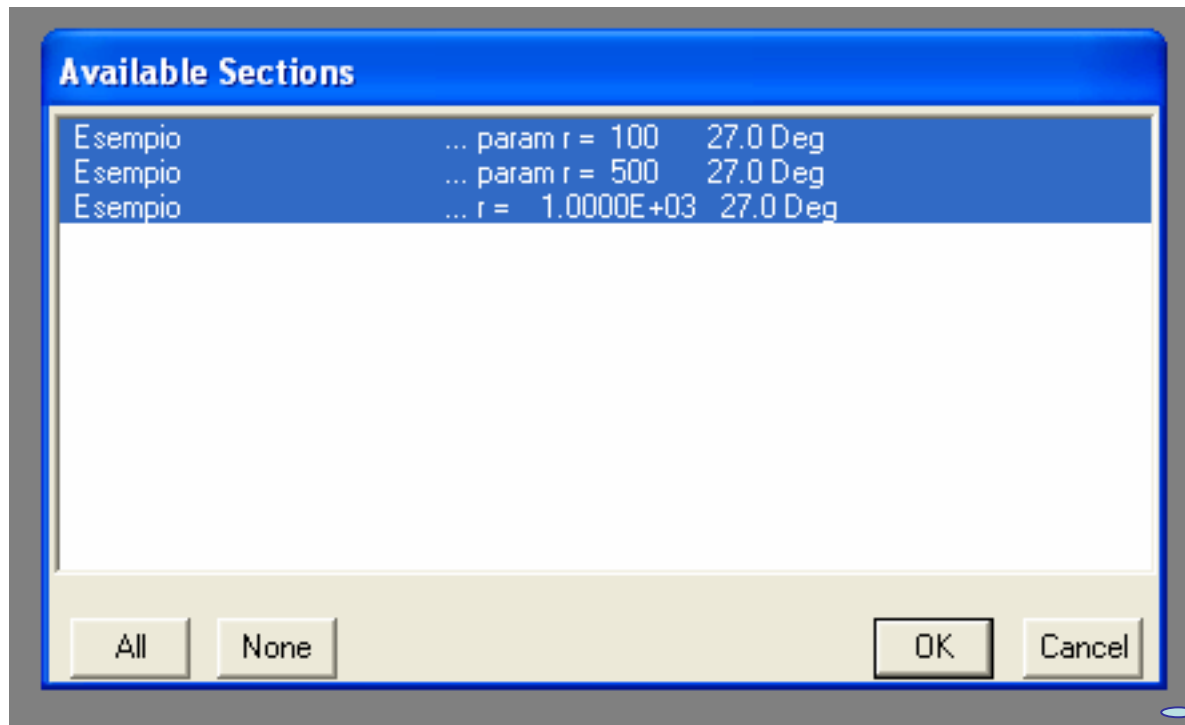
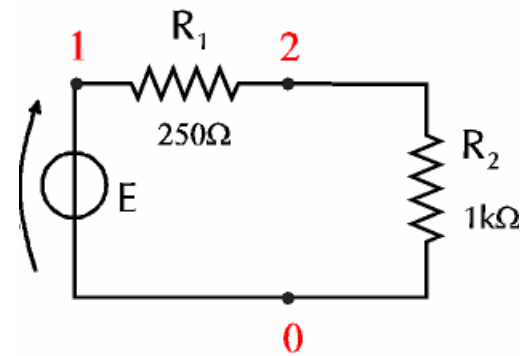
```
VE 1 0 10
```

```
.STEP PARAM r LIST 100 0.5k 1k
```

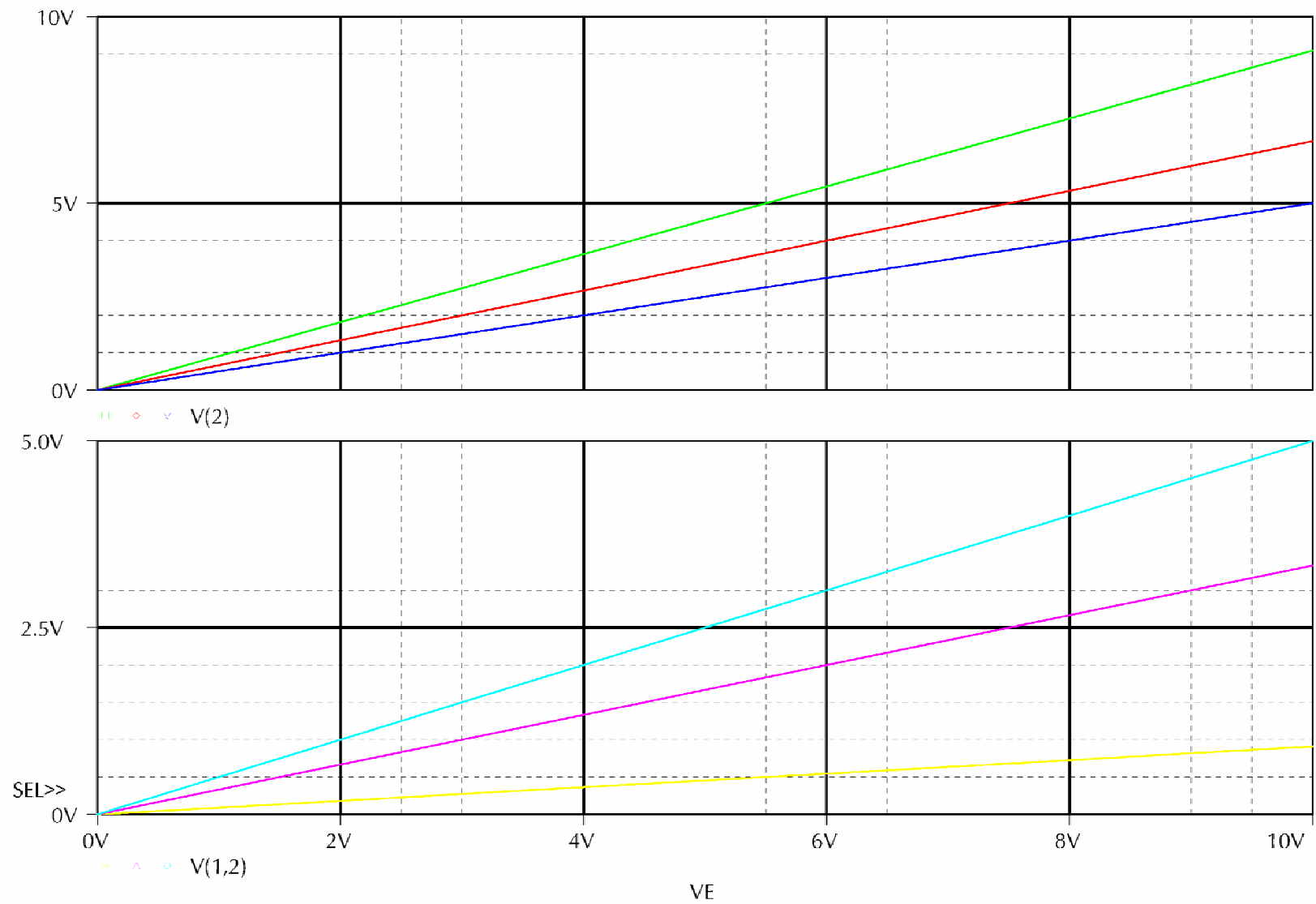
```
.DC VE 0 10 1
```

```
.PROBE
```

```
.end
```



Dalla schermata  
iniziale di PROBE

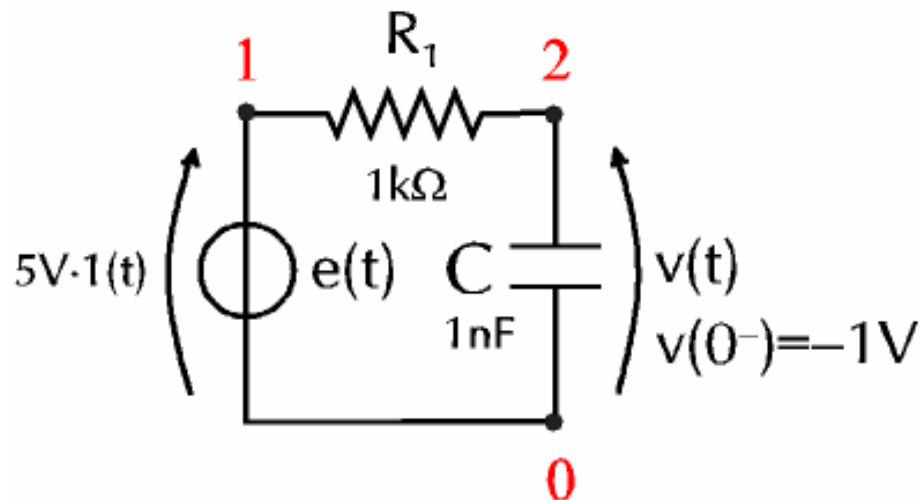


✓ Condensatore carico in  $t = 0$

$C\langle\text{nome}\rangle \langle N+\rangle \langle N-\rangle \langle\text{valore}\rangle IC=\langle\text{valore}\rangle$

✓ Induttore carico in  $t = 0$

$L\langle\text{nome}\rangle \langle N+\rangle \langle N-\rangle \langle\text{valore}\rangle IC=\langle\text{valore}\rangle$



Esempio 8

```
R1 1 2 1k
```

```
C 2 0 1.0E-9 IC=-1
```

```
Vin 1 0 pulse(0 5 0 1n)
```

```
.TRAN 1n 10u 0 1n
```

```
.PROBE
```

```
.end
```

