



Università degli Studi di Napoli Federico II

Lezione LTSPICE

Dr. Carlo Petrarca
Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Università di Napoli FEDERICO II

- § Esistono molti simulatori circuituali.
- § Spice è il più usato, non solo per la qualità e funzionalità, ma anche per la politica adottata per la sua diffusione, che prevede la disponibilità in rete di una versione gratuita utilizzabile per scopi educativi.
- § Spice nasce circa nel 1975 all'Università della California (acronimo di *Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*).
- § Noi utilizzeremo LTSpiceIV della Linear Technology
- § Con LTSpiceIV non esistono limitazioni sul numero di nodi e di elementi che costituiscono un circuito.

Avvertenze !!

1. La soluzione ottenuta con un simulatore è solo un'approssimazione di quella reale. Occorre fare molta attenzione! E' necessario conoscere i limiti del modello che si sta usando.
2. I risultati ottenuti dal calcolatore sono quasi sempre inutilizzabili se non sostenuti da un'adeguata conoscenza dei circuiti simulati.
3. E' possibile in un simulatore introdurre o eliminare effetti senza alcun riguardo per la effettiva realizzabilità del circuito che ne consegue.

Formulazione delle equazioni

Metodo dei POTENZIALI NODALI

- § Il modello circuitale risolto da SPICE è formulato esprimendo le tensioni di ciascun lato come **differenze** dei corrispondenti **potenziali nodali**.
- § In questo modo le LKT sono automaticamente verificate
- § I potenziali di nodo e_0, e_1, \dots, e_{n-1} sono definiti univocamente a meno di una costante additiva arbitraria.
- § **In SPICE, per convenzione, è $e_0=0$**
- § Le equazioni per i potenziali di nodo si ottengono imponendo le LKC a $(n-1)$ nodi utilizzando le l equazioni caratteristiche

La filosofia generale ... (1)

- § Spice è basato su un compilatore in grado di interpretare una sintassi specifica per descrivere i circuiti
- § i passi di utilizzo sono:
 - | *creare un file “sorgente” (con un editor)*
 - | *eseguire la simulazione (per risolvere risolve il sistema di equazioni)*
 - | *manipolare i risultati (visualizzazione, stampa)*

La filosofia generale ... (2)

§ Schematic Capture

pre-processore grafico che consente di disegnare il circuito da analizzare e di definire le istruzioni di controllo. E' possibile posizionare componenti e connetterli; definire i loro valori e attributi; definire le forme d'onda in ingresso; scegliere il tipo di analisi da effettuare, selezionare le grandezze da controllare.

§ Waveform Viewer

post-processore grafico per visualizzare i risultati delle simulazioni

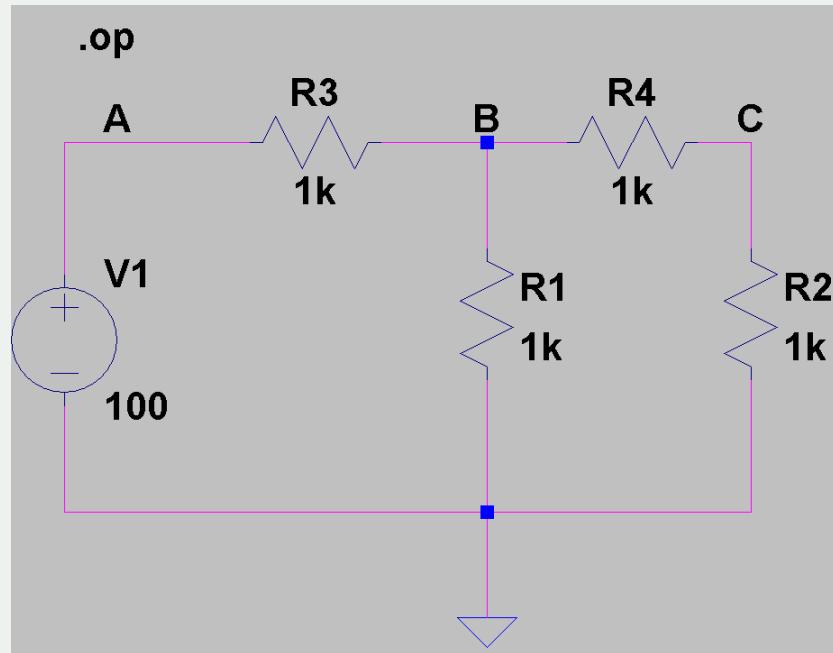
Cosa impareremo

1. Avvio del programma
2. Disegno del circuito
3. Simulazione (DC)
4. Visualizzazione dei risultati
5. Manipolazione dei risultati
6. Analisi DC Sweep
7. Analisi parametrica
8. Simulazione (AC)
9. Analisi in frequenza
10. Simulazione nel dominio del tempo
11. Matlab + LTSpice

Disegnare il circuito con Schematics

Per disegnare il circuito dobbiamo compiere 4 passi:

- 1) Inserire i componenti
- 2) Collegare i componenti
- 3) Assegnare i valori ai componenti
- 4) Salvare il file contenente il circuito



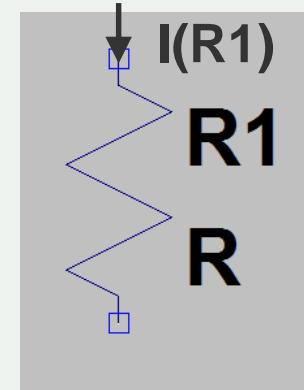
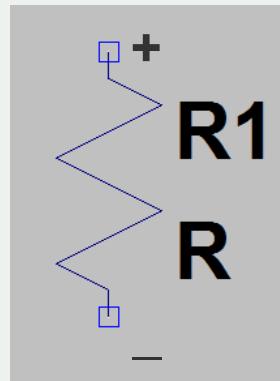
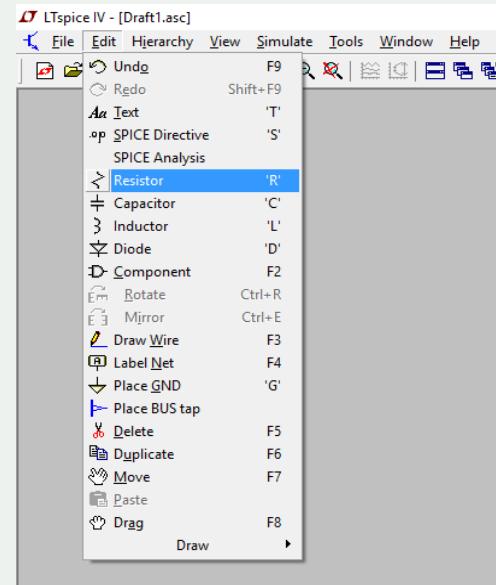
1a) Inserire il resistore:

Edit → Resistor

Ad ogni inserimento il morsetto in alto del bipolo è sempre il morsetto +
(n.b. il morsetto non è contrassegnato)

L'intensità di corrente elettrica nel resistore R1 è indicata da Spice come $I(R1)$
(n.b il verso non è contrassegnato)

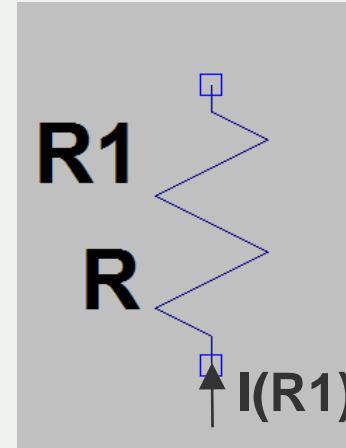
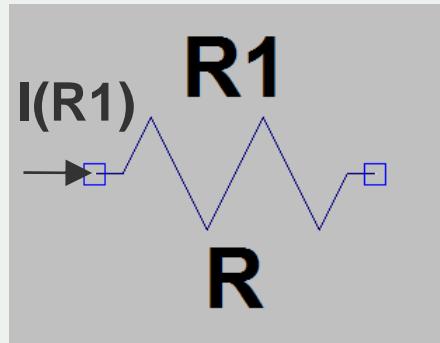
$I(R1)$ è sempre valutata con verso di riferimento entrante nel morsetto +
(convenzione dell'utilizzatore)



- Per ruotare il componente:

- 1) Premere **F7** e selezionare il Resistore
- 2) Premere **<CTRL> <R>**

La rotazione avviene sempre in senso antiorario



- *n.b. Poiché i morsetti e il verso di riferimento per la corrente non sono contrassegnati, è opportuno ricordare se il componente è stato ruotato o no.*
- Per eliminare il componente:

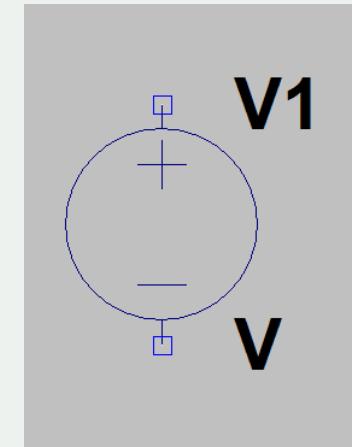
- 1) Premere **F5** e selezionare il Resistore

1b) Inserire il generatore di tensione continua

Edit → Component → Voltage

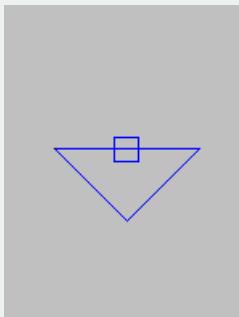
L'intensità di corrente elettrica nel generatore di tensione continua V1 è indicata da Spice come $I(V1)$

$I(V1)$ è l'intensità di corrente valutata con verso di riferimento entrante nel morsetto + (convenzione dell'utilizzatore)



1c) Inserire il nodo a potenziale zero

Edit → Place GND



- Il riferimento a potenziale zero (riferimento di terra) è **indispensabile**. Se non è presente, Spice invia un segnale di errore.

2) Collegare i componenti

a) Edit → Draw Wire (F3)

Posizionare il puntatore del mouse sul primo morsetto, left-clic, portarsi sul secondo morsetto, eseguire nuovamente left-clic

3) Assegnare i valori ai componenti

Fare clic con il tasto destro sul simbolo del resistore

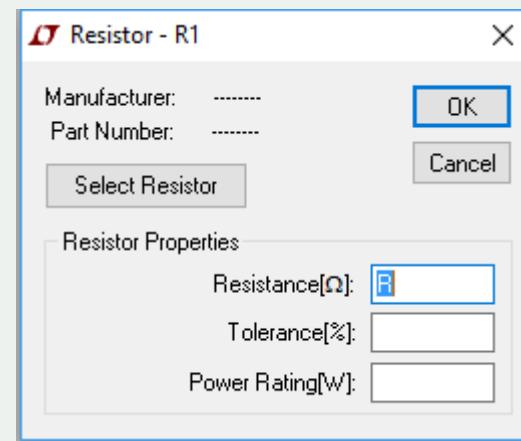
Selezionare “Resistance”

Inserire il nuovo valore

Es.: 10 ohm ('10')

30 kohm ('30k')

5 mohm ('5m')



Attenzione! Non inserire uno spazio tra valore e unità di misura.

La sintassi di Spice ...

<u>simbolo</u>	<u>forma esp.</u>	<u>valore</u>
f (femto)	1e-15	10^{-15}
p (pico)	1e-12	10^{-12}
n (nano)	1e-9	10^{-9}
u (micro)	1e-6	10^{-6}
m (milli)	1e-3	10^{-3}
k (chilo)	1e+3	10^{+3}
meg (mega)	1e+6	10^{+6}
g (giga)	1e+9	10^{+9}
t (tera)	1e+12	10^{+12}

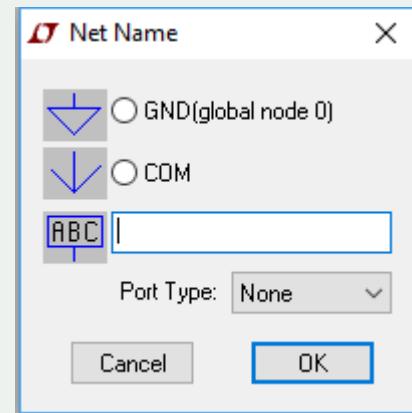
4) Assegnare un'etichetta ai collegamenti

Edit → Label net

Fare clic con il tasto destro sul filo scelto

Scegliere **Label Net**

Inserire l'etichetta in **Net Name**



5) Salvare il circuito

Per avviare una simulazione si deve salvare in un file il circuito.

File → Save AS ...

Si ottiene un file .asc

Simulare il circuito

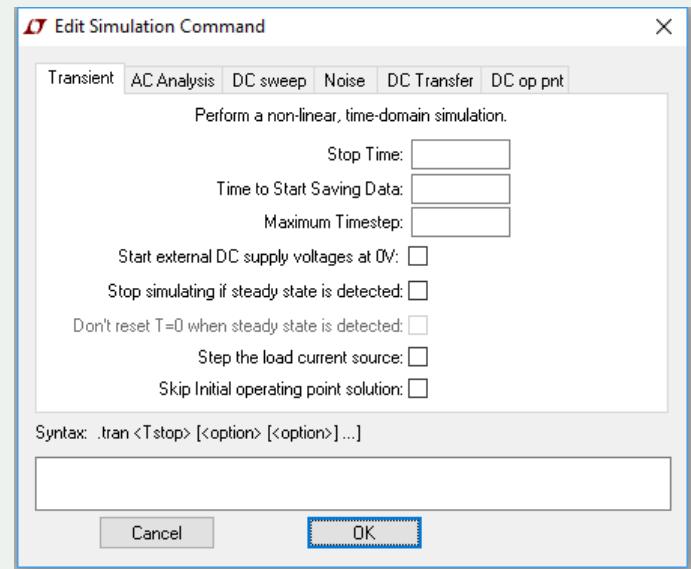
Per simulare il circuito dobbiamo compiere 2 passi:

1) Scegliere il tipo di soluzione

Simulate →

Edit Simulation Cmd → DC opt pnt

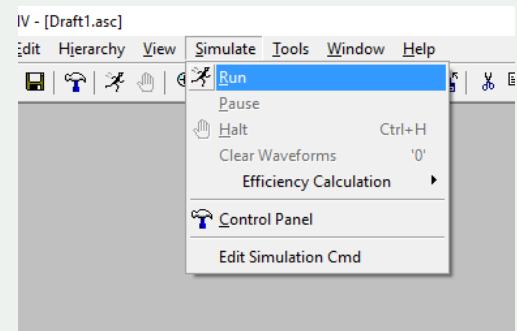
Nello schematic appare il comando .opt



2) Avviare la simulazione

Simulate → Run

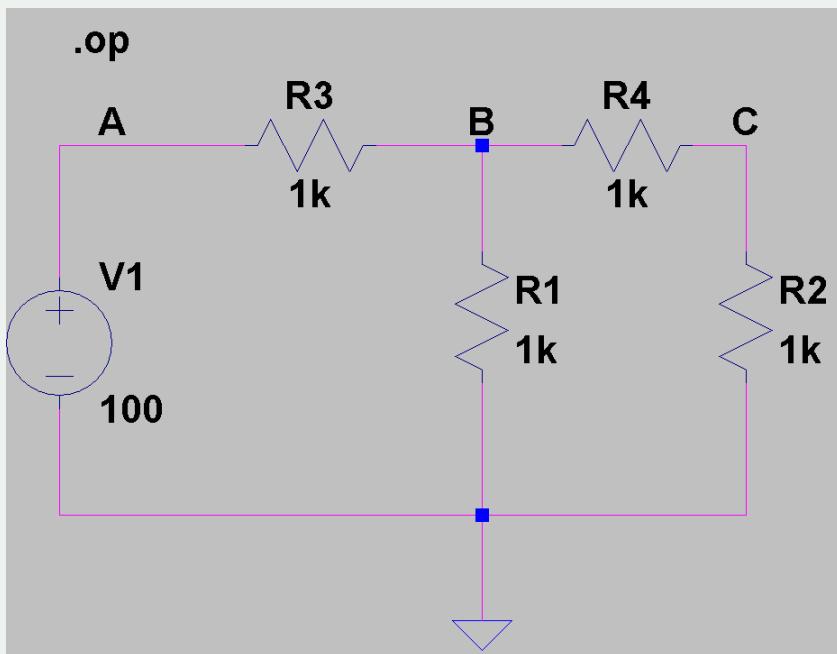
Si generano il file .net il file .raw e il file .log



Visualizzare i risultati

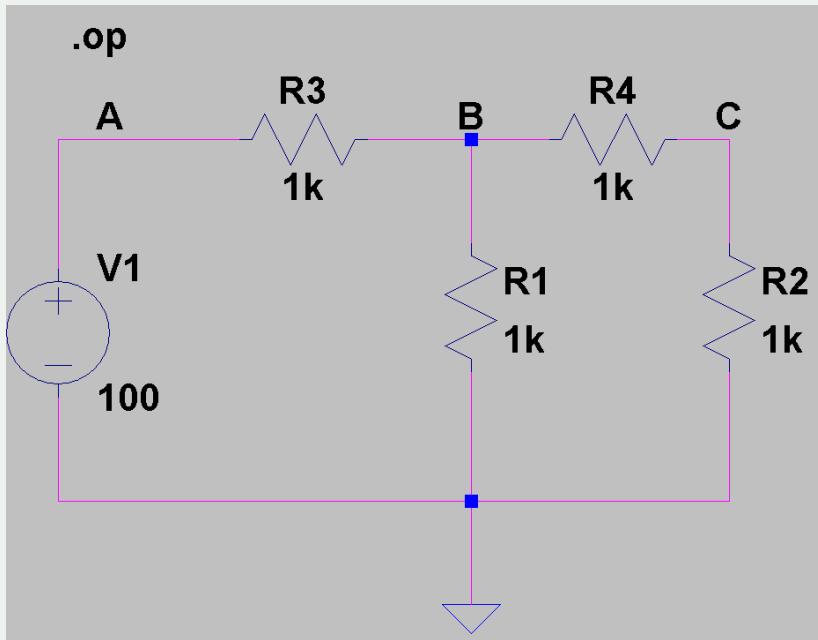
Compare una schermata con i risultati.

Sono mostrati i valori dei potenziali di nodo e i valori delle correnti nei bipoli

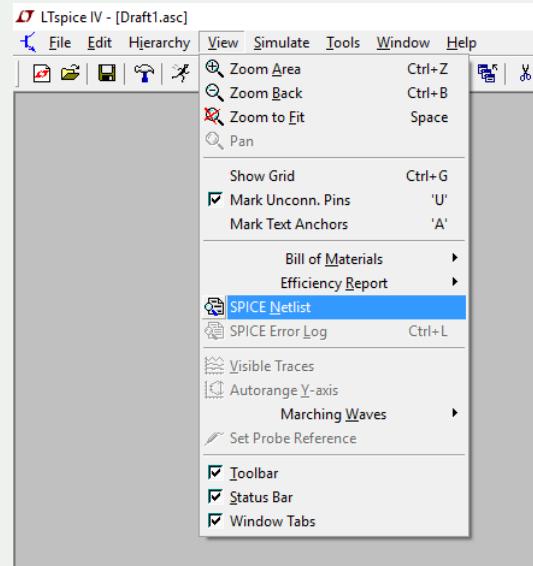


--- Operating Point ---		
V(b) :	40	voltage
V(c) :	20	voltage
V(a) :	100	voltage
I(R4) :	-0.02	device_current
I(R3) :	0.06	device_current
I(R2) :	0.02	device_current
I(R1) :	0.04	device_current
I(V1) :	-0.06	device_current

Esaminiamo il file .net



View – Spice netlist



Esercizio1.net - Blocco note

```
* H:\pidattica\Laboratorio Elettrotecnica\LTspice\Esercizi
R1 B 0 1k
R2 C 0 1k
R3 A B 1k
R4 C B 1k
V1 A 0 100
.op
.backanno
.end
```

La prima riga è sempre un commento

Il resistore R1 è collegato tra il nodo B e il nodo 0. Il valore della resistenza è $1k\Omega$

Operating Point. Punto di lavoro in DC

.backanno Automaticamente inserito. Consente di visualizzare la corrente in un nodo facendo click con il mouse. 17

Messaggi di errore

E' possibile verificare la tipologia di errore commesso.

Se dimentichiamo il riferimento di terra GND:

SPICE Error

The circuit does not have a conduction path to ground!

Se sbagliamo il valore di una resistenza “3 k” invece di “3k”:

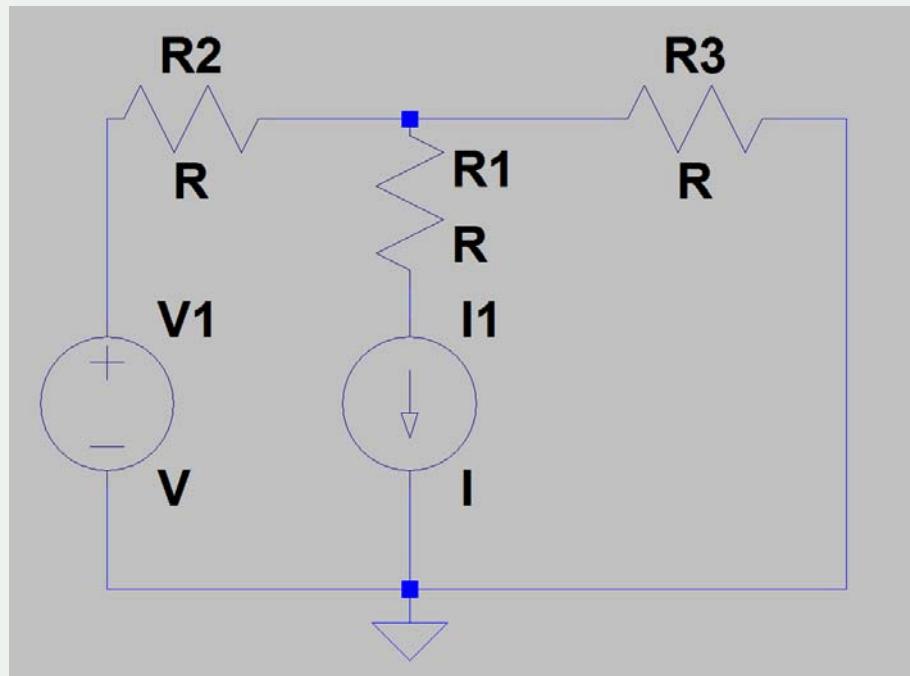
SPICE Error

Error on line 4. Unknown parameter “k”

Esercizio

E' possibile realizzare un circuito e simularlo senza usare lo Schematics, cioè senza disegnarlo. Basta produrre il file .net.

Trovare il punto di lavoro del circuito senza usare lo Schematics



$$R_1 = 10\Omega; R_2 = 5k\Omega; R_3 = 400m\Omega$$

$$V_1 = 800V; I_1 = 7A$$

LT * J:\Lavoro\Didattica\Laboratorio Elettrotecnica\LTSpice\Esercizio2.asc		
--- Operating Point ---		
V(n001):	-2.73578	voltage
V(n003):	-72.7358	voltage
V(n002):	800	voltage
I(I1):	7	device_current
I(R3):	6.83945	device_current
I(R2):	-0.160547	device_current
I(R1):	7	device_current
I(V1):	-0.160547	device_current

Inserimento del generatore di corrente continua

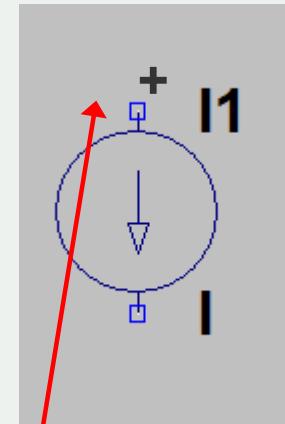
Edit → Component → Current

L'intensità di corrente elettrica nel generatore è indicata da Spice come I1.

Anche sul generatore di corrente è fatta la convenzione dell'utilizzatore. Il morsetto + è il morsetto in alto.

Nella netlist, per descrivere il componente, il primo morsetto è il morsetto in alto, il secondo morsetto è quello in basso

Fare click con il tasto destro del mouse sul componente per inserire il valore di corrente DC



I1 N001 N002 2

Analisi DC SWEEP

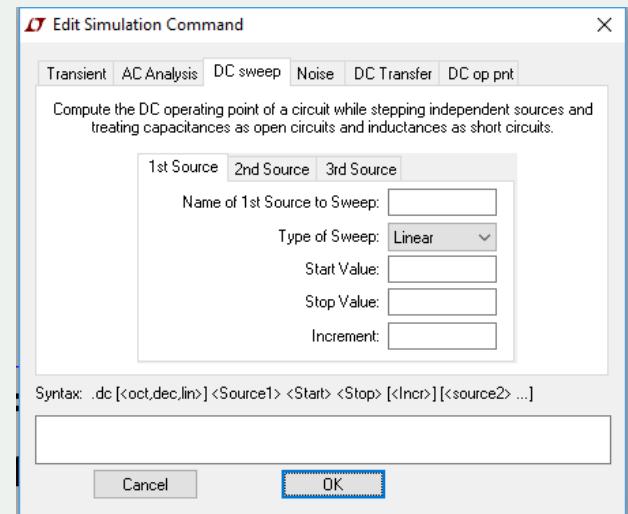
Molto spesso può capitare di dover studiare un circuito facendo variare le tensioni (o le correnti) dei generatori in un intervallo di valori predefinito.

Ciò può accadere, ad esempio, quando si vuole conoscere la caratteristica tensione-corrente (V,I) di un bipolo, oppure quando si vuole effettuare un'analisi di sensibilità.

In questi casi è particolarmente utile l'analisi di tipo DC SWEEP

Simulate → Edit Simulation Cmd → DC Sweep

1. DC SWEEP
2. Inserire il nome del componente “V1”
3. Inserire Type of Sweep : Linear
4. Inserire Start value : -100
5. Inserire End value: +1000
6. Inserire Increment: 300



Nello schematic appare il comando **.dc V1 100 1000 300**

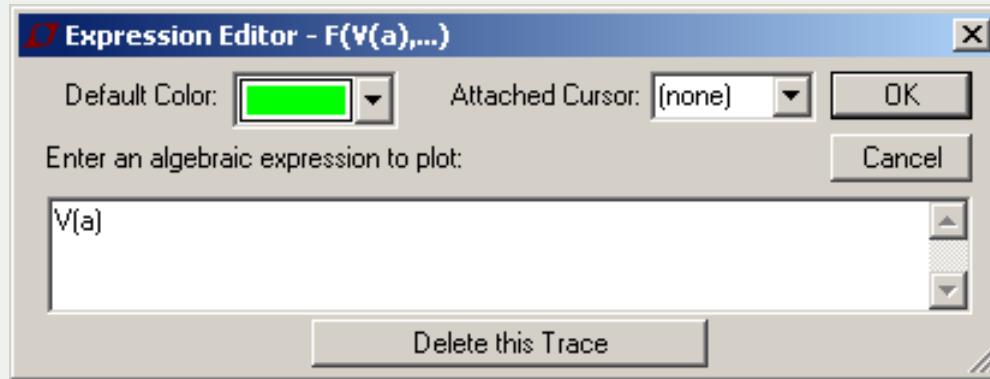
Simulate → Run

Si apre la finestra del Waveform Viewer

Passando con il mouse sul circuito appariranno una sonda di potenziale o una sonda di corrente che permetteranno di vedere il grafico della grandezza selezionata



Passando con il mouse sul nome della variabile e cliccando con il tasto destro è possibile modificare il colore della traccia

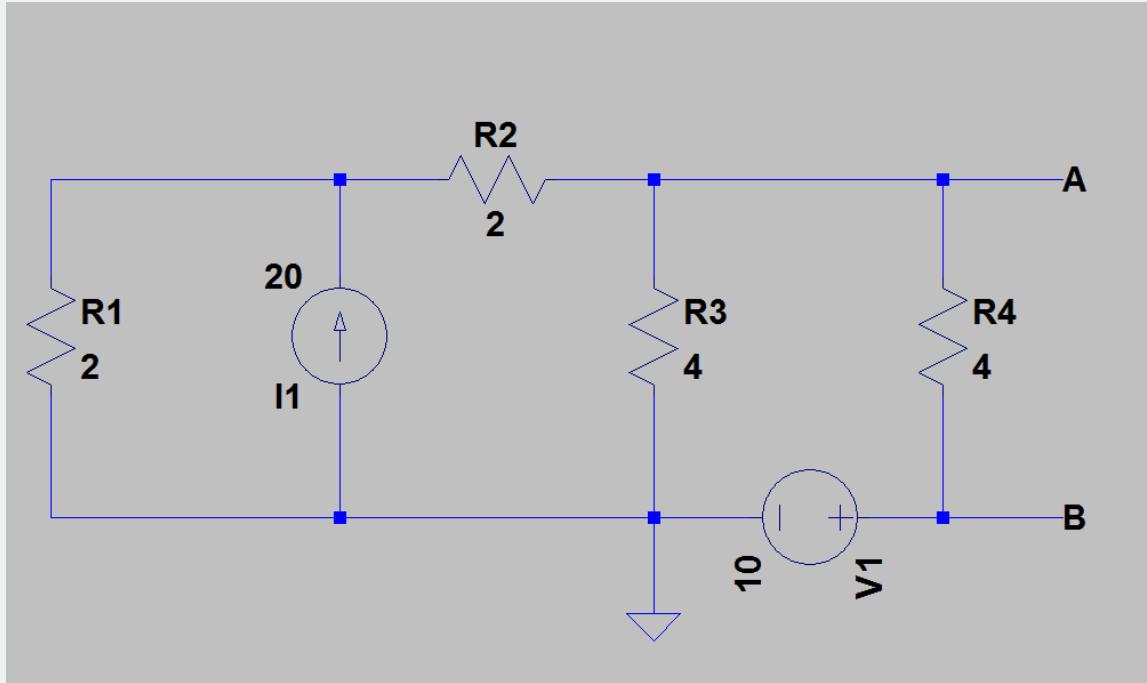


Se si vuole visualizzare una differenza di potenziale:

- 1) fare clic con il tasto sinistro del mouse su un morsetto (+), avendo cura di non rilasciare il tasto del mouse. Appare quindi una sonda di potenziale rossa.
- 2) Portare il mouse sul secondo morsetto (-) Apparirà una sonda di potenziale nera. Rilasciare il mouse
- 3) La tensione V tra il morsetto (+) e il morsetto (-) apparirà sul waveform viewer

Esercizio

Ricavare l'equivalente di Thevenin e Norton del bipolo in figura



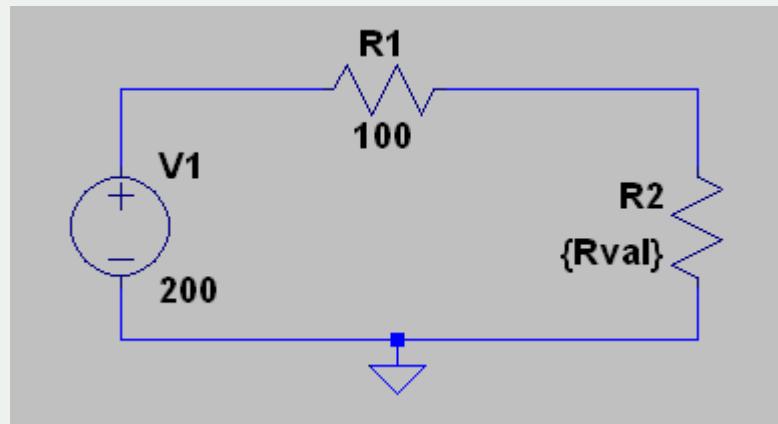
Suggerimento: controllare in tensione o in corrente il bipolo e tracciare la caratteristica.

$$R_{eq} = 1.33\Omega; \quad V_{AB}^0 = 6.66V; \quad I_{cc} = 5A$$

Analisi parametrica

Max trasferimento di potenza

“Un generatore di resistenza interna R_1 fornisce la massima potenza al carico di resistenza R_2 , quando $R_2=R_1$ ”



Al variare della resistenza di carico R_2 , varia l'intensità della corrente nel circuito, varia la potenza erogata dal generatore, così come la potenza assorbita su R_1 e R_2 . Ci proponiamo di studiare il circuito al variare della resistenza di carico R_2

Per creare un resistore R2 con resistenza variabile:

1. Fare doppio clic sul resistore R2. Value: **{Rvar}**

Attenzione a non dimenticare le parentesi graffe!! **{..}**

Codice ASCII per { **ALT+123**

Codice ASCII per } **ALT+125**

Simulate → Edit Simulation Cmd → DC opt pnt

Scrivere il comando:

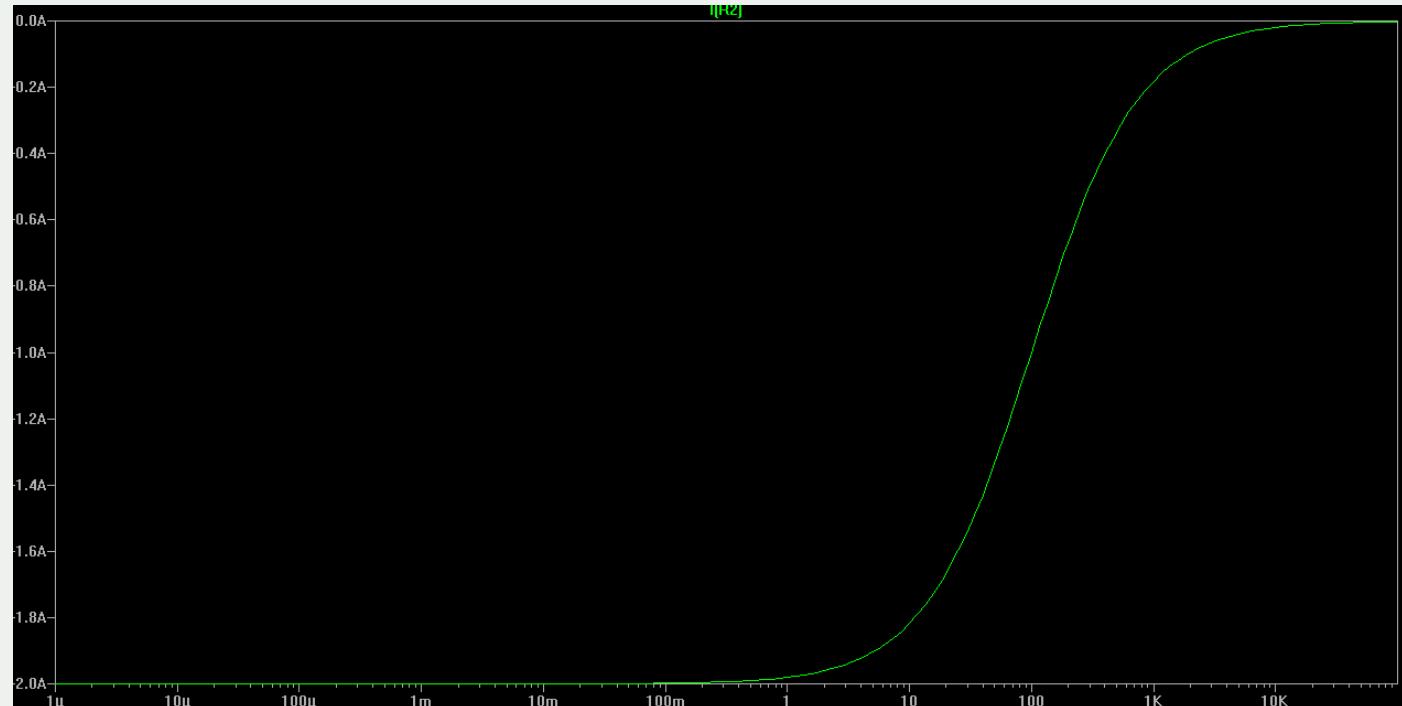
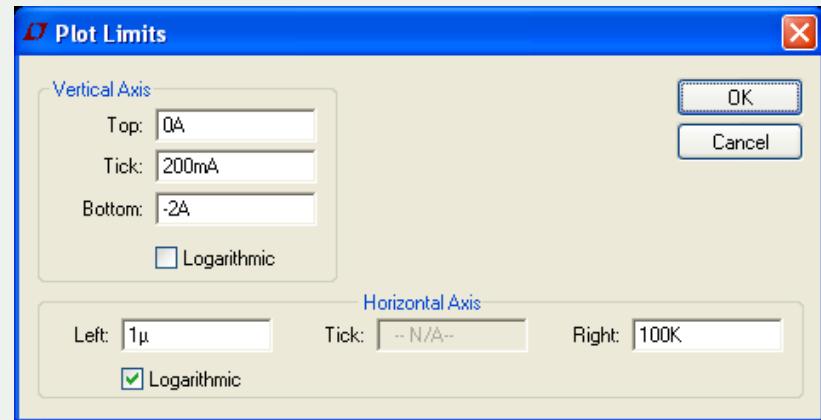
.step dec param Rvar 100n 100k 10

Scansione Logaritmica per Decade con Rvar variabile da 100n a 100k e 10 punti per decade

Passando con il mouse sul circuito, selezionare la sonda di corrente e tracciare la $I(R2)$

Per la scala logaritmica:

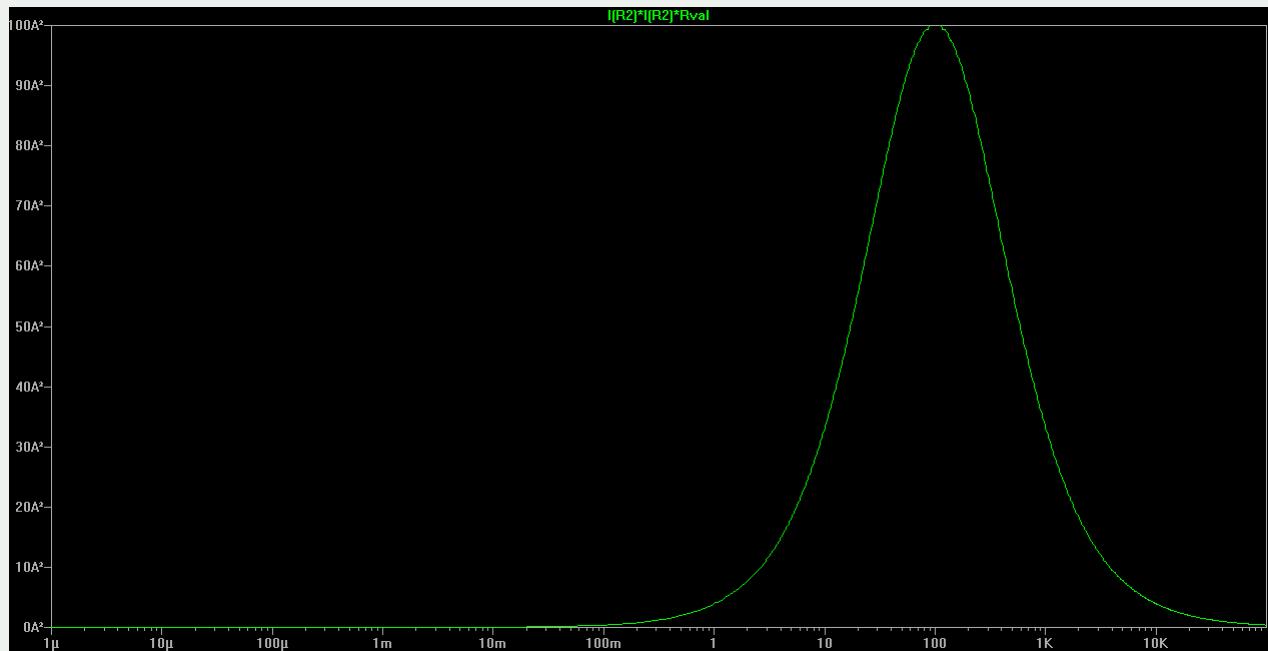
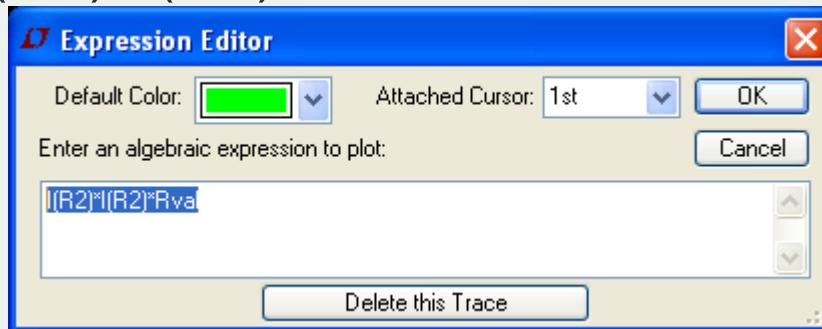
- 1) Selezionare Plot Settings**
- 2) Selezionare Manual limits**
- 3) Horizontal axis: logarithmic**



Manipolazione dei risultati

Per visualizzare la potenza:

- 1) Clic con il tasto destro sul I(R2)
- 2) Scrivere: $I(R2)^2 * Rvar$



E' possibile usare tante funzioni predefinite.

Ad esempio:

pow(x,y)

sin(x)

cos(x)

sqrt(x)

abs(x) ecc. ecc.

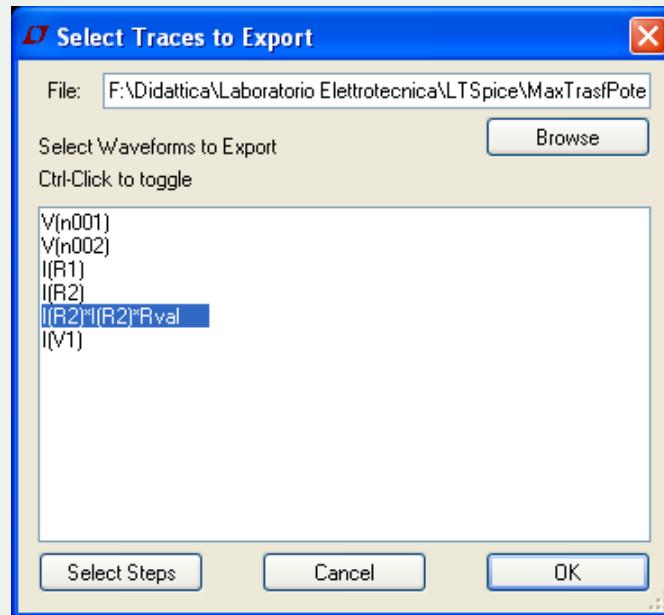
Per ottenere un cursore, passare con il mouse sul nome della variabile, cliccare con il tasto destro e selezionare “Attached cursor”

Muovendosi con il cursore si ottiene il valore massimo della potenza e il valore Rvar corrispondente



LTSpice consente anche di esportare in un file ASCII i dati relativi ad una curva tracciata su grafico.

- 1) Selezionare la curva
- 2) Dal menu FILE selezionare Export
- 3) Selezionare la variabile da esportare e il nome del file
(E' possibile selezionare contemporaneamente più tracce)

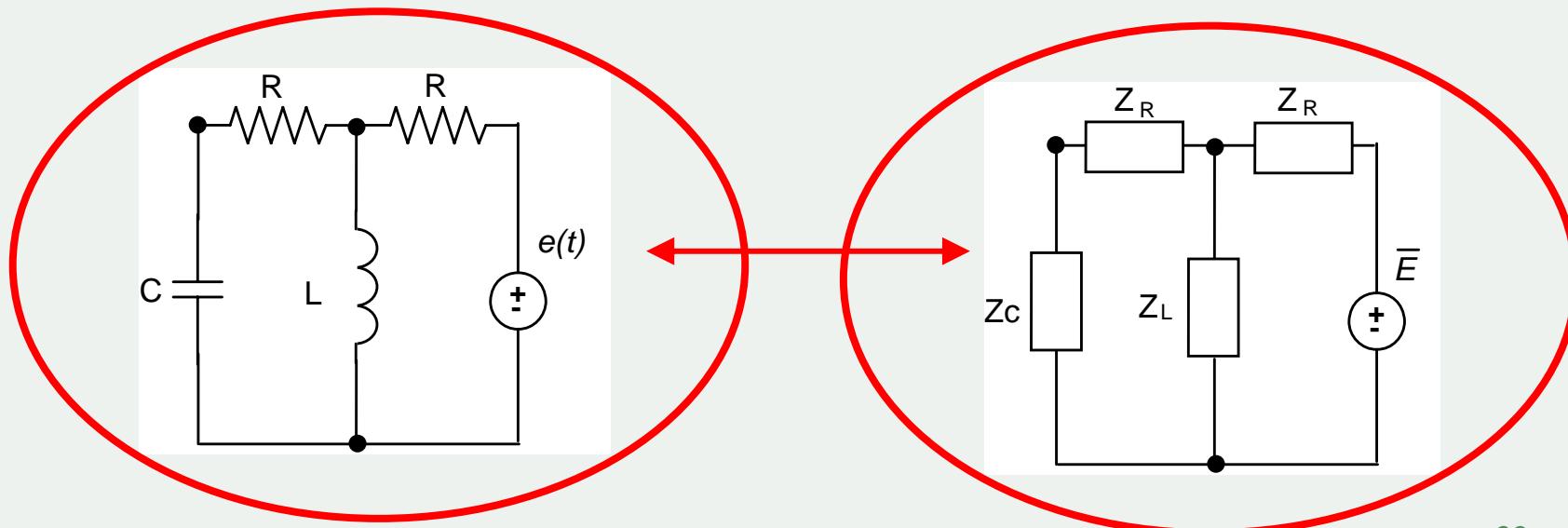


- 4) Il file può essere letto in Matlab con la funzione importdata

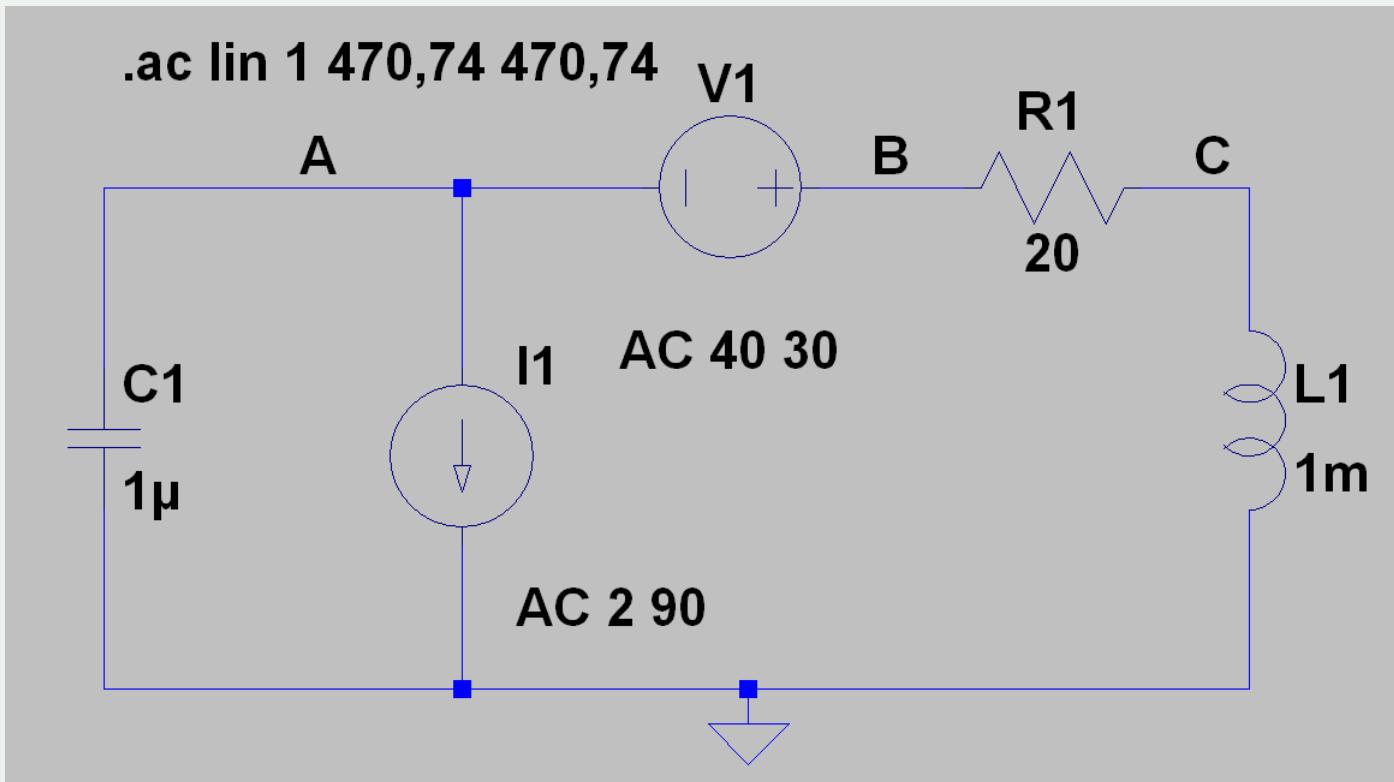
Simulazione AC – Metodo simbolico

LTSpice usa il metodo simbolico per risolvere reti in regime sinusoidale

$$i(t) = I_M \cos(\omega t + \beta) \quad \bar{I} = I_M e^{j\beta}$$
$$v(t) = V_M \cos(\omega t + \alpha) \quad \bar{V} = V_M e^{j\alpha}$$



La rete è a regime sinusoidale. Ricavare la tensione sul condensatore e l'intensità di corrente nell'induttore



$$v_1(t) = 40 \sin\left(3000t + \frac{\pi}{6}\right); \quad j(t) = 2 \cos(3000t);$$

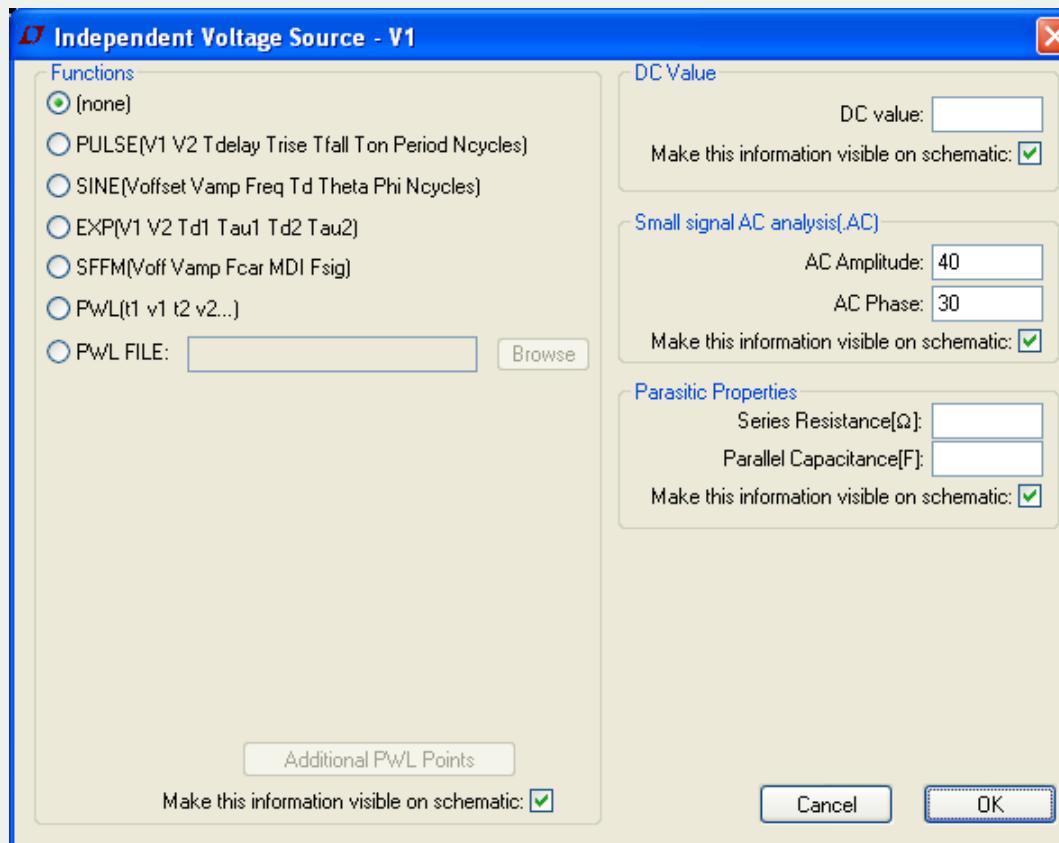
Per impostare ampiezza e fase dei generatori:

1) Click con tasto destro del mouse sul generatore

2) Advanced

3) Small signal AC analysis

4) Inserire modulo (AC Amplitude) e fase (AC Phase)



Per abilitare l'analisi in AC

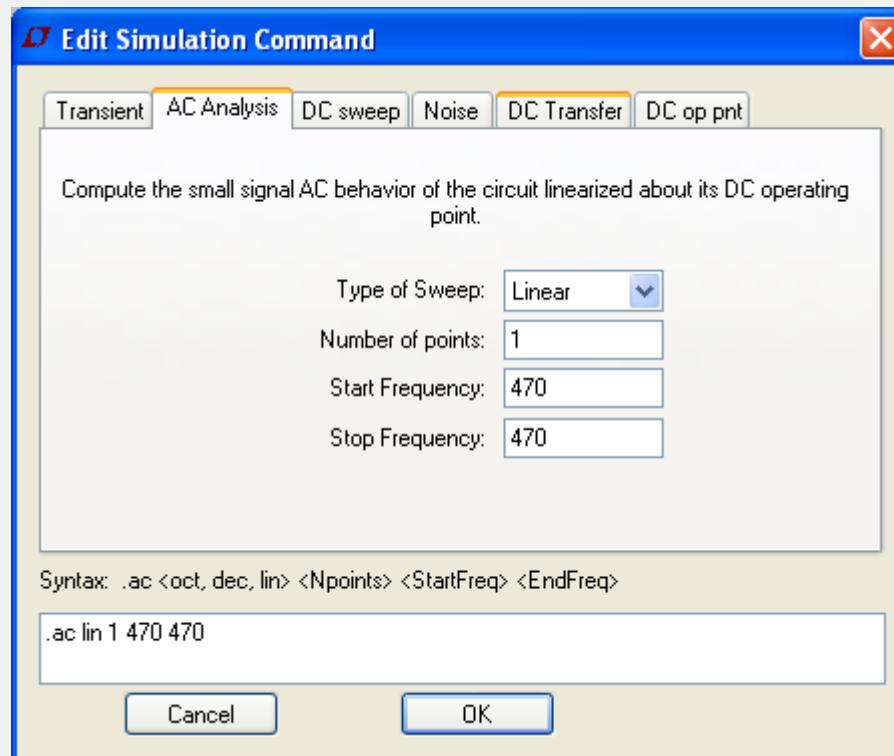
1)Simulate

2)Edit simulation cmd

3)AC analysis

4)Scansione lineare. Numero di punti: 1

5)Frequenza iniziale = Frequenza finale



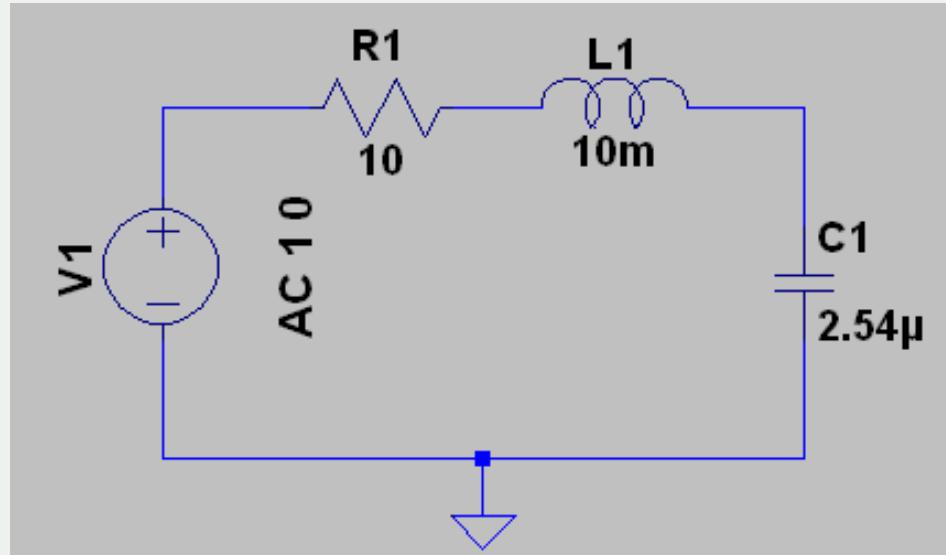
Dopo il run apparirà la schermata con i risultati

Sono presenti (in modulo e fase) i potenziali dei nodi e le intensità di corrente nei bipoli

```
Q * F:\Didattica\Laboratorio Elettrotecnica\LTSpice\CircuitoAC.asc
--- AC Analysis ---
frequency:      74          Hz
V(c) :          mag:  0.922594 phase: -0.924716°      voltage
V(b) :          mag:  39.6979 phase: -89.4698°      voltage
V(a) :          mag:  68.8354 phase: -119.862°      voltage
I(C1) :         mag:  0.0320054 phase: -29.8616°     device_current
I(L1) :         mag:  1.98426 phase: -90.8015°     device_current
I(I1) :         mag:      2 phase:    90°      device_current
I(R1) :         mag:  1.98426 phase:  89.1985°     device_current
I(V1) :         mag:  1.98426 phase:  89.1985°     device_current
```

Analisi in frequenza

Determinare la risposta in frequenza ricavando la curva di risonanza

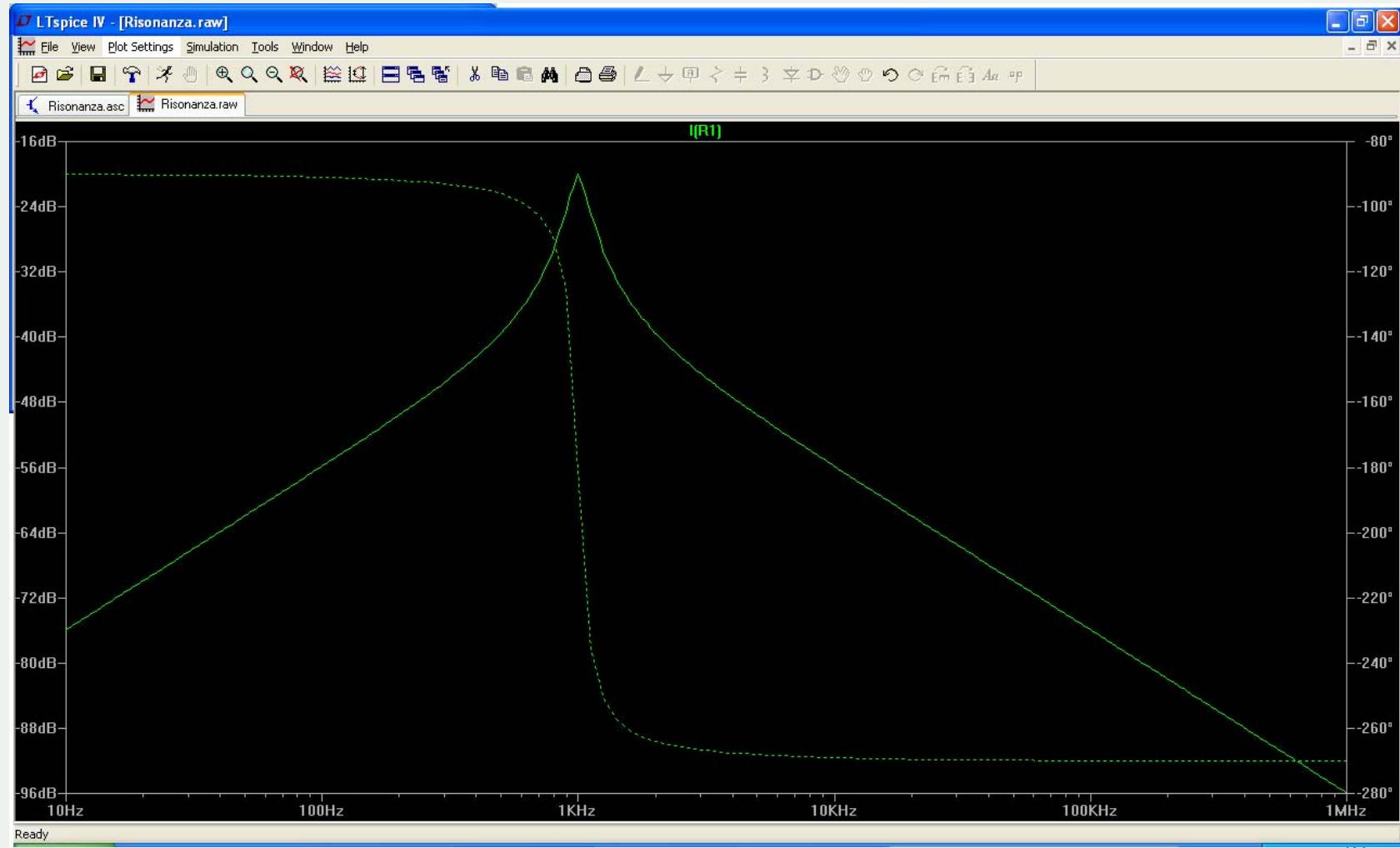


In Edit simulation cmd e AC analysis:

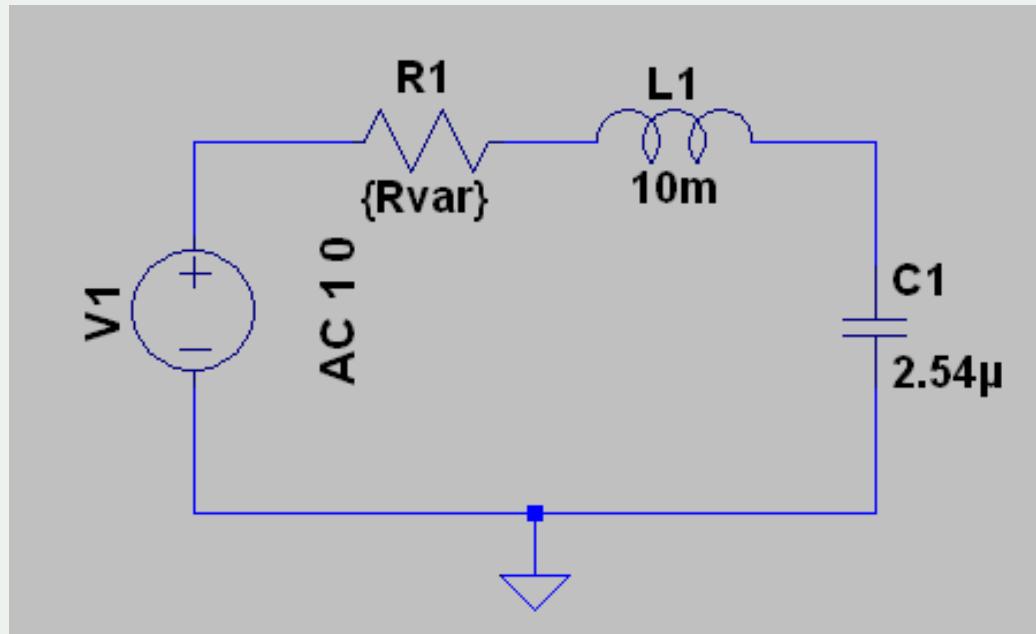
- 1) Scansione per decadi. Numero di punti: 20 (per decade)**
- 2) Frequenza iniziale = 10**
- 3) Frequenza finale = 1Meg**

.ac dec 20 10 1Meg

Quando si sceglie di visualizzare una variabile, automaticamente vengono mostrati modulo e fase.



Cosa accade quando, oltre all'analisi in frequenza, facciamo un'analisi parametrica al variare della resistenza R?



.step param Rvar list 10 20 40 80

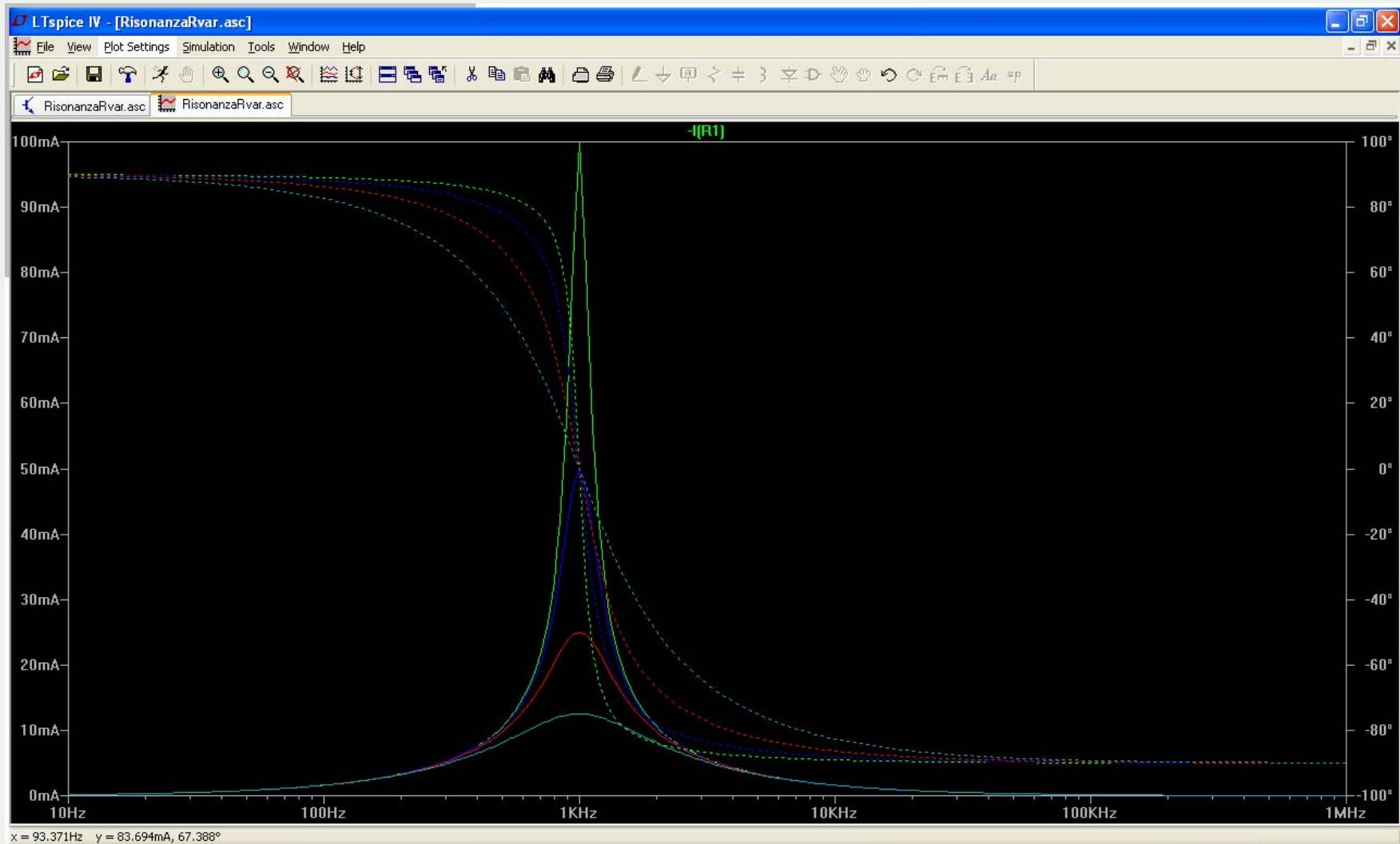
Analisi parametrica con 4 valori di Rvar:

10, 20, 40, 80 ohm

.ac dec 40 10 1Meg

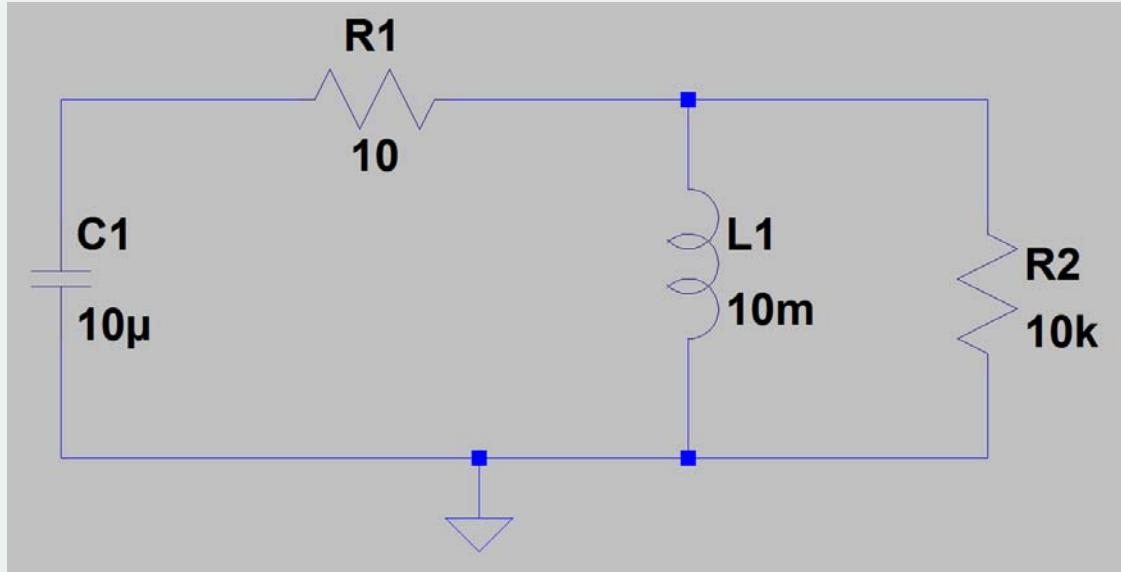
Analisi in frequenza. Scansione logaritmica da 10 Hz a 1 MHz, 40 punti per decade

Mostriamo sul grafico la corrente – I(R1)



Analisi nel dominio del tempo

Analisi in transitorio



In Simulation - Edit simulation cmd e Transient:

1) Stop Time: 20m

.tran 20m

In Edit – Spice directive si impostano le condizioni iniziali

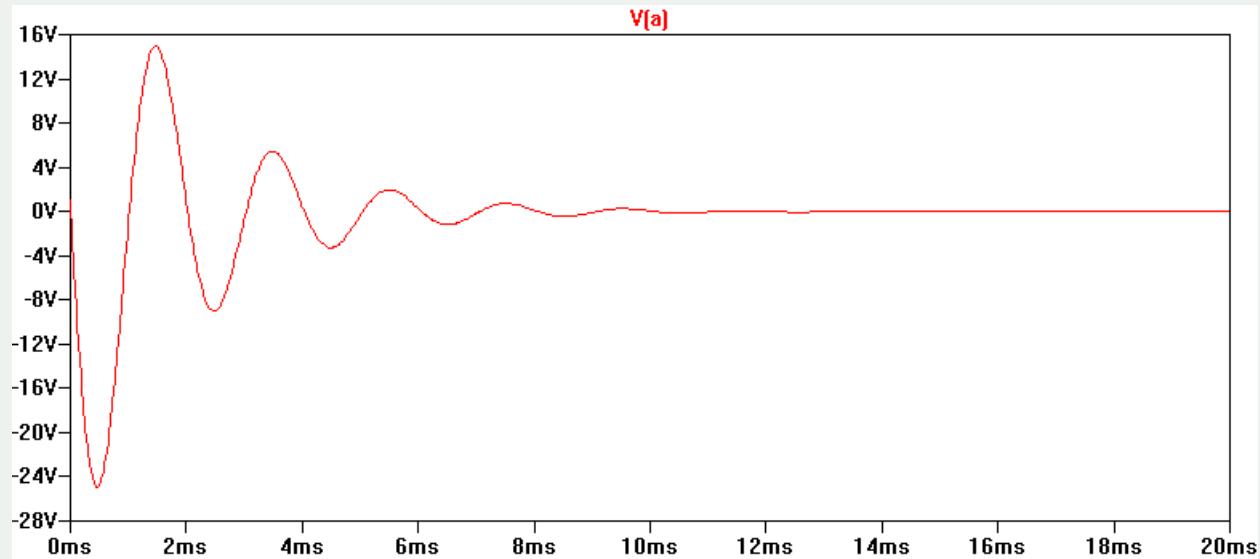
1).ic V(a)=1V

.ic V(a)=1V

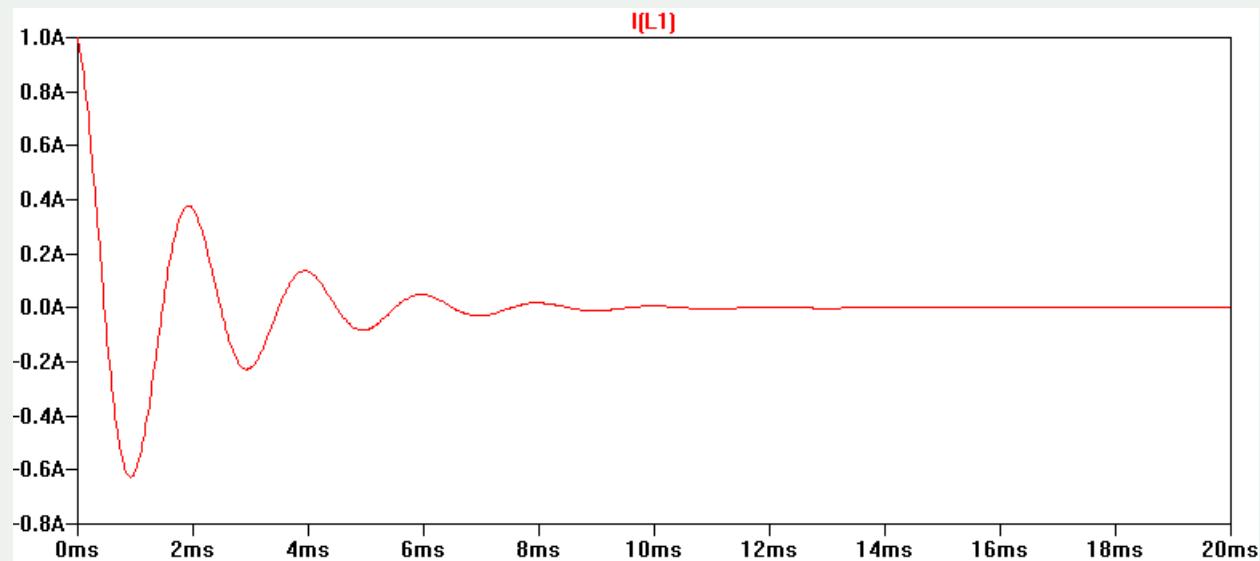
2).ic I(L1)=1A

.ic I(L1)=1A

$V(a)$

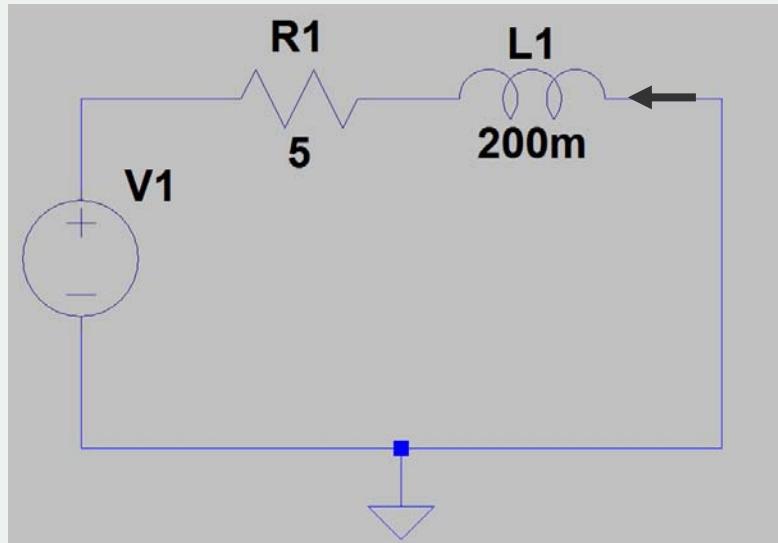


$I(L1)$



Analisi nel dominio del tempo

Analisi in transitorio con generatori sinusoidali



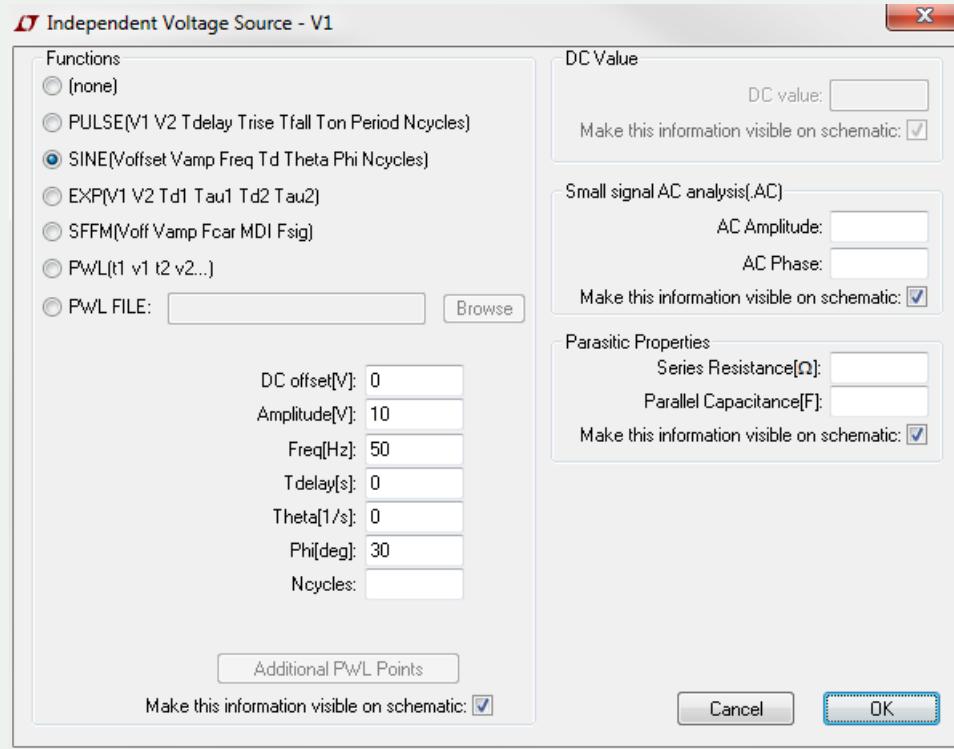
Imponiamo i seguenti valori:

$$e(t) = 10 \sin\left(2\pi 50 \cdot t + \frac{\pi}{6}\right) V$$

$$i_{L1}(0) = 1 A$$

Il generatore di tensione sinusoidale ha la seguente forma

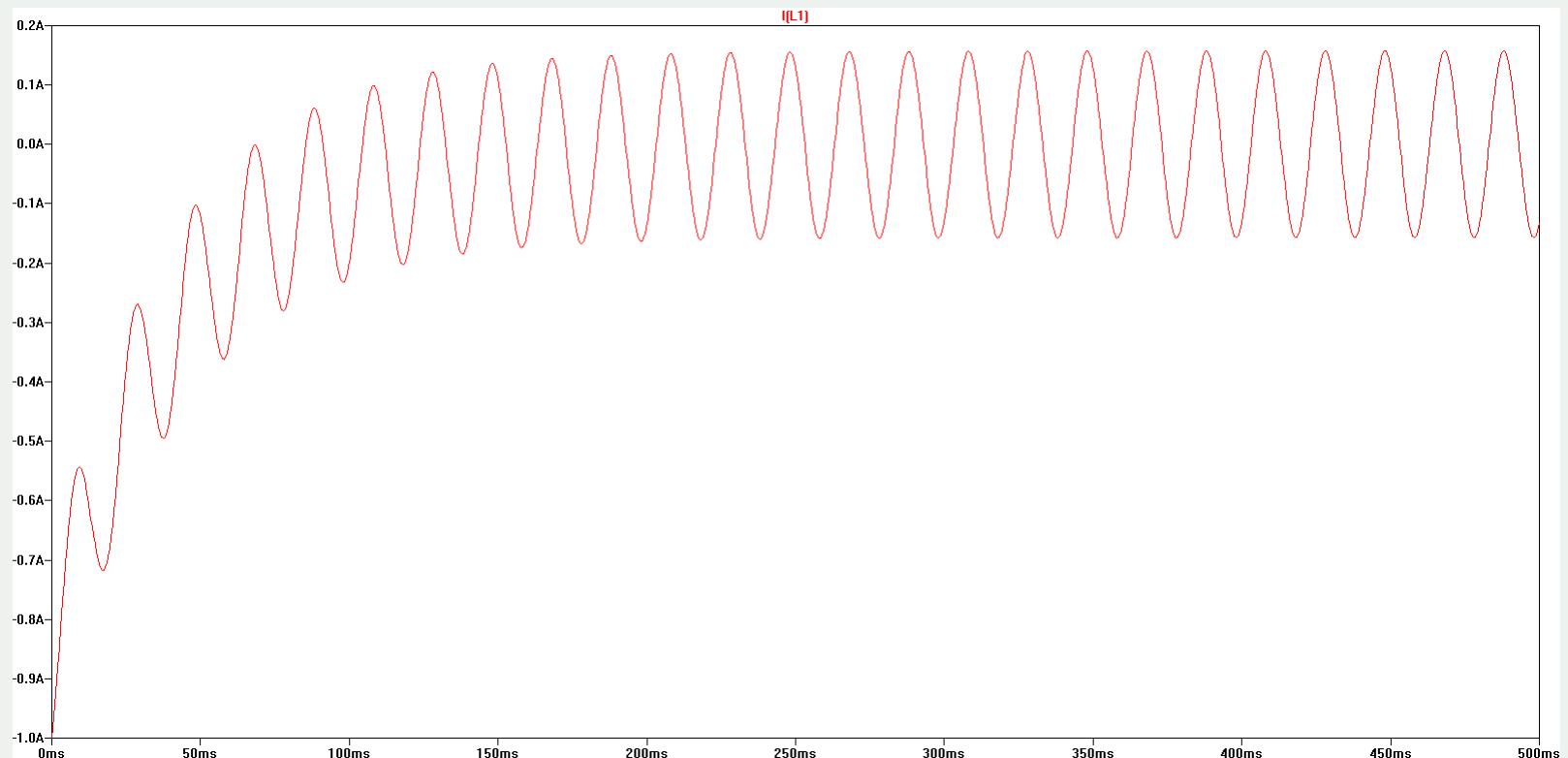
$$v(t) = V_{off} + V_{amp} \cdot e^{[-(t-T_d) \cdot \text{Theta}]} \cdot \sin\left(2\pi Freq \cdot (t - T_d) + \frac{\pi}{180} \text{Phi}\right) V$$



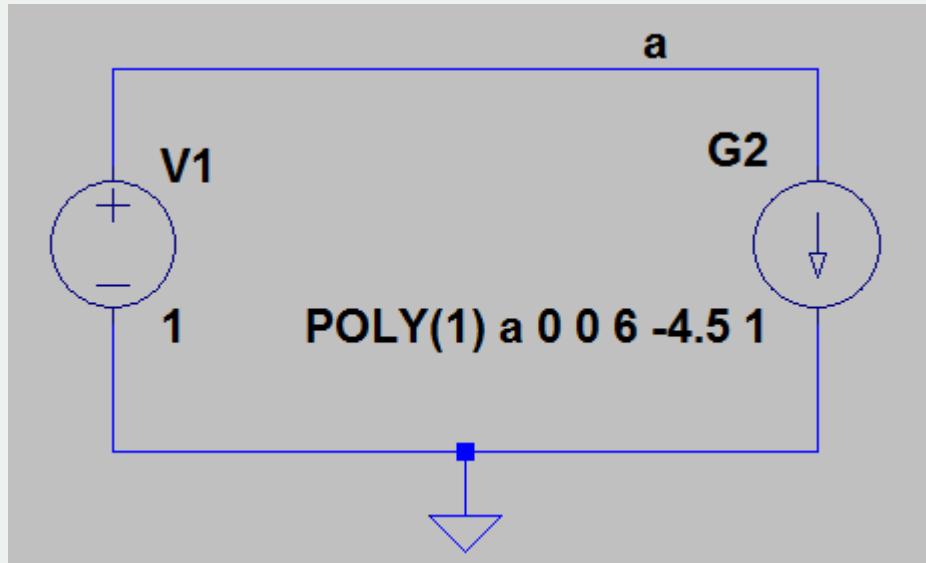
Attenzione! Il valore impostato per .ic è -1 A. Perche?

.tran 500m
SINE(0 10 50 0 0 30)
.ic I(L1)=-1A

I(L1)



Bipoli non lineari



Un bipolo non lineare può essere modellato con Gpoly, un generatore di corrente polinomiale controllato in tensione

Edit – Component – Misc - Gpoly

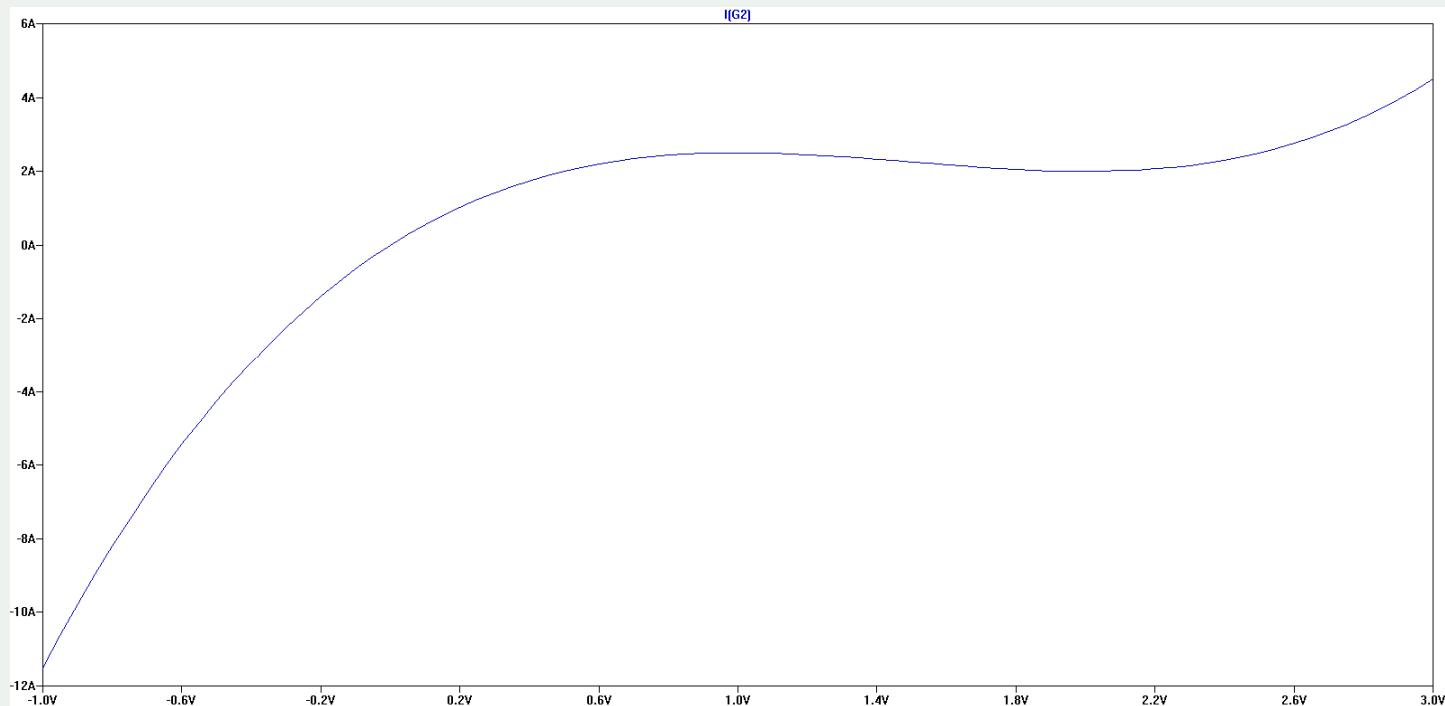
$$POLY(1) n_1 n_2 a_0 a_1 a_2 a_3 a_4$$

Generatore di corrente $y(x)$ controllato dalla tensione x tra i nodi $n1$ e $n2$

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$$

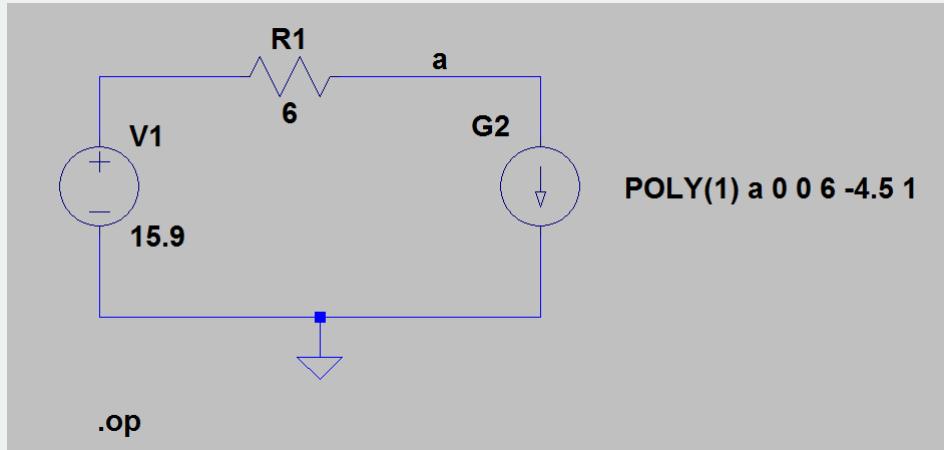
La caratteristica del bipolo non lineare si traccia utilizzando una DCSweep

```
.dc V1 -1 3 .05
```



Bipoli non lineari

Ricavare graficamente il punto di lavoro del circuito illustrato

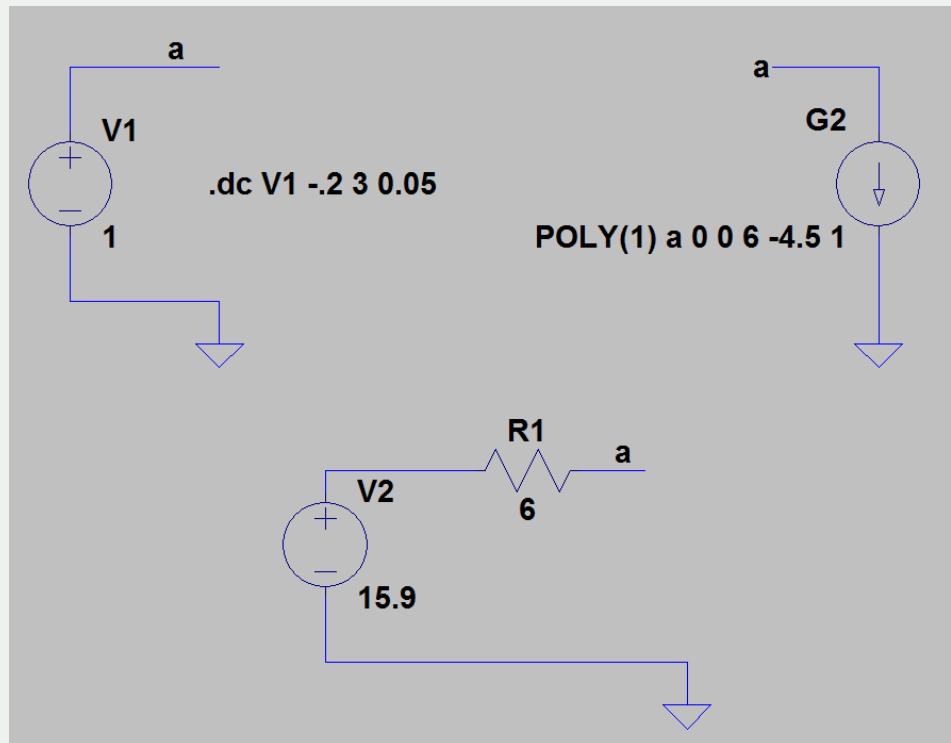


Per ricavare il punto di lavoro è necessario tracciare le caratteristiche dei due bipoli connessi ai morsetti a e 0

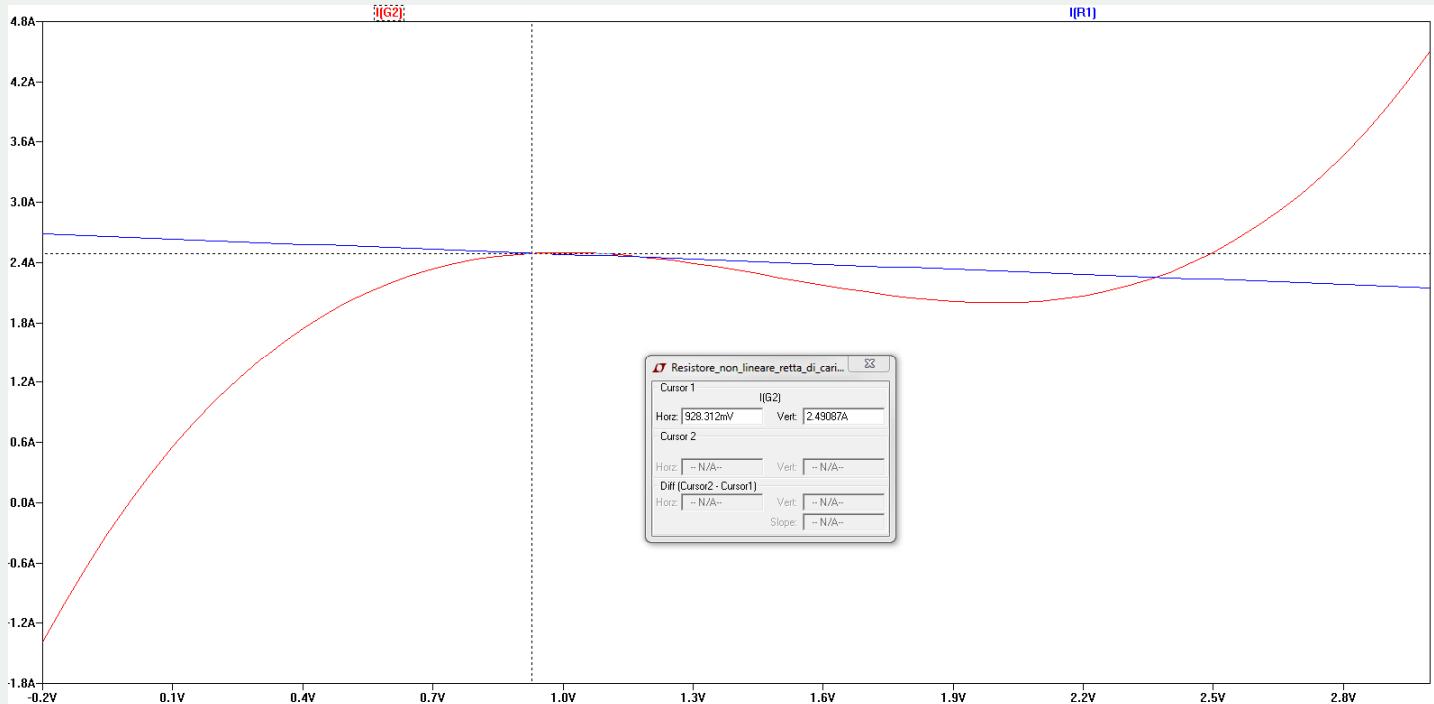
Per avere le caratteristiche è sufficiente alimentare con tensione variabile V1 tra i morsetti a,0 e ricavare le correnti.

Basta allora effettuare un'analisi DCSweep

```
.dc V1 -.2 3 0.05
```



Attenzione alle convenzioni. Per avere il punto di lavoro, se sul bipolo non lineare imponiamo la convenzione dell'utilizzatore, sull'altro bipolo dovremo usare la convenzione del generatore.



Attiviamo il cursore e portiamoci all'intersezione delle due caratteristiche.
Esistono tre possibili punti di lavoro:

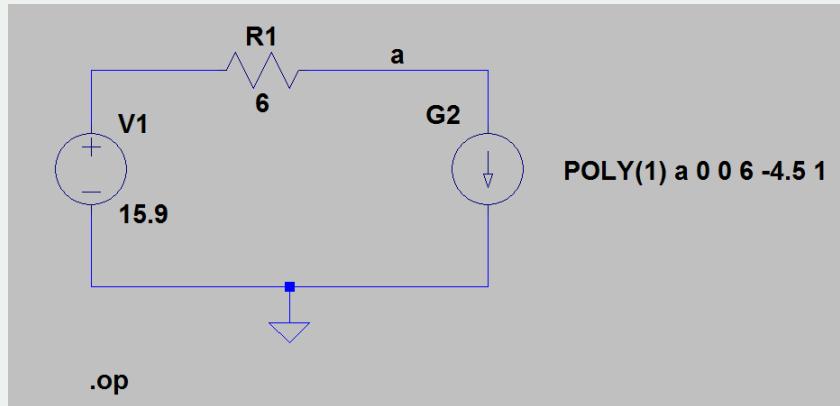
(928mV,2.49A)

(1.18V,2.45A)

(2.36V,2.25A)

Verifichiamo il risultato studiando con Spice il circuito completo.

In questo caso usiamo il comando .op

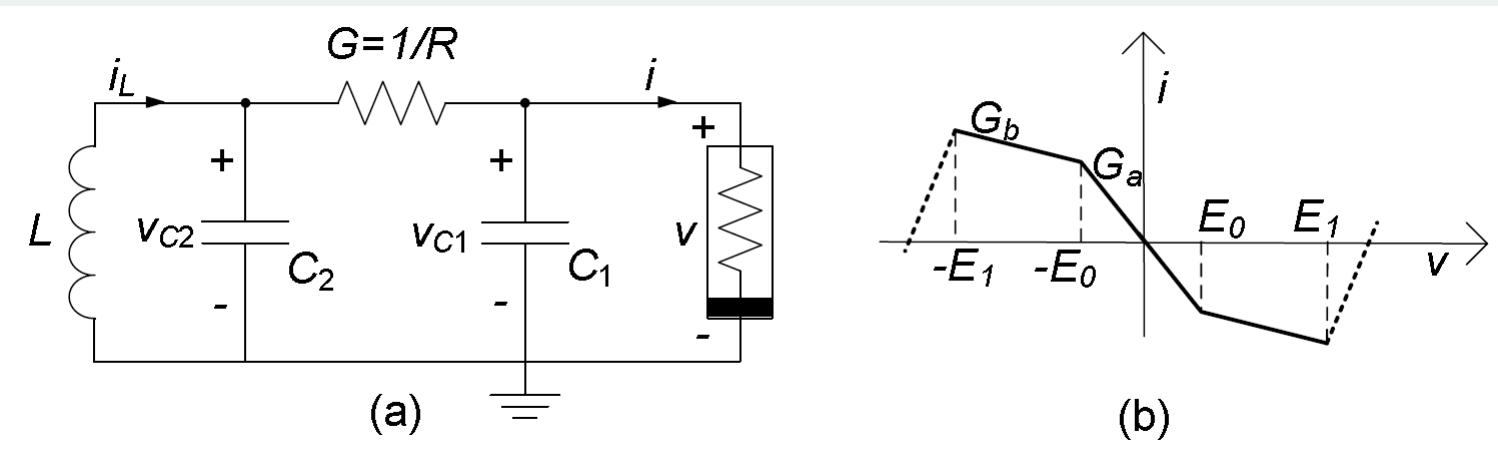


```
LT * L:\Didattica\Laboratorio Elettrotecnica\LTSpice\Circuito_con_resistore_non_lineare.asc
--- Operating Point ---
V(a):      0.9371      voltage
V(n001):   15.9        voltage
I(G2):     2.49382    device_current
I(R1):    -2.49382    device_current
I(V1):    -2.49382    device_current
```

Si osserva che Spice è in grado di determinare un solo punto di lavoro.

(937mV,2.49A)

Circuito di Chua



$$R = 1880 \Omega; C_1 = 10.1 \text{ nF}; C_2 = 103 \text{ nF}; L_1 = 18.36 \text{ mH}$$

$$E_0 = 1.0 \text{ V}; E_1 = 5.7 \text{ V}; E_2 = 7.0 \text{ V}; I_0 = 0.65 \text{ mA}; I_1 = 2.5 \text{ mA};$$

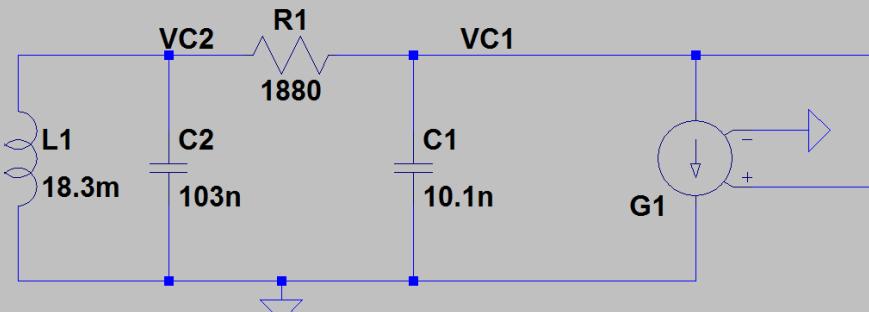
$$G_a = -6.5 \cdot 10^{-4} \text{ S}; G_b = -3.9 \cdot 10^{-4} \text{ S}; G_c = 1.9 \cdot 10^{-3} \text{ S};$$

Per modellare il resistore non lineare è possibile usare un generatore di corrente controllato in tensione (Edit – component – **G**)

Con **G** è possibile dare la caratteristica per punti usando una *table*

Circuito di Chua

```
.tran 0 0.05 0 100n  
.ic I(L1)=0  
.ic V(VC1)=1  
.ic V(VC2)=0
```



```
table=(-7.0 0, -5.7 0.0025,-1.0 0.00067, 0 0,1.0 -0.00067,5.7 -0.0025,7.0 0)
```

```
R1 VC1 VC2 1880  
C1 VC1 0 10.1n  
C2 VC2 0 103n  
L1 VC2 0 18.3m  
G1 VC1 0 VC1 0 table=(-7 0, -5.7 0.0025,-1 0.00067, 0 0,1 -0.00067,5.7 -0.0025,7 0)  
.ic I(L1)=0  
.ic V(VC1)=1  
.ic V(VC2)=0  
.tran 0 0.05 0 100n  
.backanno  
.end
```

Matlab - LTspice

E' possibile interfacciare Matlab con LTspice per sfruttare le potenzialità di entrambi gli applicativi: la flessibilità di Matlab per il calcolo scientifico e le funzionalità di Spice per la risoluzione dei circuiti.

In allegato è riportato un semplice programma MATLAB per la risoluzione di un circuito di Chua. Per il suo funzionamento sono necessari i seguenti file:

1)Main_LTspice_Matlab_Single_Chua: è il programma principale in cui si impostano i parametri di simulazione e in cui si visualizzano i risultati

2)spice_solve_chua_pwl è la funzione che richiama LTspice per la risoluzione del circuito

3)netlist_chua_pwl: consente di scrivere il file .net che deve essere letto da LTspice

4)LTspice2Matlab: è la routine per convertire i dati LTspice in dati in formato Matlab. Deve essere salvata nella cartella di LTspice

Per aggirare le restrizioni di Windows, conviene eseguire Matlab in modalità amministratore.