



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

[www.upct.es](http://www.upct.es)



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

## LTSPICE

Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis (**Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados**).

*Ejemplos de circuitos analógicos.*

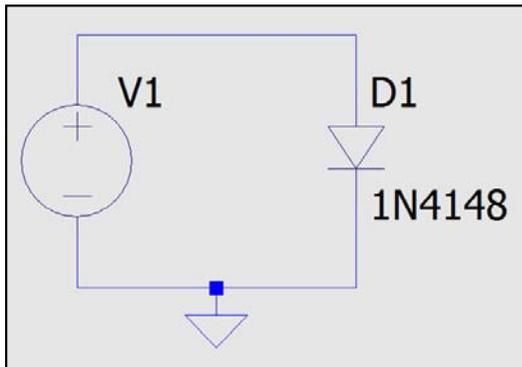


### Aprendizaje basado en Proyectos

1. Estudio de la unión PN: Introducción.
2. Estudio de la unión PN: Ruptura y Conducción.
3. Estudio de la unión PN:  $R_{directa}$  y Curva característica.
4. Estudio de la unión PN: Estudio dinámico y comparación entre diferentes diodos.
5. Estudio en temperatura de un diodo rectificador.
6. Variación del valor de un componente: Barrido paramétrico.
7. Análisis en AC y TRAN: Bode, Magnitud, Fase, Retardo de grupo, Measure...
8. Variación de un parámetro interno de un transistor.
9. Fuente regulada lineal: Subcircuitos y modelos de Transformadores y Puente de diodos.
10. Fuente regulada fija, fuente regulada variable, fuente regulada simétrica, fuente de corriente constante.
11. Teorema de máxima transferencia de potencia.
12. Función de Laplace: Filtro paso bajo. Filtro de Butterworth de 1º orden, 2º, 3º y 4º orden.
13. Señal Transitoria y FFT.
14. Rectificador trifásico de onda completa.
15. Cantidades eléctricas definidas por el usuario: Measure.

En otras presentaciones independientes...

- Creación de componentes: Ejemplos.
- El análisis de Ruido: Ejemplos.
- Definición y uso de Transformadores: Ejemplos.
- Análisis estadístico (MonteCarlo y Worst Case): Ejemplos.



Circuito de partida

## ESPECIFICACIONES DEL MODELO 1N4148

Corriente inversa de saturación	$I_s = 2.52\text{nA}$
Resistencia Óhmica	$R_s = 0.568\Omega$
Coefficiente de emisión	$N = 1.752$
Capacidad de la unión sin tensión	$C_{jo} = 4\text{pF}$
Coefficiente del gradiente	$M = 0.4$
Tiempo de transición	$t_t = 20\text{ns}$
Corriente media	$I_{ave} = 200\text{mA}$
Tensión de ruptura (Bv)	$V_{pk} = 75\text{V}$
Tensión umbral de la unión	$V_j = 0.5\text{V}$
Fabricante	$mfg = \text{On Semiconductor}$
Tipo semiconductor	$type = \text{Silicio}$



William B. Shockley

### Parámetros de varios fabricantes del 1N4148

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752
+ Cjo=4p M=.4 tt=20n Iave=200m Vpk=75
+ mfg=OnSemi type=silicon)
```

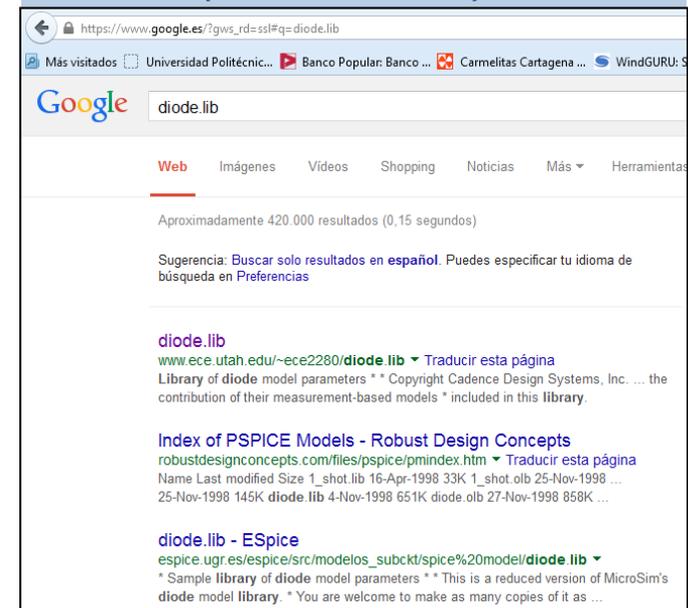
```
.model 1N4148 D(Is=2.682n N=1.836 Rs=.5664
+ Ikf=44.17m Xti=3 Eg=1.11 Cjo=4p M=.3333
+ Vj=.5 Fc=.5 Isr=1.565n Nr=2 Bv=100 lbv=100u
+ Tt=11.54n)
```

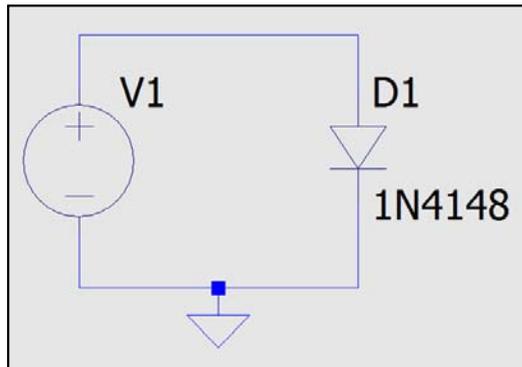
### Ecuación de Shockley

$$I_F = I_S \cdot (e^{\frac{V_F}{\eta \cdot V_T}} - 1)$$

Las especificaciones de cada parámetro están en la ayuda de LTSpice

### En Internet se pueden obtener datos de diferentes librerías





Circuito de partida

### ESPECIFICACIONES DEL MODELO 1N4148

Corriente inversa de saturación	$I_s = 2.52\text{nA}$
Resistencia Óhmica	$R_s = 0.568\Omega$
Coefficiente de emisión	$N = 1.752$
Capacidad de la unión sin tensión	$C_{jo} = 4\text{pF}$
Coefficiente del gradiente	$M = 0.4$
Tiempo de transición	$t_t = 20\text{ns}$
Corriente media	$I_{ave} = 200\text{mA}$
Tensión de ruptura (Bv)	$V_{pk} = 75\text{V}$
Tensión umbral de la unión	$V_j = 0.5\text{V}$
Fabricante	$mfg = \text{On Semiconductor}$
Tipo semiconductor	$type = \text{Silicio}$

#### Parámetros de varios fabricantes del 1N4148

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752
+ Cjo=4p M=.4 tt=20n Iave=200m Vpk=75
+ mfg=OnSemi type=silicon)
```

```
.model 1N4148 D(Is=2.682n N=1.836 Rs=.5664
+ Ikf=44.17m Xti=3 Eg=1.11 Cjo=4p M=.3333
+ Vj=.5 Fc=.5 Isr=1.565n Nr=2 Bv=100 lbv=100u
+ Tt=11.54n)
```

#### Datos de la familia 1N4001-7

```
.model 1N4001 D(Is=14.11n N=1.984 Rs=33.89m Ikf=94.81 Xti=3 Eg=1.11
+ Cjo=25.89p M=.44 Vj=.3245 Fc=.5 Bv=75 lbv=10u Tt=5.7u)
* Motorola Semiconductor Databook (03 Jun 91).
```

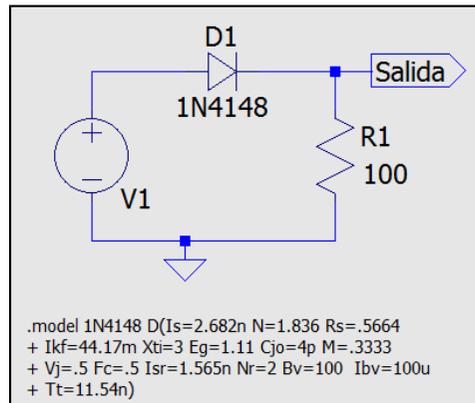
```
.model 1N4007 ako:1N4001 D(Bv=1500)
```

A Kind Of

El modelo del diodo estándar extendido **SPICE de Berkeley** utiliza **35 parámetros** para definir las tres regiones de trabajo del diodo: ON, OFF y Ruptura.

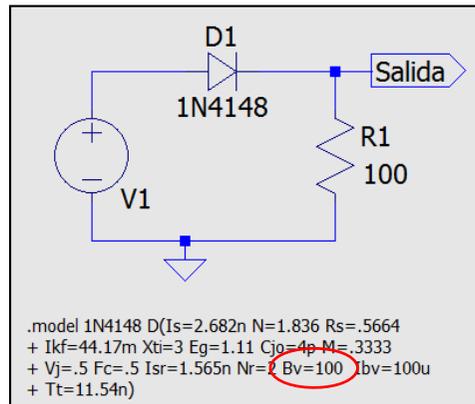
Para el **modelo idealizado** pueden utilizarse los siguientes parámetros:

Name	Description	Units	Default
Ron	Resistance in forward conduction	$\Omega$	1.
Roff	Resistance when off	$\Omega$	1./Gmin
Vfwd	Forward threshold voltage to enter conduction	V	0.
Vrev	Reverse breakdown voltage	V	Infin.
Rrev	Breakdown impedance	$\Omega$	Ron
Ilimit	Forward current limit	A	Infin.
Revlimit	Reverse current limit	A	Infin.
Epsilon	Width of quadratic region	V	0.
Revepsilon	Width of reverse quad. region	V	0.





## Estudio de la unión PN: Ruptura y Conducción



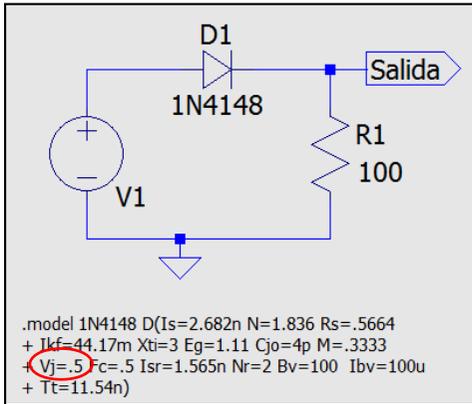
Tensión de ruptura

.dc V1 -120V +10V 0.01V



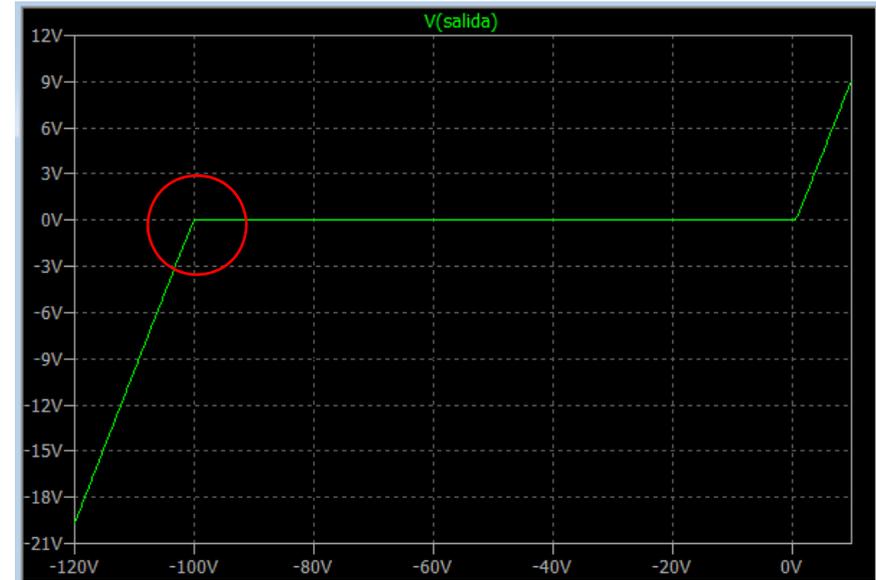


## Estudio de la unión PN: Ruptura y Conducción

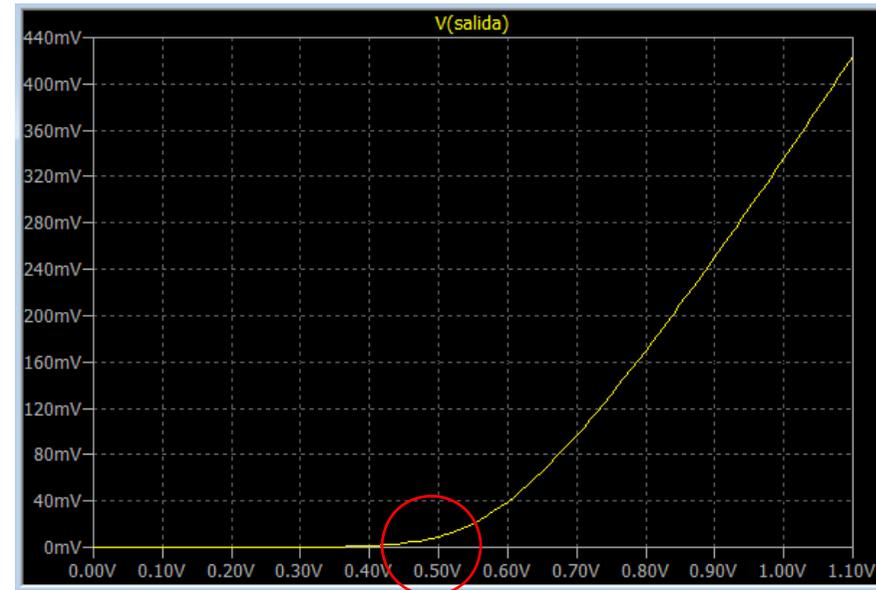


Tensión de ruptura

.dc V1 -120V +10V 0.01V

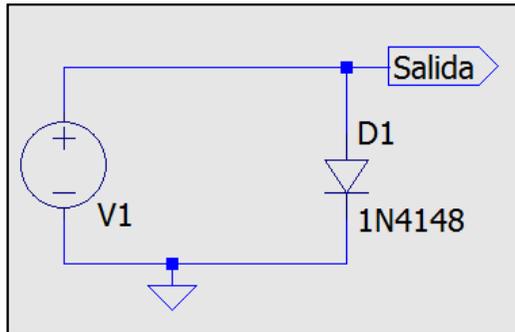


Tensión de conducción





## Estudio de la unión PN: $R_{directa}$ y Curva



Resistencia directa

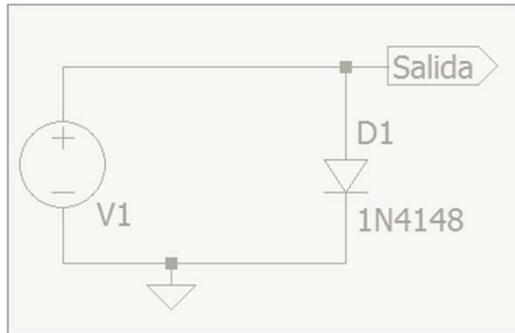
```
.dc V1 0.1V 2V 0.01V
```



Tensión (V)	Resistencia ( $\Omega$ )
0,5	4.537
0,7	105,19
1,0	5,51

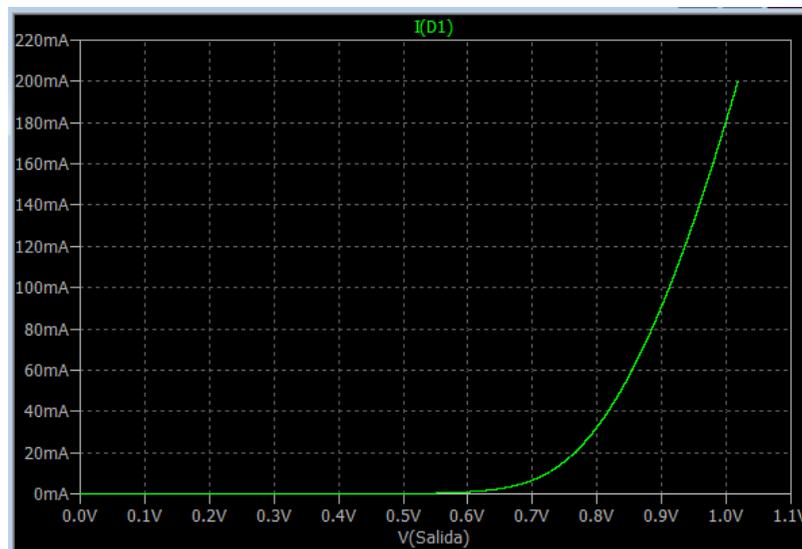
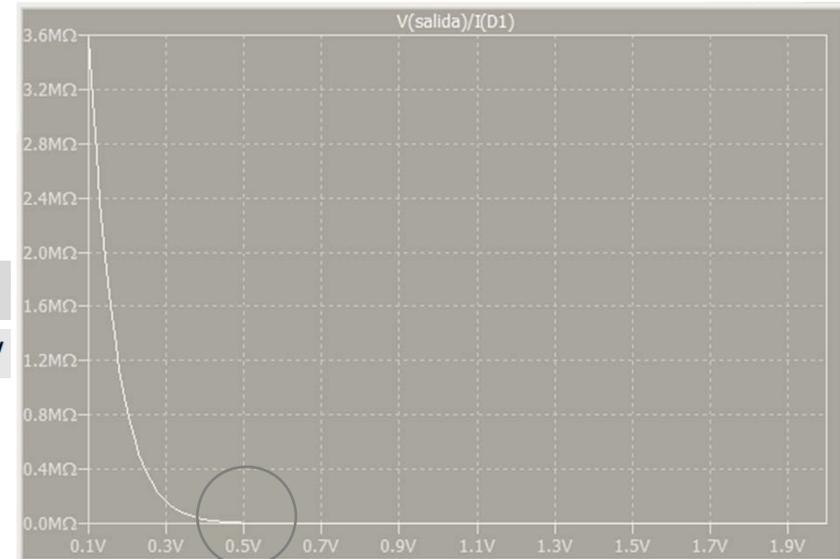


## Estudio de la unión PN: $R_{directa}$ y Curva



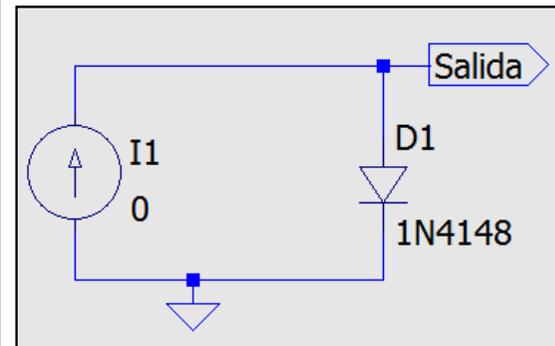
Resistencia directa

.dc V1 0.1V 2V 0.01V



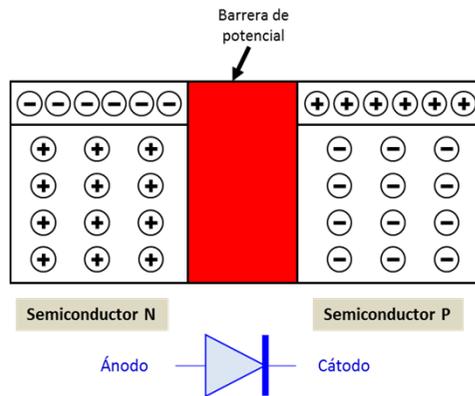
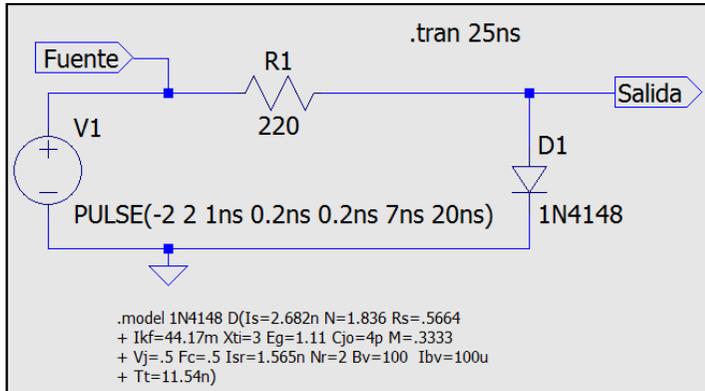
Curva característica V/I

.dc I1 0mA 200mA 0.01mA

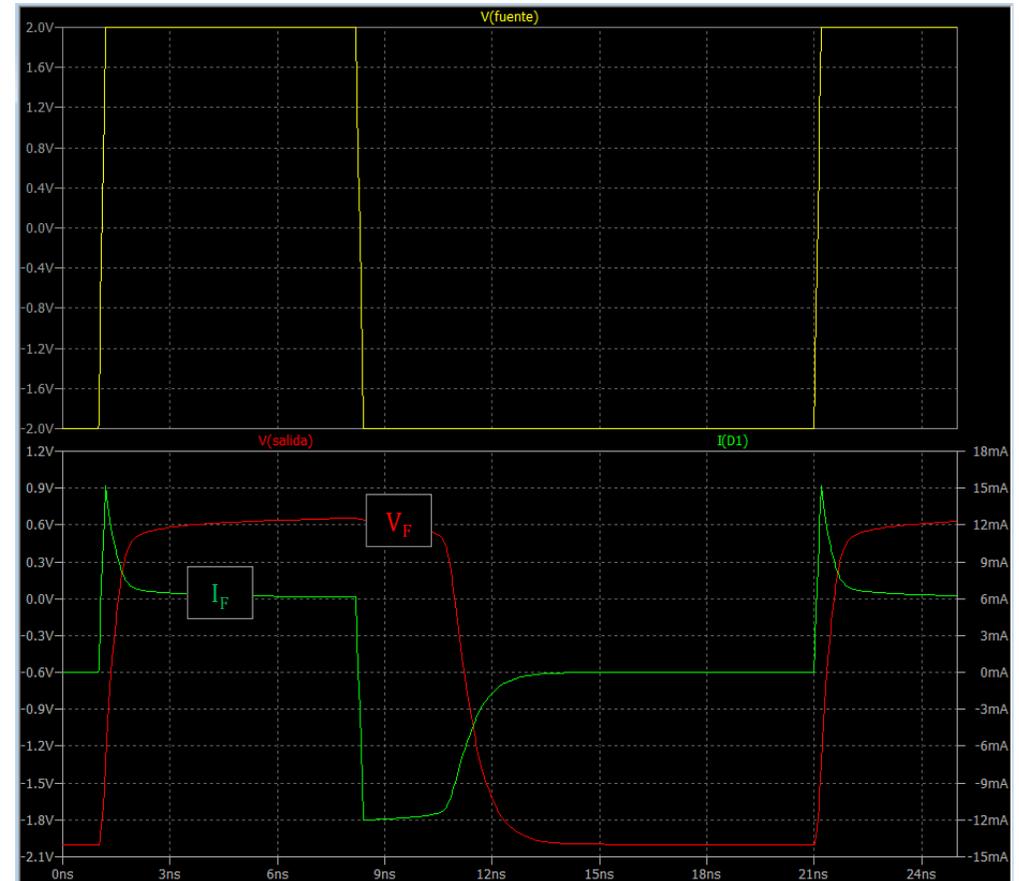


Tensión (V)	Corriente (mA)
0,500	112μ
0,640	2
0,912	100
1,017	200

**Tensión de conducción**  
Centésima parte de la corriente media



11



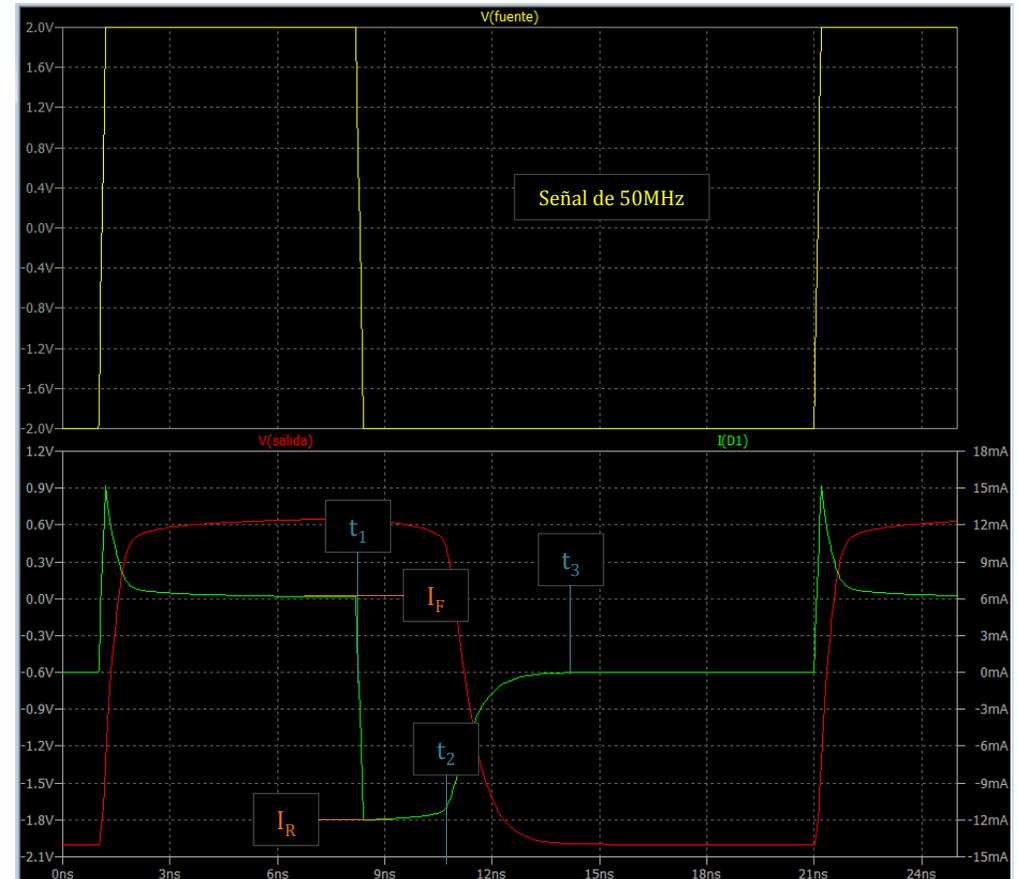
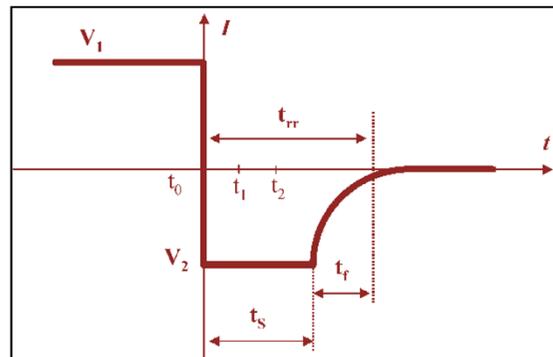
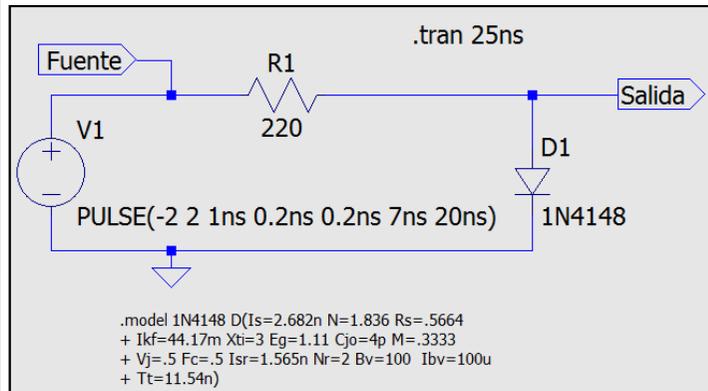


## Estudio de la unión PN: Estudio dinámico

$t_1 = 8.2\text{ns}$        $t_s = t_2 - t_1 = 2.51\text{ns}$       (t. de almacenamiento)  
 $t_2 = 10.71\text{ns}$        $t_t = t_3 - t_2 = 3.32\text{ns}$       (t. de transición  $220\Omega$ )  
 $t_3 = 13.31\text{ns}$        $t_{rr} = t_s + t_t = 5.83\text{ns}$       (t. de recuperación inversa)

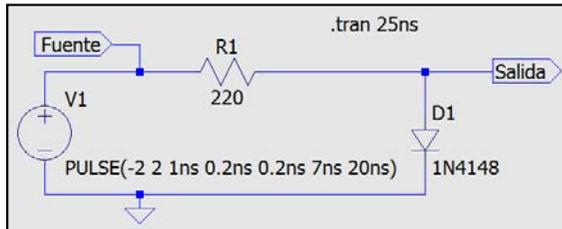
Tiempo de recombinación de los huecos  $\tau_p = \frac{t_s}{\ln\left[1 + \frac{I_F}{I_R}\right]} = \frac{2.51}{\ln\left[1 + \frac{6.17}{11.95}\right]} = 6.029\text{ns}$

La carga efectiva para los huecos  $Q_p = I_F \cdot \tau_p = 37.1\text{pC} (220\Omega)$

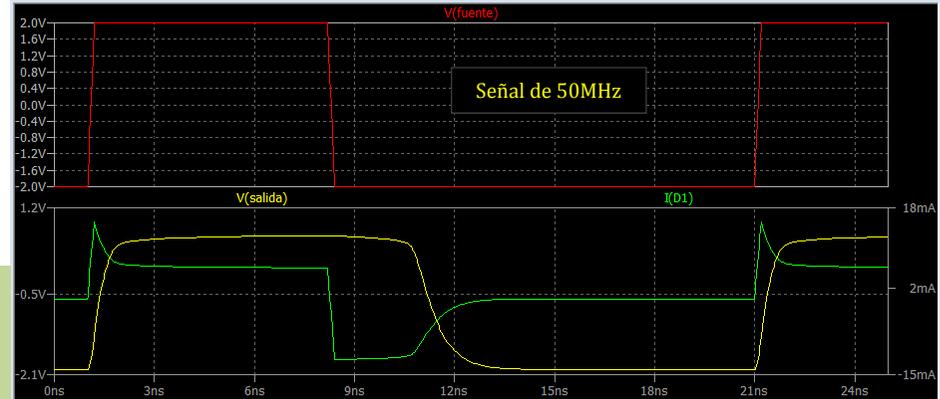




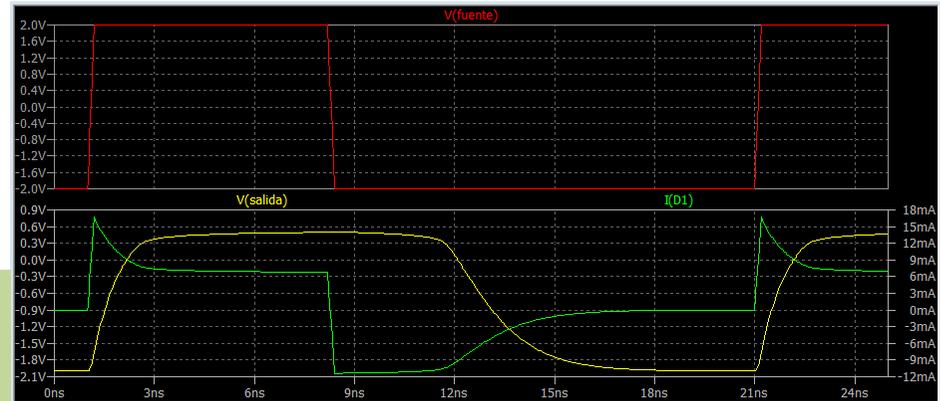
## Estudio de la unión PN: Comparación de tipos



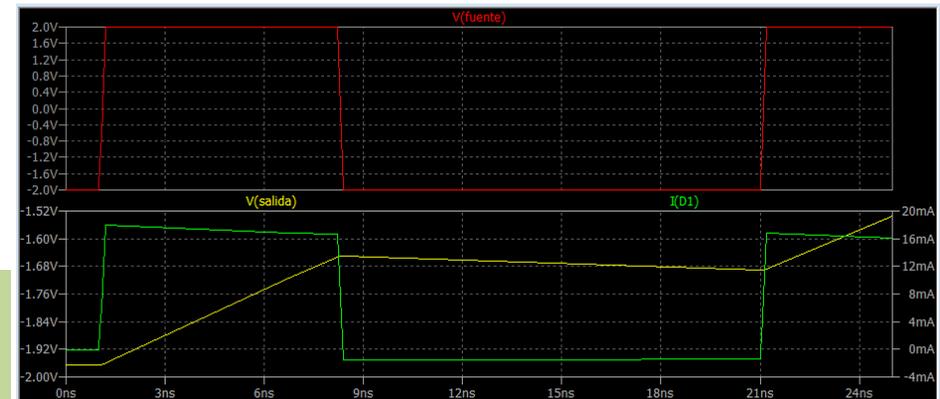
1N4148  
Diodo de señal  
Silicio



1N4007  
Diodo rectificador  
Silicio



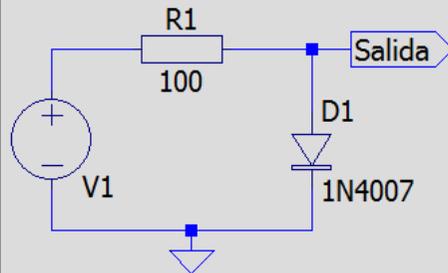
MBR745  
Diodo rápido  
Schottky





### Estudio en temperatura

```
.dc V1 0 3 0.01V
```



```
.step temp list -10 27 50 90
```

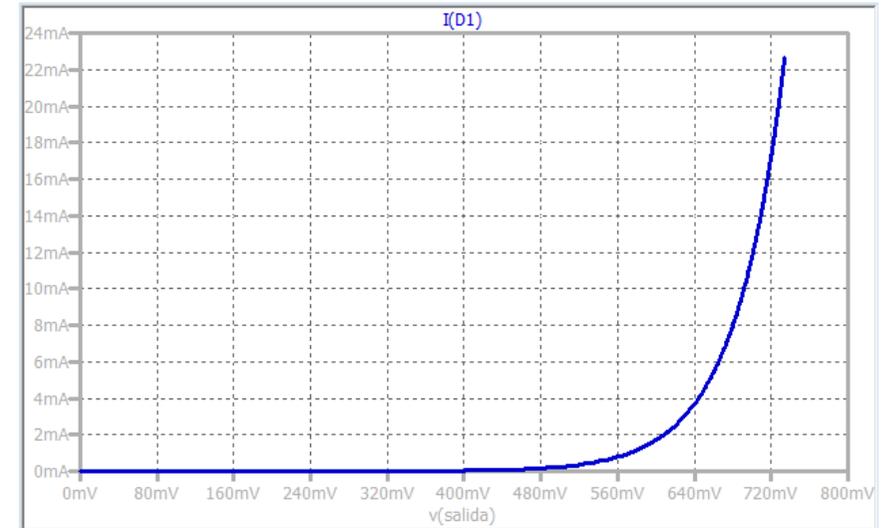
1N4007  
Curva característica  
27°C

The syntax

```
.TEMP <T1> <T2> ...
```

is equivalent to

```
.STEP TEMP LIST <T1> <T2> ...
```

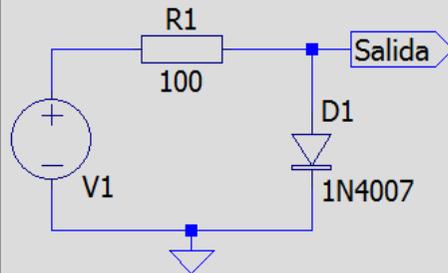




## Ejemplo de temperatura: Diodo 1N4007

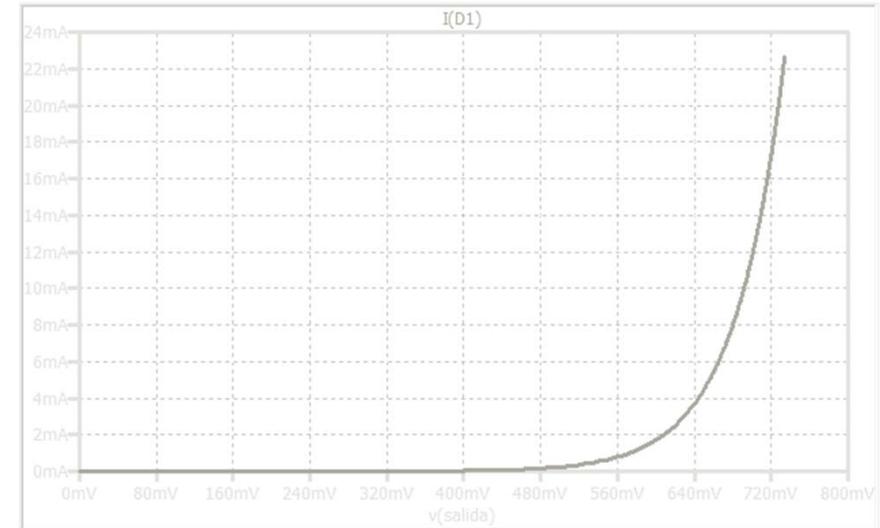
### Estudio en temperatura

```
.dc V1 0 3 0.01V
```

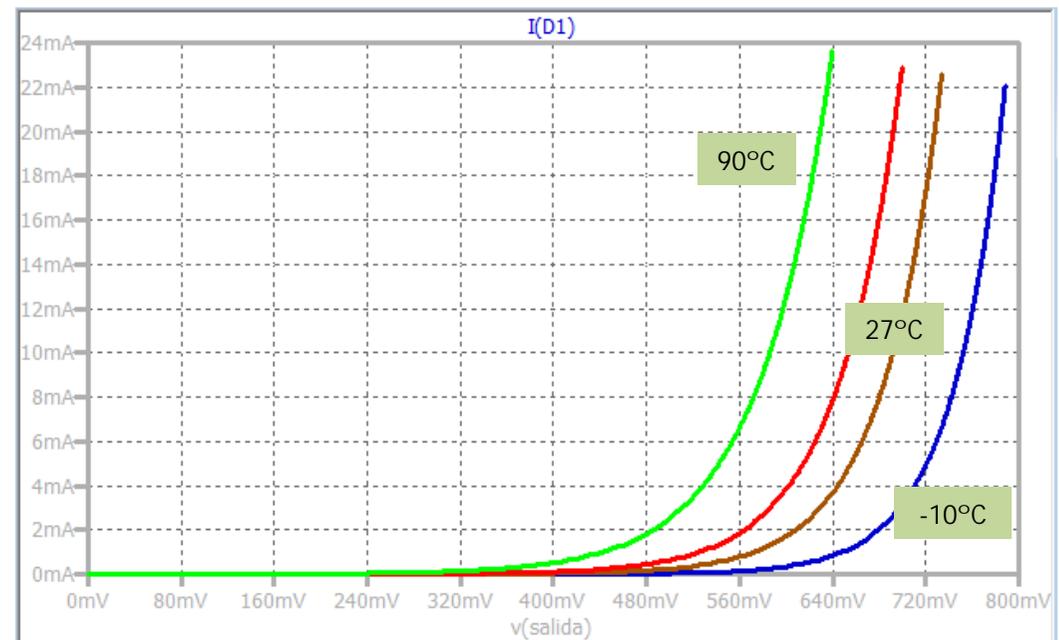


```
.step temp list -10 27 50 90
```

1N4007  
Curva característica  
27°C



1N4007  
Curva característica  
-10°C, 27°C, 50°C y 90°C

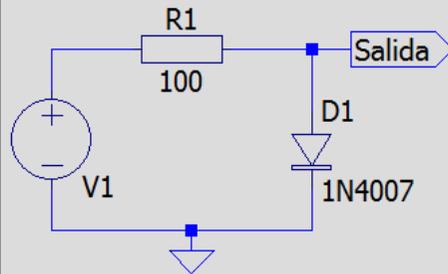




## Ejemplo de temperatura: Diodo 1N4007

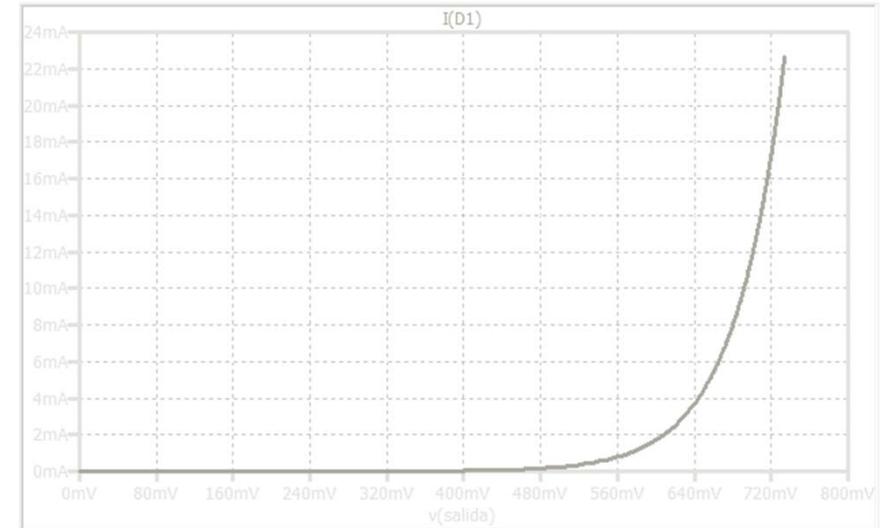
### Estudio en temperatura

```
.dc V1 0 3 0.01V
```



```
.step temp list -10 27 50 90
```

1N4007  
Curva característica  
27°C

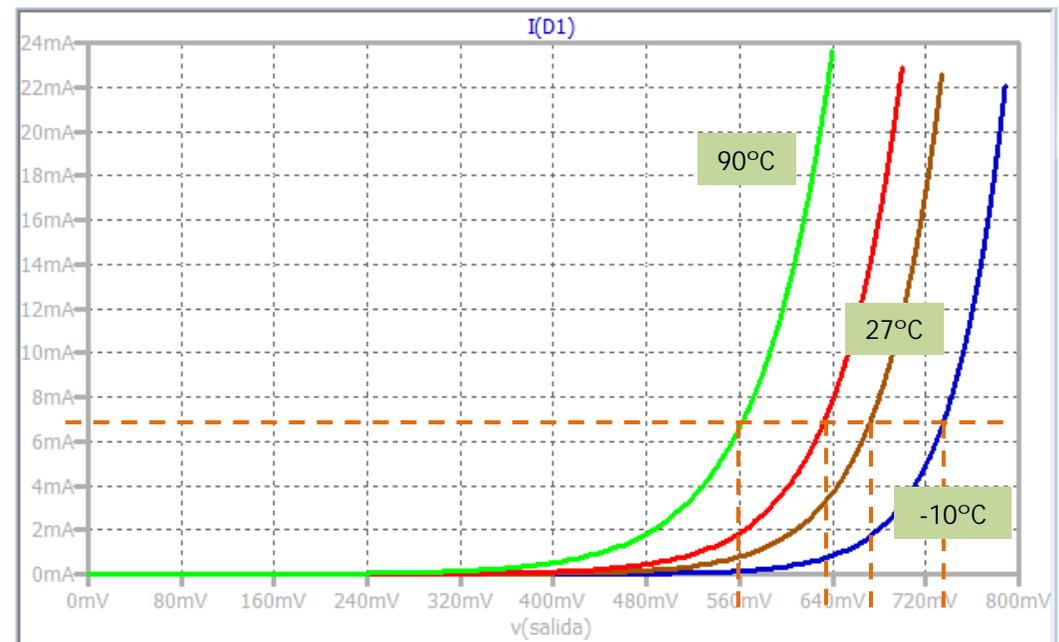


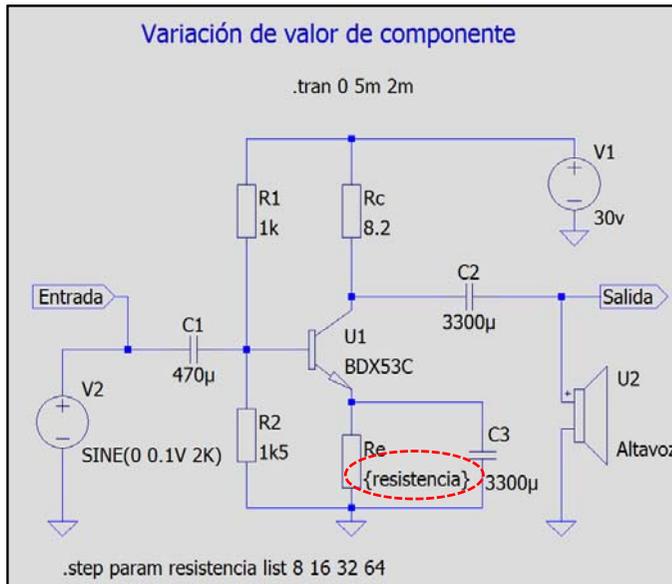
1N4007  
Curva característica  
-10°C, 27°C, 50°C y 90°C

Ecuación de Shockley

$$I_F = I_S \cdot \left( e^{\frac{V_F}{\eta \cdot V_T}} - 1 \right)$$

$$\ln \left( 1 + \frac{I_F}{I_S} \right) \cdot \eta \cdot \frac{k}{q} = \frac{V_F}{T}$$

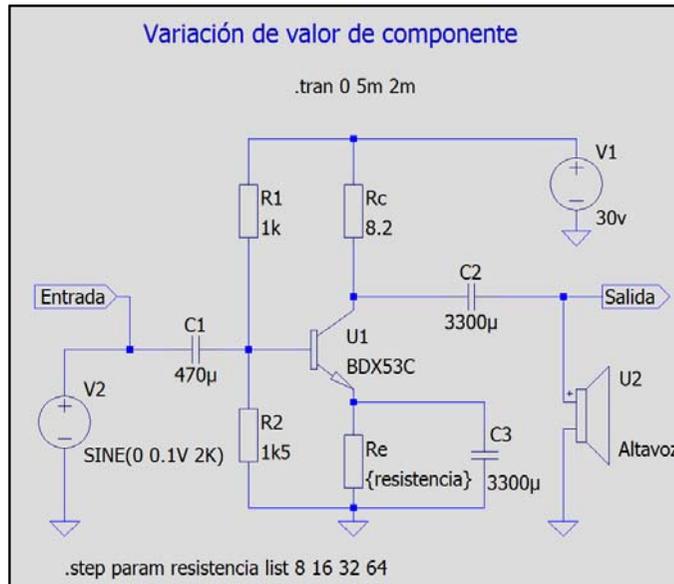




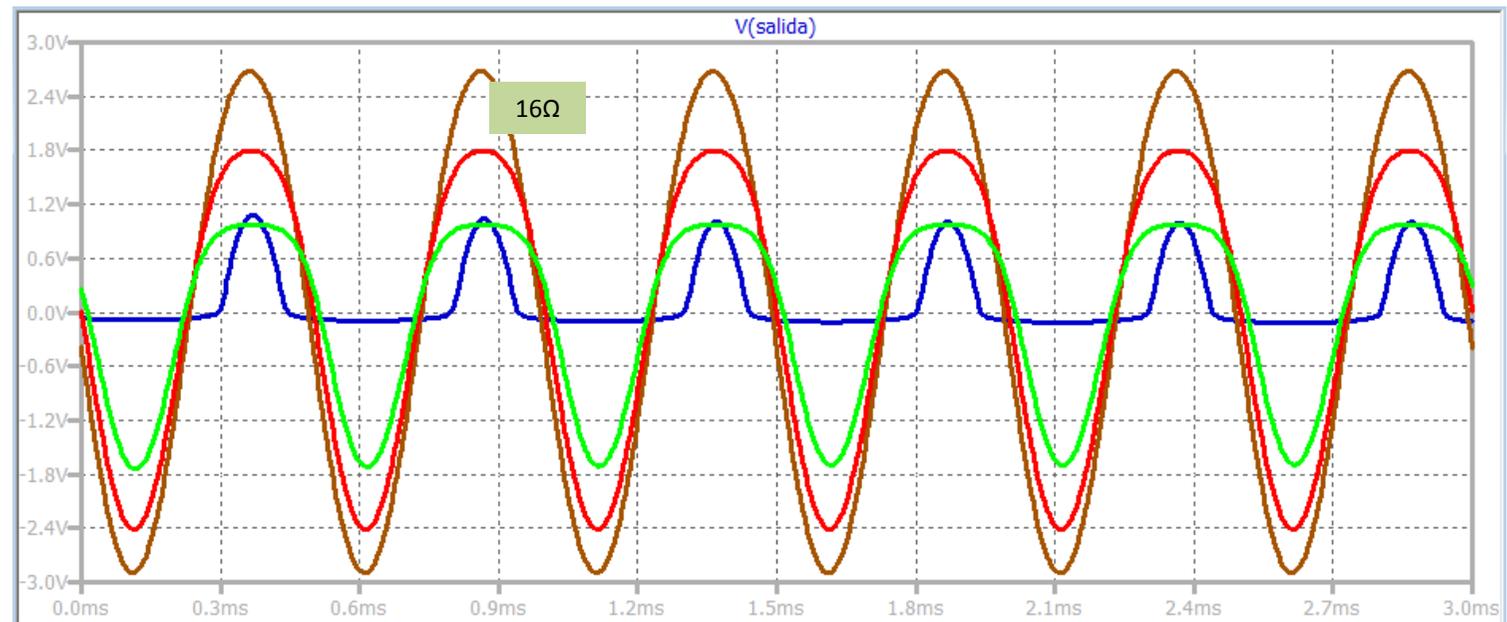
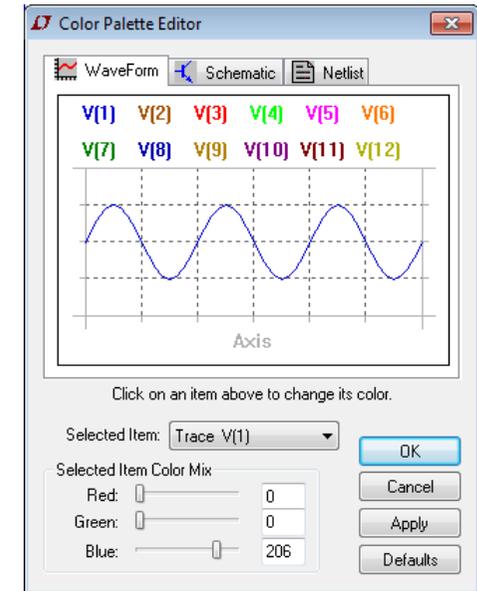
Amplificador clase A con Darlington



## Ejemplo variación de valor de componente: Resistencia



Amplificador clase A con Darlington

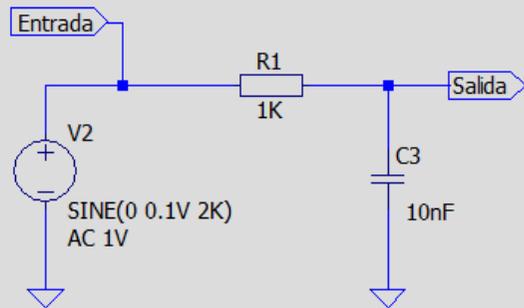




Mostar Magnitud, Fase y Retardo de grupo de un filtro Pasobajo.

$f_c = 15915\text{Hz}$

.ac oct 100 10 50K



*Resonancia*

$$R = X_C$$

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$P_{Out} = \frac{P_{In}}{2}$$

$$V_{Out(V)} = \frac{V_{In(V)}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{Out(dB)} = -3dB V_{In(dB)}$$

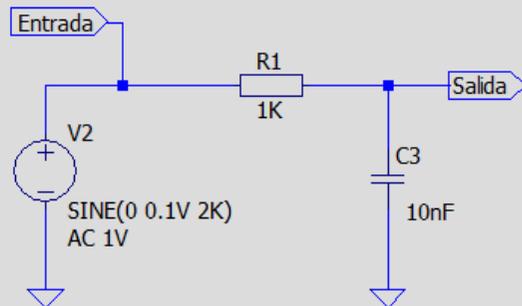


## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-bajo

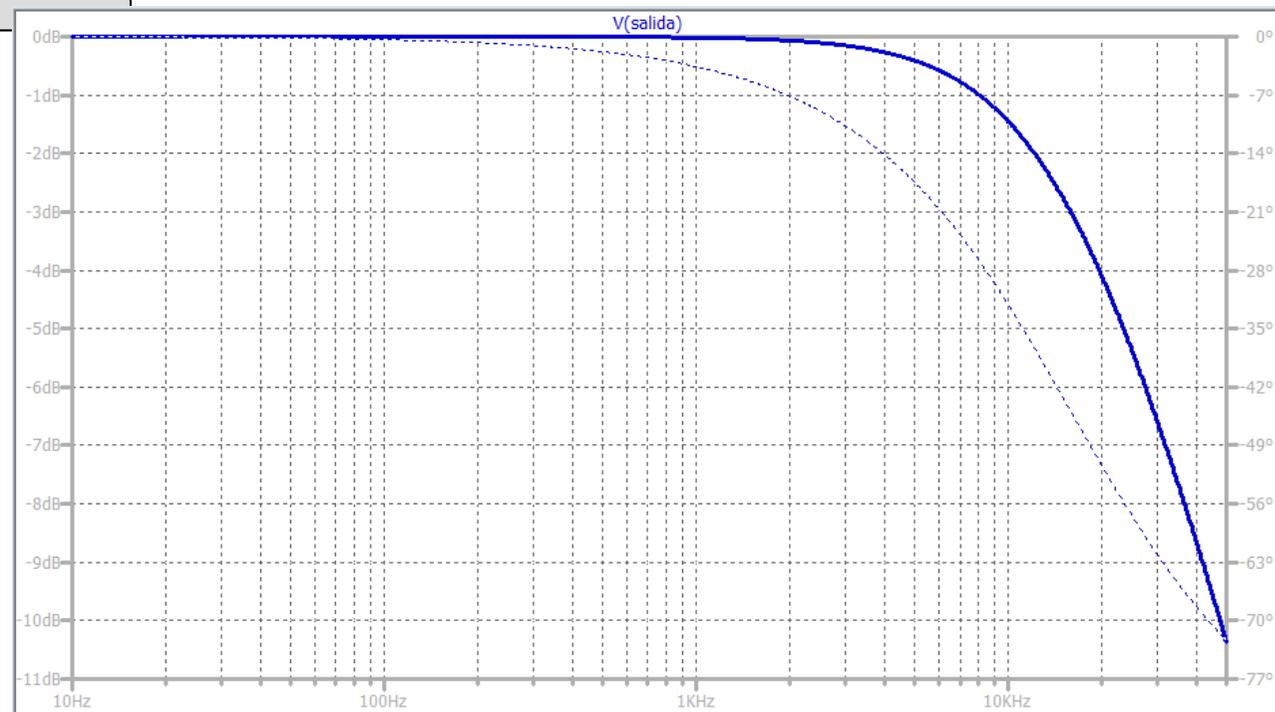
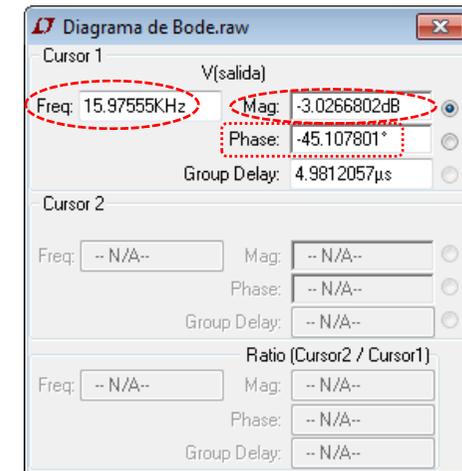
Mostar Magnitud, Fase y Retardo de grupo de un filtro Pasobajo.

$F_c = 15915\text{Hz}$

`.ac oct 100 10 50K`



Magnitud y Fase



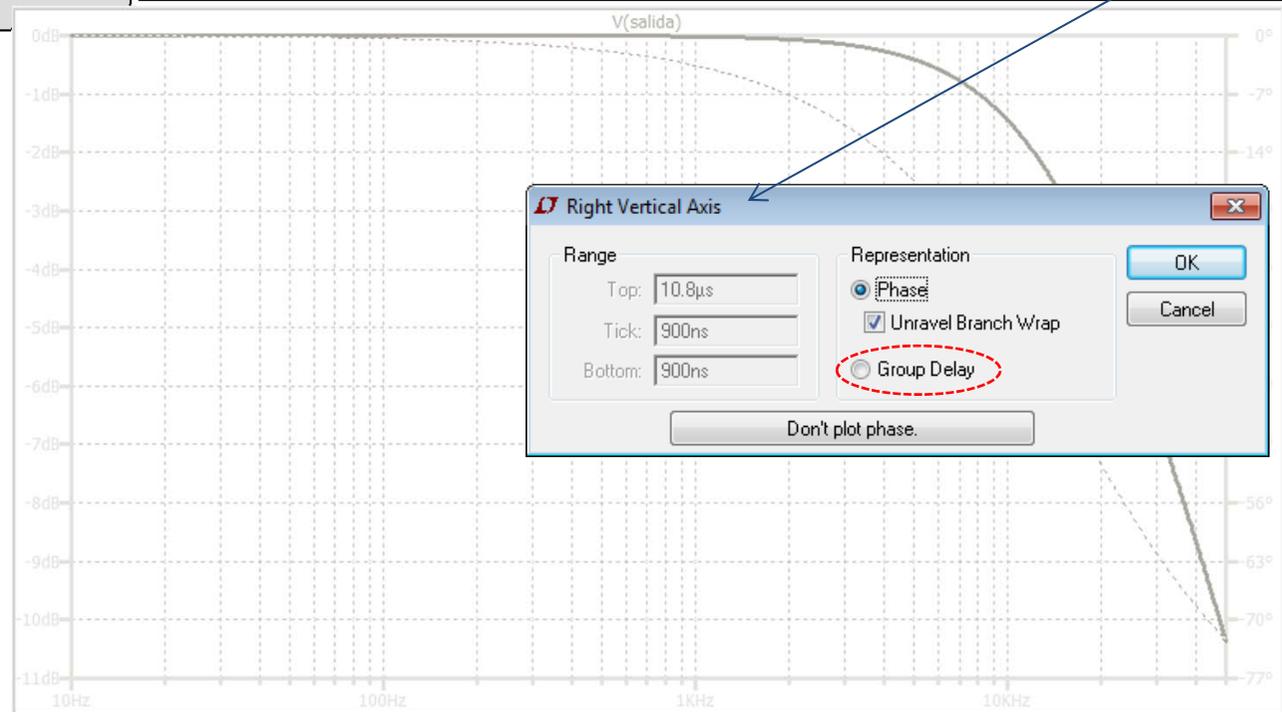
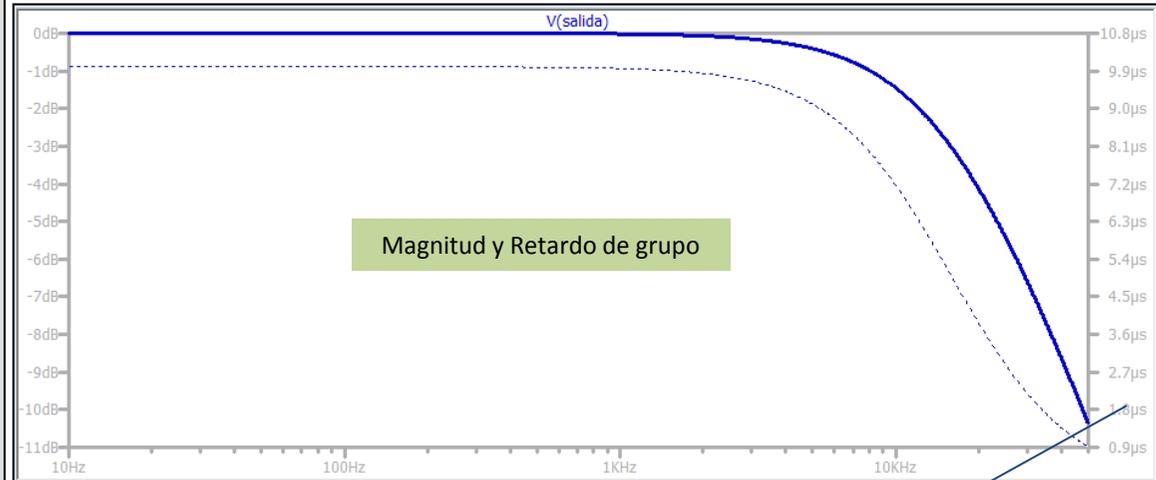
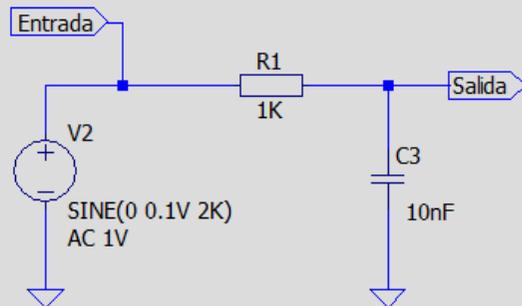


## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-bajo

Mostar Magnitud, Fase y Retardo de grupo de un filtro Pasobajo.

$F_c = 15915\text{Hz}$

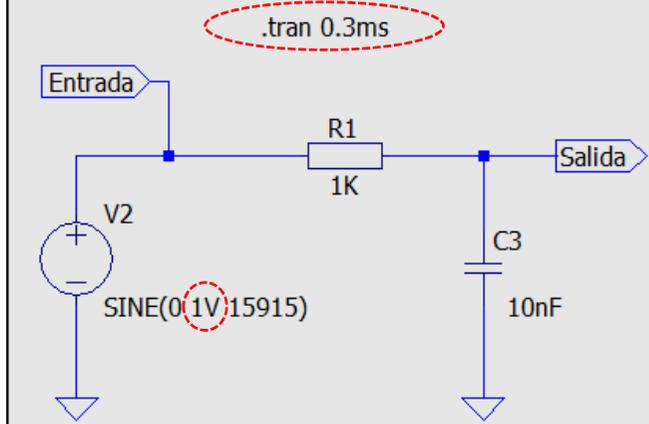
.ac oct 100 10 50K





## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-bajo

Mostar Magnitud, Fase y Retardo de grupo de un filtro Pasobajo.  
 $F_c = 15915\text{Hz}$

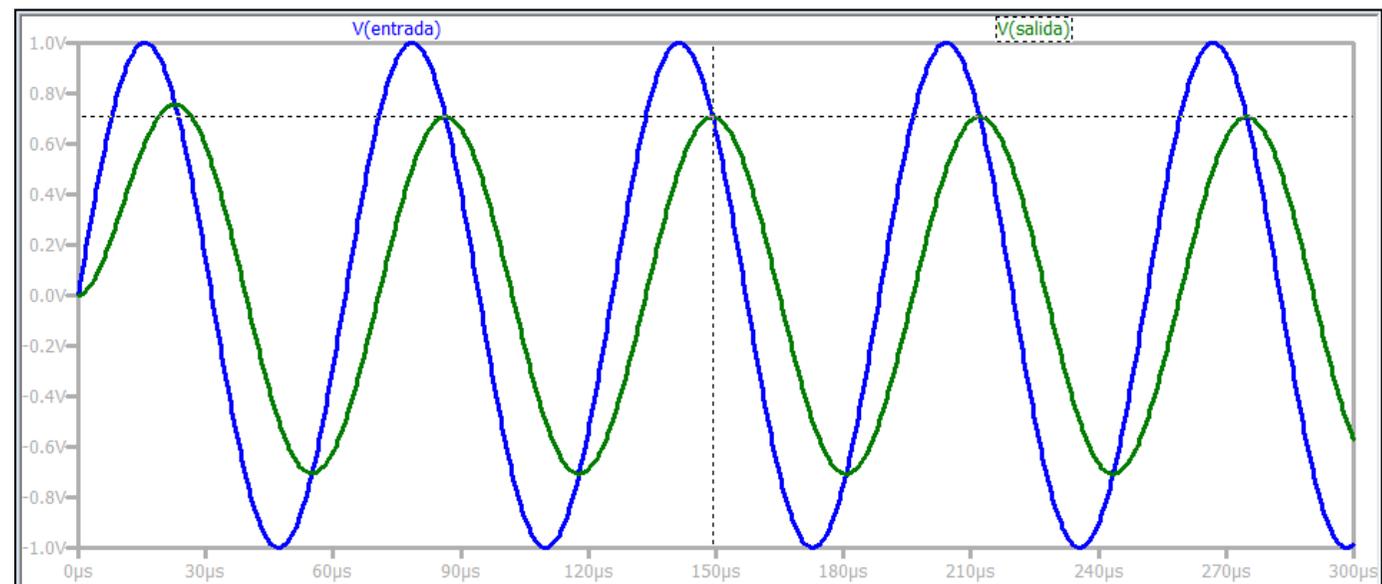
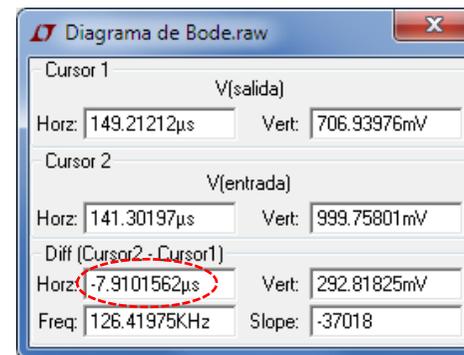


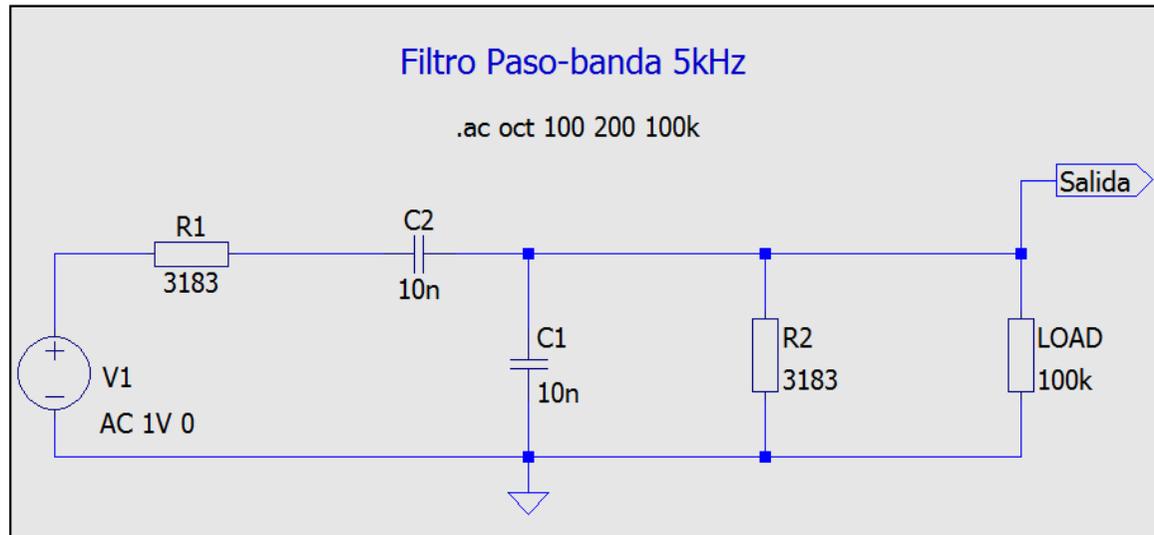
$$\frac{1}{15915} = 62.8338\mu\text{s}$$

$$Cur_1 - Cur_2 = 7.9101\mu\text{s}$$

$$\frac{360^\circ \cdot 7.9101\mu}{62.8338\mu} = 45.3^\circ \text{ Desfase}$$

Tensión a la frecuencia de corte





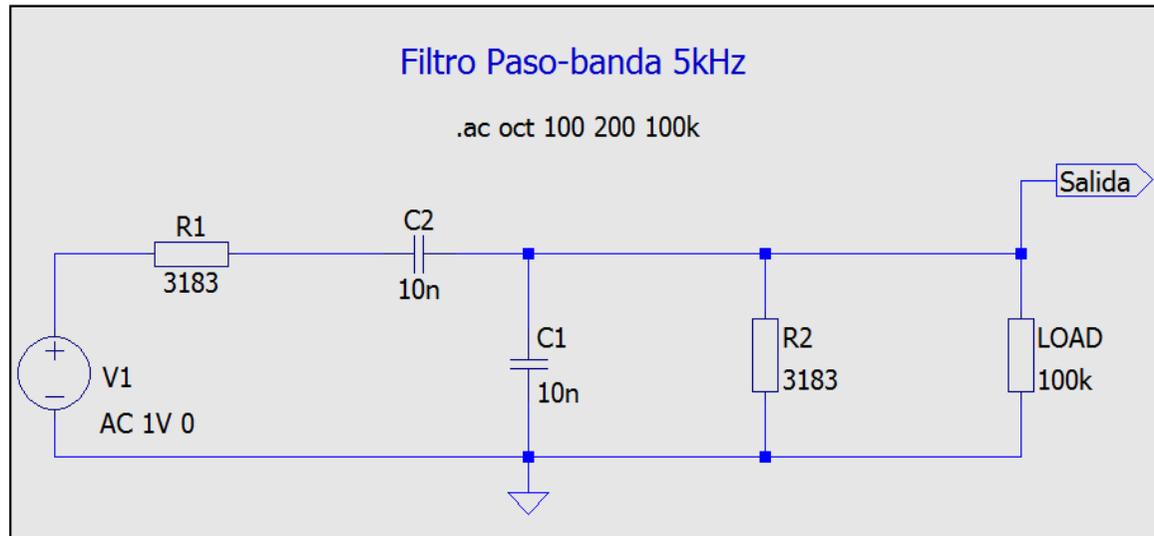
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$C = 10nF$$

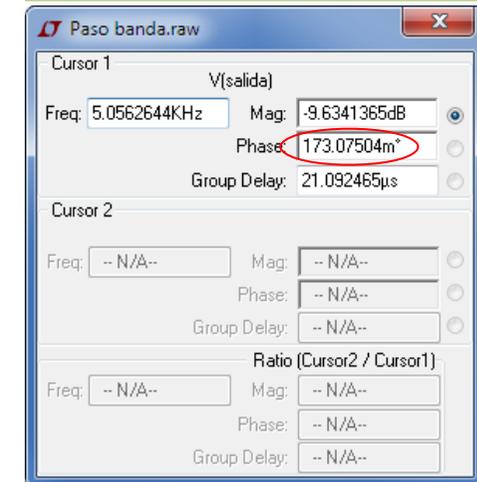
$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 5000} = 3183\Omega$$



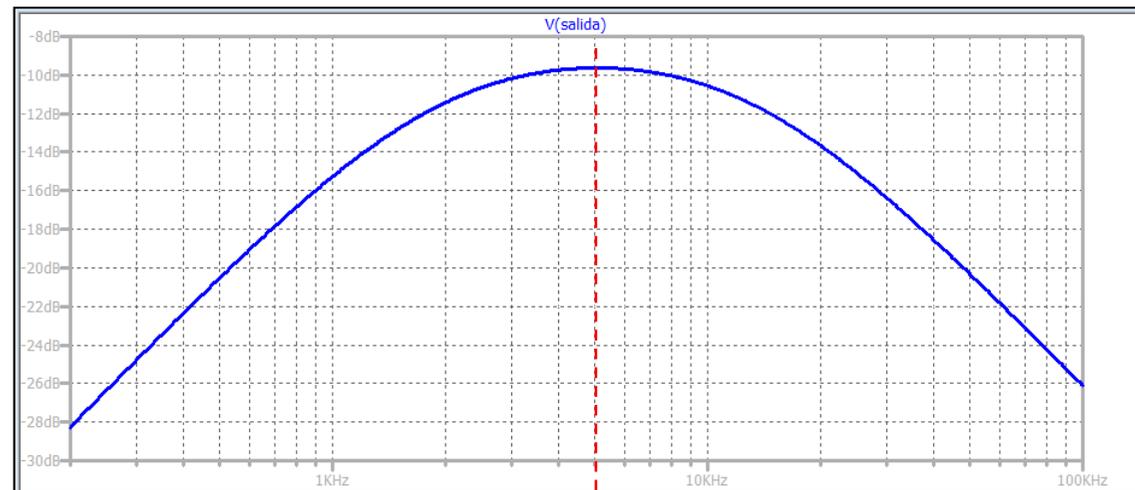
## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-banda



$$f_c = \text{Desfase nulo} = 5056\text{Hz}$$

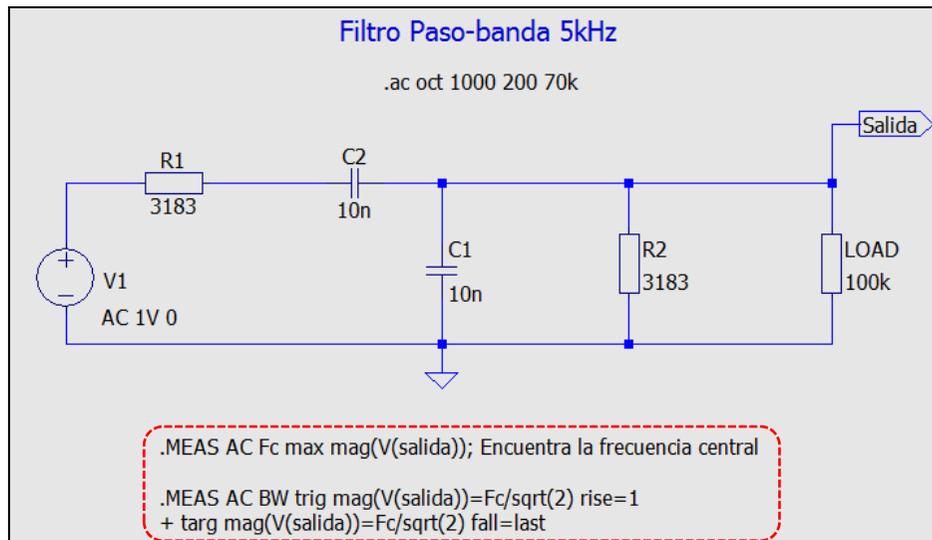


$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$
$$C = 10\text{nF}$$
$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 5000} = 3183\Omega$$





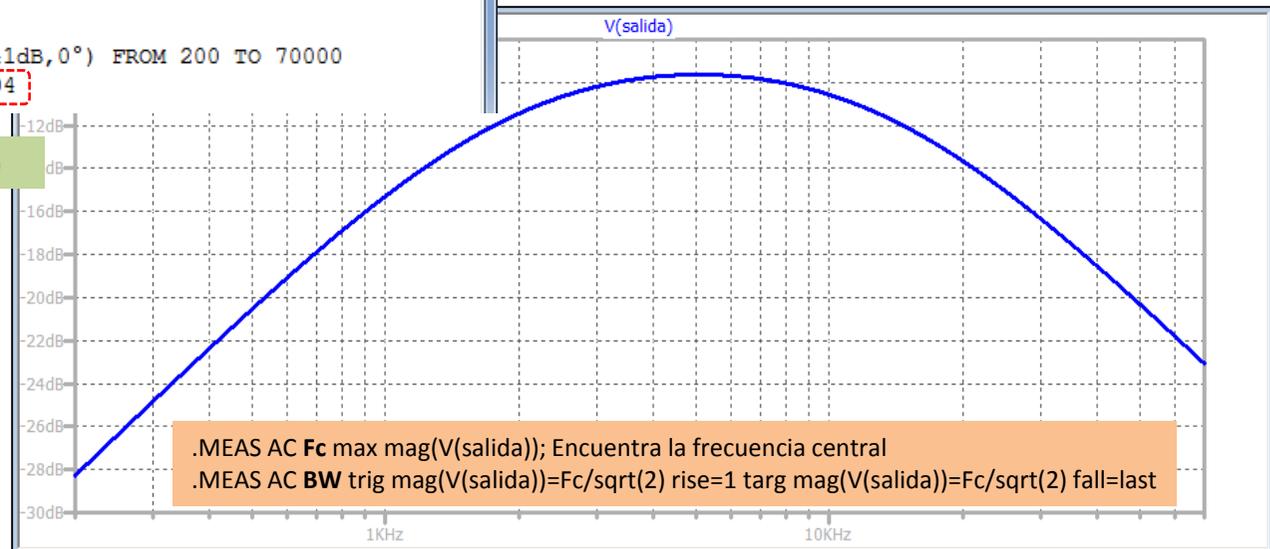
## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-banda



**MEASURE:** Evalúa cantidades eléctricas definidas por el usuario

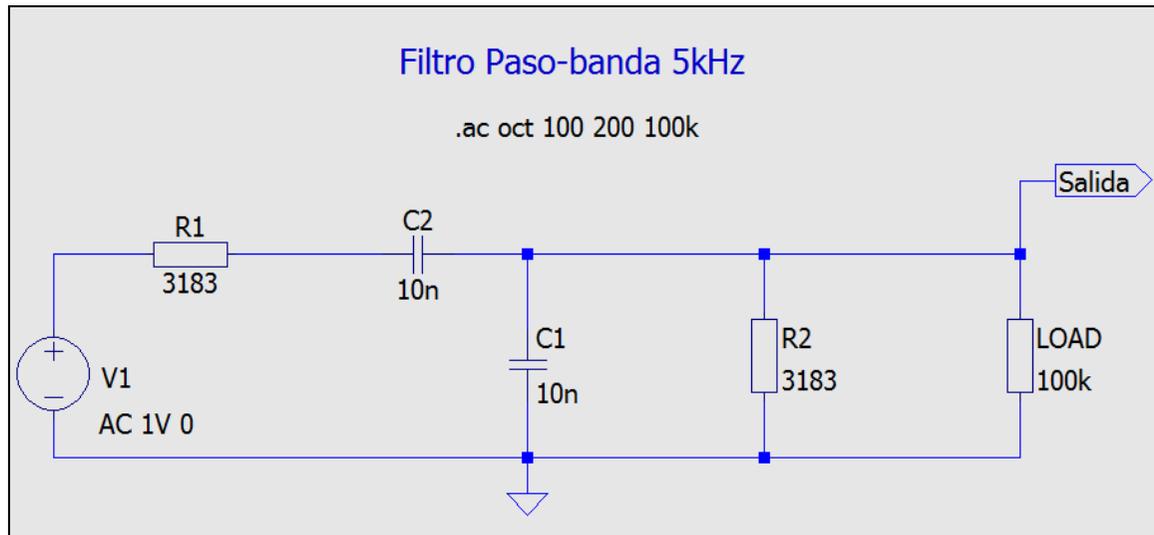
```
SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\2014-15 DYSE\Otros\Paso banda.log
Circuit: * C:\LTSpice practicas\2014-15 DYSE\Otros\Paso banda.asc
fc: MAX(mag(v(salida)))=(-9.6341dB,0°) FROM 200 TO 70000
bw=15159.6 FROM 1544.38 TO 16704
```

View>SPICE Error Log (CTRL+L)

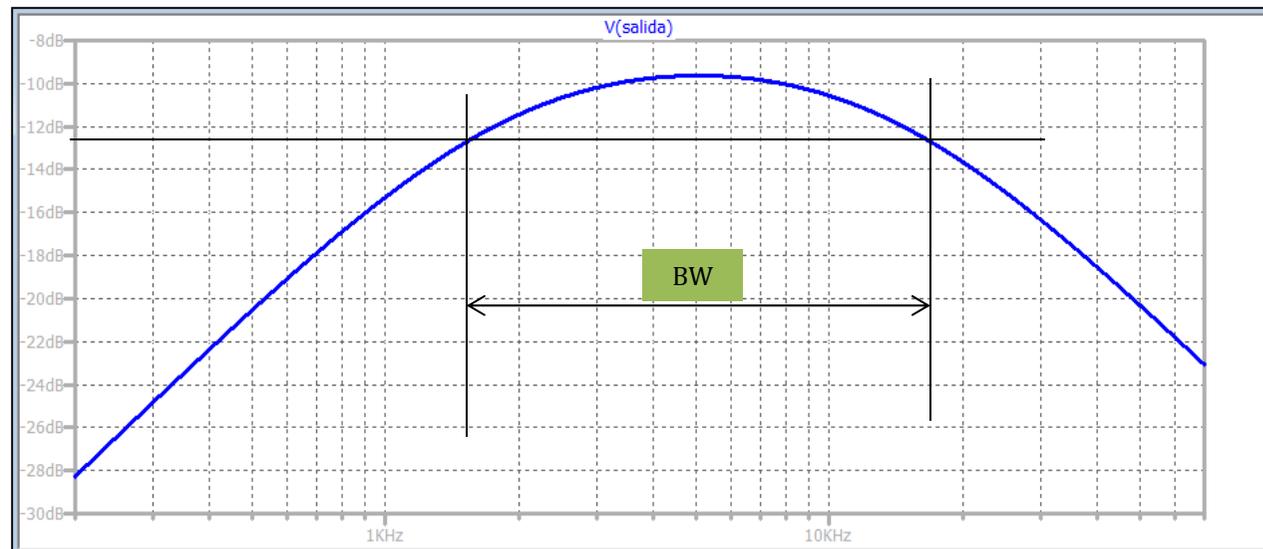
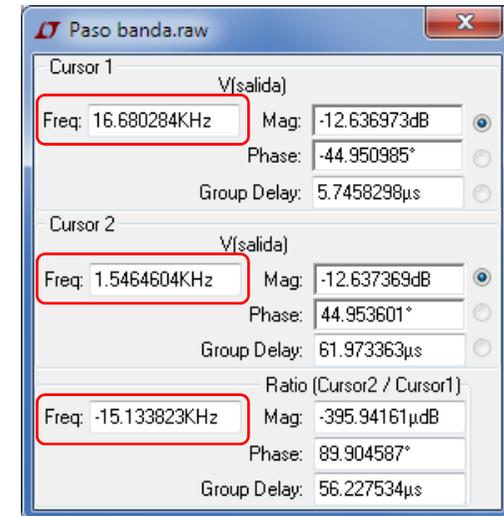




## Ejemplo de diagrama de Bode: Filtro paso-banda

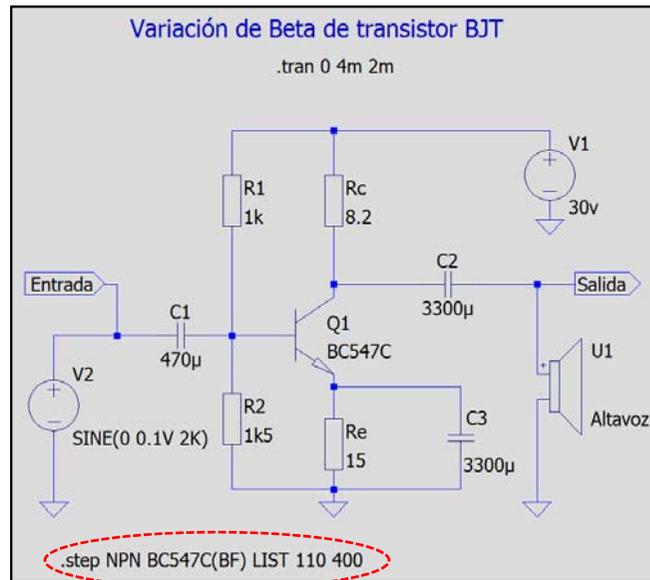


Realizando las mediciones manualmente (-3dB)



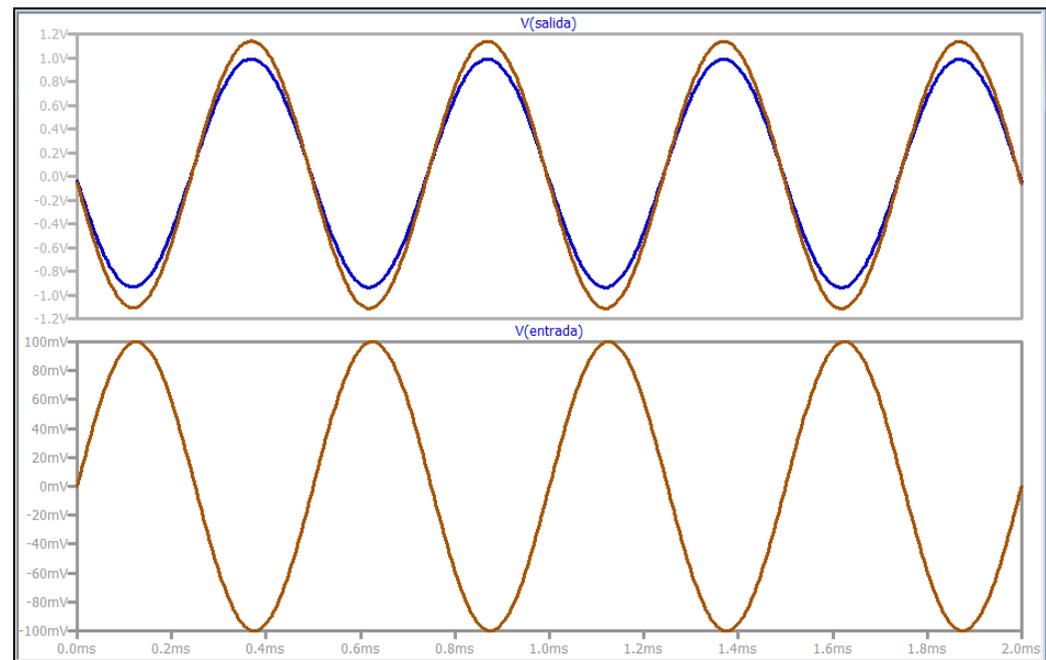
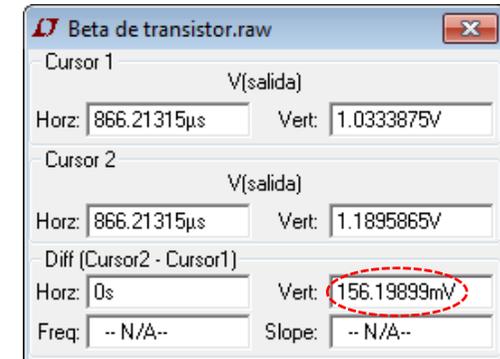
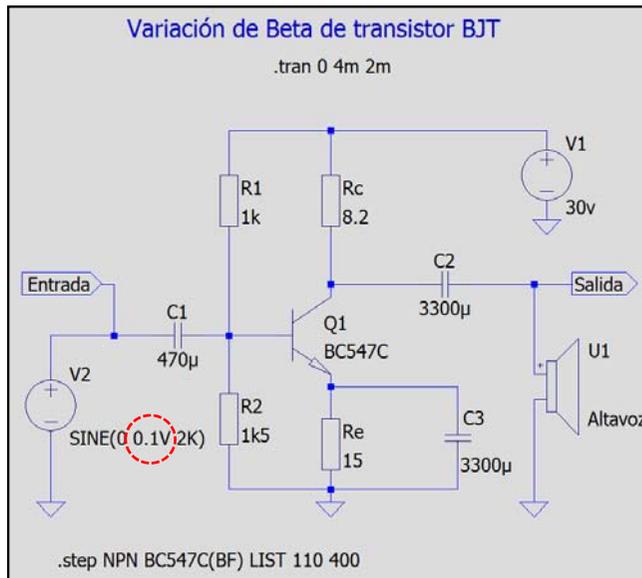


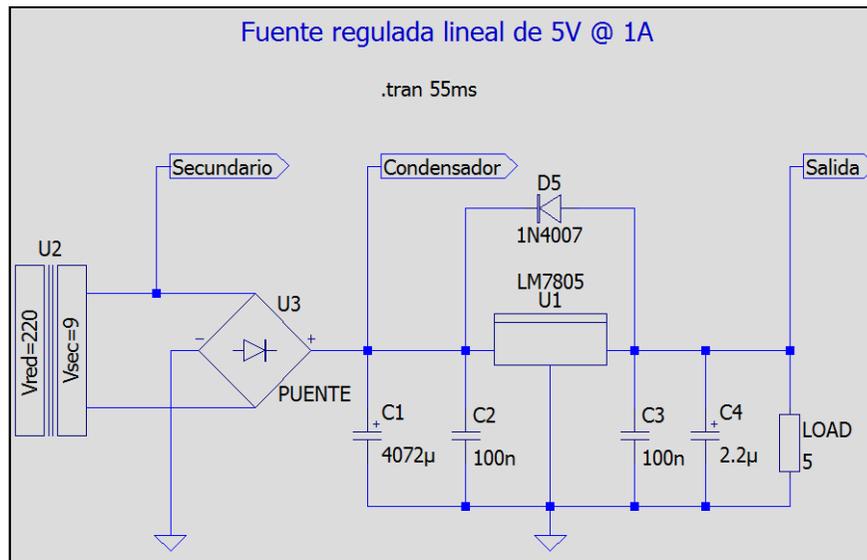
## Ejemplo de variación de parámetro interno de componente: **Beta de transistor**

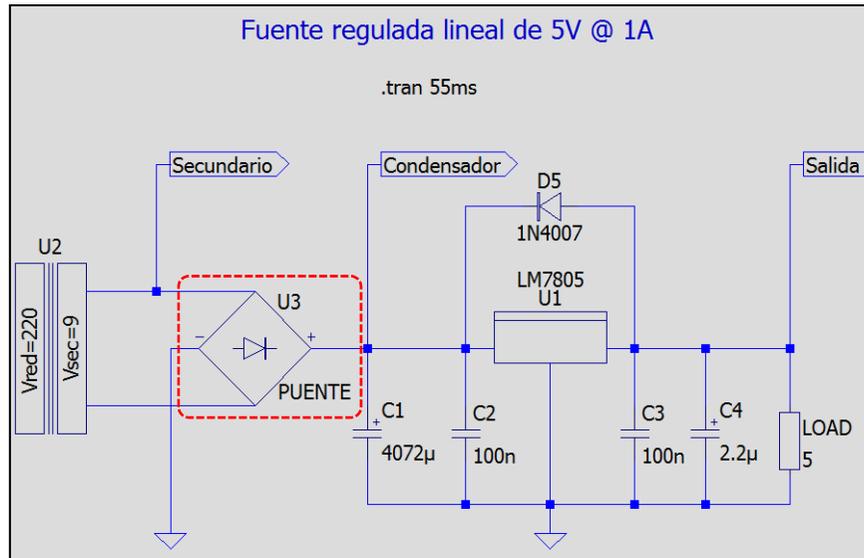




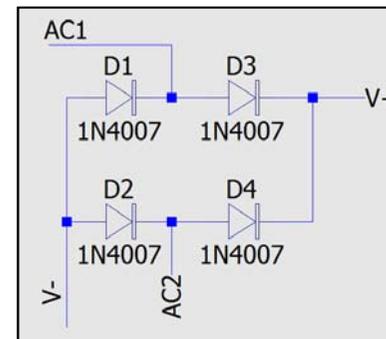
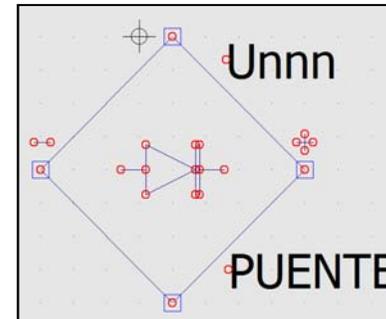
## Ejemplo de variación de parámetro interno de componente: **Beta de transistor**







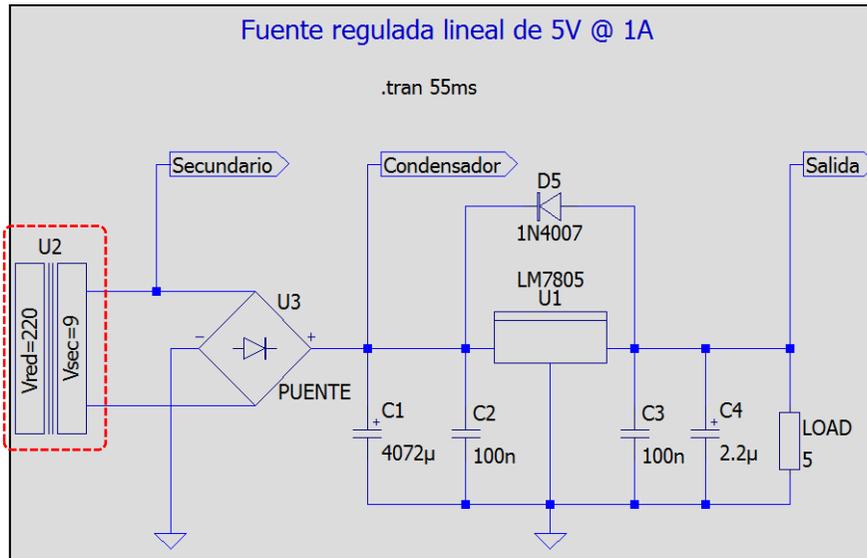
```
.SUBCKT PUENTE AC1 AC2 V+ V-  
D1 V- AC1 1N4007  
D2 V- AC2 1N4007  
D3 AC1 V+ 1N4007  
D4 AC2 V+ 1N4007  
.MODEL 1N4007 D(Is=7.02767e-09 Rs=0.0341512 N=1.80803 Eg=1.05743  
+Xti=5 lave=1 Vpk=1000 bv=1000 lbv=5e-08 Cjo=1e-11 Vj=0.7 M=0.5  
+FC=0.5 TT=1e-07 KF=0 AF=1)  
.ENDS PUENTE
```



Subcircuito y símbolo del puente de diodos

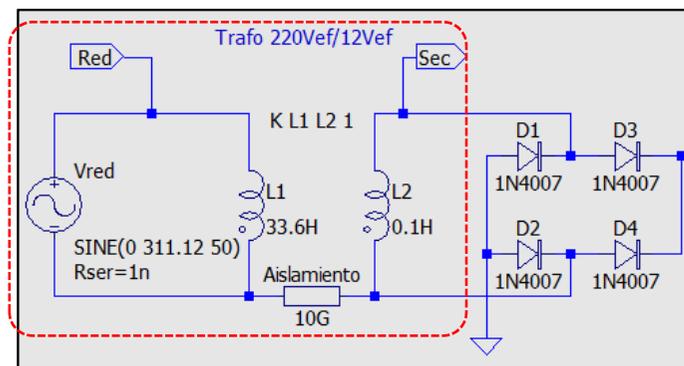
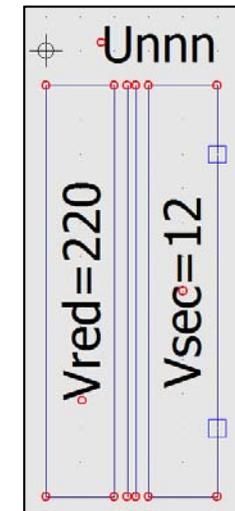
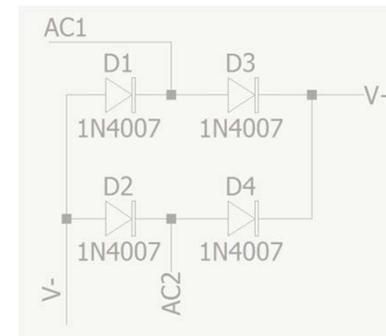


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



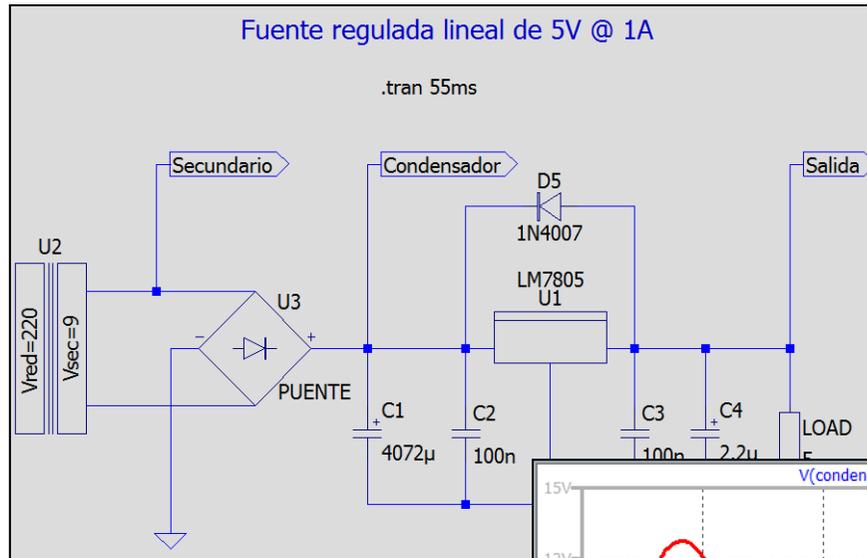
```
.SUBCKT PUENTE AC1 AC2 V+ V-
D1 V- AC1 1N4007
D2 V- AC2 1N4007
D3 AC1 V+ 1N4007
D4 AC2 V+ 1N4007
.MODEL 1N4007 D(Is=7.02767e-09 Rs=0.0341512 N=1.80803 Eg=1.05743
+Xti=5 lave=1 Vpk=1000 bv=1000 Ibv=5e-08 Cjo=1e-11 Vj=0.7 M=0.5
+FC=0.5 TT=1e-07 KF=0 AF=1)
.ENDS PUENTE
```

```
*----- Trafo salida única VRED/VSEC
.SUBCKT TRAFO_1 AC3 AC4 PARAMS: VRED=220 VSEC=12
L1 N001 0 {((VRED/VSEC)*(VRED/VSEC))*0.1}
L2 AC3 AC4 0.1H
V1 N001 0 SINE(0 {VRED*SQRT(2)} 50) Rser=1n
R1 AC4 0 10G
K L1 L2 1
.ENDS TRAFO_1
```

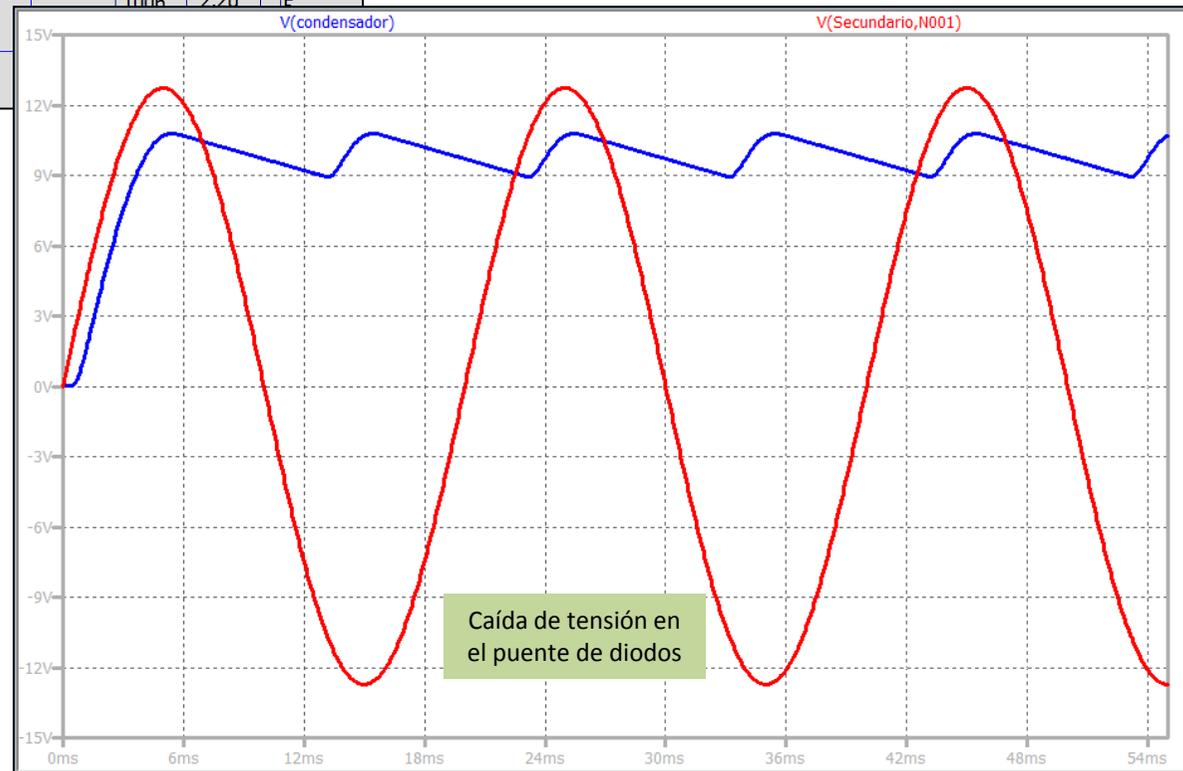




## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal

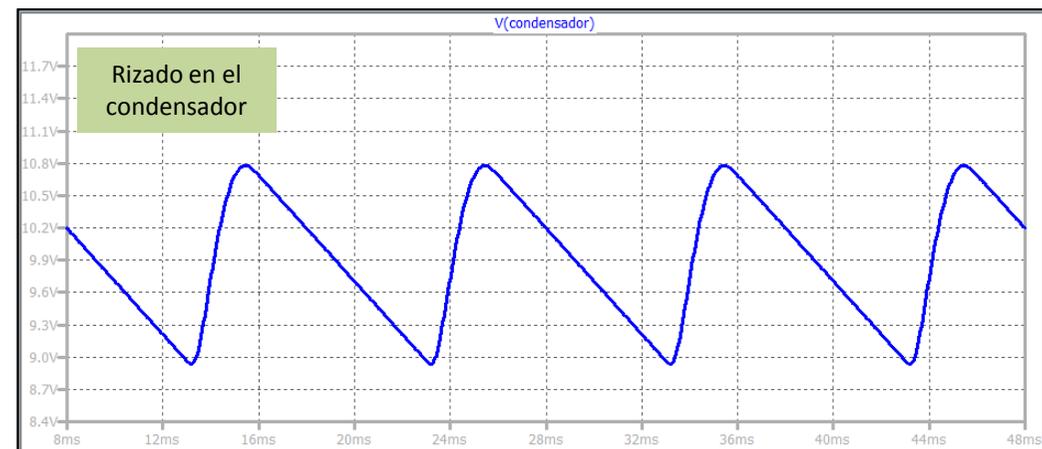
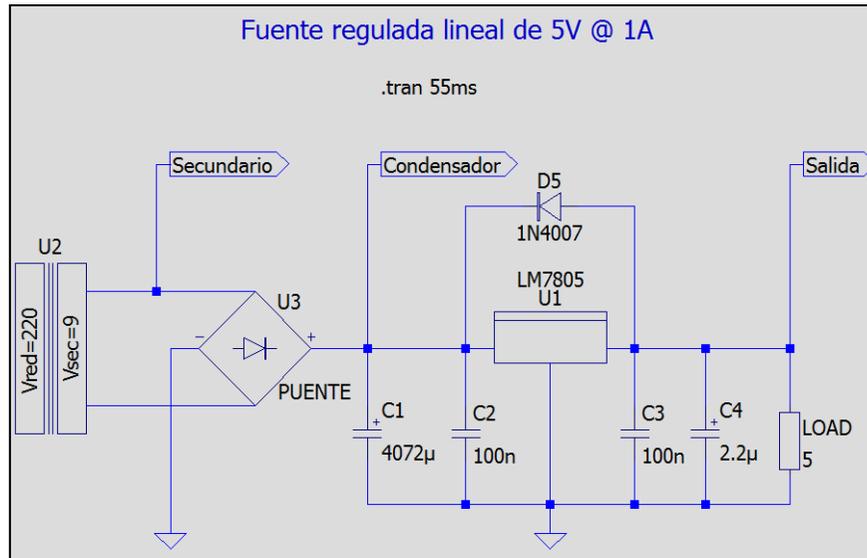


Cursor 1	
V(Secundario,N001)	
Horz: 24.980552ms	Vert: 12.72678V
Cursor 2	
V(condensador)	
Horz: 35.424876ms	Vert: 10.777569V
Diff (Cursor2 - Cursor1)	
Horz: 10.444324ms	Vert: -1.9492108V
Freq: 95.745781Hz	Slope: -186.629



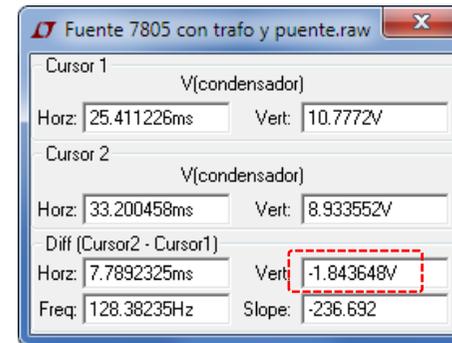
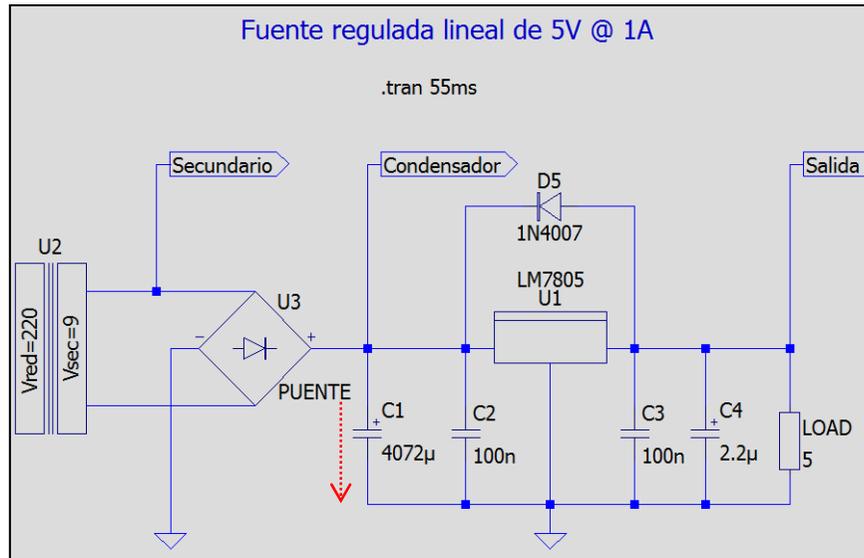


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



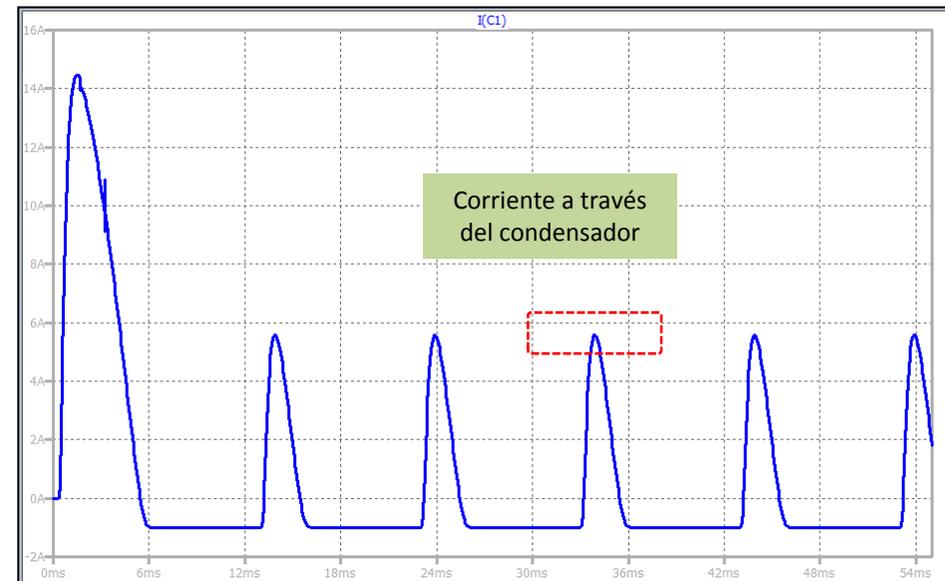
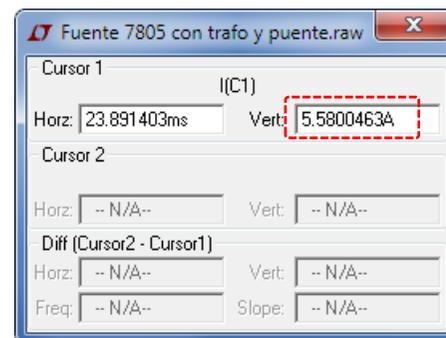


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



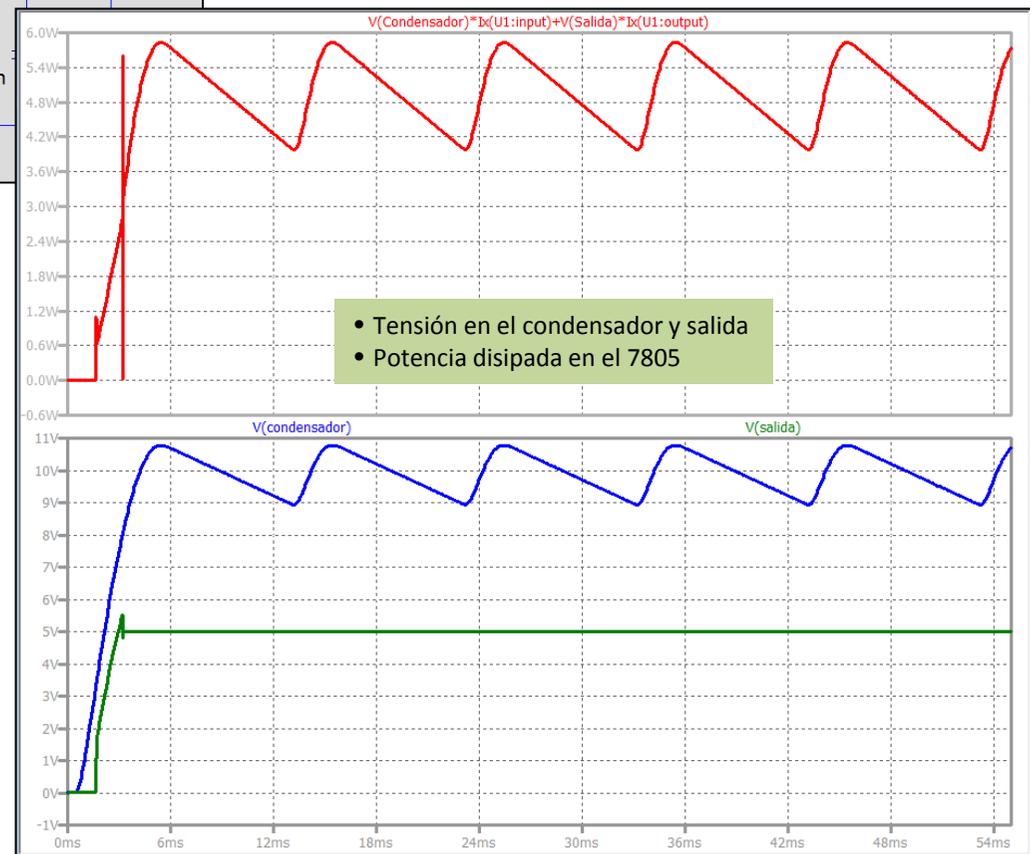
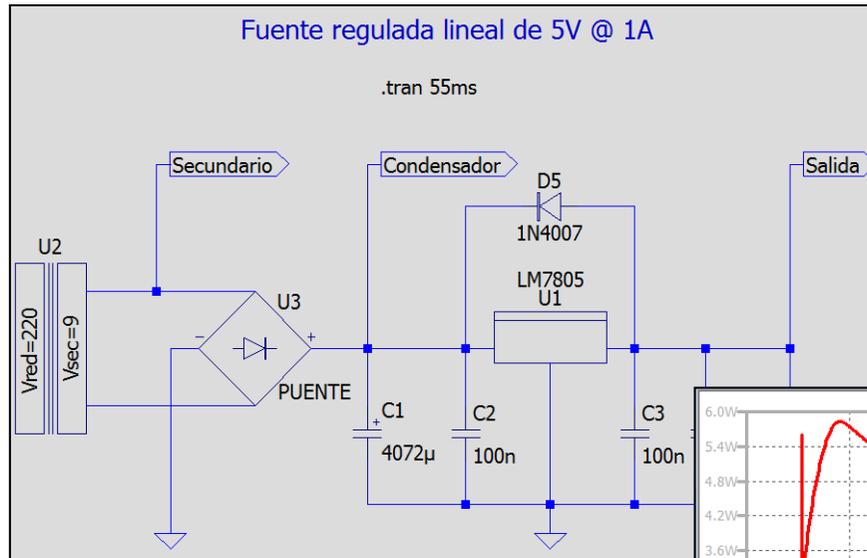
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0.004072} = 0.3908\Omega$$

$$I_C = \frac{\Delta V_{pp}}{X_C} = \frac{1.84}{0.3908} = 4.708A$$



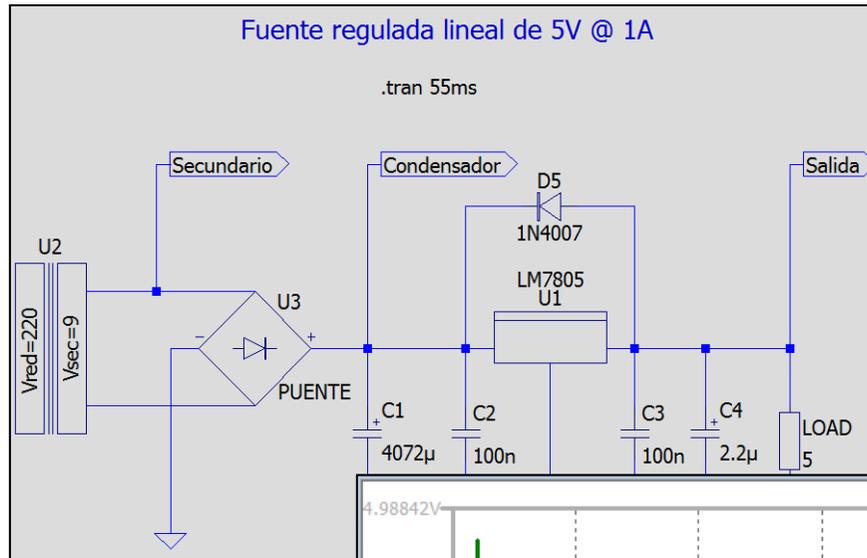


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal





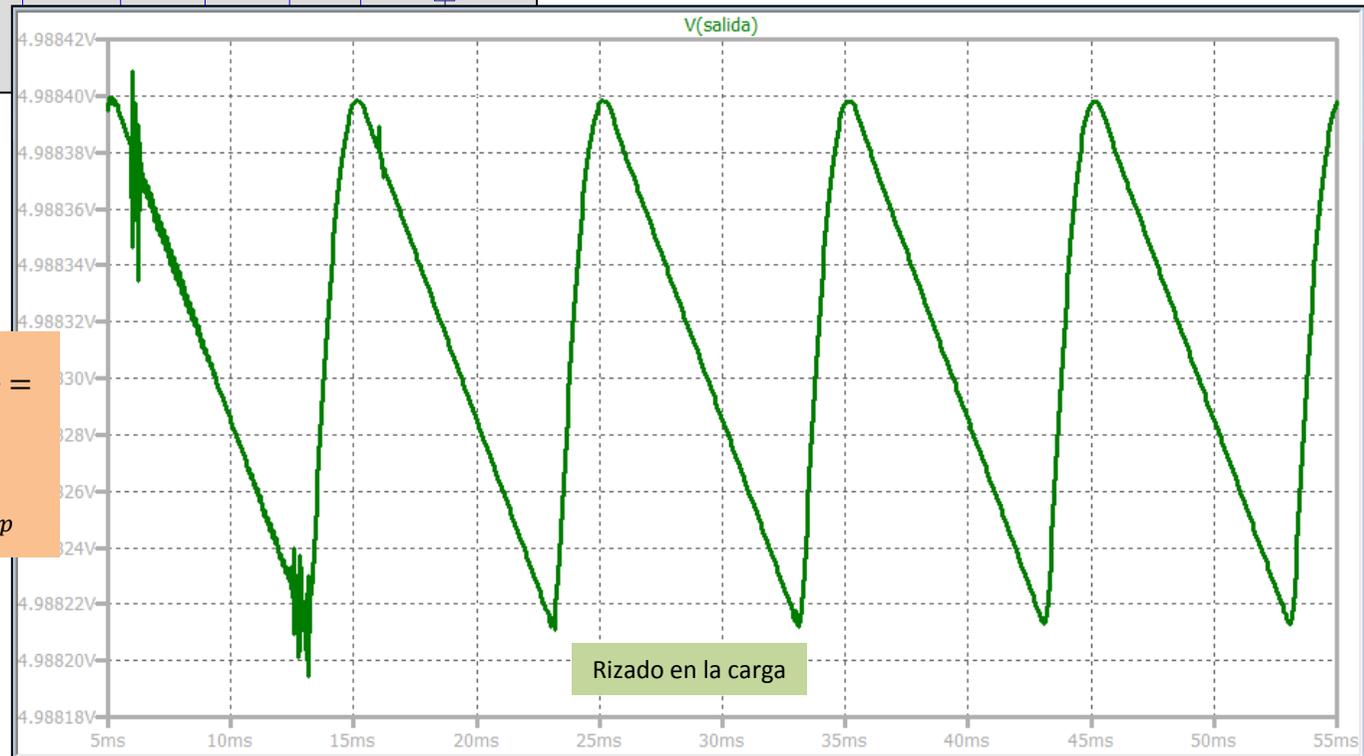
## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



Cursor 1		V(salida)	
Horz:	25.129108ms	Vert:	4.9883983V
Cursor 2		V(salida)	
Horz:	43.028169ms	Vert:	4.9882138V
Diff (Cursor2 - Cursor1)			
Horz:	17.899061ms	Vert:	-184.56981µV
Freq:	55.868852Hz	Slope:	-0.0103117

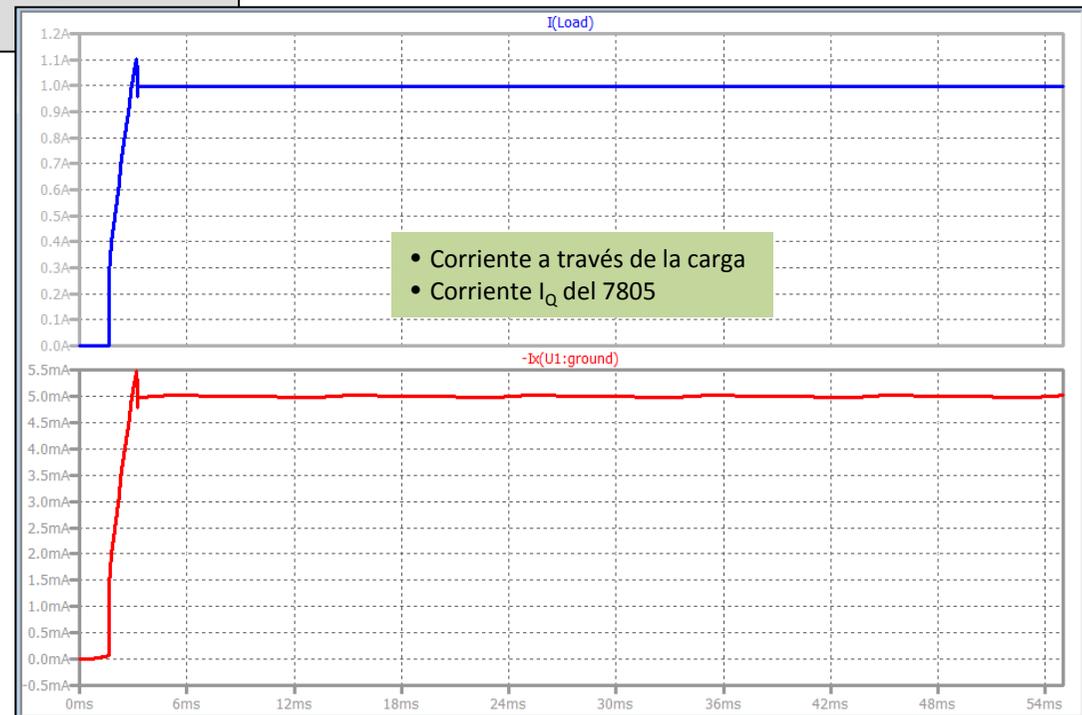
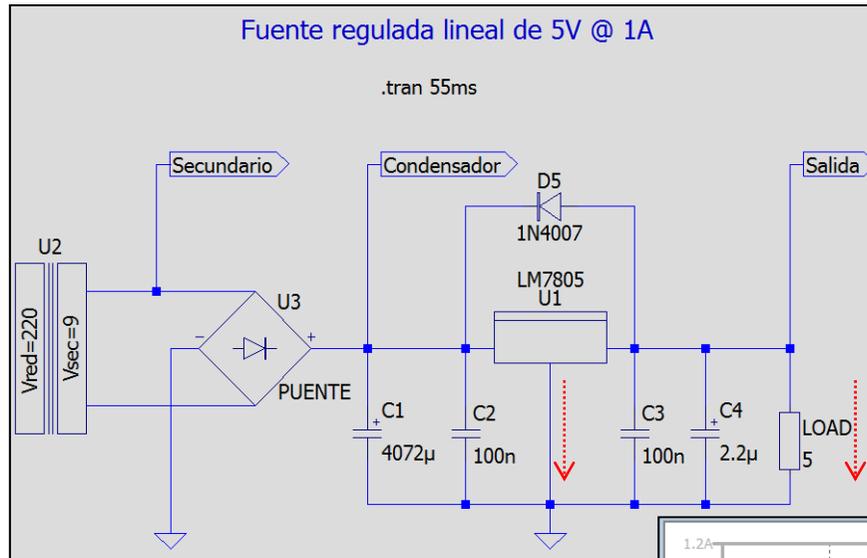
$$dB = -20 \cdot \log \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

$$\Delta V_{pp(Out)} = \frac{\Delta V_{pp(Cond)}}{10^{\frac{80dB}{20}}} = \frac{1.84V}{10000} = 0.184mV_{pp}$$



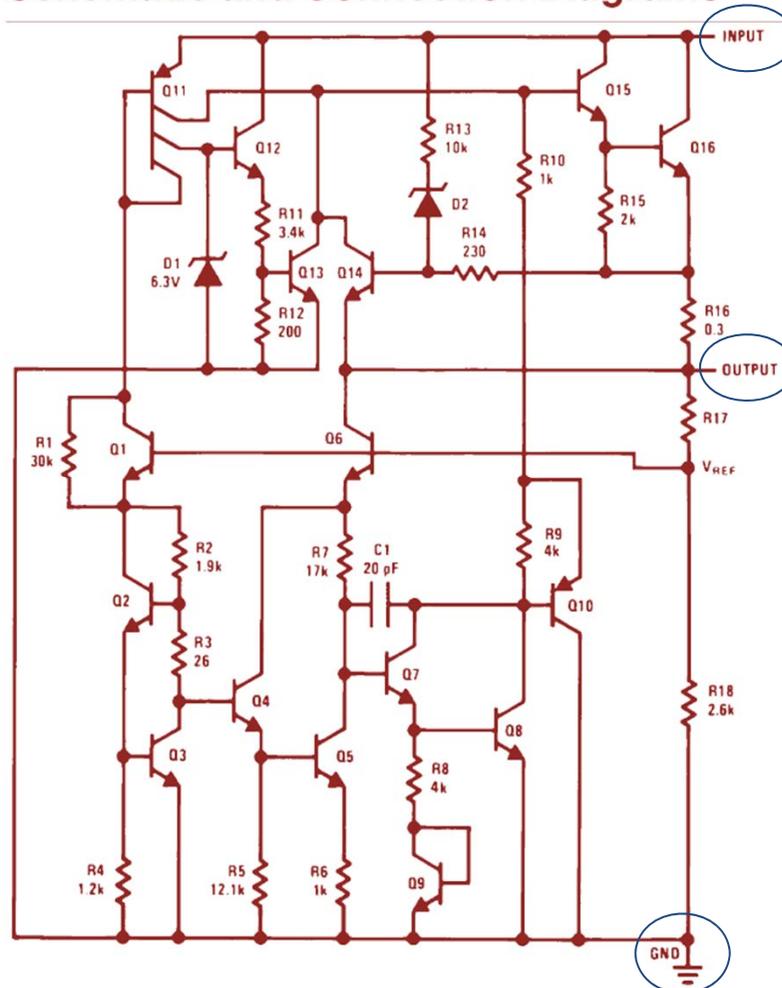


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal





## Schematic and Connection Diagrams

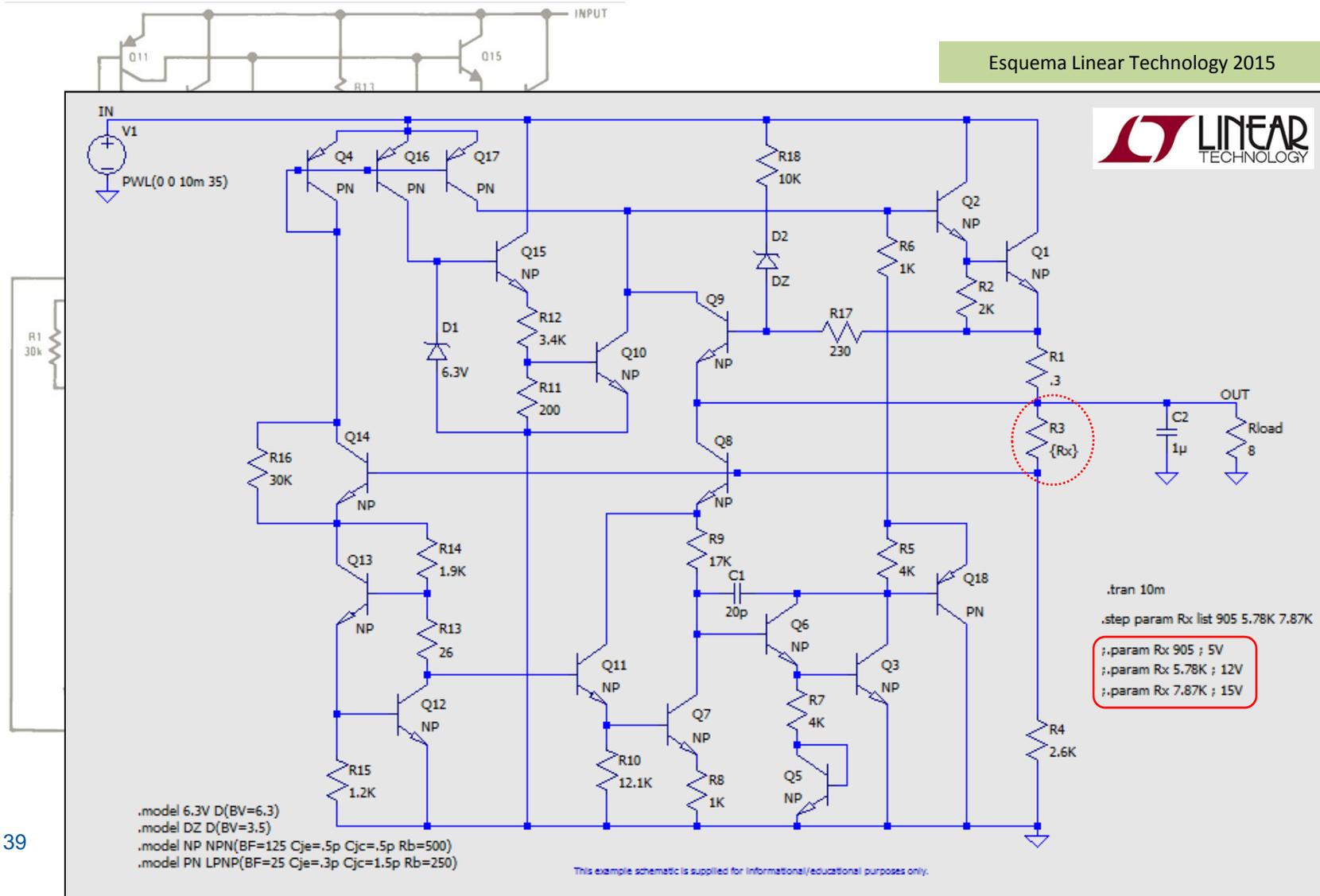


Esquema National Semiconductor 1995



## Schematic and Connection Diagrams

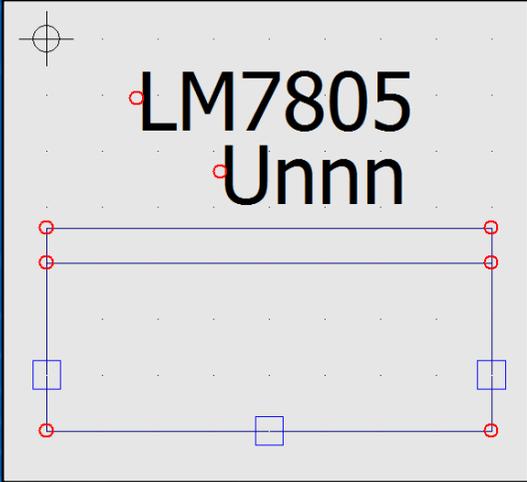
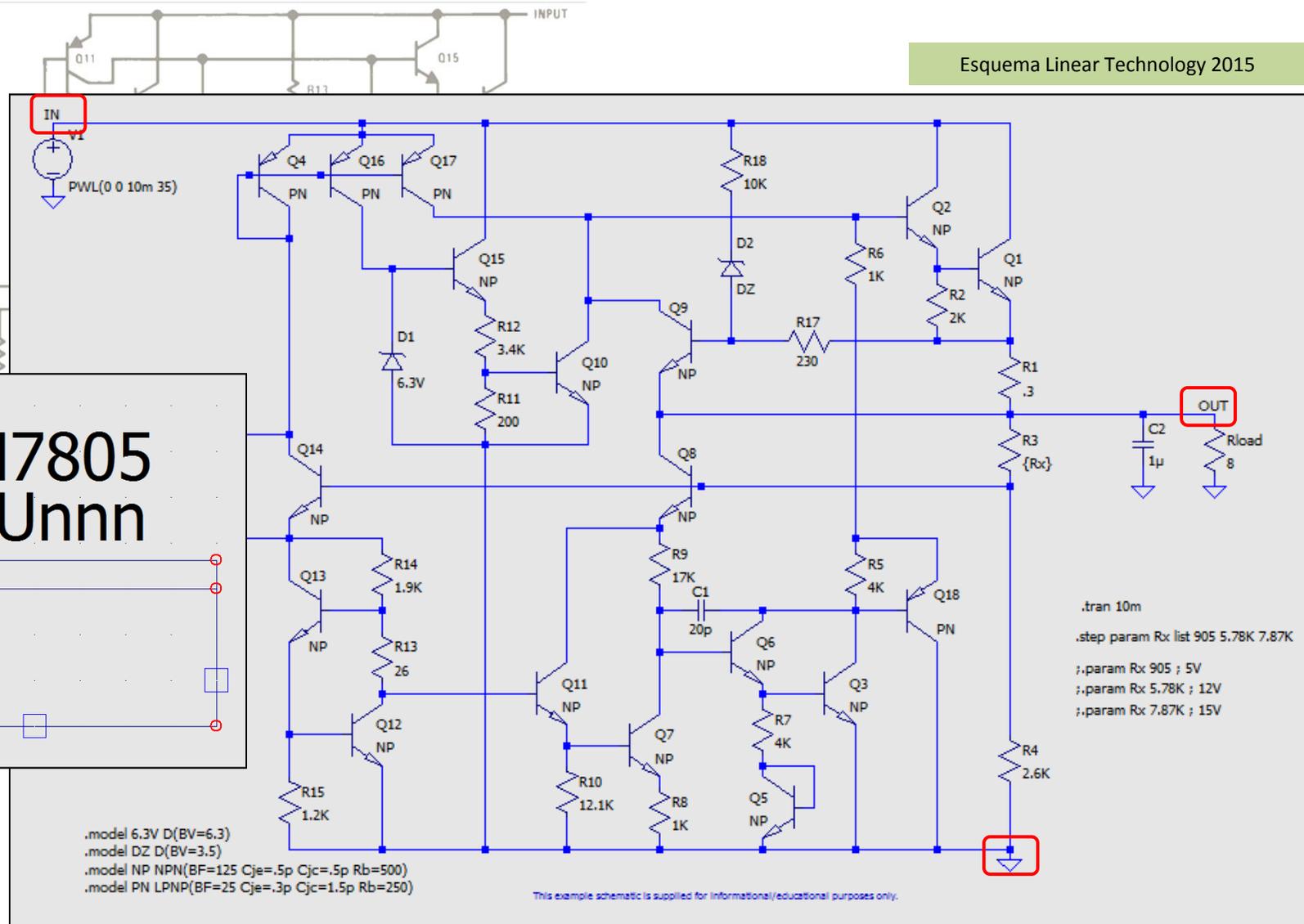
Esquema Linear Technology 2015





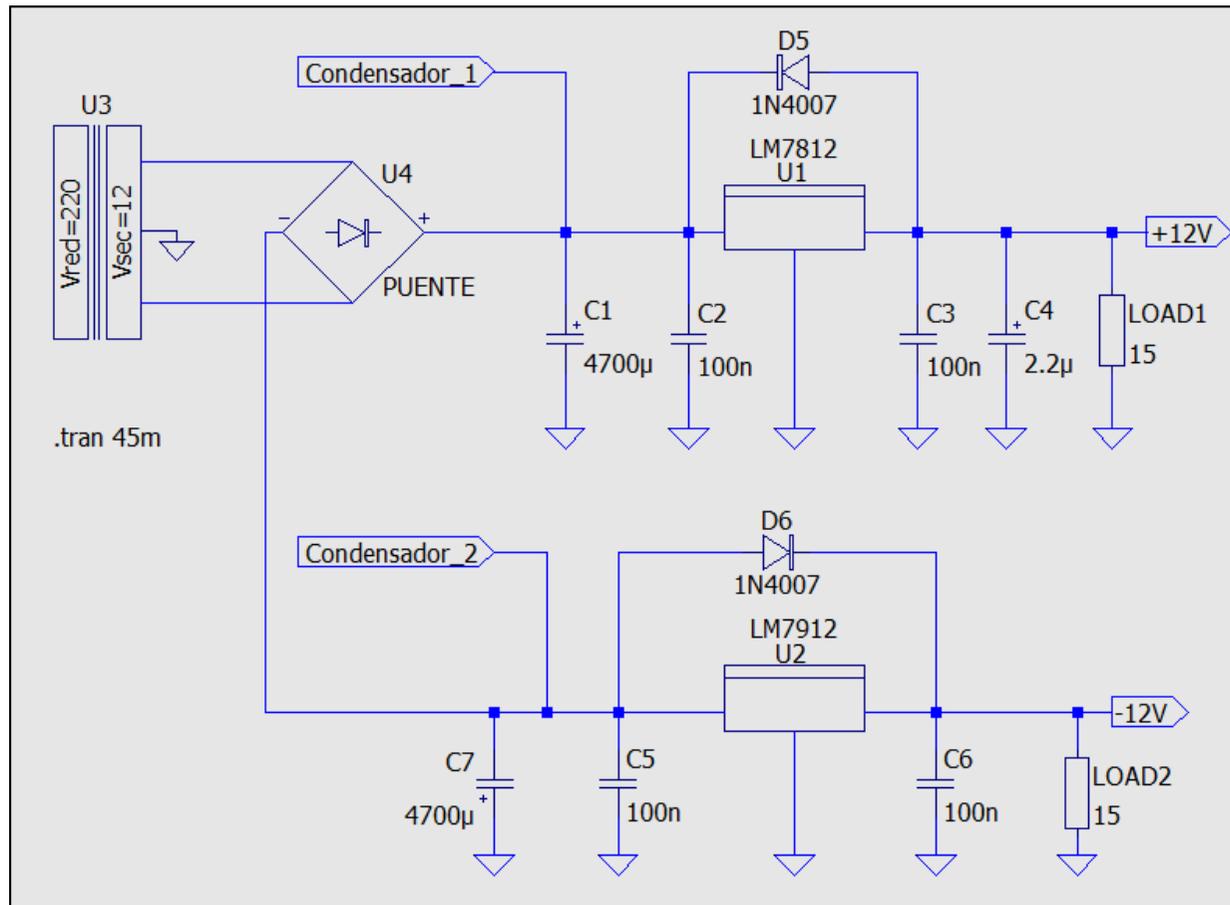
### Schematic and Connection Diagrams

Esquema Linear Technology 2015





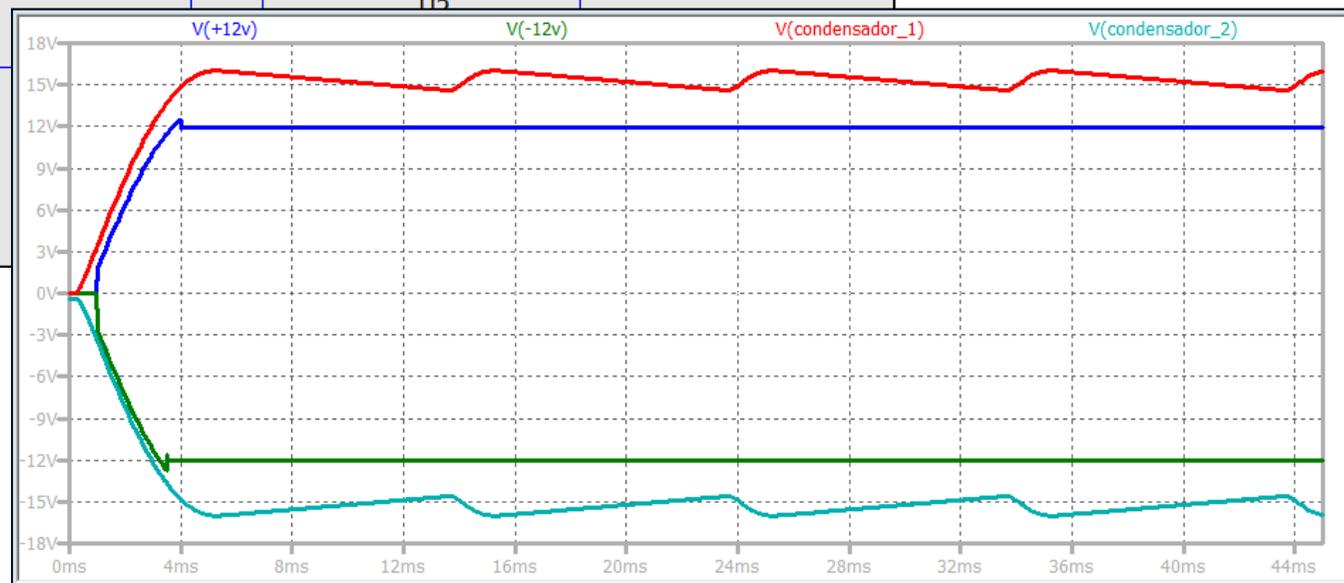
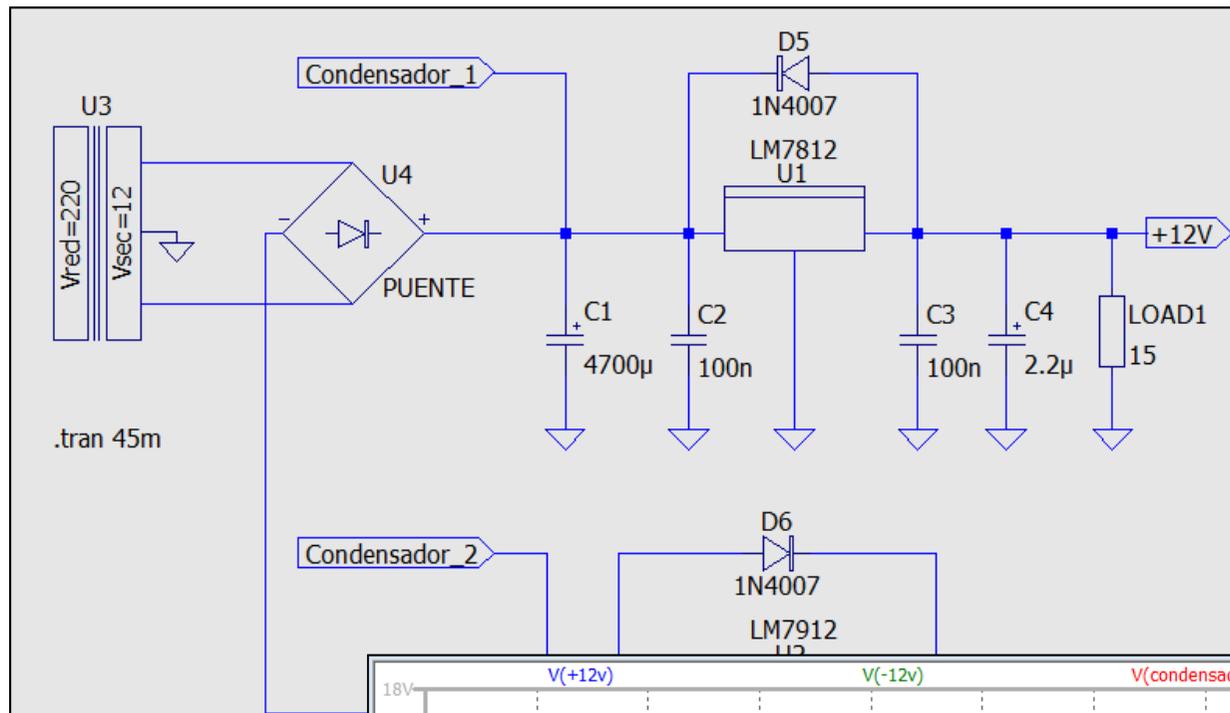
## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



Fuente simétrica  $\pm 12V$

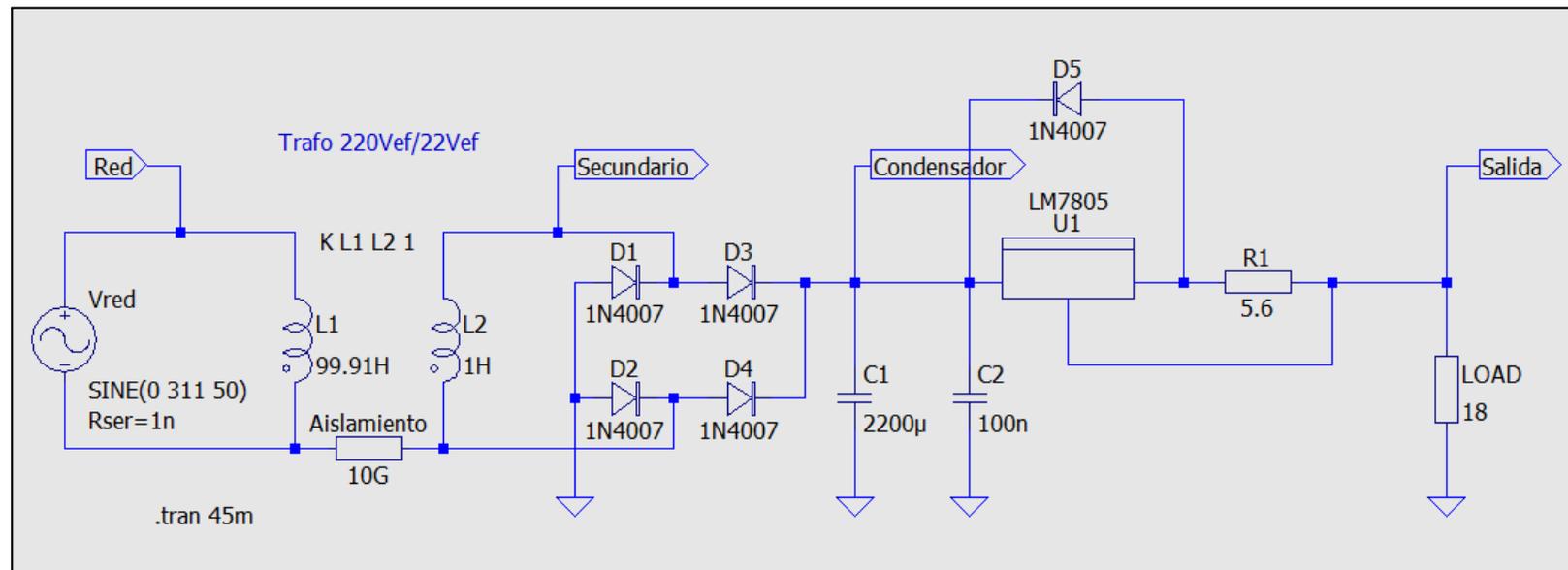


## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal





## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal

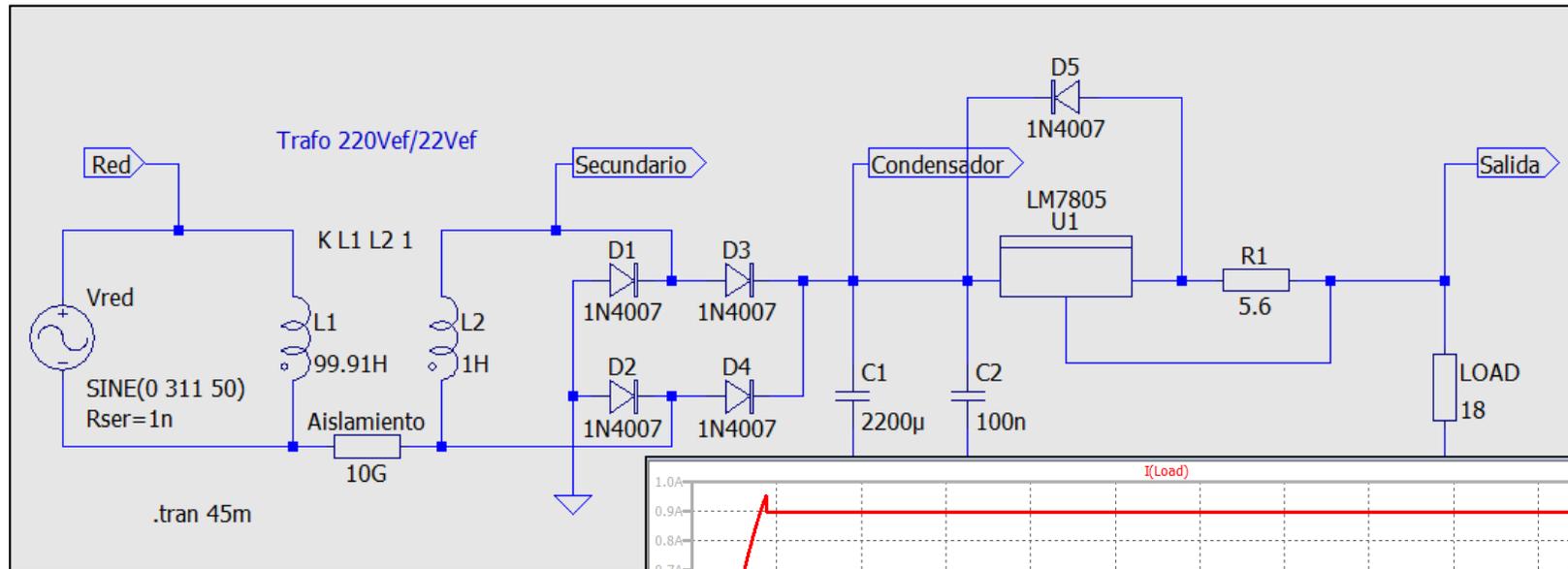


$$I_{LOAD} = \frac{V_{XX}}{R_1} + I_q$$

Fuente de corriente constante



## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal

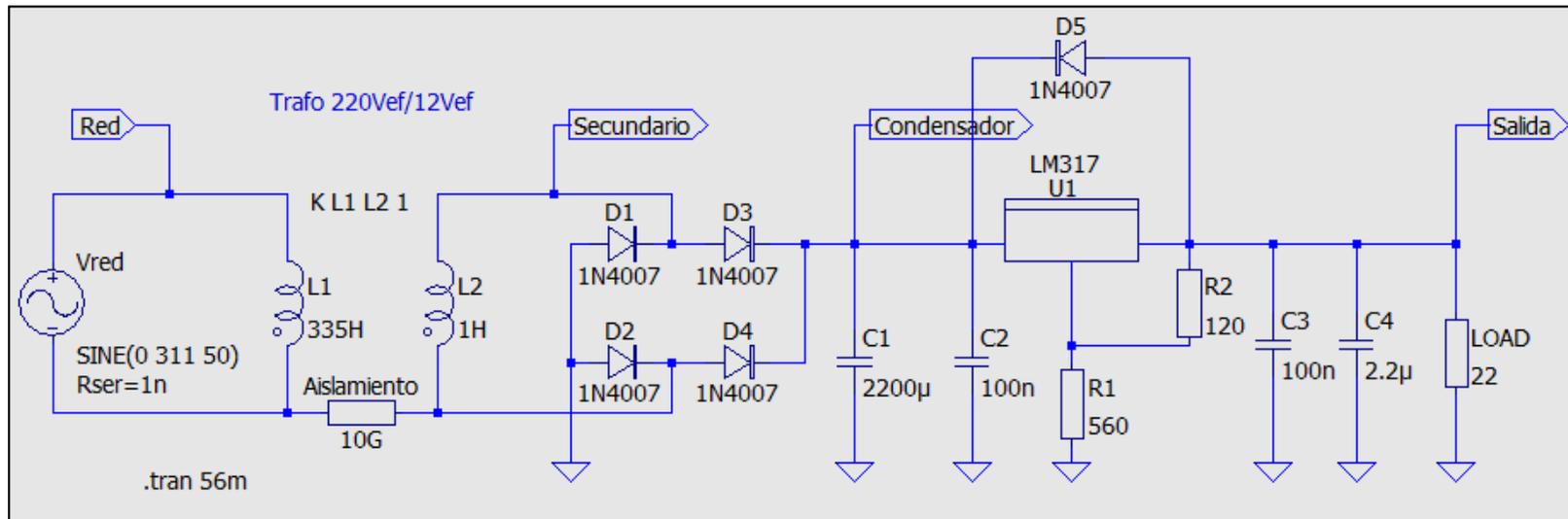


$$I_{LOAD} = \frac{V_{XX}}{R_1} + I_q$$





## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



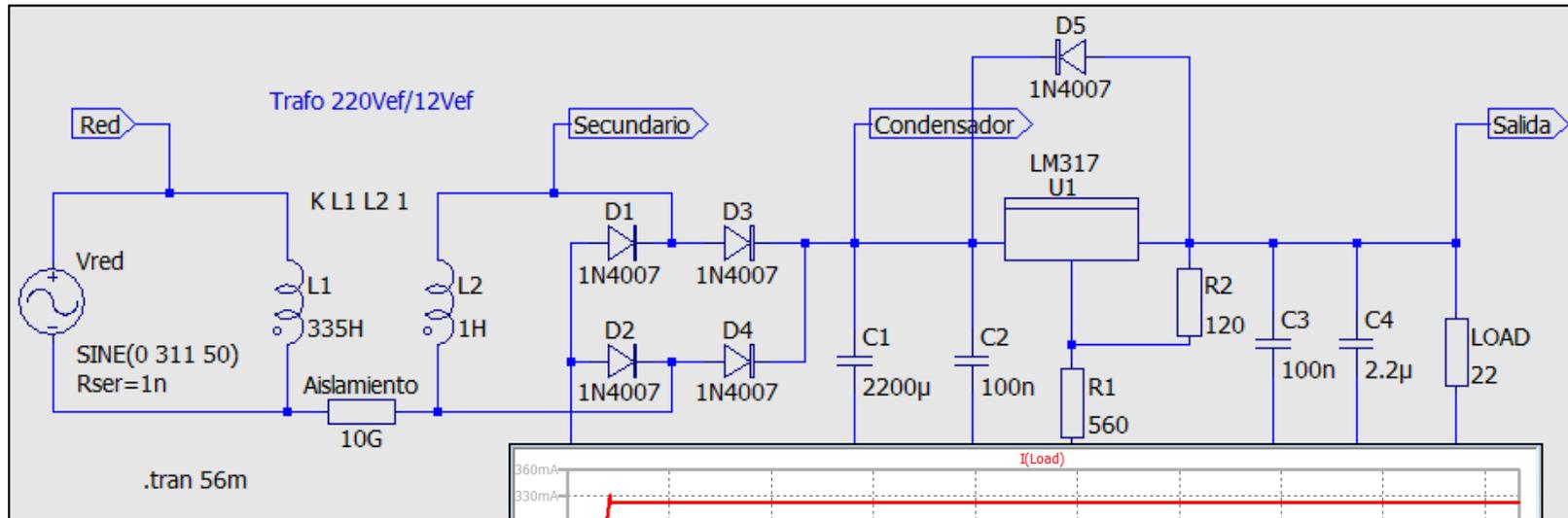
$$R_2 = \frac{V_{XX}}{5 \cdot I_q}$$

$$R_1 = \frac{V_{Out} - V_{XX}}{6 \cdot I_q}$$

Fuente regulable LM317

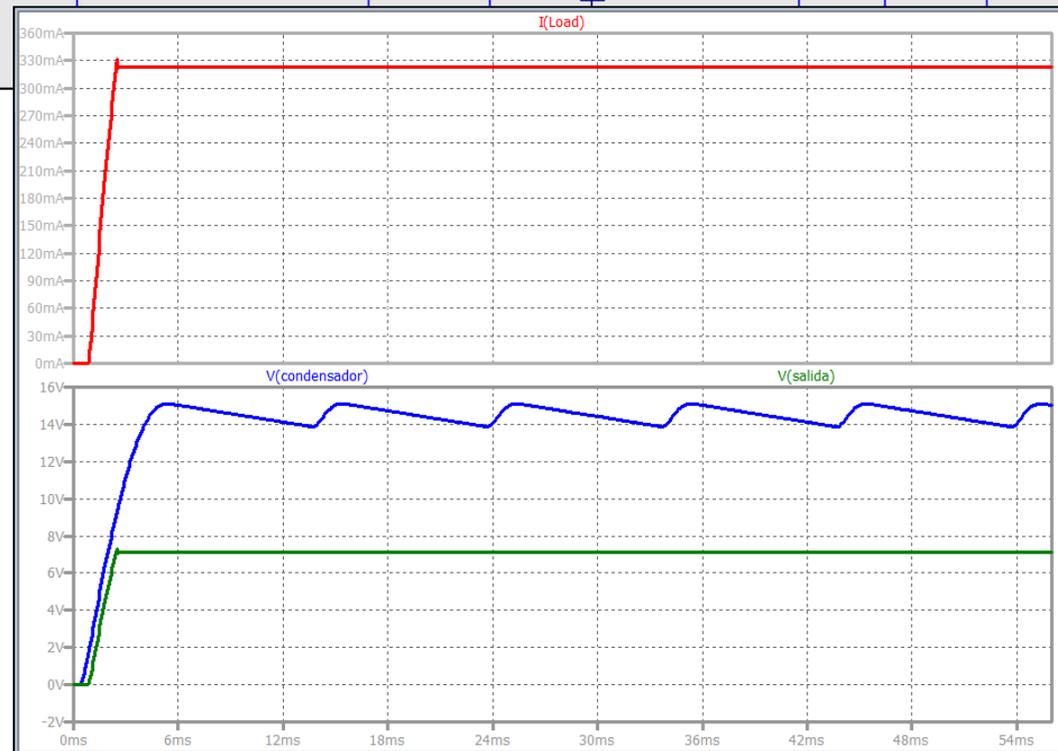


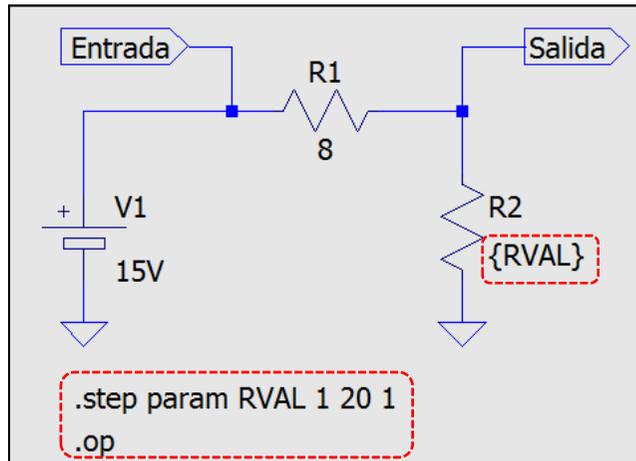
## Ejemplo de Análisis transitorio: Fuente regulada lineal



$$R_2 = \frac{V_{XX}}{5 \cdot I_q}$$

$$R_1 = \frac{V_{Out} - V_{XX}}{6 \cdot I_q}$$





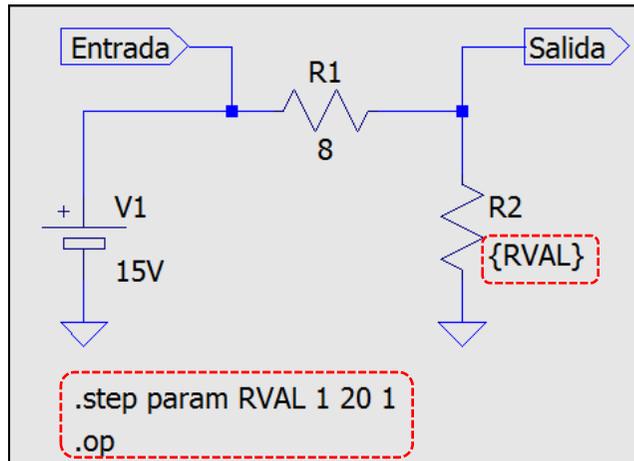
#### Teorema de máxima transferencia de potencia

IMPEDANCIA DE SALIDA = IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de la salida de una fuente debe ser idéntica a la impedancia de entrada de la carga que se conecte.



## Ejemplo de Punto de Operación: Máxima transferencia de potencia



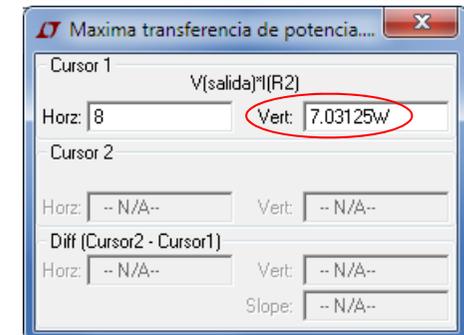
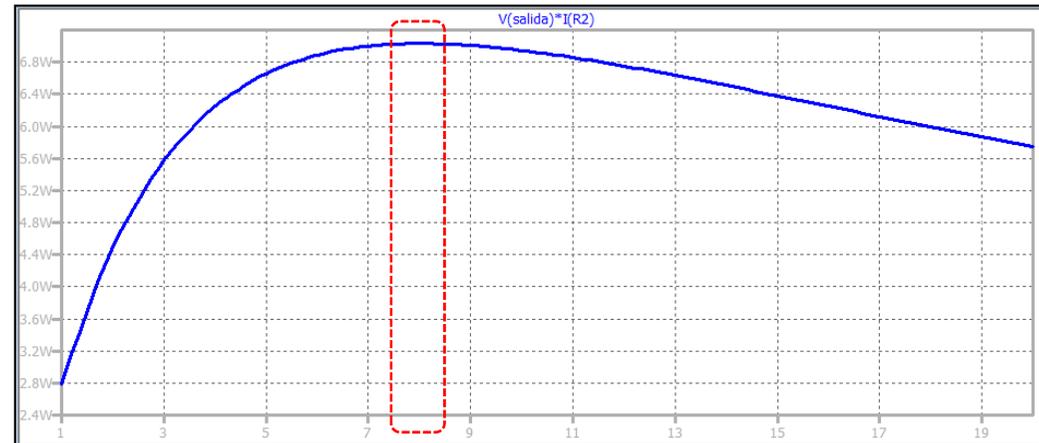
### Teorema de máxima transferencia de potencia

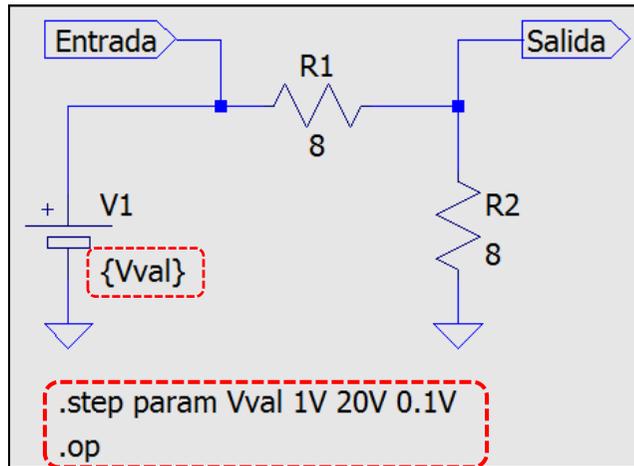
IMPEDANCIA DE SALIDA = IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de la salida de una fuente debe ser idéntica a la impedancia de entrada de la carga que se conecte.

VCC = 15V @ 8Ω → 7.03W

**TDA2003 → 10W**





**Teorema de máxima transferencia de potencia**

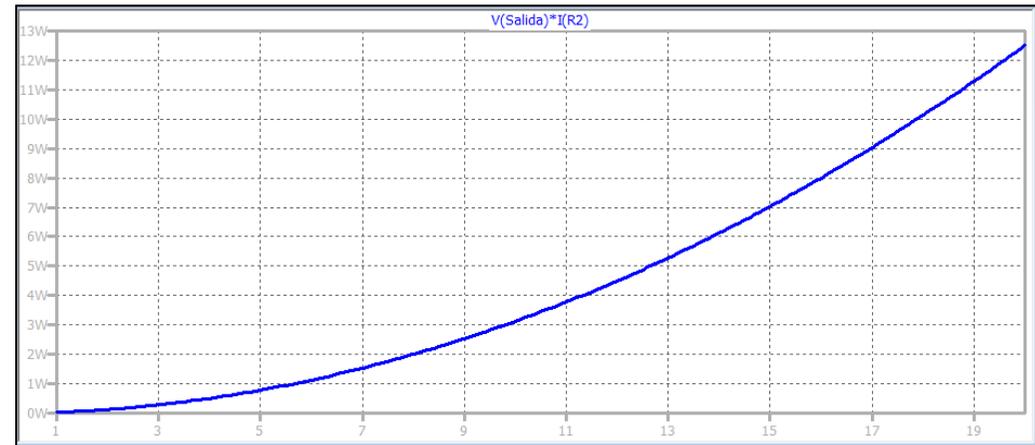
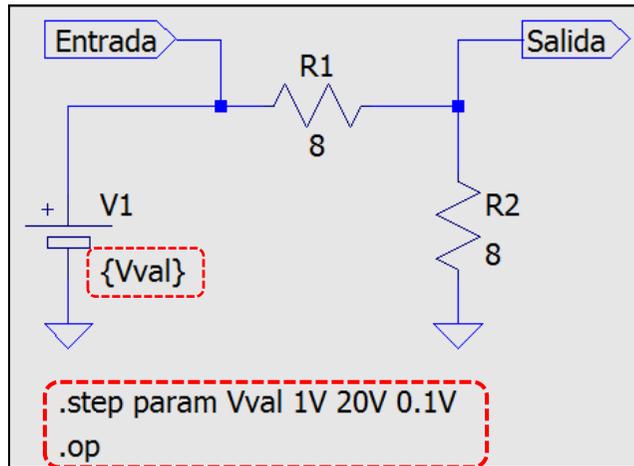
IMPEDANCIA DE SALIDA = IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de la salida de una fuente debe ser idéntica a la impedancia de entrada de la carga que se conecte.

$$P_{ef_{Altavoz}} = \frac{V_{ef}^2}{Z} \cong \frac{\left(\frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R} \cong \frac{V_P^2}{2R}$$



## Ejemplo de Punto de Operación: Máxima transferencia de potencia



### Teorema de máxima transferencia de potencia

IMPEDANCIA DE SALIDA = IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de la salida de una fuente debe ser idéntica a la impedancia de entrada de la carga que se conecte.

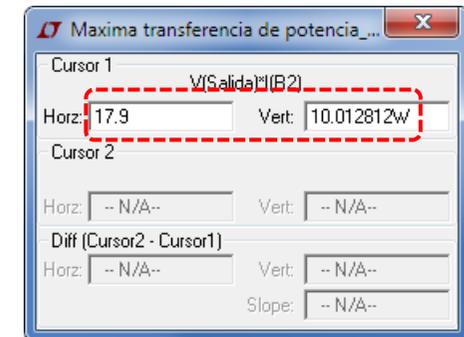
$$P_{Max} = V \cdot I = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_{CC} = \frac{V_{CC} \cdot I_{CC}}{2}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{2R} \quad ; \quad P_{Max} = \frac{V_{CC} \cdot \frac{V_{CC}}{2R}}{2} = \frac{V_{CC}^2}{4R}$$

$$V_{CC} = \sqrt{4R \cdot P_{Max}} = \sqrt{32 \cdot 10} = 17.88V$$

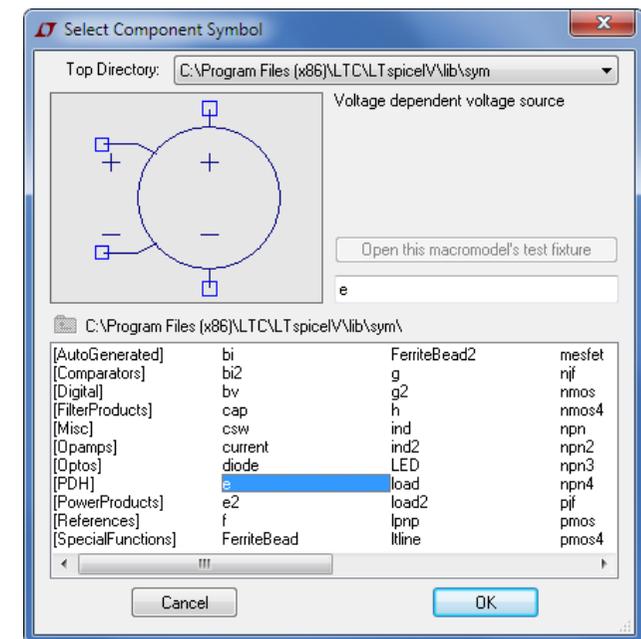
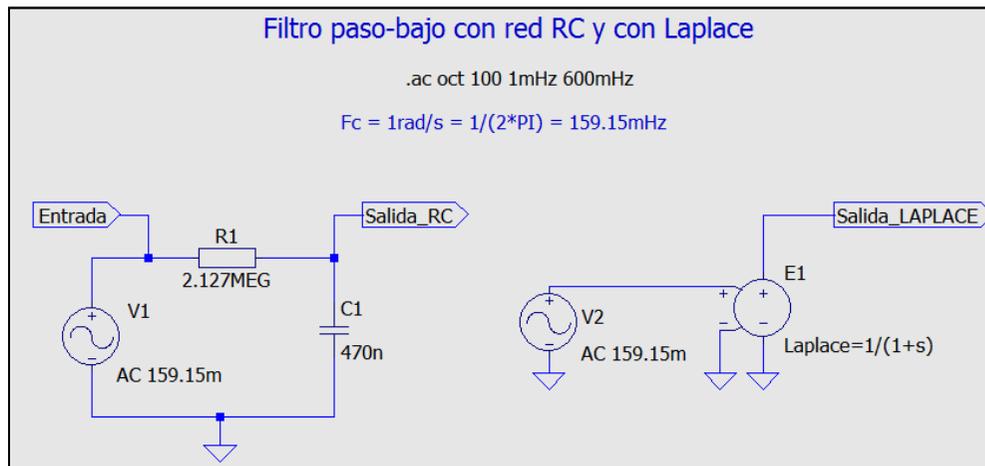
Potencia del TDA2003 = 10W  
Altavoz = 8Ω

$$P_{efAltavoz} = \frac{V_{ef}^2}{Z} \cong \frac{\left(\frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}}\right)^2}{R} \cong \frac{V_P^2}{2R}$$



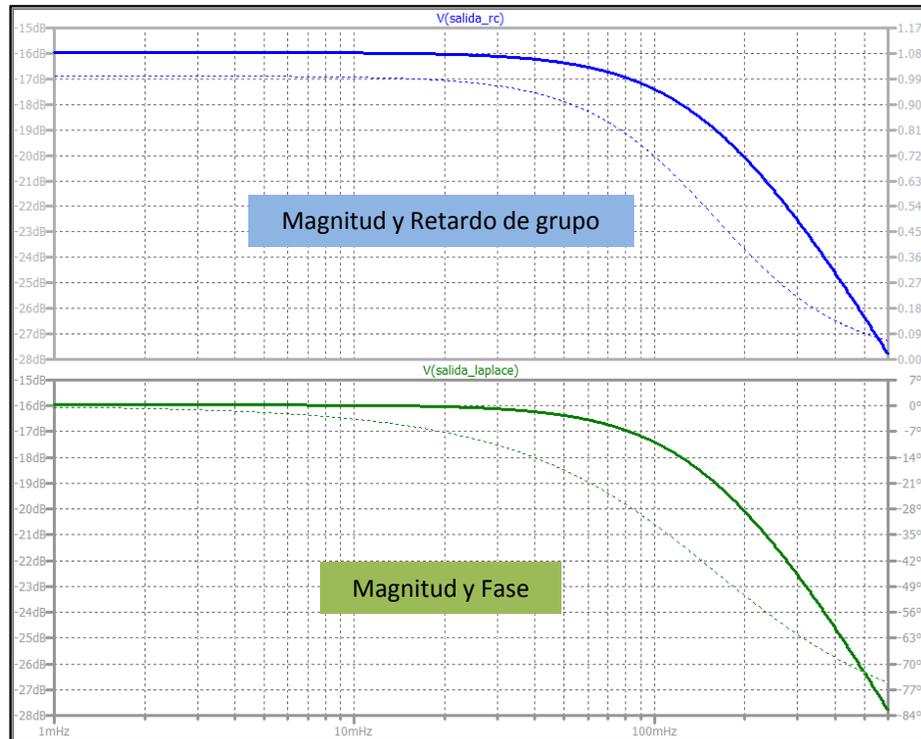
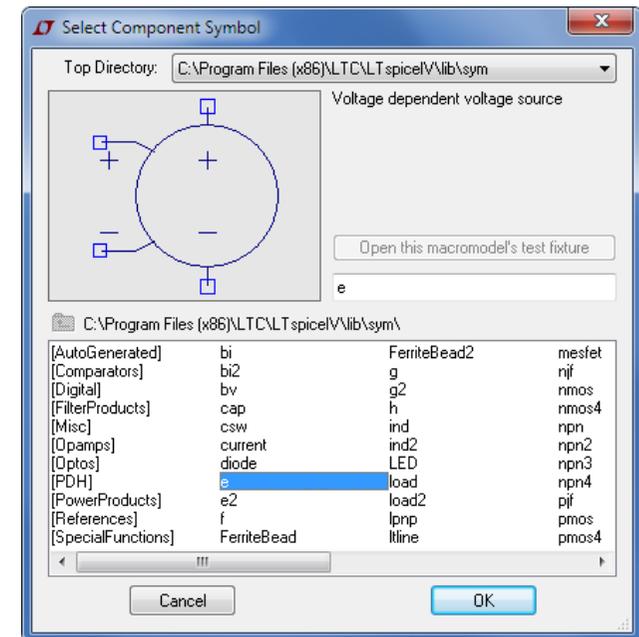
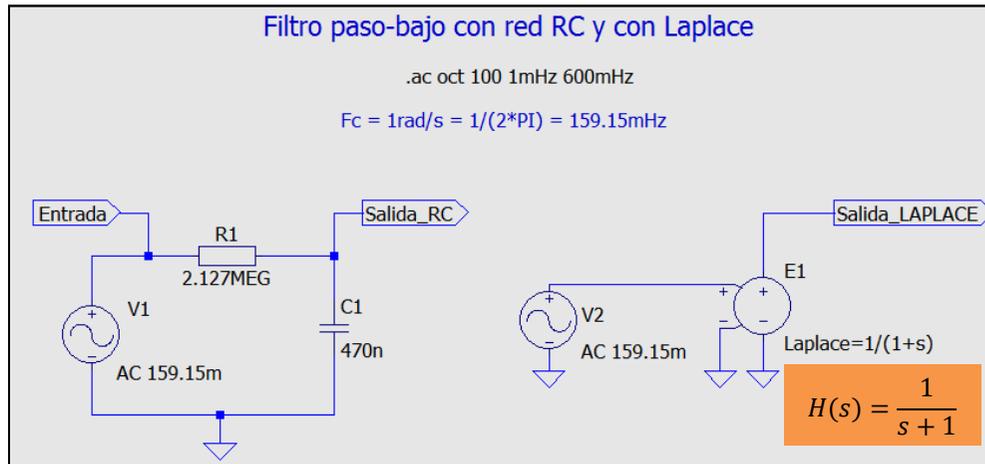


## Ejemplo de Función Laplaciana: Filtro paso bajo





## Ejemplo de Función Laplaciana: Filtro paso bajo



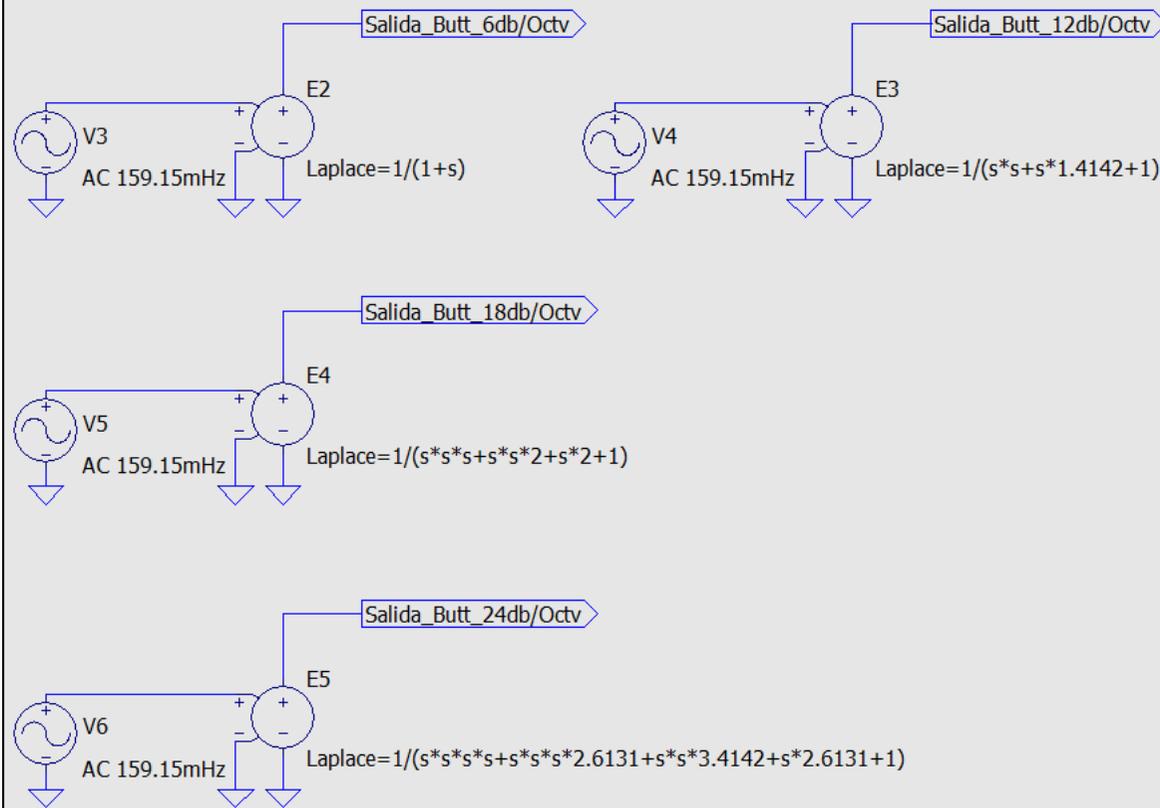


## Ejemplo de Función Laplaciana: Filtro paso bajo Butterworth

### Filtro paso-bajo Butterworth con 6, 12, 18 y 24dB/Octava

.ac oct 100 0.005Hz 400mHz

Fc = 1rad/s = 159.15mHz

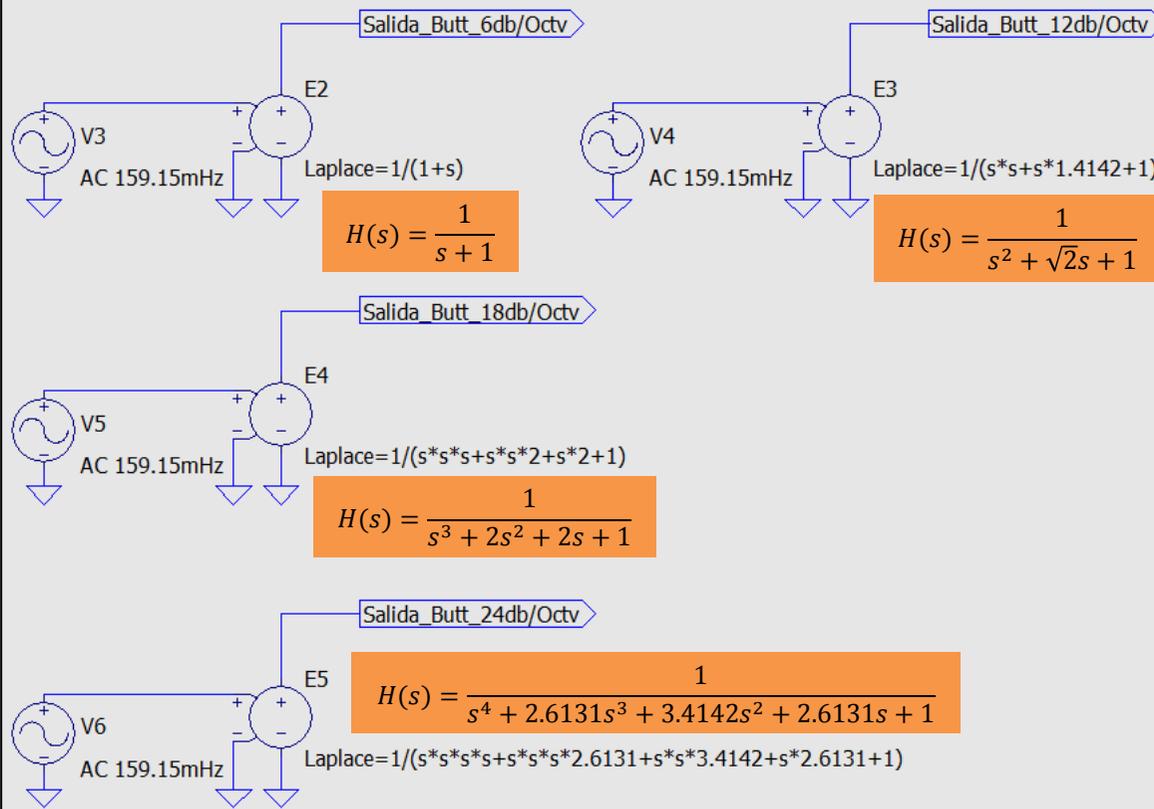




Filtro paso-bajo Butterworth con 6, 12, 18 y 24dB/Octava

.ac oct 100 0.005Hz 400mHz

Fc = 1rad/s = 159.15mHz



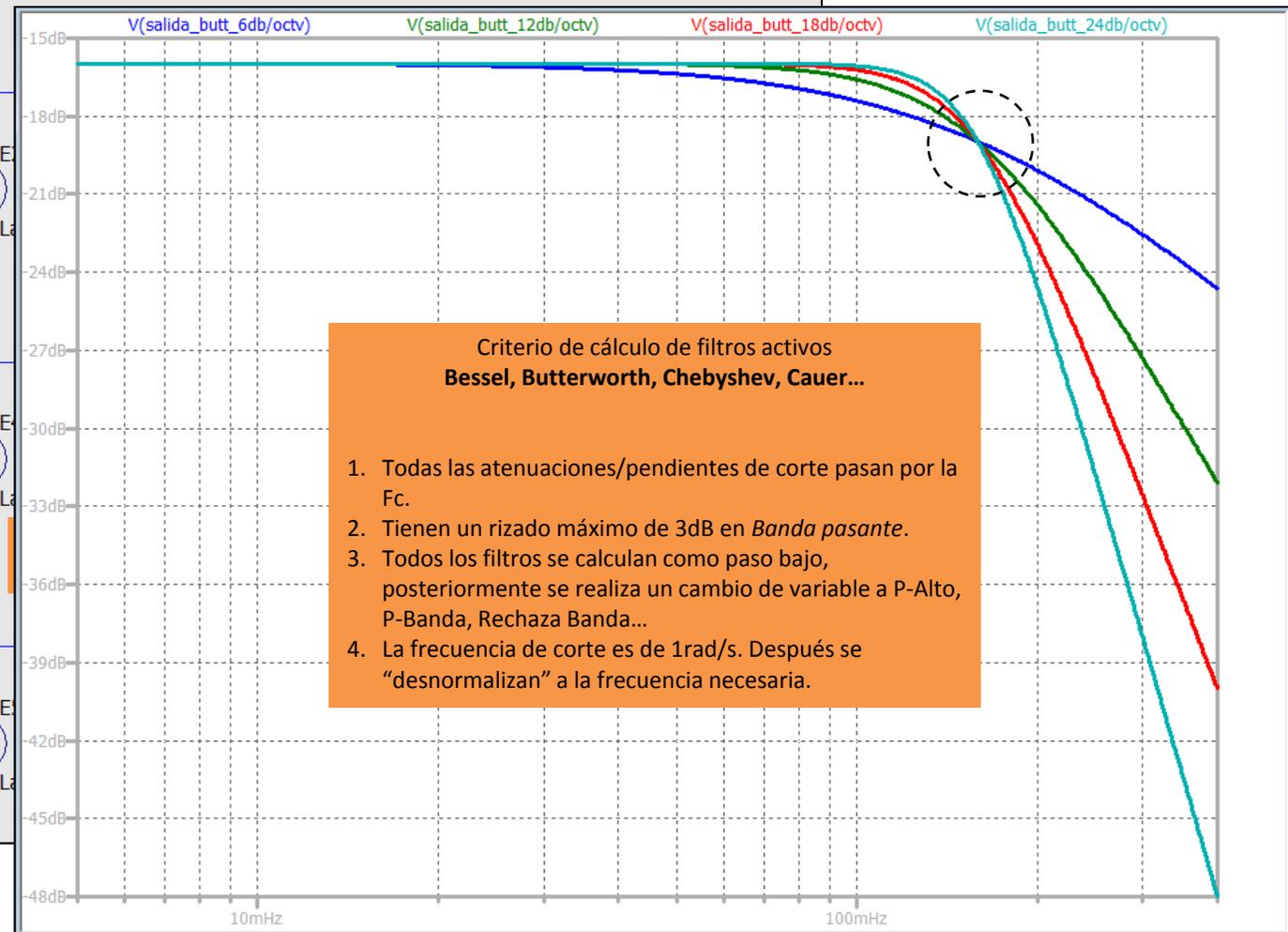
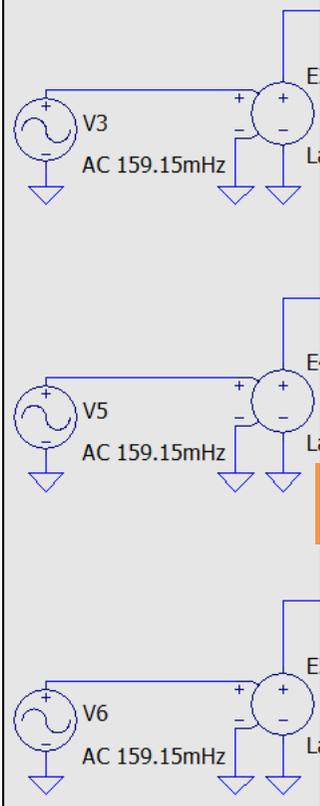


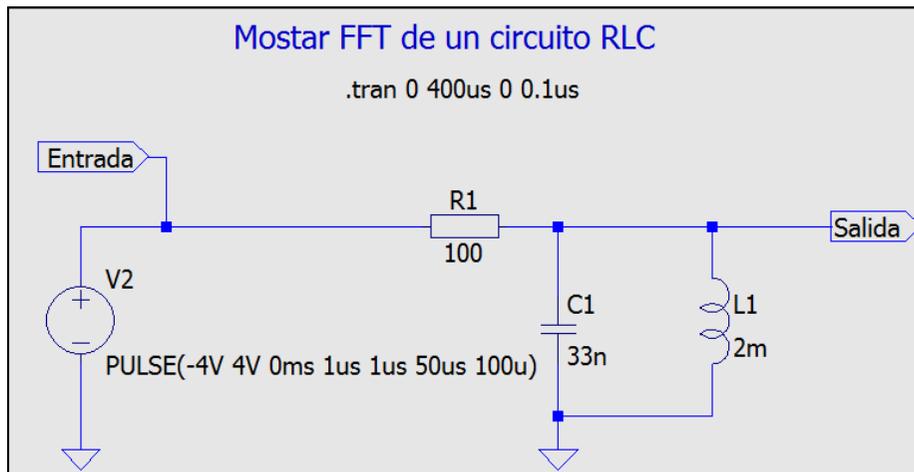
## Ejemplo de Función Laplaciana: Filtro paso bajo Butterworth

### Filtro paso-bajo Butterworth con 6, 12, 18 y 24dB/Octava

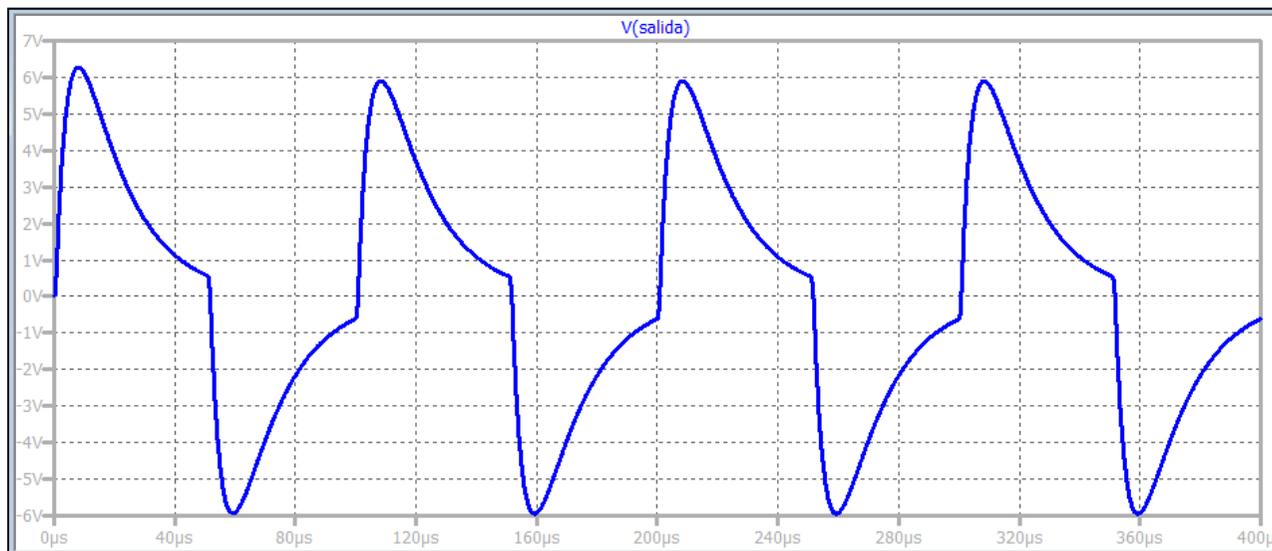
.ac oct 100 0.005Hz 400mHz

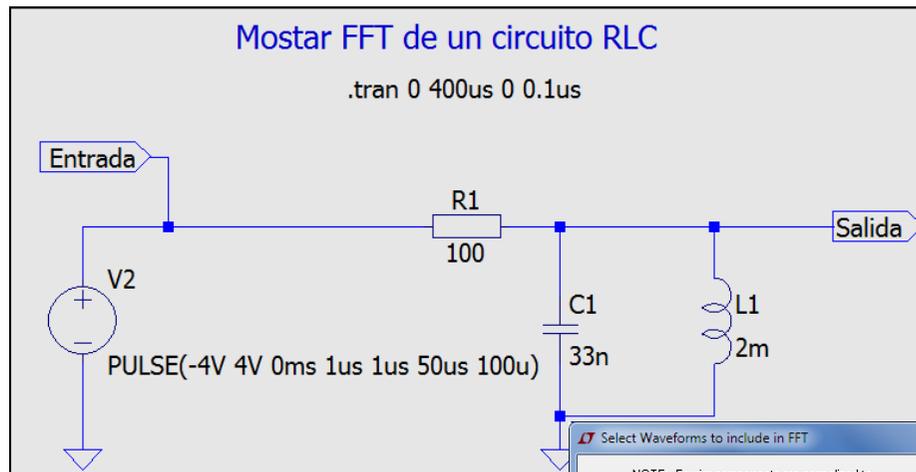
Fc = 1rad/s = 159.15mHz





Mostrar señal transitoria





- Zoom Area Ctrl+Z
- Zoom Back Ctrl+B
- Zoom to Fit Ctrl+E
- Pan
- Autorange Y-axis Ctrl+Y
- Manual Limits
- Autoranging
- Visible Traces
- Add Trace Ctrl+A
- Delete Traces F5
- Select Steps
- Add Plot Pane
- Delete this Pane
- Sync. Horiz. Axes
- Marching Waveforms
- Grid
- Reset Colors
- Mark Data Points
- Eye Diagram
- View
- SPICE Error Log Ctrl+L

#### Select Waveforms to include in FFT

NOTE: Fourier components are normalized to correspond to the time domain RMS amplitude.  
Ctrl-Click to toggle

OK Cancel

V(entrada)  
V(c1) [selected]  
I(L1)  
I(R1)  
I(V2)

Number of data point samples in time: 262144

Quadratic interpolate uncompressed data

Time range to include

Start Time: 0s  Use Extent of Simulation Data  
 Use current zoom Extent  
End Time: 400us  Specify a time range

Binomial Smoothing done before FFT and windowing

Number of Points: 3

Windowing (Periodic and normalized to unit area)

Windowing Function: [none]

Kaiser-Bessel Parameter Beta: 2

Preview Window

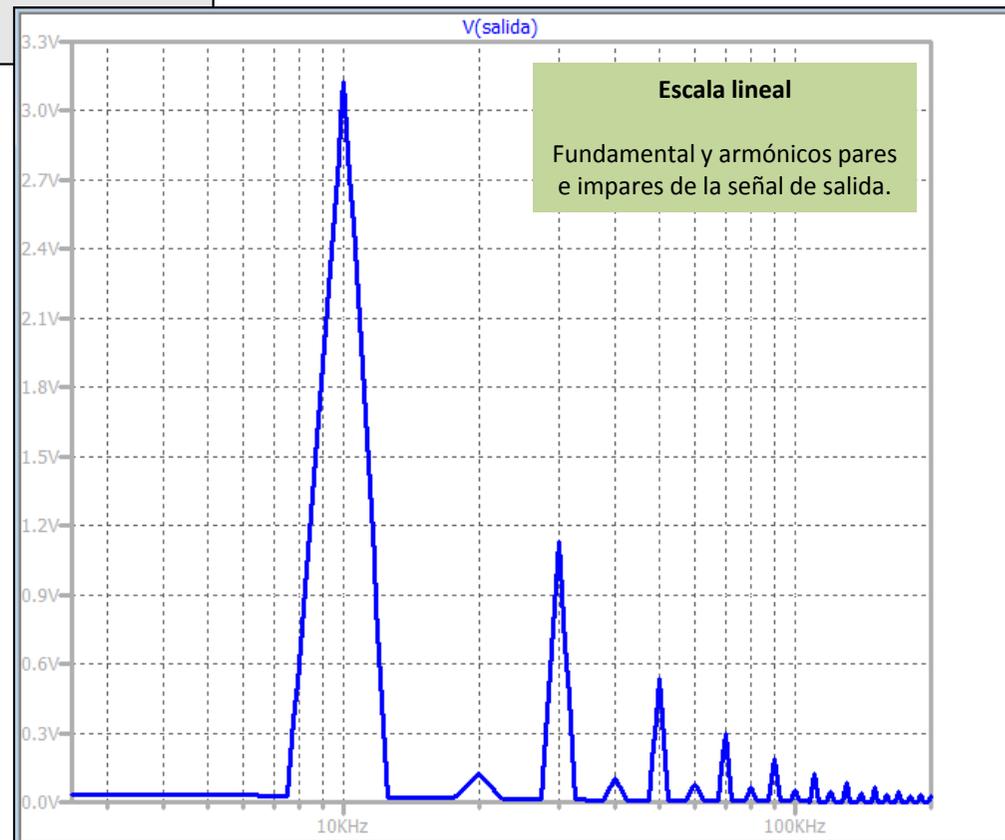
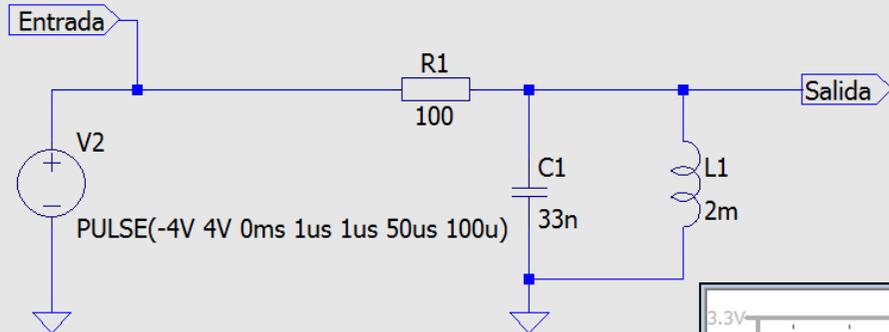
NOTE: The DC component is removed before windowing.

Reset to Default Values



### Mostar FFT de un circuito RLC

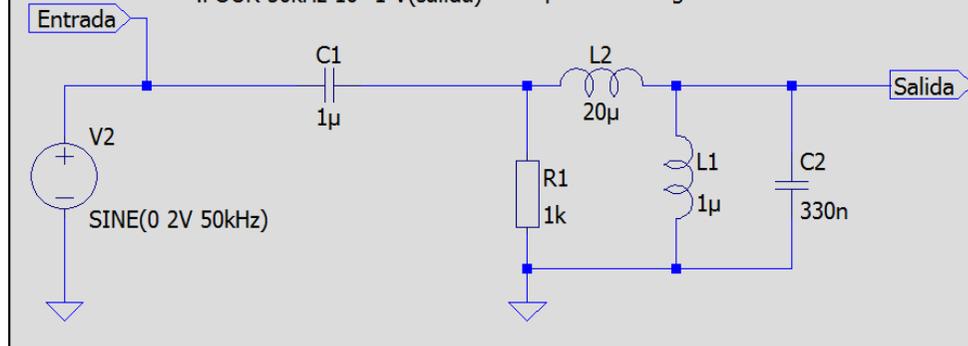
.tran 0 400us 0 0.1us





### Mostrar FFT de un circuito RLC

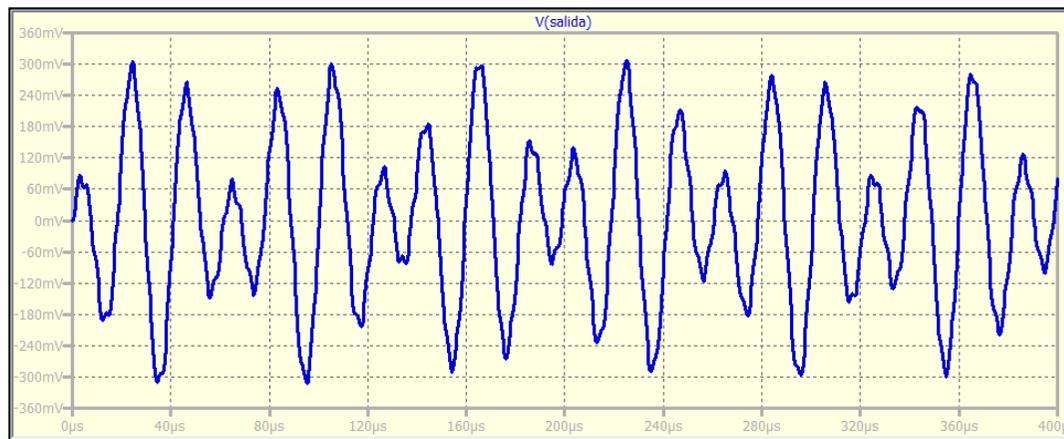
```
.tran 400us .options plotwinsize=0  
.FOUR 50kHz 10 -1 V(salida) .options numdgt=7
```

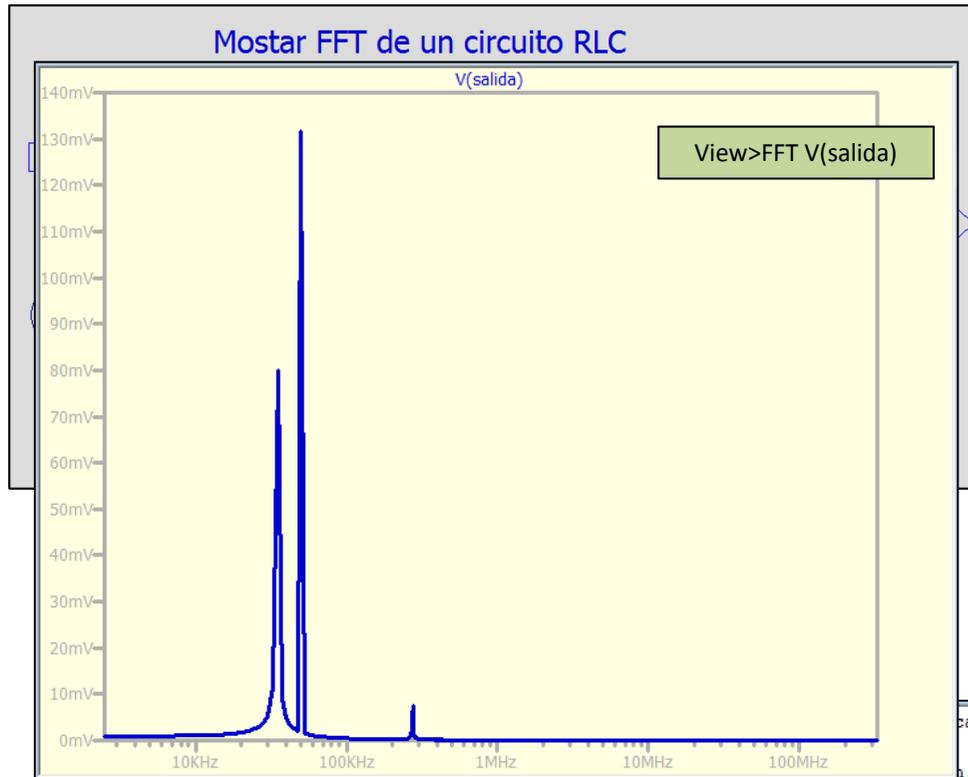


### Modificaciones

Si deseamos mostrar la FFT con suficiente calidad, deberemos añadir algunos cambios.

1. **.options plotwinsize=0** para máxima tasas de muestreo.
2. **.options numdgt=7** para que LTspice utilice variables de doble precisión en sus cálculos.
3. **.FOUR 50kHz 10 -1 V(salida)** para mostrar, con texto, los diferentes armónicos, el valor de continua y la distorsión armónica total (THD). Todo ello con el "Spice Error Log" (CTRL+L). Con este comando de punto (.FOUR), mostrará la FFT a partir de 50kHz, los diez armónicos siguientes y sobre todas las frecuencias posibles de la variable tensión de salida.





#### Modificaciones

Si deseamos mostrar la FFT con suficiente calidad, deberemos añadir algunos cambios.

1. **.options plotwinsize=0** para máxima tasas de muestreo.
2. **.options numdgt=7** para que LTspice utilice variables de doble precisión en sus cálculos.
3. **.FOUR 50kHz 10 -1 V(salida)** para mostrar, con texto, los diferentes armónicos, el valor de continua y la distorsión armónica total (THD). Todo ello con el "Spice Error Log" (CTRL+L). Con este comando de punto (.FOUR), mostrará la FFT a partir de 50kHz, los diez armónicos siguientes y sobre todas las frecuencias posibles de la variable tensión de salida.

cas\00 Ejemplos\FFT.asc

View>Spice Error Log

```
N-Period=all
Fourier components of V(salida)
DC component:-0.000657025
```

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	5.000e+04	1.861e-01	1.000e+00	0.53°	0.00°
2	1.000e+05	6.503e-04	3.494e-03	173.35°	172.82°
3	1.500e+05	3.946e-04	2.120e-03	-173.85°	-174.37°
4	2.000e+05	2.862e-04	1.538e-03	-155.95°	-156.48°
5	2.500e+05	4.345e-04	2.335e-03	-108.87°	-109.40°
6	3.000e+05	4.732e-04	2.542e-03	129.63°	129.10°
7	3.500e+05	2.635e-04	1.416e-03	147.83°	147.31°
8	4.000e+05	1.912e-04	1.027e-03	153.03°	152.51°
9	4.500e+05	1.645e-04	8.839e-04	155.93°	155.41°
10	5.000e+05	1.449e-04	7.785e-04	160.50°	159.97°

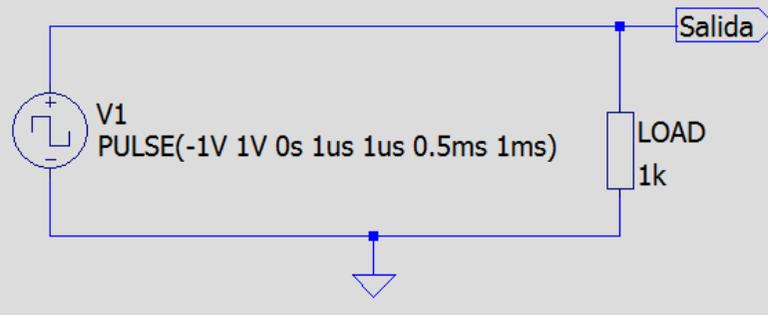
Total Harmonic Distortion: 0.595263% (62.829898%)



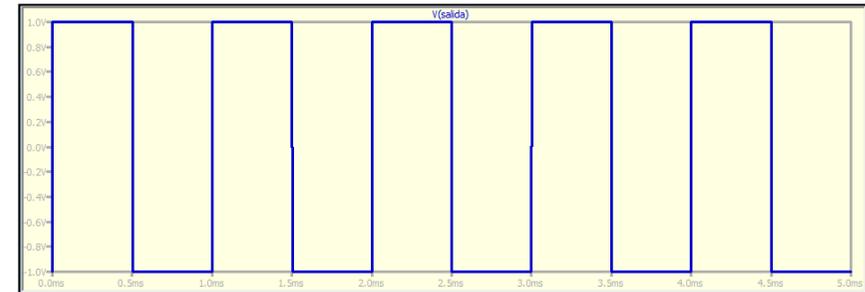
## Reconstrucción de señales mediante la FFT

### Señal cuadrada

```
.tran 5ms      .FOUR 1kHz 9 -1 v(salida)  
.options plotwinsize=0
```



Deseamos comprobar la reconstrucción de una señal con el desarrollo inverso de la FFT.

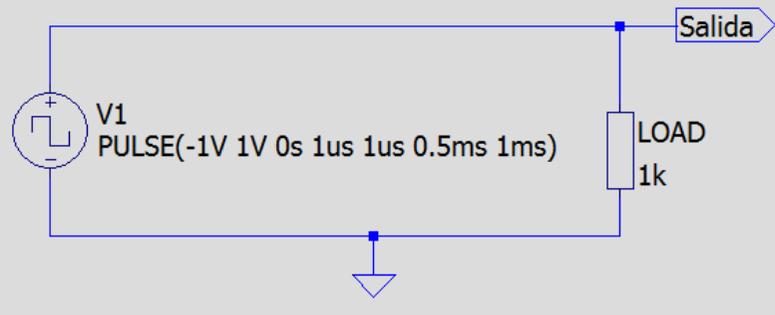




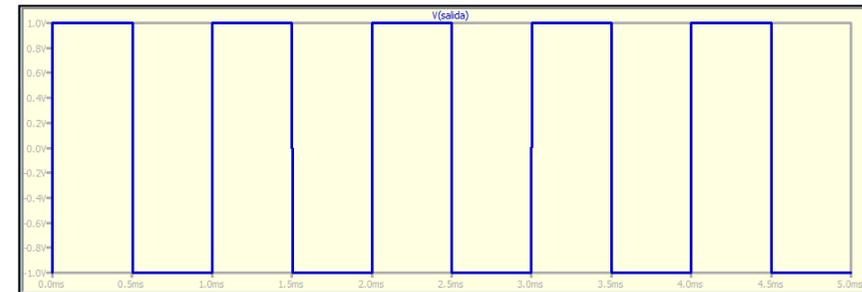
## Reconstrucción de señales mediante la FFT

### Señal cuadrada

```
.tran 5ms .FOUR 1kHz 9 -1 v(salida)  
.options plotwinsize=0
```



Deseamos comprobar la reconstrucción de una señal con el desarrollo inverso de la FFT.



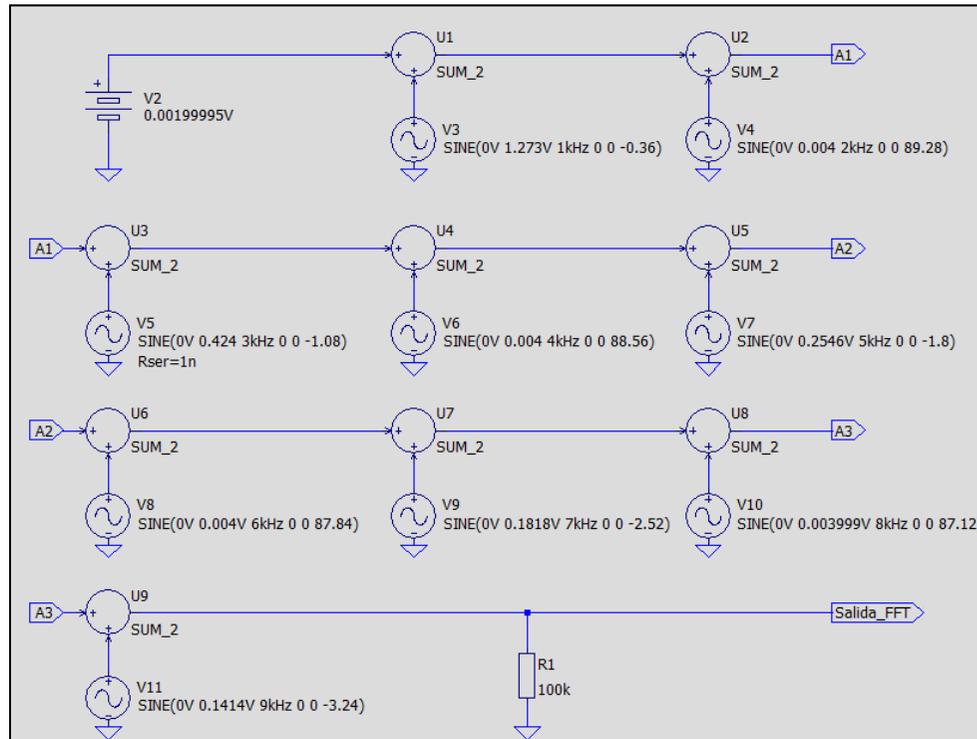
SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\2014-15 DYSE\Otros\Demostracion FFT.log

N-Period=all  
Fourier components of V(salida)  
DC component:0.002

Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	1.000e+03	1.273e+00	1.000e+00	-0.36°	0.00°
2	2.000e+03	4.000e-03	3.142e-03	89.28°	89.64°
3	3.000e+03	4.244e-01	3.333e-01	-1.08°	-0.72°
4	4.000e+03	4.000e-03	3.141e-03	88.56°	88.92°
5	5.000e+03	2.546e-01	2.000e-01	-1.80°	-1.44°
6	6.000e+03	4.000e-03	3.141e-03	87.84°	88.20°
7	7.000e+03	1.818e-01	1.428e-01	-2.52°	-2.16°
8	8.000e+03	3.999e-03	3.141e-03	87.12°	87.48°
9	9.000e+03	1.414e-01	1.111e-01	-3.24°	-2.88°

Total Harmonic Distortion: 42.878757%(48.170100%)

Tomando los valores de la tensión continua y los de las componentes de Fourier de los distintos armónicos, podemos reconstruir la señal original.

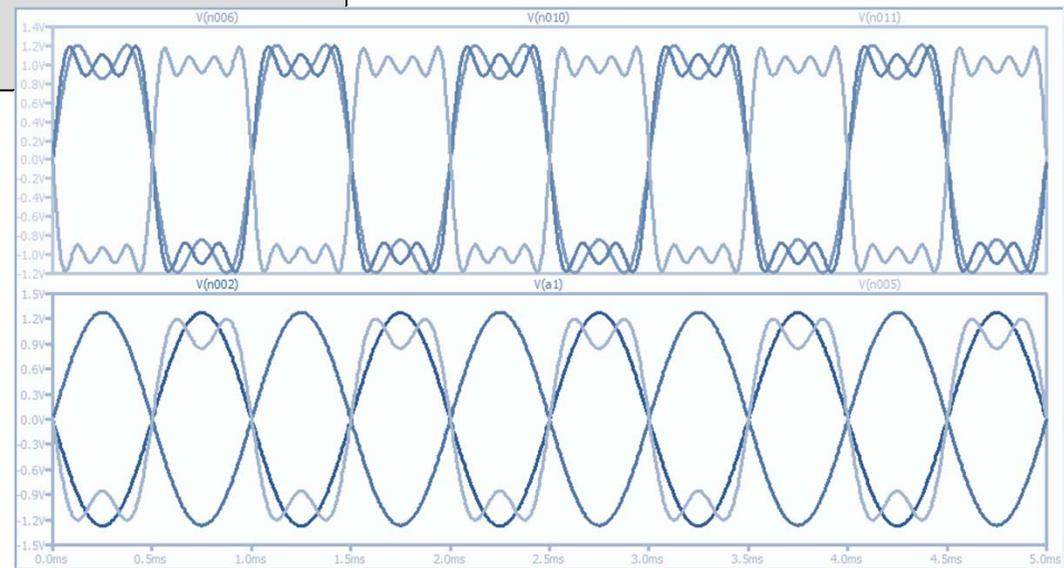
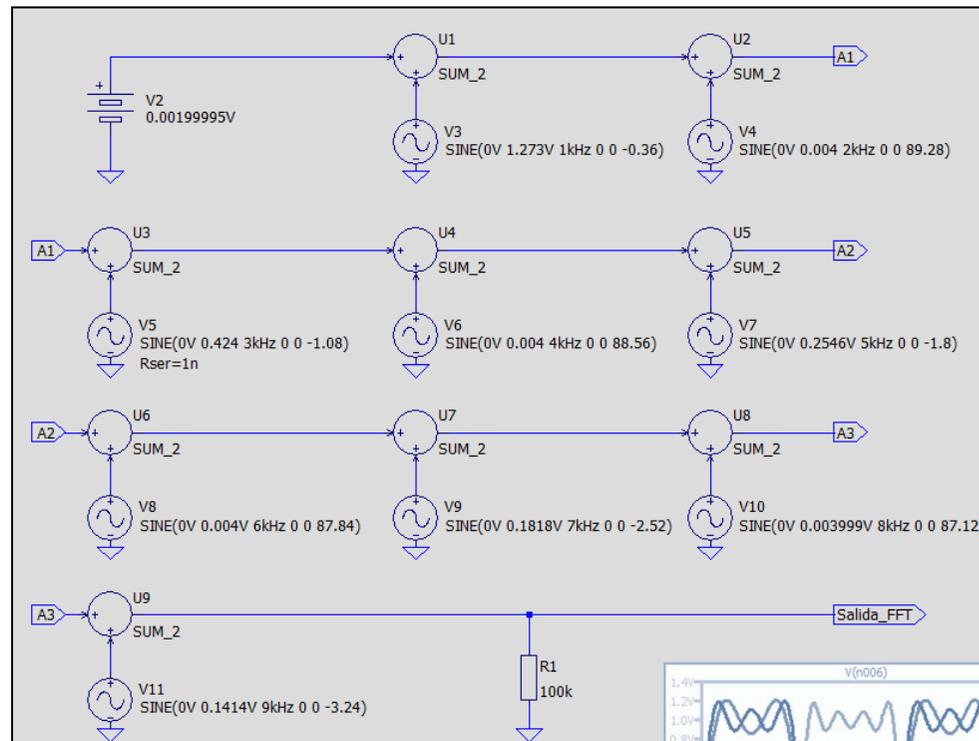


SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\2014-15 DYSE\Otros\Demostracion FFT.log

N-Period=all  
Fourier components of V(salida)  
DC component:0.002

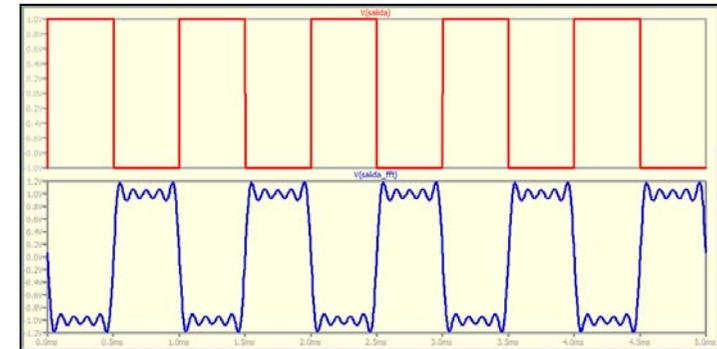
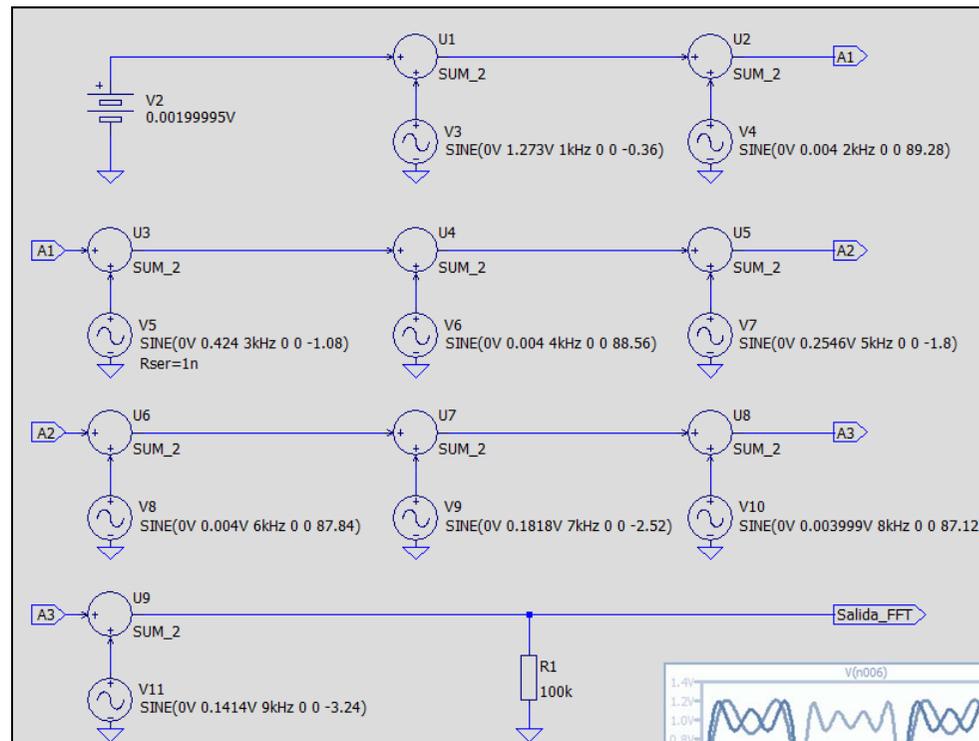
Harmonic Number	Frequency [Hz]	Fourier Component	Normalized Component	Phase [degree]	Normalized Phase [deg]
1	1.000e+03	1.273e+00	1.000e+00	-0.36°	0.00°
2	2.000e+03	4.000e-03	3.142e-03	89.28°	89.64°
3	3.000e+03	4.244e-01	3.333e-01	-1.08°	-0.72°
4	4.000e+03	4.000e-03	3.141e-03	88.56°	88.92°
5	5.000e+03	2.546e-01	2.000e-01	-1.80°	-1.44°
6	6.000e+03	4.000e-03	3.141e-03	87.84°	88.20°
7	7.000e+03	1.818e-01	1.428e-01	-2.52°	-2.16°
8	8.000e+03	3.999e-03	3.141e-03	87.12°	87.48°
9	9.000e+03	1.414e-01	1.111e-01	-3.24°	-2.88°

Total Harmonic Distortion: 42.878757% (48.170100%)

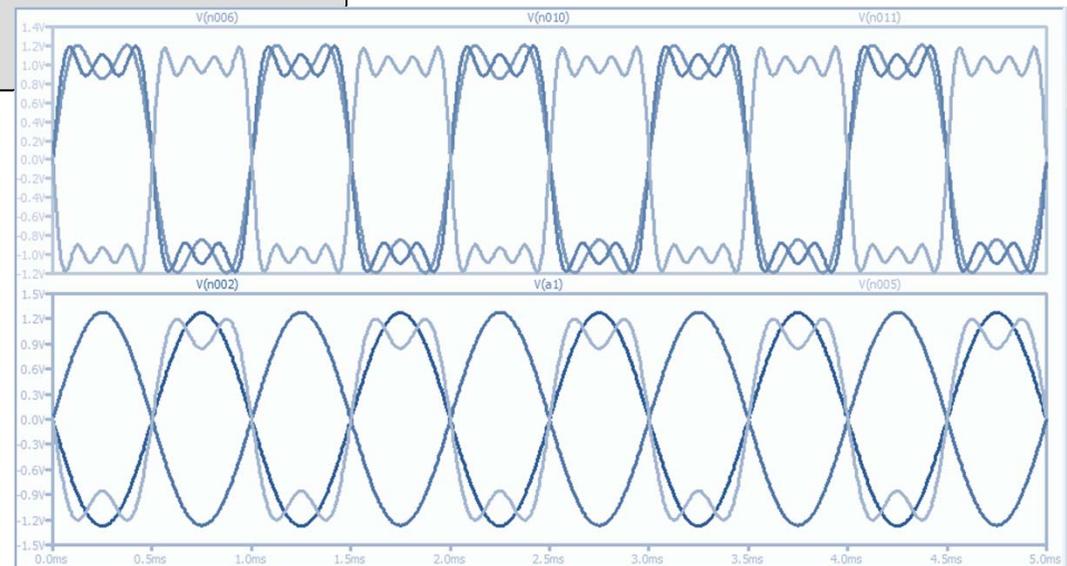


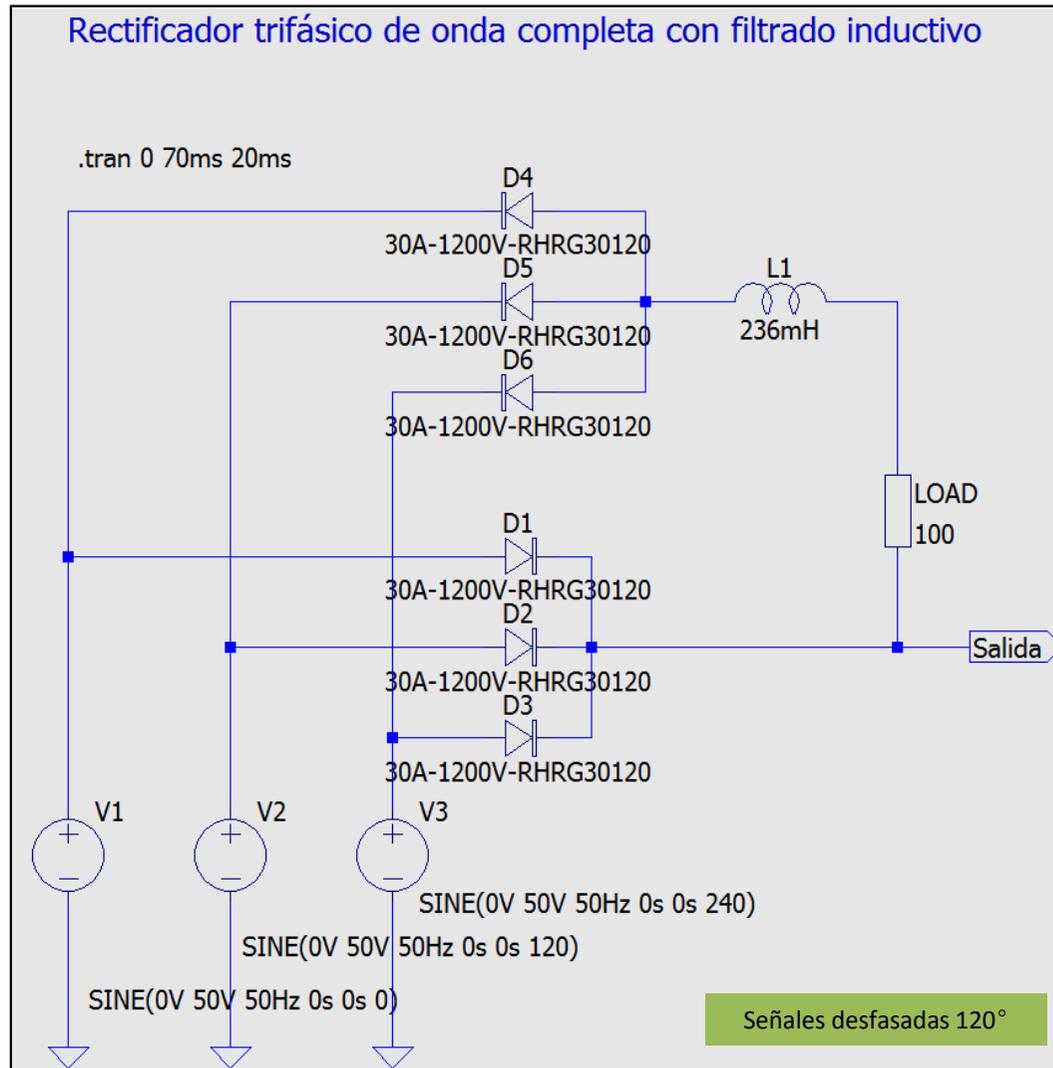


## Reconstrucción de señales mediante la FFT



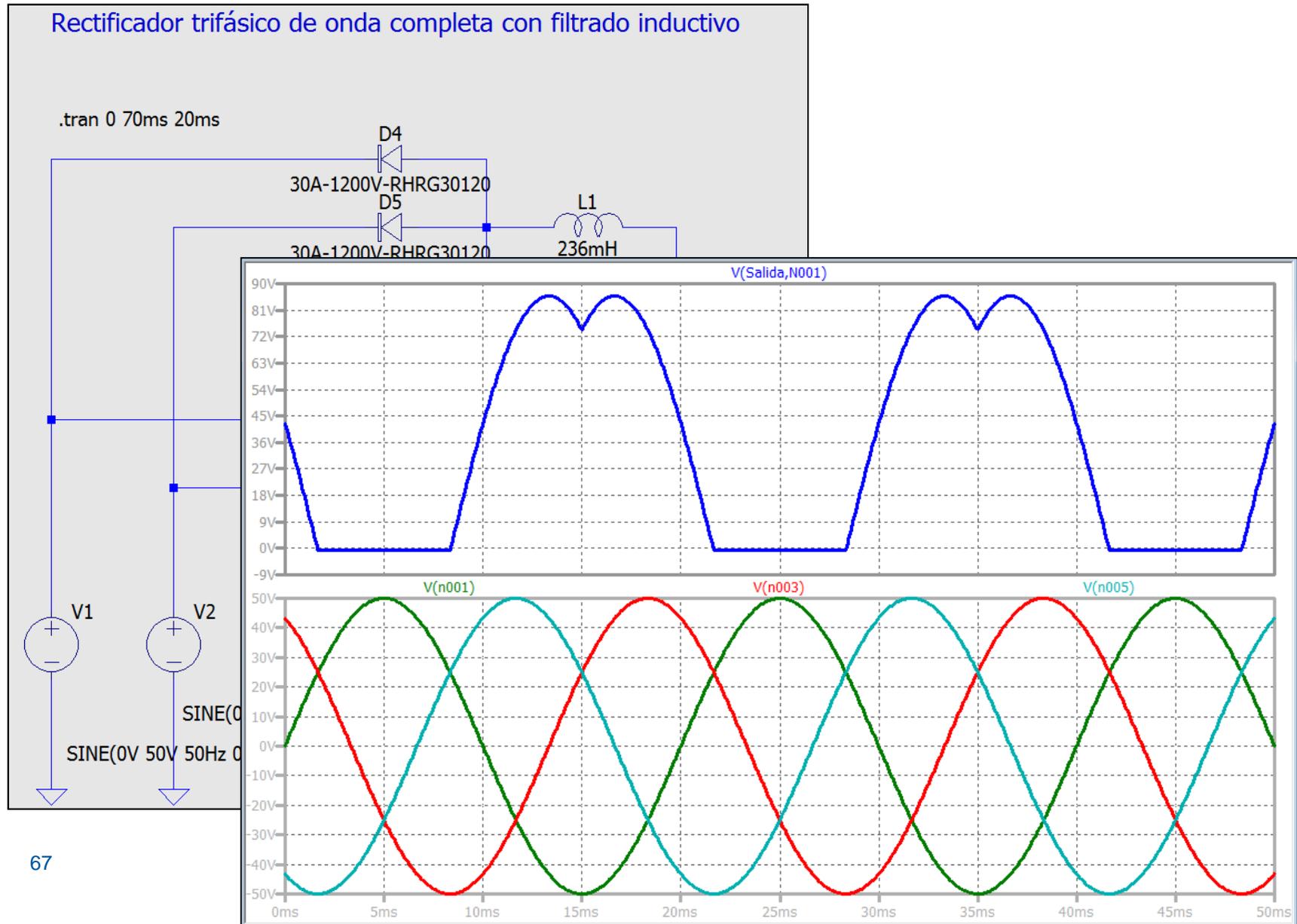
Señal original y reconstruida hasta el noveno armónico

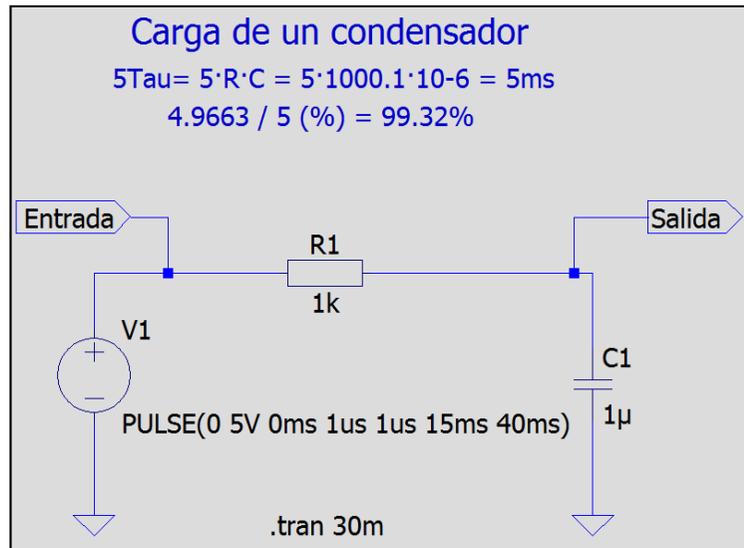




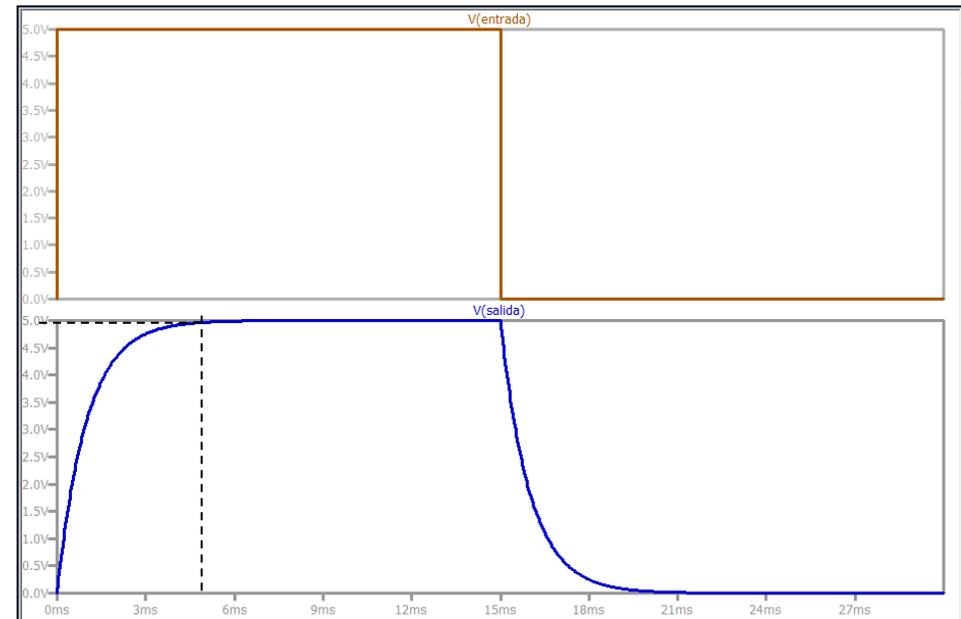


## Ejemplo de Análisis transitorio: Rectificador trifásico de onda completa con filtro inductivo





Calcular el tanto por ciento de la tensión máxima alcanzada por el condensador al transcurrir  $5\tau$



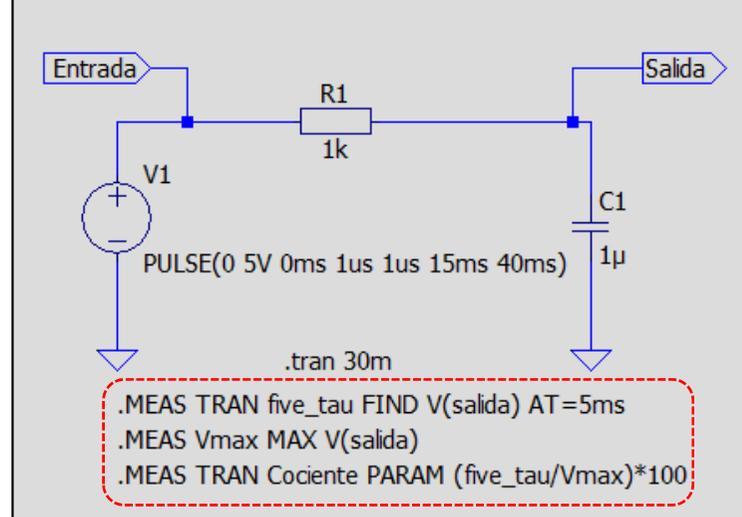


## Ejemplo de Análisis transitorio: **Cantidades eléctricas definidas por el usuario**

### Carga de un condensador

$$5\tau = 5 \cdot R \cdot C = 5 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ ms}$$

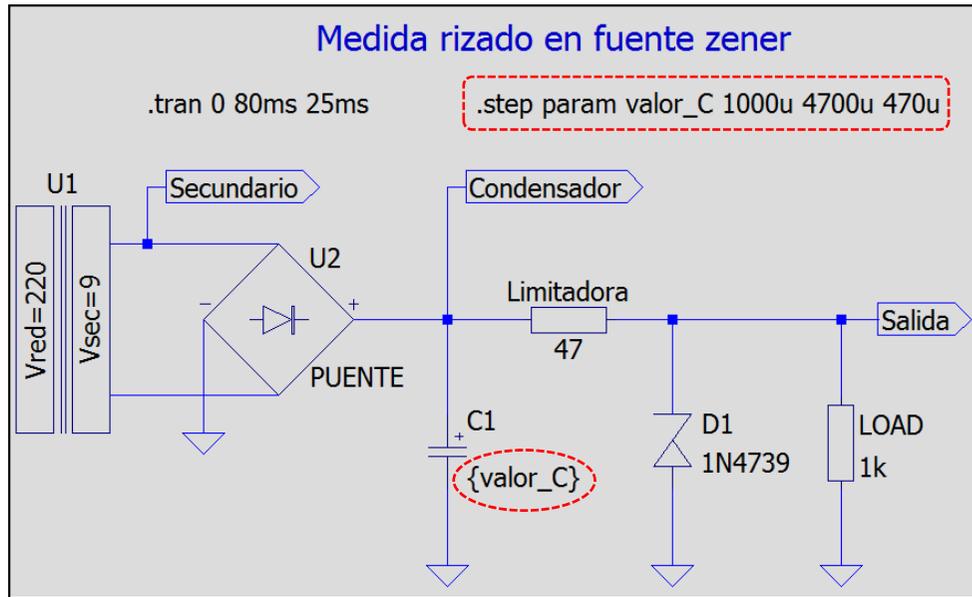
$$4.9663 / 5 (\%) = 99.32\%$$



```
SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Carga condensador.log
Circuit: * C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Carga condensador.asc
.OP point found by inspection.
five_tau: v(salida)=4.96625 at 0.005
vmax: MAX(v(salida))=5 FROM 0 TO 0.03
cociente: (five_tau/vmax)*100=99.3249
```

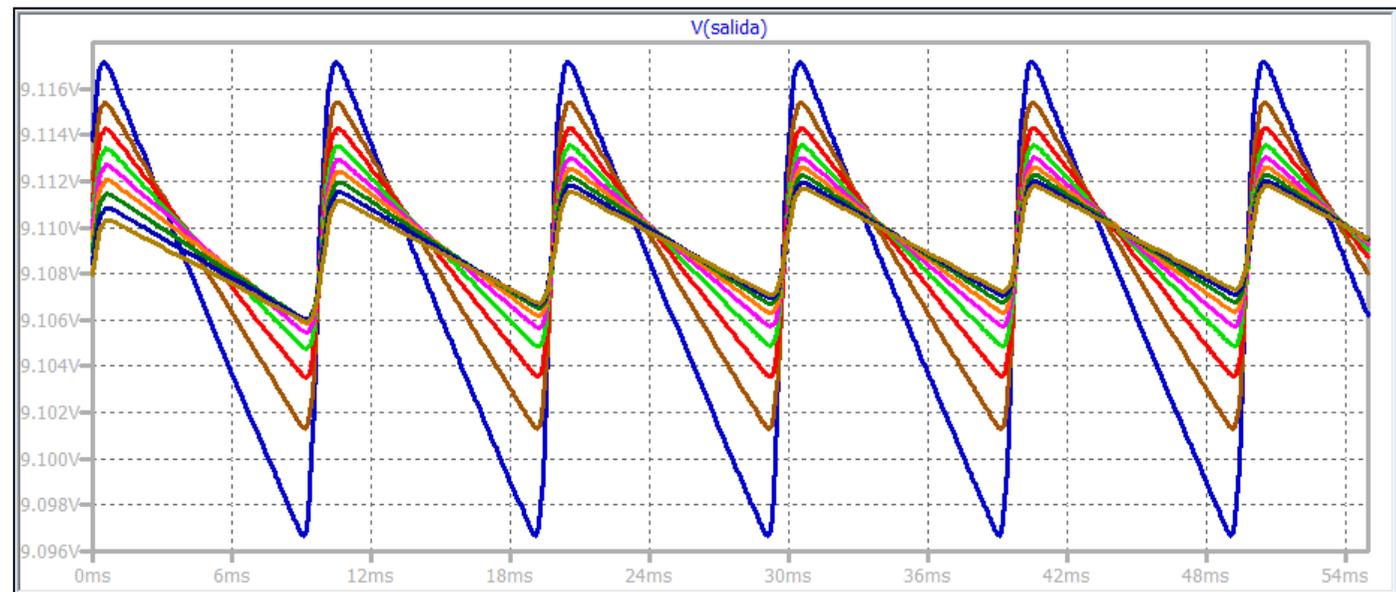
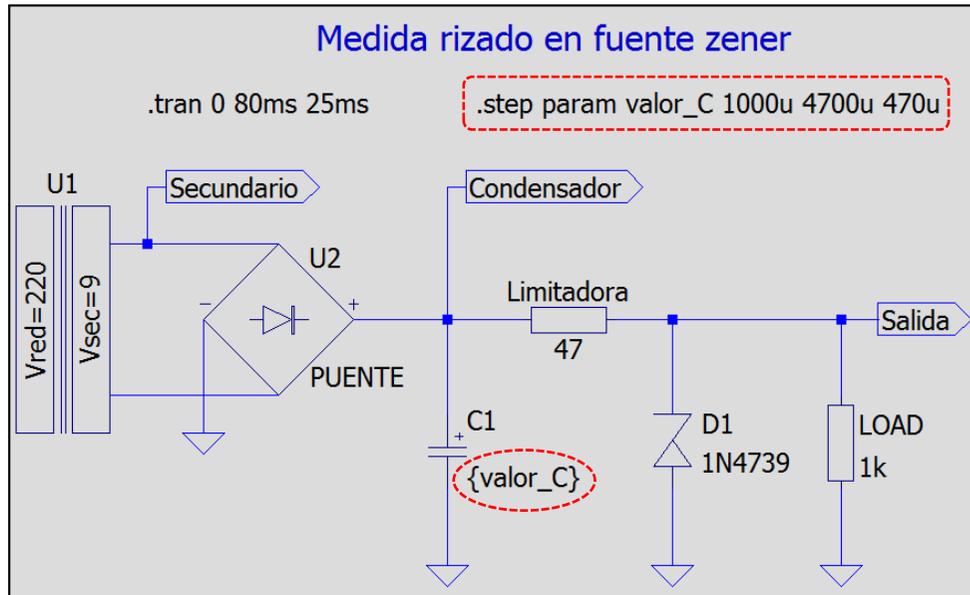
View>SPICE Error Log (CTRL+L)

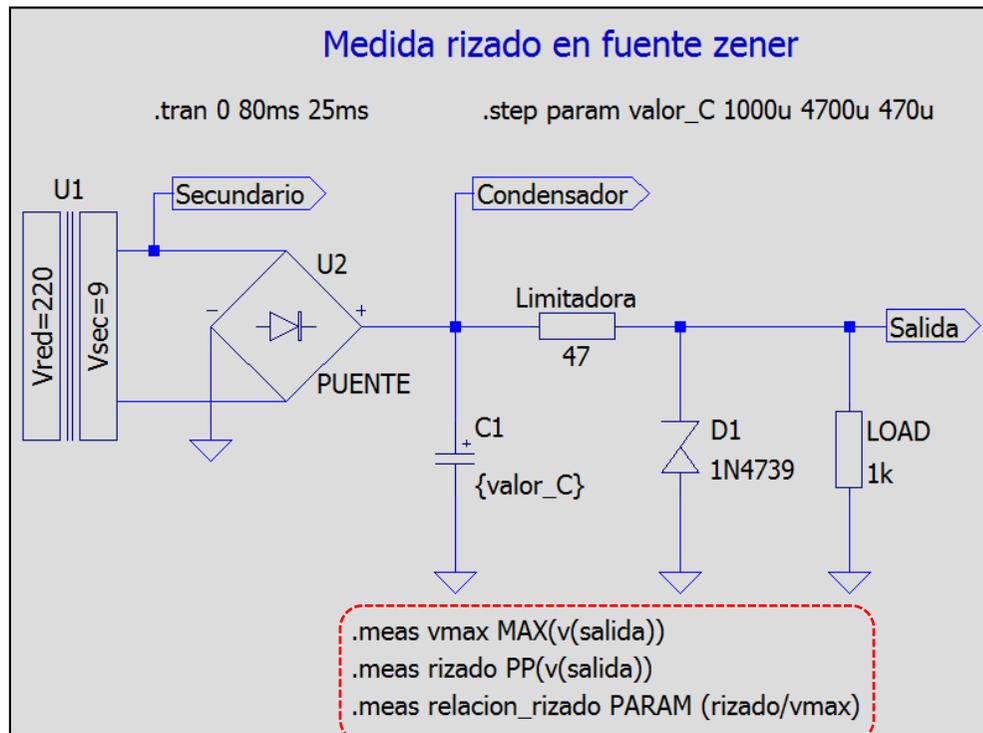
No utilizar números en las variables. **No válido 5Tau**



Mostrar el efecto del valor del condensador en el rizado a la salida

$$C = \frac{I_T}{f \cdot \Delta V_{pp}}$$





- *Valor máximo de la tensión de salida*
- *Valor pico-pico del rizado a la salida*
- *Cociente (relación) entre el rizado y la tensión máxima*

$$Relacion\_rizado = \frac{rizado}{Tension\ máxima}$$



## Ejemplo de Análisis transitorio: Cantidades eléctricas definidas por el usuario

### Medida rizado en fuente zener

`.tran 0 80ms 25ms`      `.step param valor_C 1000u 4700u 4`

`.meas vmax MAX(v(salida))`  
`.meas rizado PP(v(salida))`  
`.meas relacion_rizado PARAM (rizado/vmax)`

SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.log

Circuit: \* C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.asc

```
.OP point found by inspection.
.step valor_c=0.001
.step valor_c=0.00147
.step valor_c=0.00194
.step valor_c=0.00241
.step valor_c=0.00288
.step valor_c=0.00335
.step valor_c=0.00382
.step valor_c=0.00429
.step valor_c=0.0047
```

Measurement: vmax

step	MAX(v(salida))	FROM	TO
5	9.11301	0	0.055
6	9.11276	0	0.055
7	9.11227	0	0.055
8	9.11201	0	0.055
9	9.11181	0	0.055

Measurement: rizado

step	PP(v(salida))	FROM	TO
1	0.0204763	0	0.055
2	0.0141125	0	0.055
3	0.0107861	0	0.055
4	0.00879765	0	0.055
5	0.00755215	0	0.055
6	0.00675869	0	0.055
7	0.00626659	0	0.055
8	0.00598907	0	0.055
9	0.00587654	0	0.055

Measurement: relacion\_rizado

step	(rizado/vmax)
1	0.00224591
2	0.0015482
3	0.00118342
4	0.000965337
5	0.000828722
6	0.000741686
7	0.000687709

Dibujar datos del barrido



## Ejemplo de Análisis transitorio: Cantidades eléctricas definidas por el usuario

### Medida rizado en fuente zener

.tran 0 80ms 25ms

.step param valor\_C 1000u 4700u 470u

```
SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.log
Circuit: * C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.asc
.OP point found by inspection.
.step valor_c=0.001
.step valor_c=0.00147
.step valor_c=0.00194
.step valor_c=0.00241
```

Add Traces to Plot

Only list traces matching

Available data:

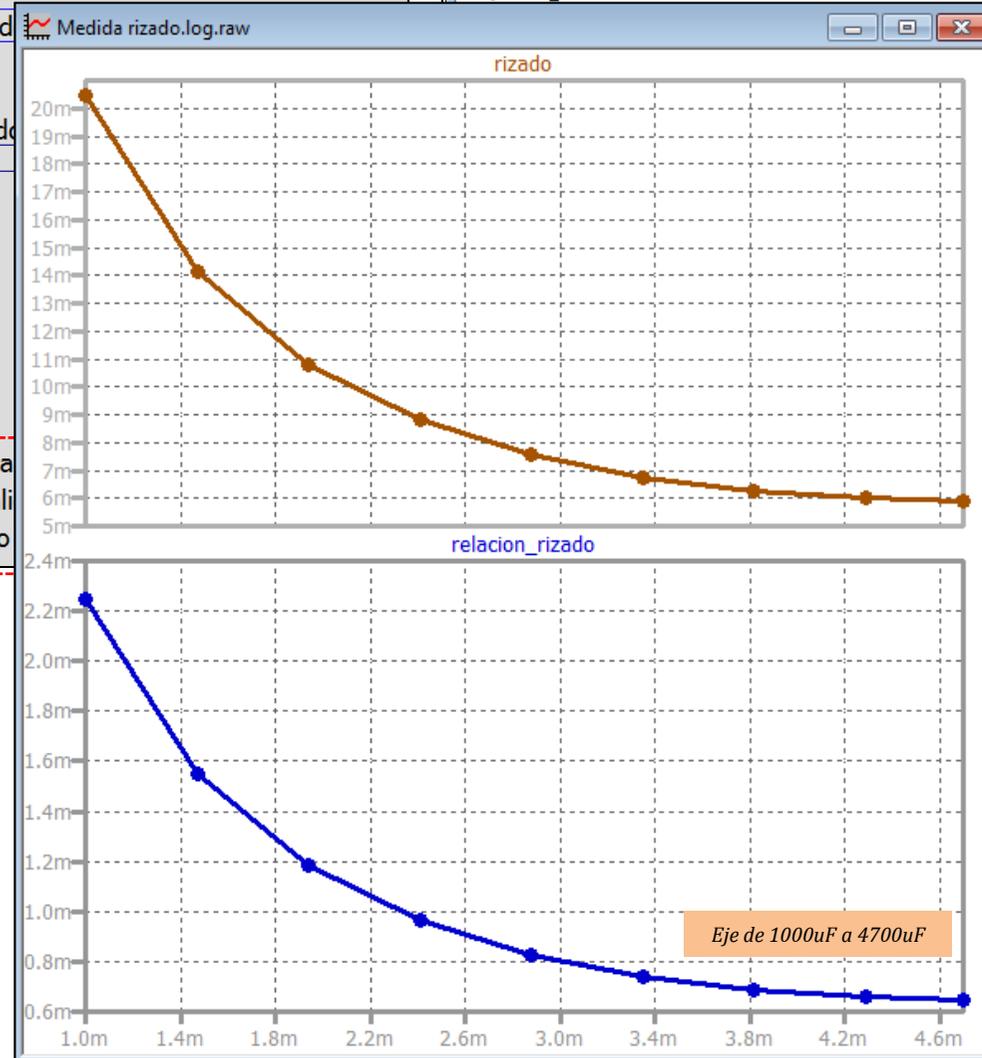
- relacion\_rizado
- rizado
- valor\_c
- vmax

Añadir una traza nueva (CTRL+A)

Expression(s) to add:

rizado relacion\_rizado

AutoRange





## Ejemplo de Análisis transitorio: Cantidades eléctricas definidas por el usuario

### Medida rizado en fuente zener

.tran 0 80ms 25ms

.step param valor\_C 1000u 4700u 470u

```
SPICE Error Log: C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.log
Circuit: * C:\LTSpice practicas\00 Ejemplos\Medida rizado.asc
.OP point found by inspection.
.step valor_c=0.001
.step valor_c=0.00147
.step valor_c=0.00194
.step valor_c=0.00241
```

Add Traces to Plot

Only list traces matching

Available data:

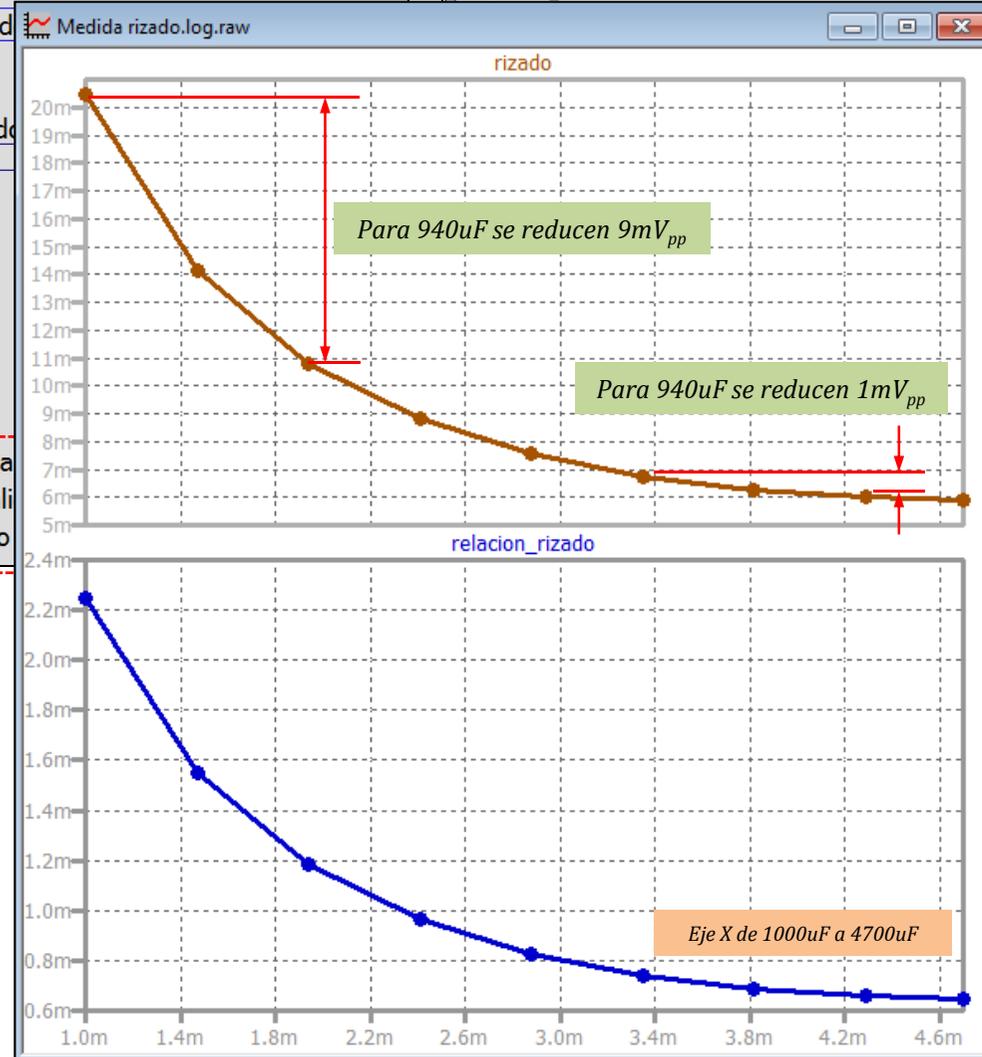
- relacion\_rizado
- rizado
- valor\_c
- vmax

Añadir una traza nueva (CTRL+A)

Expression(s) to add:

rizado relacion\_rizado

AutoRange



$$C = \frac{I_T}{f \cdot \Delta V_{pp}}$$



### BIBLIOGRAFÍA

- LTspice IV (SwitcherCAD III). [www.linear.com](http://www.linear.com)
- Bramble, S., Op Amp Noise Analysis. ([www.simonbramble.co.uk](http://www.simonbramble.co.uk)).
- Engelhardt, M., Using Transformers in LTspice/SwitcherCAD III. Linear Technology Magazine, September 2006.
- Simulación Montecarlo. [http://hagamoselectronica.blogspot.com.es/2010/11/simulacion-de-circuitos-con-ltspice\\_24.html](http://hagamoselectronica.blogspot.com.es/2010/11/simulacion-de-circuitos-con-ltspice_24.html).
- <http://www.audio-perfection.com/spice-ltspice/distortion-measurements-with-ltspice.html>
- <http://k6jca.blogspot.com.es/2012/07/monte-carlo-and-worst-case-circuit.html>.
- [http://ltwiki.org/index.php?title=Main\\_Page](http://ltwiki.org/index.php?title=Main_Page).
- [http://es.wikipedia.org/wiki/William\\_Bradford\\_Shockley](http://es.wikipedia.org/wiki/William_Bradford_Shockley)