

# Minicurso LTSpice IV Parte II

XXXVIII Semana de Engenharia – UFJF

Dias 20/01 e 22/01/2016

Prof. Estêvão Coelho Teixeira

# Conteúdo

1. Retificador de meia-onda (sem e com filtro capacitivo)
2. Retificador de onda completa em ponte (sem e com filtro capacitivo)
3. Amplificador a transistor
4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”
5. Circuitos chaveados usando modelos de MOSFETs
6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo “ideal”)

# Conteúdo

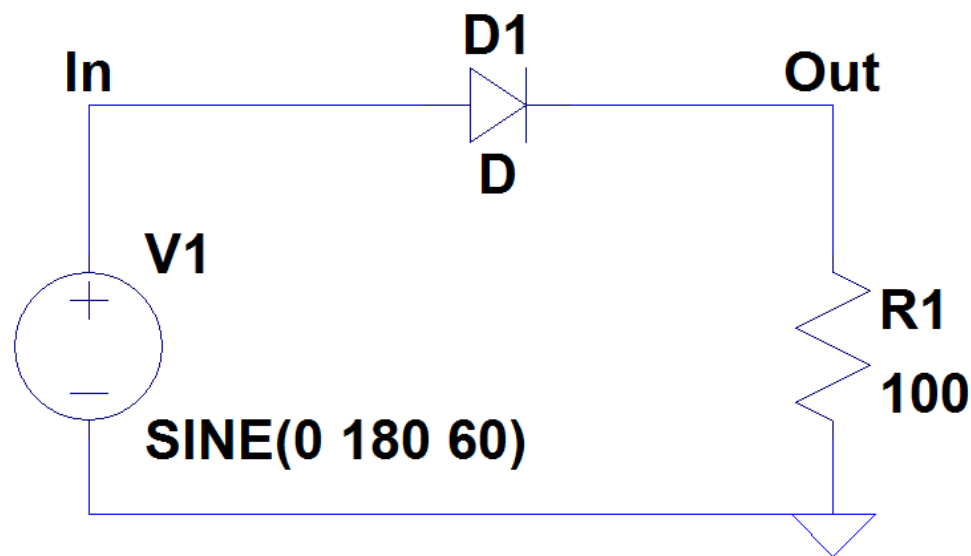
7. Circuito com amplificadores operacionais – importante macromodelos externos
8. Utilizando subcircuitos – monte seu próprio amplificador operacional
9. Resposta em frequência – circuito RLC
10. Usando transformadores no SPICE
11. Exemplo do LTSpice IV – Ponte de Wien
12. Exemplo do LTSpice IV – Conversor Step-Down (Buck) integrado

# 1. Retificador de meia-onda

## (a) Sem filtro capacitivo

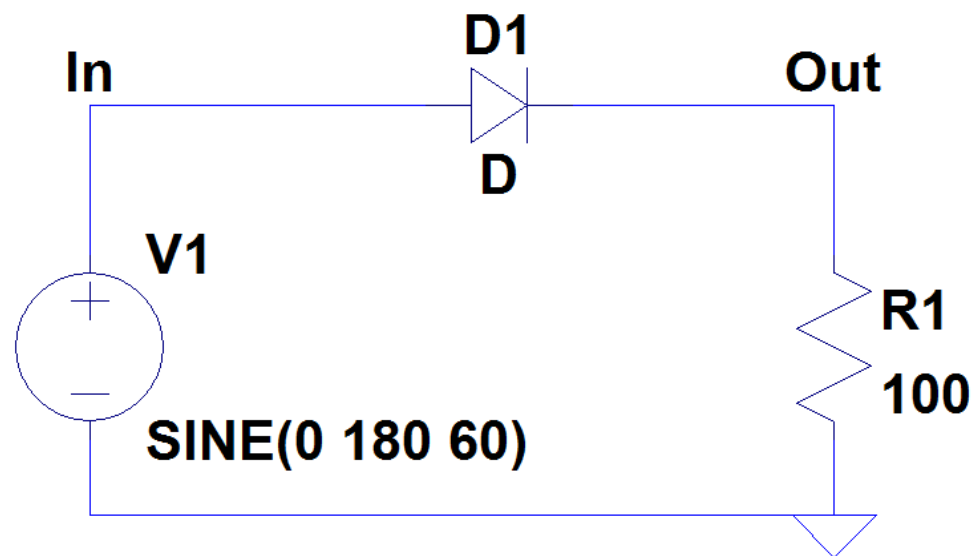
Vamos montar o retificador de meia-onda conforme a figura a seguir, e efetuar a simulação transiente.

Neste circuito, enquanto R1 representa a carga, V1 representa a tensão da rede elétrica, 127V (RMS), 60 Hz.



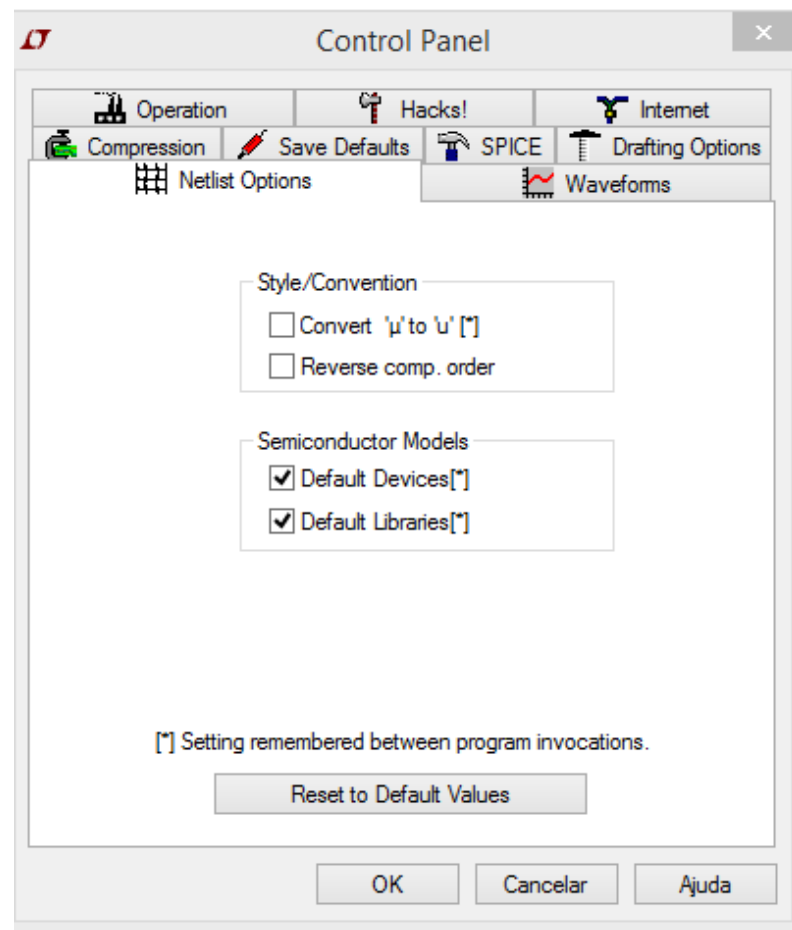
# 1. Retificador de meia-onda

Observe que o modelo de diodo usado é o modelo “D”. Este é um modelo “genérico” do LTSpice para diodos, o que não significa que seja um diodo ideal. Aliás, componentes “ideais” podem resultar em dificuldades para simular o circuito.



# 1. Retificador de meia-onda

Para que o LTSpice IV use um modelo genérico (default), verifique, em *Simulate/Control Panel*, na aba *Netlist Options*, se os itens Default Devices e Default Libraries estão selecionados.



# 1. Retificador de meia-onda

Configure os parâmetros de simulação transiente, tendo em mente que a frequência do sinal é 60 Hz. Você já sabe...

Rode a simulação, e verifique as formas de onda da tensão da fonte, tensão na carga e da corrente de entrada (que coincide neste caso com a corrente em D1).

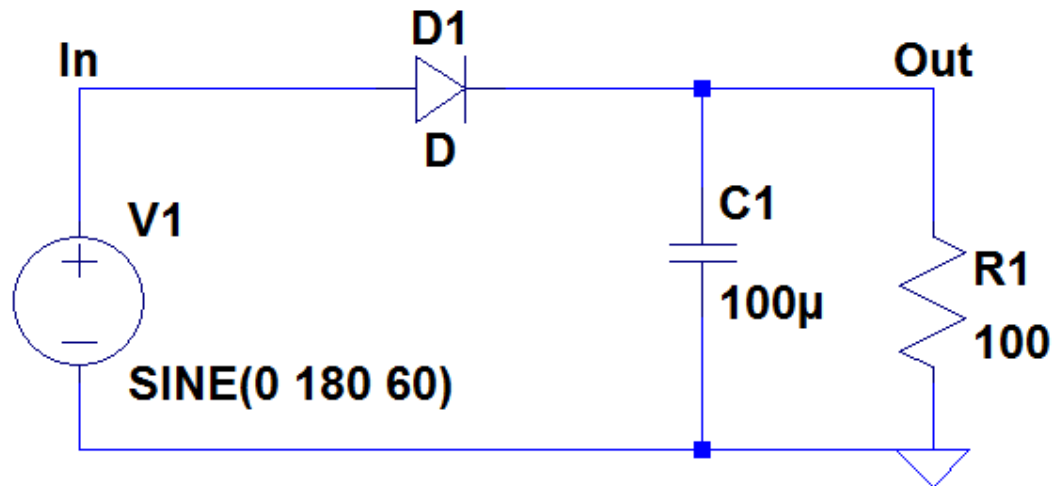
Verifique, mantendo CTRL pressionada e clicando no nome do sinal, o valor RMS da tensão da fonte e o valor médio da tensão na carga, dentre outros.

# 1. Retificador de meia-onda

## b) Com filtro capacitivo

Acrescente o capacitor de filtro, conforme mostra a figura a seguir, e efetue novamente a simulação. Verifique as formas de onda da tensão na fonte e tensão na carga, bem como da corrente em D1.

Verifique o novo valor da tensão média na carga.

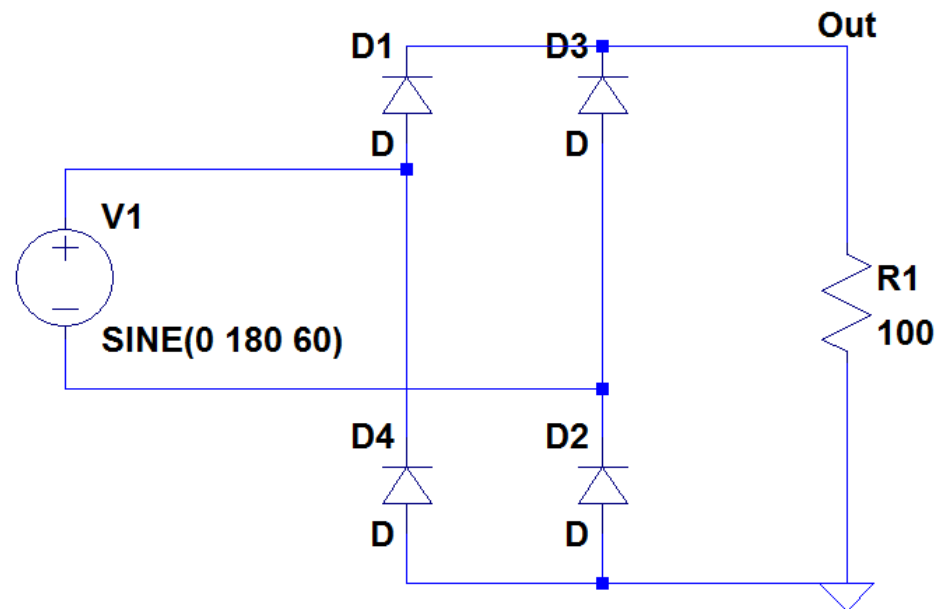




## 2. Retificador de onda completa

(a) Sem filtro capacitivo

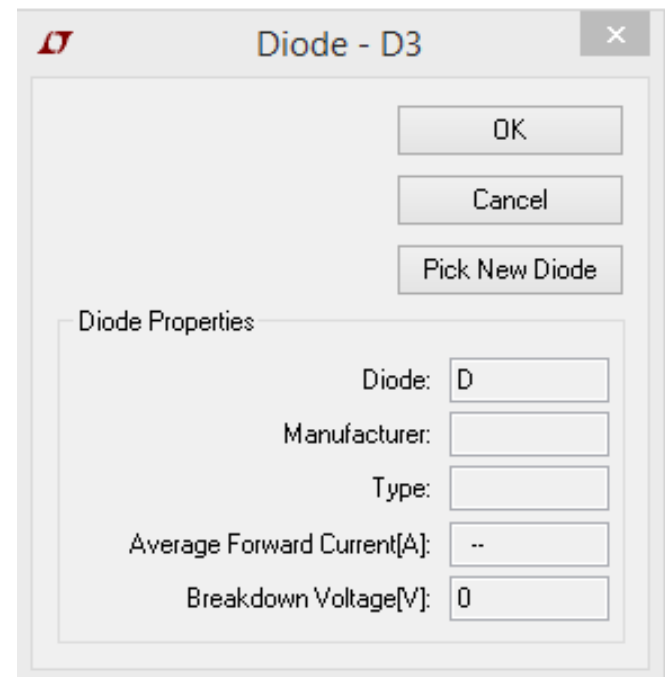
Um retificador de onda completa em ponte é apresentado na figura a seguir.



## 2. Retificador de onda completa

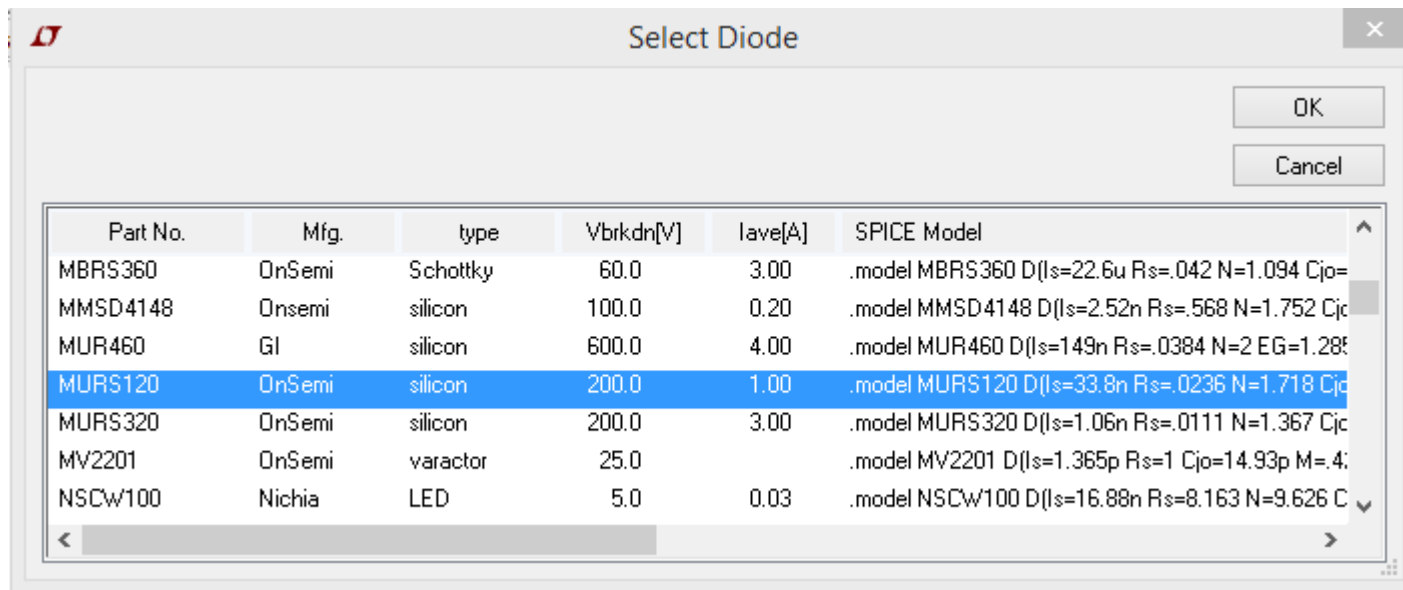
Iremos, neste circuito, usar um modelo de diodo da biblioteca de modelos do LTSpice IV. Iremos escolher, para os diodos D1 – D4, o modelo MURS120.

Clique, com o botão direito do mouse, no corpo do componente, não no “valor” ou no Reference Designator (D1). A seguinte caixa de diálogo irá se abrir.



## 2. Retificador de onda completa

Clique em *Pick New Diode*. A biblioteca de diodos irá se abrir, contendo vários modelos de diodos (incluindo diodos zener e LEDs). Uma tabela mostra informações relevantes sobre os componentes, como a tensão máxima de bloqueio reversa e sua corrente média máxima admissível.

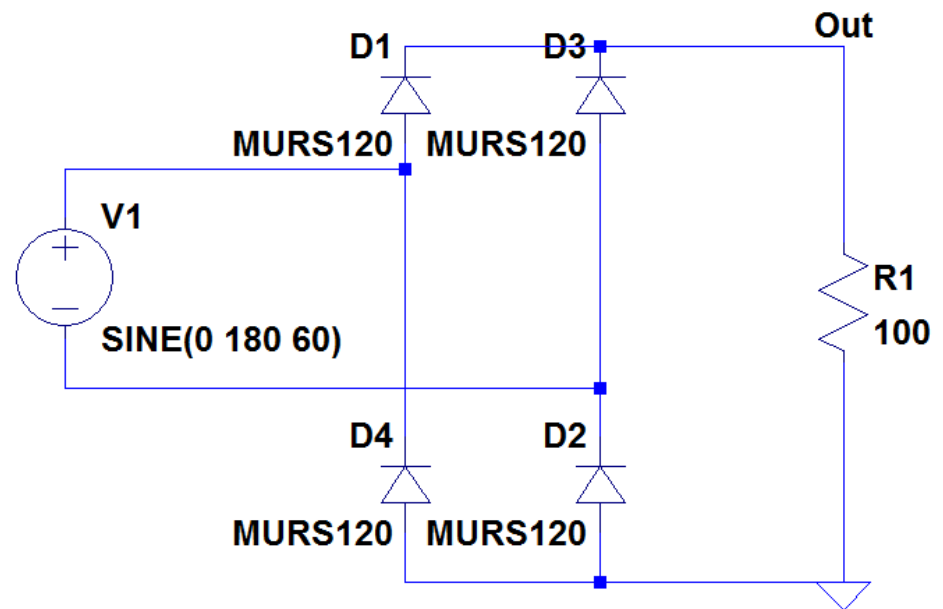


Part No.	Mfg.	type	Vbrkdn[V]	Iave[A]	SPICE Model
MBRS360	OnSemi	Schottky	60.0	3.00	.model MBRS360 D(Is=22.6u Rs=.042 N=1.094 Cjo=
MMSD4148	Onsemi	silicon	100.0	0.20	.model MMSD4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjc
MUR460	GI	silicon	600.0	4.00	.model MUR460 D(Is=149n Rs=.0384 N=2 EG=1.285
MURS120	OnSemi	silicon	200.0	1.00	.model MURS120 D(Is=33.8n Rs=.0236 N=1.718 Cjc
MURS320	OnSemi	silicon	200.0	3.00	.model MURS320 D(Is=1.06n Rs=.0111 N=1.367 Cjc
MV2201	OnSemi	varactor	25.0		.model MV2201 D(Is=1.365p Rs=1 Cjo=14.93p M=.4
NSCW100	Nichia	LED	5.0	0.03	.model NSCW100 D(Is=16.88n Rs=8.163 N=9.626 C

## 2. Retificador de onda completa

Selecione o modelo MURS120, por este modelo atender as especificações do circuito apresentado (tensão de bloqueio máxima de 200 V, corrente média de 1 A).

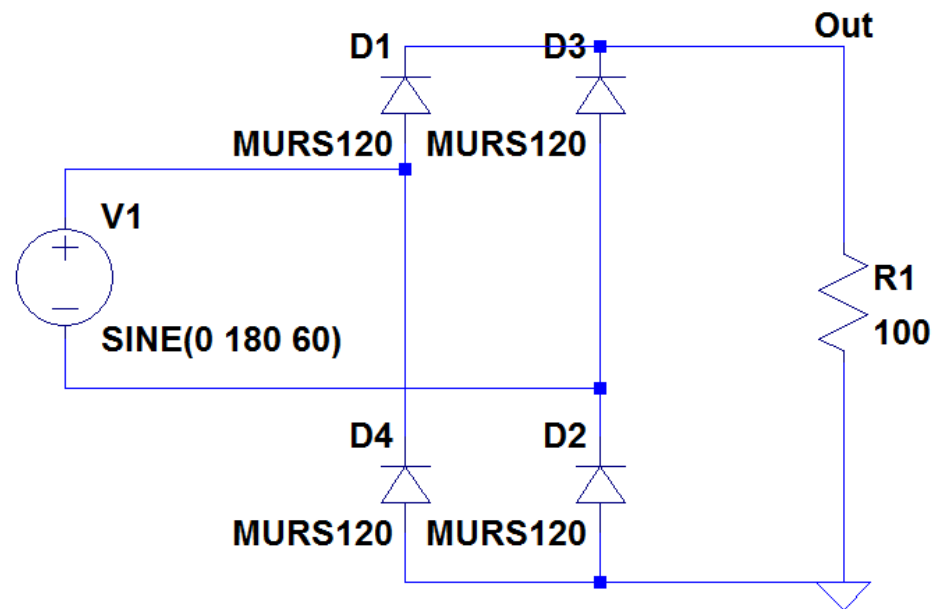
Repetindo para todos os diodos, o circuito assume o aspecto a seguir.



## 2. Retificador de onda completa

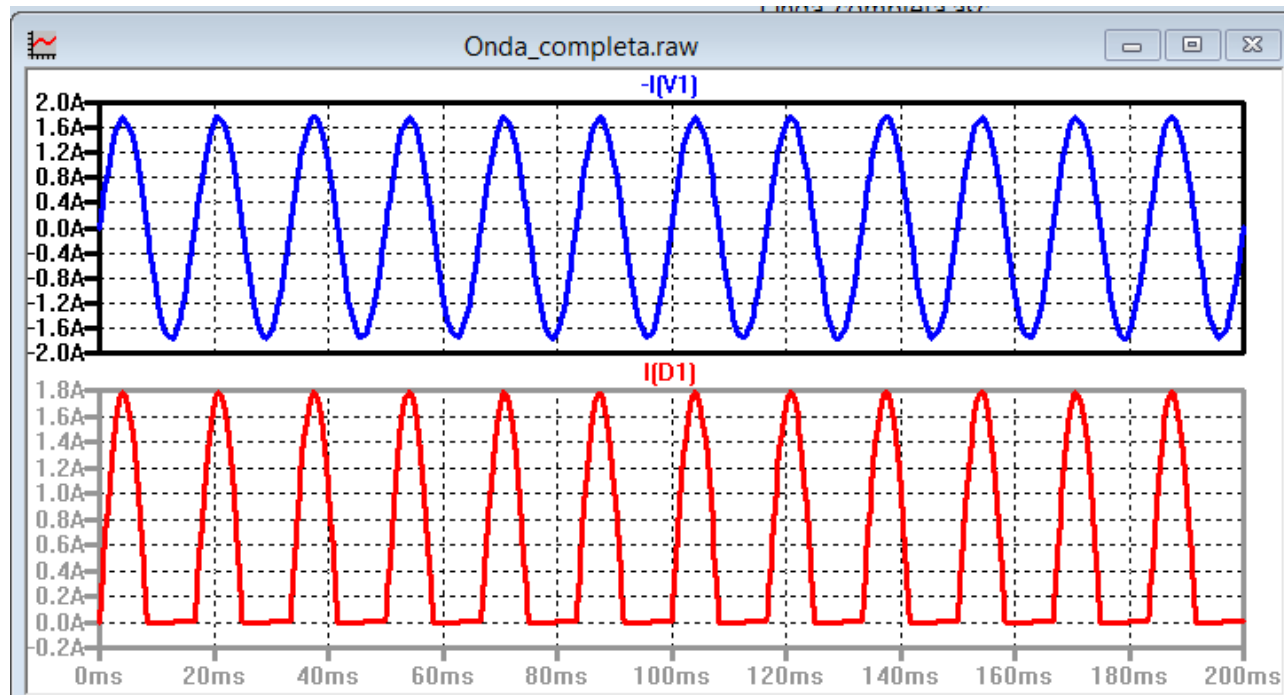
Simule o circuito. Observe as formas de onda da tensão da fonte, a tensão na carga, as correntes nos diodos e a corrente de entrada do circuito (a que sai da fonte V1).

A leitura da corrente de entrada do circuito não é trivial...



## 2. Retificador de onda completa

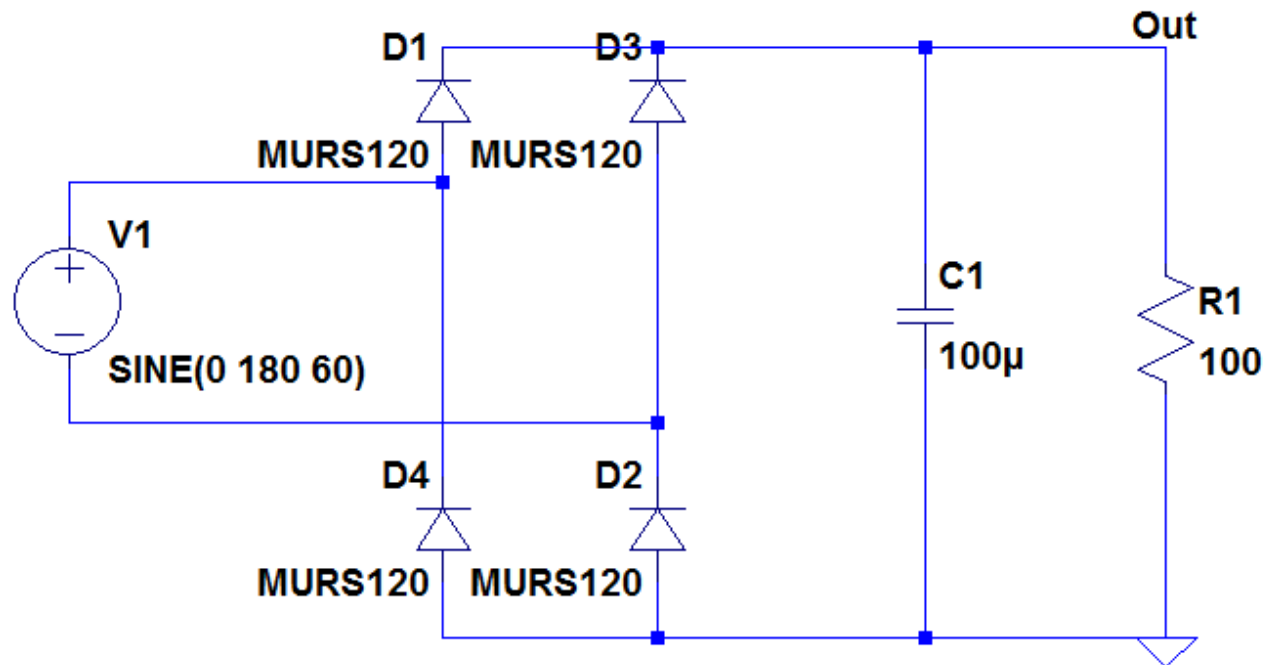
A figura a seguir, mostra a corrente de entrada e a corrente no diodo D1.



## 2. Retificador de onda completa

### b) Com filtro capacitivo

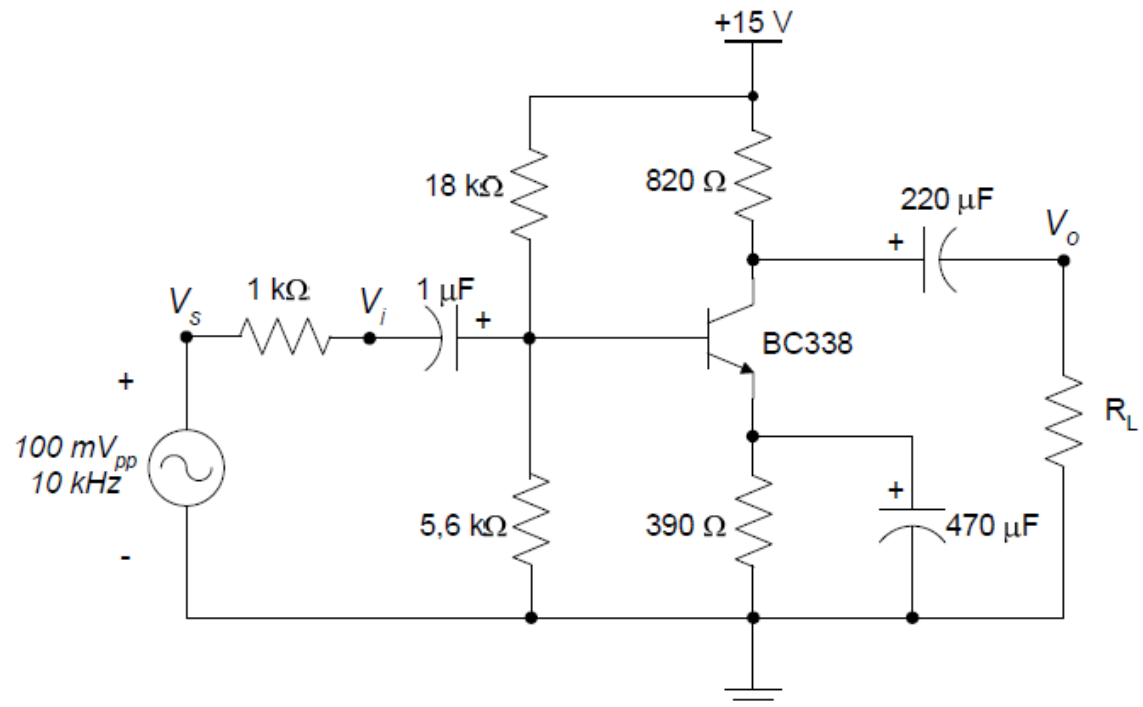
A inserção do filtro capacitivo leva ao circuito da figura a seguir. Simule novamente o circuito, e reavalie os resultados.



### 3. Amplificador a transistor

*“Todo estudante de engenharia elétrica deve montar seu amplificador a transistor bipolar de junção (TBJ) ao menos uma vez na vida”.*

Pelo menos na simulação, montaremos um aqui. O circuito é mostrado na figura. Para a carga  $R_L$ , usar  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ .





### 3. Amplificador a transistor

Este circuito, além de possuir diversos nós e componentes, tem algumas particularidades. Duas fontes deverão ser utilizadas:

- Uma para alimentação do circuito (DC), de 15 V;
- Uma fonte de sinal, de 100 mV de pico, 10 kHz. Este sinal deverá ser amplificado, na carga  $R_L$ .

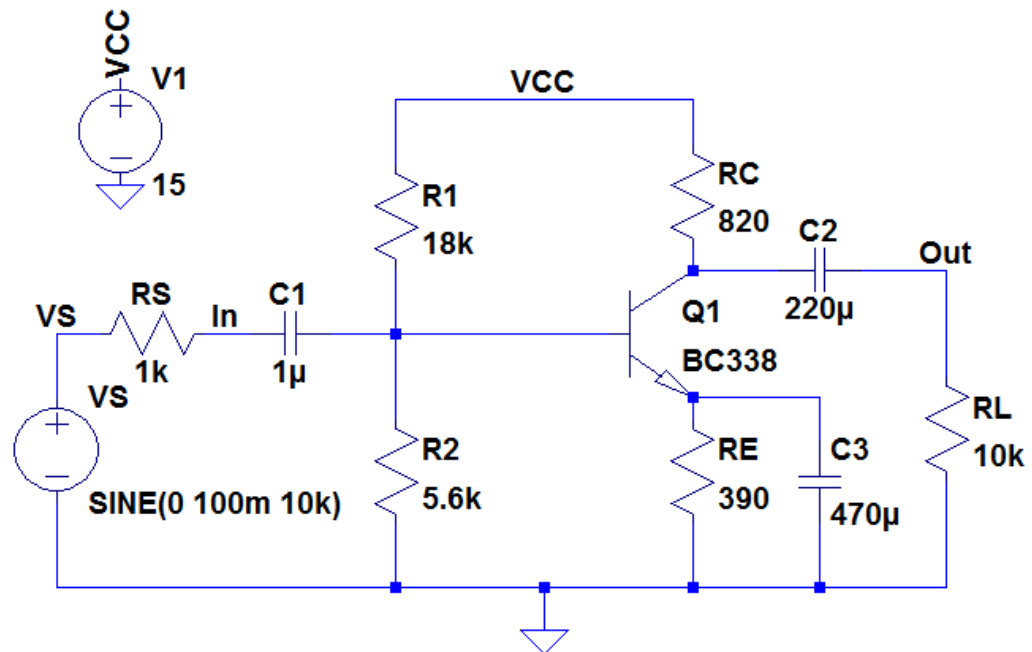
Você pode nomear um resistor com qualquer extensão, desde que seu Reference Designator inicie com “R”. Por exemplo, ao resistor de carga, o SPICE nos permite nomeá-lo como  $R_L$ .

O mesmo vale para qualquer elemento. Por exemplo, uma fonte de tensão pode ser denominada  $V_{\text{sinal}}$ ,  $V_{\text{entrada}}$ ,  $V_{\text{senoidal}}$ , etc (iniciando com “V”).

### 3. Amplificador a transistor

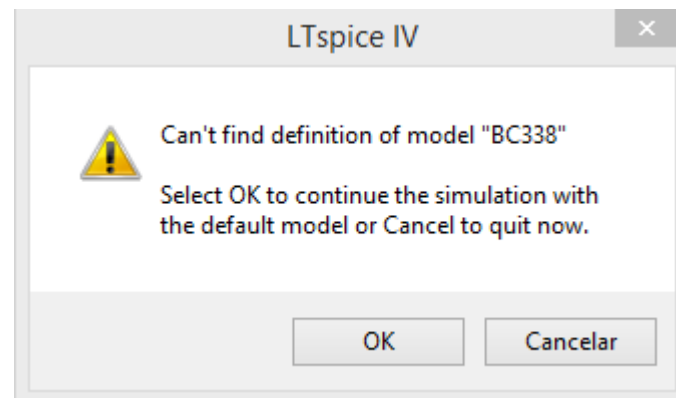
Para evitar sobrecarregar o esquemático com grande quantidade de fios, usaremos nós nomeados com labels de mesmo nome (VCC). Isso informa ao aplicativo que tais nós estão conectados. Veja a figura.

Simule o circuito,  
e veja o resultado (!).



### 3. Amplificador a transistor

Se você conseguiu simular, OK. Mas provavelmente, você irá receber esta mensagem.



A mensagem diz que o aplicativo não encontrou o modelo especificado pelo usuário para o TBJ. As alternativas são:

- Usar um modelo “equivalente”.
- Encontrar o modelo SPICE do dispositivo na Internet.

### 3. Amplificador a transistor

Em uma procura na Internet, não é difícil encontrar os modelos SPICE dos componentes mais usuais. Pode ser, contudo, que o modelo tenha uma sintaxe própria de outro aplicativo, como o PSPICE, e haja alguma incompatibilidade.

Encontrada uma biblioteca de modelos, vamos salvá-la com a extensão .lib, embora o LTSpice IV não tenha grandes problemas com extensões. O que importa é que seja um arquivo de texto.

Nomeie o arquivo como TBJ.lib.

### 3. Amplificador a transistor

Como incluir o modelo no esquemático? Usando a diretiva `.inc` ou `.include`, para incluir um arquivo.

Sintaxe:

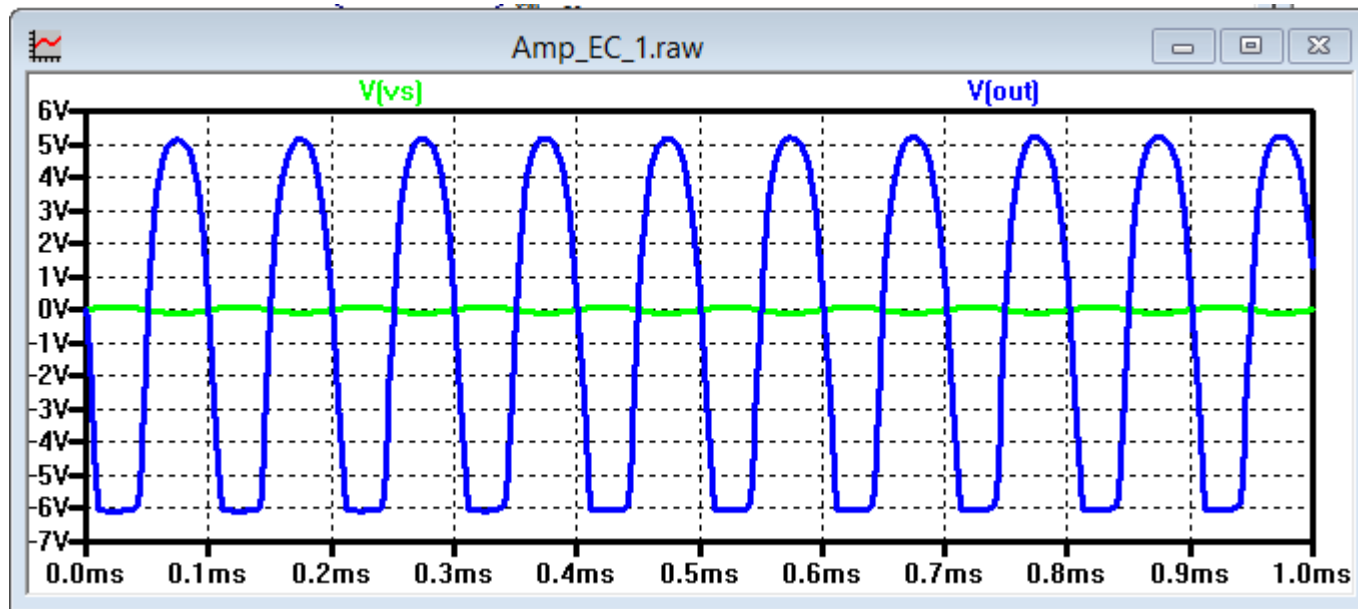
*`.inc <caminho>/arquivo.lib`*

Se o arquivo estiver na pasta do esquemático, não é necessário incluir o caminho.

As diretivas do SPICE são inseridas em *Edit/SPICE Directive*, ou clicando no ícone correspondente na barra de ferramentas.

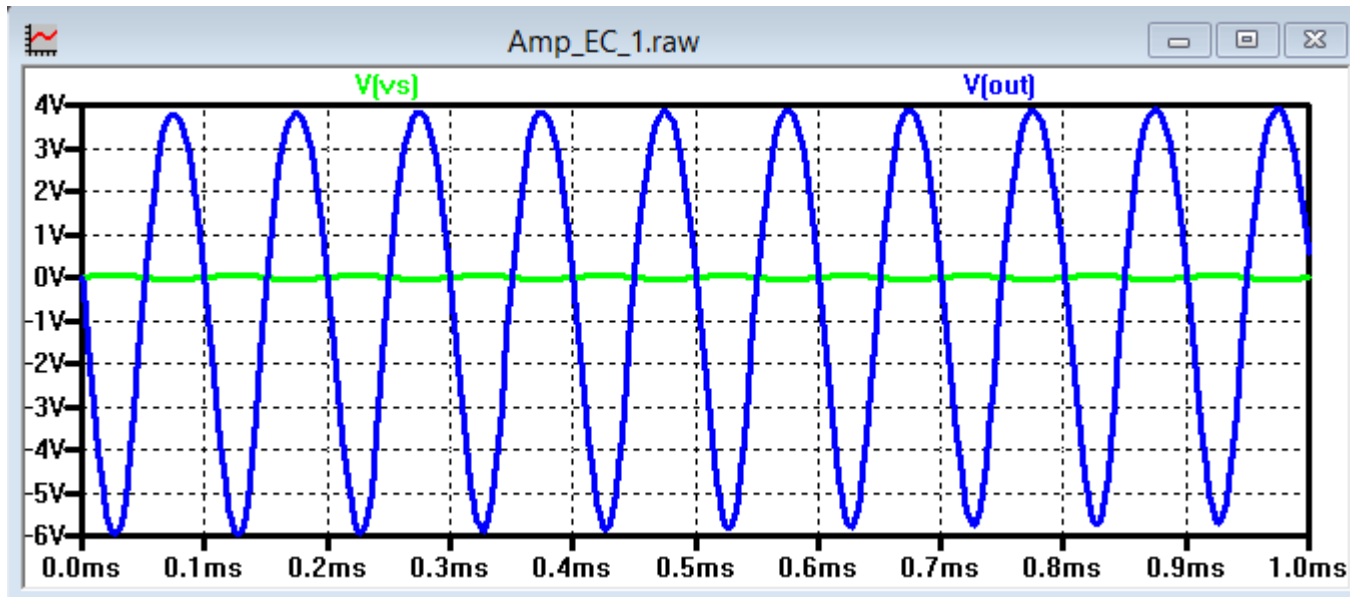
### 3. Amplificador a transistor

Inserida a diretiva no arquivo (juntamente com a diretiva de simulação), rode novamente a simulação. Verifique o resultado. A figura abaixo mostra as formas de onda dos sinais da fonte e na carga, respectivamente.



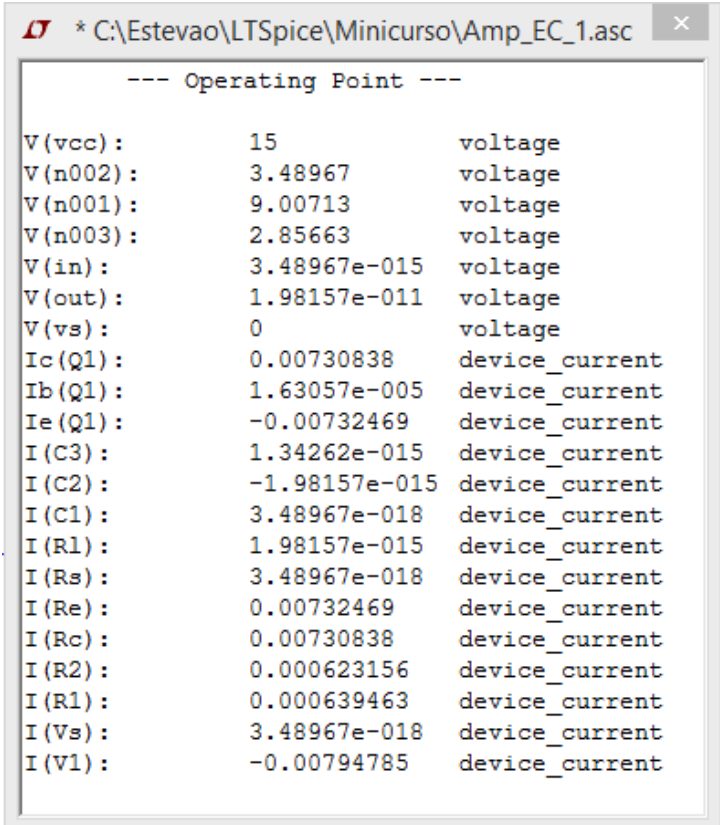
### 3. Amplificador a transistor

O sinal de saída se apresenta distorcido. A distorção se reduz se reduzirmos a amplitude do sinal de entrada para 50 mV, como ilustra a figura a seguir.



### 3. Amplificador a transistor

- Em um circuito a TBJ, os sinais AC estão sobrepostos a níveis DC de polarização. A polarização DC do circuito é a grande responsável por garantir que a amplificação do sinal ocorrerá sem problemas.
- Se quiser conhecer as tensões de polarização do circuito sem executar a análise transiente, mude o tipo de simulação para .op (ponto de operação). O LTSpice IV irá lhe fornecer uma lista com as tensões e correntes no circuito.



```
* C:\Estevao\LTSpice\Minicurso\Amp_EC_1.asc
--- Operating Point ---
V(vcc):          15          voltage
V(n002):         3.48967     voltage
V(n001):         9.00713     voltage
V(n003):         2.85663     voltage
V(in):           3.48967e-015 voltage
V(out):          1.98157e-011 voltage
V(vs):           0          voltage
Ic(Q1):          0.00730838   device_current
Ib(Q1):          1.63057e-005 device_current
Ie(Q1):          -0.00732469  device_current
I(C3):           1.34262e-015 device_current
I(C2):           -1.98157e-015 device_current
I(C1):           3.48967e-018 device_current
I(R1):           1.98157e-015 device_current
I(Rs):           3.48967e-018 device_current
I(Re):           0.00732469   device_current
I(Rc):           0.00730838   device_current
I(R2):           0.000623156  device_current
I(R1):           0.000639463  device_current
I(Vs):           3.48967e-018 device_current
I(V1):           -0.00794785  device_current
```



## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

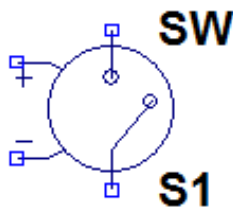
Circuitos chaveados são topologias muito importantes em Eletrônica, envolvendo geralmente a conversão estática de energia. Normalmente, as chaves são implementadas com dispositivos semicondutores.

No entanto, para uma análise preliminar da topologia, é interessante usar uma chave “ideal”, ou melhor explicando, com uma modelagem mais simplificada que aquela encontrada nos semicondutores.

## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

O LTSpice IV possui, em sua biblioteca de componentes, uma chave, identificada como SW. Esta possui quatro terminais: dois deles são os contatos da chave, enquanto os outros dois deverão ser ligados a uma fonte de tensão de comando.

Os valores default para a chave SW são dados abaixo.



Voltage Controlled Switch Model Parameters

Name	Description	Units	Default
Vt	Threshold voltage	V	0.
Vh	Hysteresis voltage	V	0.
Ron	On resistance	$\Omega$	1.
Roff	Off resistance	$\Omega$	1/Gmin
Lser	Series inductance	H	0.
Vser	Series voltage	V	0.
Ilimit	Current limit	A	Infin.

## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

Para se trabalhar com esta chave, é necessário que a declaração de seu modelo esteja no esquemático, usando a diretiva `.model`. A sintaxe (já alterando alguns valores) é a seguinte:

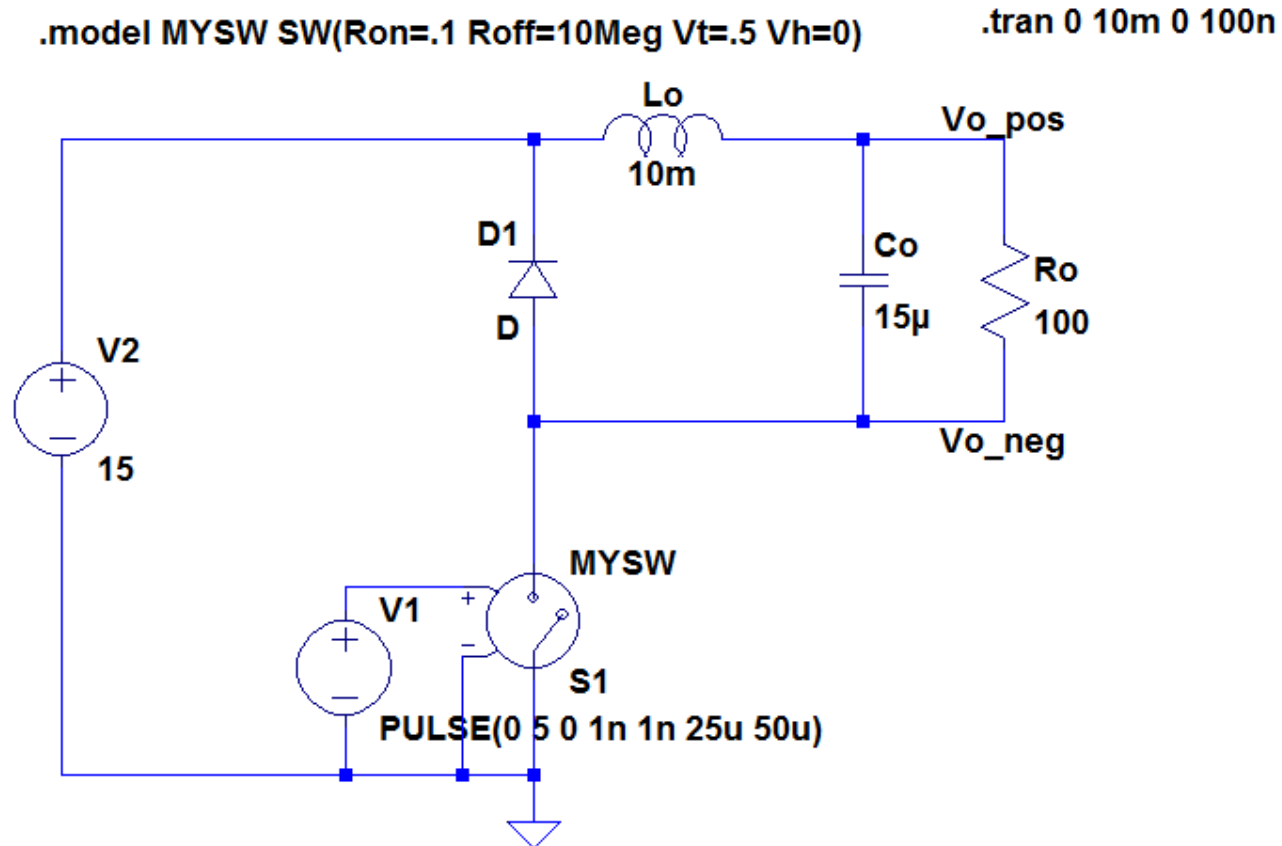
```
.model MYSW SW(Ron=.1 Roff=10Meg Vt=.5 Vh=0)
```

Insira esta diretiva no seu esquemático.

OBS: a sintaxe para chaves pode encontrar grandes diferenças entre um simulador SPICE e outro. Não é uma sintaxe padrão.

## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

Vamos montar um conversor *buck*, conforme ilustra a figura.



## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

O conversor buck tem como característica aplicar à carga uma tensão média de saída *menor* que a tensão de entrada, de acordo com a equação

$$V_O = D \cdot V_I, \text{ com } 0 \leq D \leq 1.$$

*D* é a *razão cíclica* do sinal de comando da chave. A razão cíclica, por sua vez, é definida pelo tempo em que o sinal fica em nível alto ( $T_{ON}$ ) pelo seu período total  $T$ .

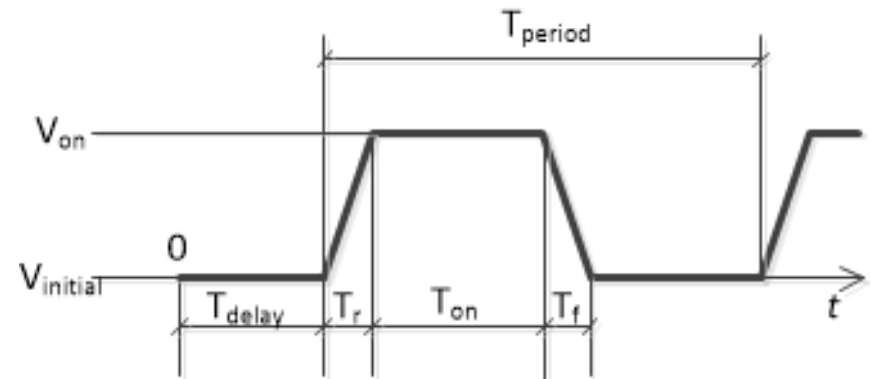
Para gerar os pulsos de disparo da chave, configuraremos a fonte de tensão para o tipo PULSE, como segue.

## 4. Circuitos chaveados usando a chave “ideal”

De acordo com os parâmetros, estamos chaveando o circuito com uma frequência de 20 kHz, com uma razão cíclica de 50%.

OBS a fonte PULSE é uma das mais versáteis do SPICE. Com ela, é possível gerar sinais de comando de chaves, pulsos digitais e até mesmo um sinal triangular ou dente-de-serra.

Vinitial (V):	0
Von(V):	5
Tdelay(s):	0
Trise(s):	1n
Tfall(s):	1n
Ton(s):	25u
Tperiod(s):	50u
Ncycles:	

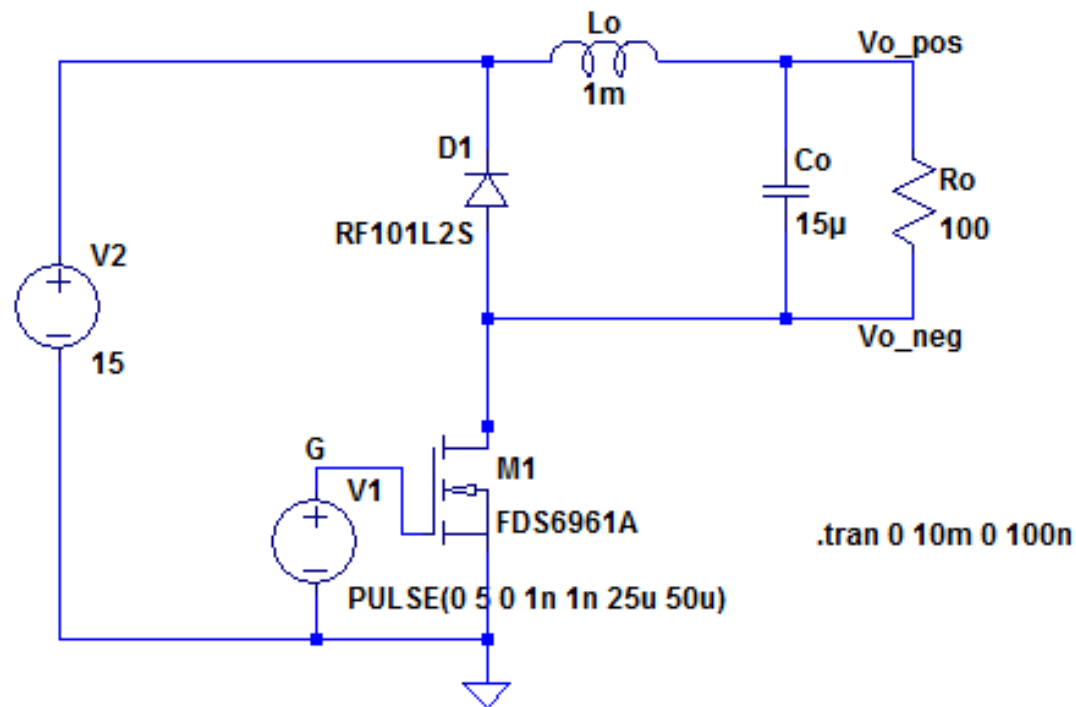


## 5. Circuitos chaveados usando modelos de MOSFETs

- Uma vez verificada a validade da topologia, podemos estar interessados em como será o desempenho do circuito com os componentes que iremos usar. Para isso, substituiremos a chave controlada pelo modelo de um MOSFET de potência. O diodo D também será substituído por um modelo de diodo de recuperação rápida, próprio para aplicações de chaveamento em alta frequência.
- Usaremos os modelos FDS6961A e RF101L2S para o MOSFET e diodo, respectivamente. Ambos são residentes na biblioteca de componentes do LTSpice IV.

## 5. Circuitos chaveados usando modelos de MOSFETs e diodos

- O circuito fica como apresentado na figura.





## 6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo "ideal")

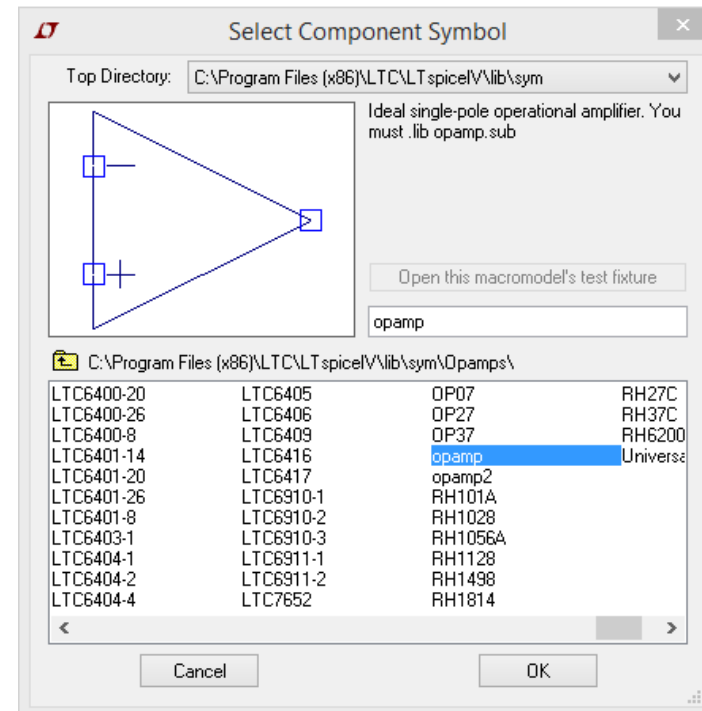
- Circuitos com amplificadores operacionais (ampops) são de uso frequente em Eletrônica. Neste exemplo, iremos montar um circuito usando um macromodelo de amplificador operacional simples.
- O macromodelo, na verdade, é um subcircuito, diferente do modelo, que é um conjunto de parâmetros que caracterizam um elemento fundamental (diodo, transistor, MOSFET, etc.).
- Este macromodelo de aipop é bastante simples, mas não chega a ser o aipop ideal (um aipop ideal seria de difícil manuseio pelo SPICE). Porém, para uma ampla variedade de circuitos montados com ele, seu comportamento pode ser considerado o de um aipop ideal.

## 6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo "ideal")

- Para inserir o ampop, vamos buscá-lo na caixa de seleção de componentes, na pasta [opamp]. Nesta pasta, procure pelo componente opamp.
- Note que o LTSpice IV nos orienta a incluir a biblioteca opamp.sub, com o comando

*.lib opamp.sub*

Não só faremos, como iremos verificar o que este arquivo contém.



## 6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo "ideal")

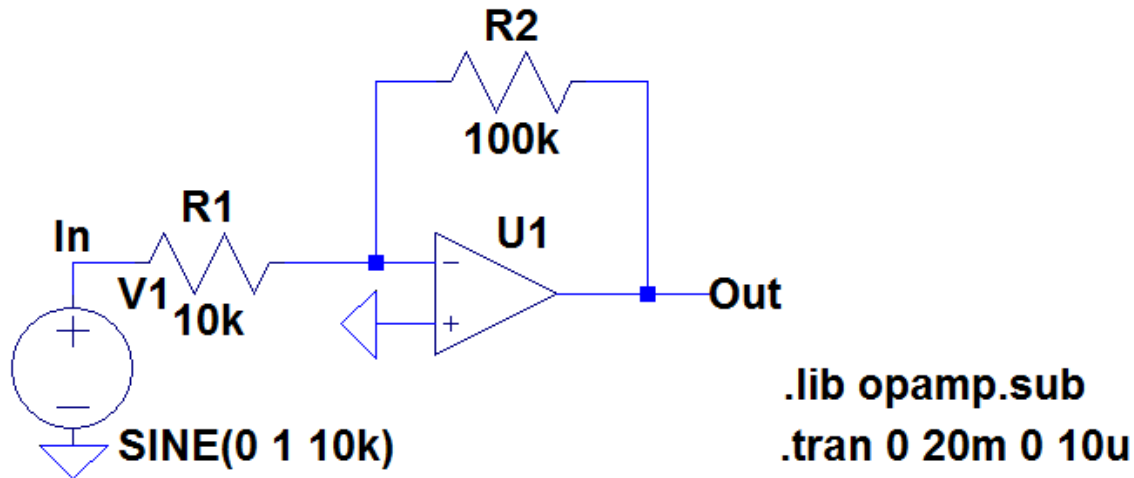
- Abrindo o arquivo *opamp.sub*, temos:

```
* Copyright © Linear Technology Corp. 1998, 1999, 2000. All rights reserved. *  
.subckt opamp 1 2 3  
G1 0 3 2 1 {Aol}  
R3 3 0 1.  
C3 3 0 {Aol/GBW/6.28318530717959}  
.ends opamp
```

- Trata-se, portanto, de um subcircuito bem simples, onde o usuário pode definir o ganho em malha aberta (Aol) e o produto ganho-banda passante (GBW). Para aplicações simples, pode-se adotar os valores default.

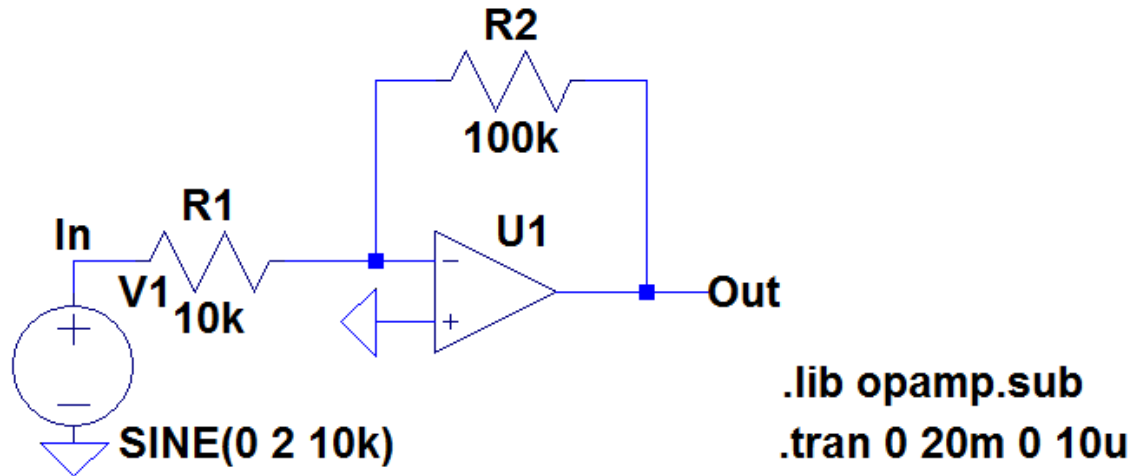
## 6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo "ideal")

- Com este ampop, iremos montar um amplificador inversor, cujo ganho é dado por  $-R2/R1$ . Neste caso, espera-se um ganho de tensão igual a -10 (o sinal negativo indica apenas inversão de fase entre os sinais de saída e de entrada).



## 6. Circuito com amplificadores operacionais (modelo "ideal")

- Curiosidade: dobre a amplitude do sinal de entrada. Verifique a saída.

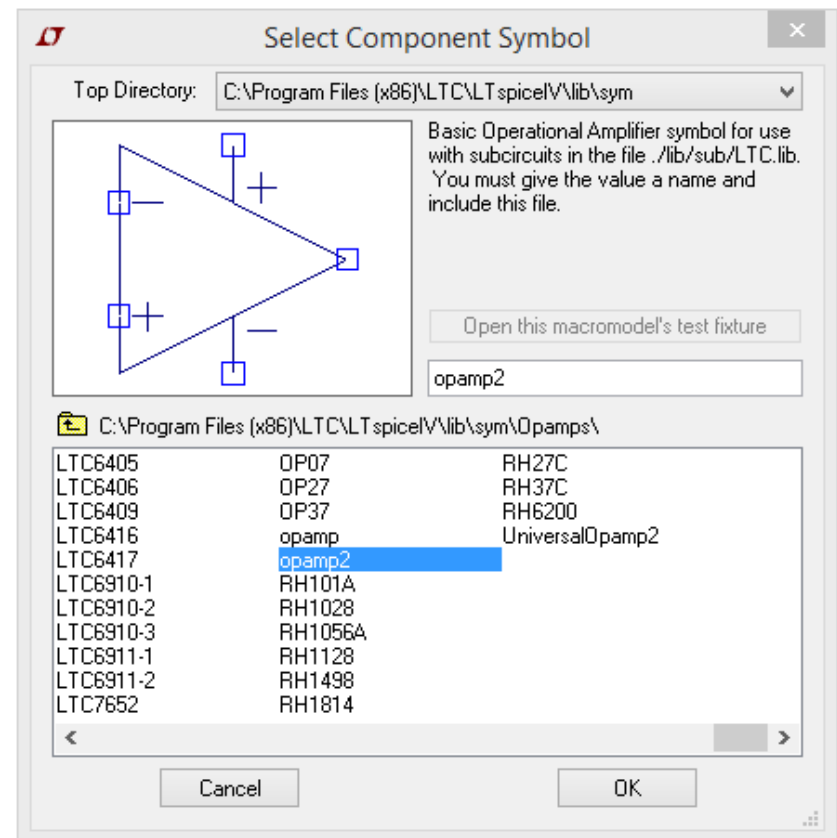


## 7. Circuito com amplificadores operacionais – importando macromodelos externos

- Além do macromodelo “ideal”, a pasta [opamp] contém diversos modelos de amplificadores operacionais da Linear Technologies.
- Mas pode ser necessário importar um macromodelo de amplificador operacional de outro fabricante.
- Neste exercício, iremos simular um circuito semelhante ao anterior, porém usando um macromodelo do famoso amplificador operacional 741.
- Para o macromodelo do 741, será necessário incluir as tensões de alimentação.

## 7. Circuito com amplificadores operacionais - importando macromodelos externos

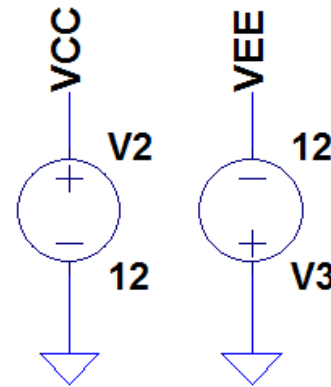
- O símbolo a ser utilizado é o opamp2, presente na pasta [opamp]. Apesar de ser um bloco para ser usado com os macromodelos da biblioteca *LTC.lib* (ver figura), a metodologia é a mesma para bibliotecas importadas.
- Observe que o símbolo inclui os terminais de alimentação.



## 7. Circuito com amplificadores operacionais

- importando macromodelos externos

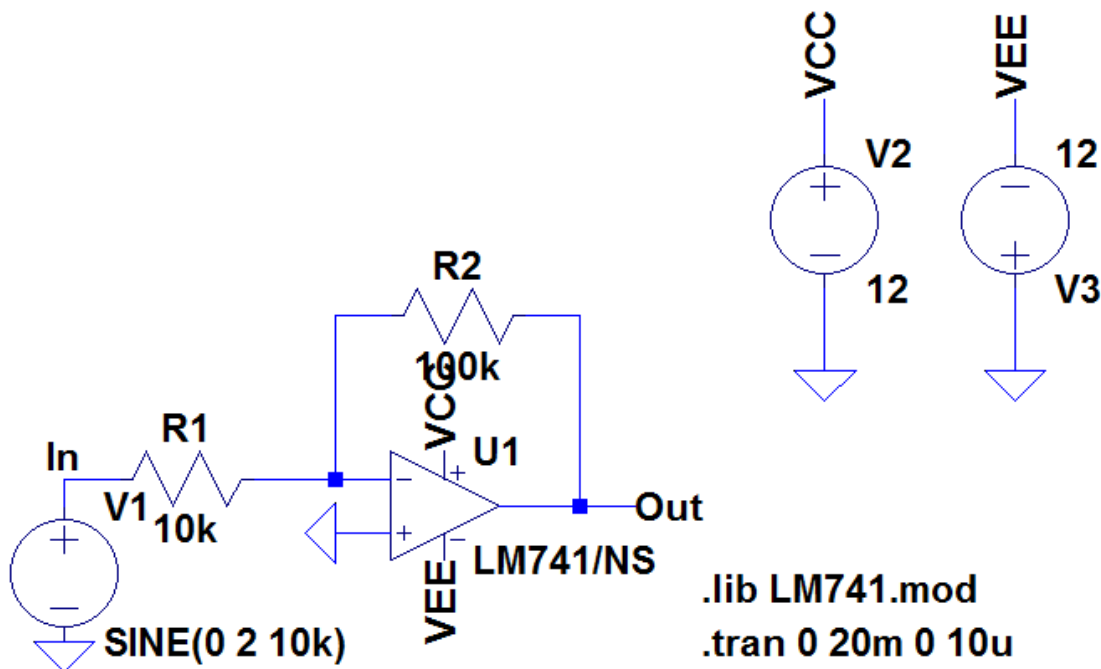
- Ao posicionar o elemento no esquemático, altere o seu “valor” opamp2 para o nome do macromodelo na biblioteca importada. No caso, ele deverá ser renomeado para “LM741/NS”.
- Você deverá incluir as fontes de alimentação positiva e negativa, como ilustra a figura.





## 7. Circuito com amplificadores operacionais - importando macromodelos externos

- O circuito será o da figura.



Rode a simulação e interprete os resultados. Altere frequência e amplitude do sinal, se desejar. E lembre-se: estamos usando o macromodelo de um ampop *real*.

## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

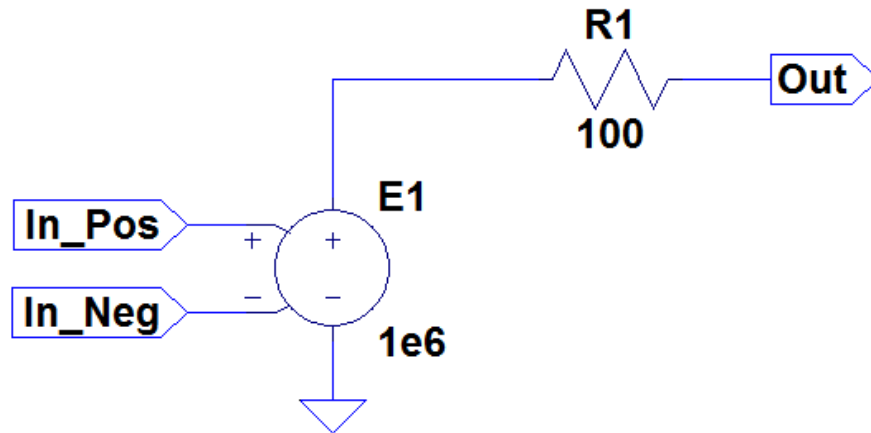
- Os macromodelos usados para os ampops nos exercícios anteriores nada mais são do que subcircuitos, ou seja, circuitos que são “encapsulados” em um determinado símbolo, e usados como instâncias em um esquemático, como se fossem um único componente.
- Dentre as vantagens do subcircuito, estão a possibilidade de montar um esquemático mais “limpo”, usar diversas instâncias do mesmo subcircuito e facilitar as alterações, visto que, se necessário alterar um componente do subcircuito, não é necessário executar N alterações, caso N instâncias do subcircuito tenham sido usadas em um outro esquemático.

## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

- O LTSpice IV oferece recursos para a criação de símbolos associados a um subcircuito. Iremos ilustrar isso criando nosso próprio amplificador operacional, com características bem próximas das do ideal.
- Um ampop “quase” ideal poderá ser montado usando uma fonte de tensão controlada de tensão (E) em série com um resistor. O valor do ganho da fonte deverá ser elevado (por exemplo, 1E6).
- Em série com a saída da fonte controlada, usaremos um resistor. Lembre-se, componentes ideais demais podem ser um problema...

## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

- Monte o esquemático e salve. Os nós In\_Pos e In\_Neg serão configurados como pinos de entrada, enquanto o nó Out será configurado como um nó de saída (obvio!).



Circuito simples, não?

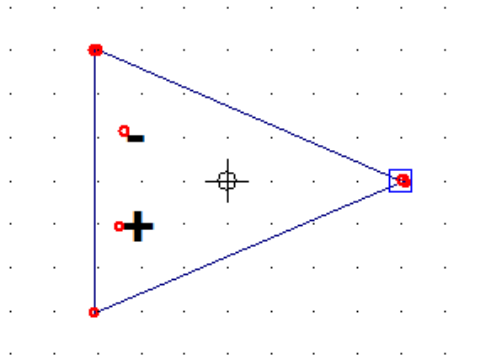
## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

Continuemos. Em *File/New Symbol*, uma tela irá se abrir para criar o símbolo. O arquivo que você salvar não terá a extensão .asc, mas sim .asy. Salve-o na mesma pasta e exatamente com o mesmo nome do esquemático ao qual ele será associado.

Neste ambiente é possível desenhar formas como linhas, retângulos, círculos, arcos e inserir textos. É o bastante pra se criar símbolos simples. Tais elementos, sem qualquer significado elétrico, são encontrados no menu *Draw*.

## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

Vamos criar o símbolo do ampop, como mostra a figura.



Falta agora inserir os pinos, o que é feito em *Edit/ Add Pin/Port*. Note que os pinos não podem ser posicionados em qualquer lugar do símbolo, mas apenas nos grids. Isso é imprescindível para que, ao se usar o símbolo em outro esquemático, seja possível efetuar as ligações elétricas nos pinos correspondentes.

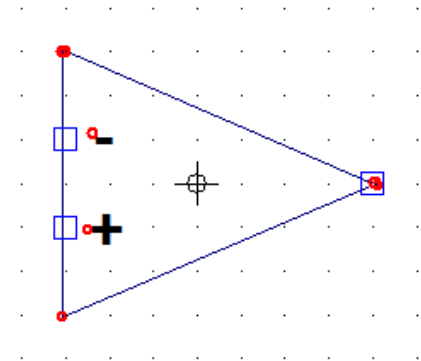
## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

Inseridos os pinos, nomeie-os exatamente com o mesmo nome dos pinos no esquemático correspondente.

Pino 1 – In\_Pos

Pino 2 – In\_Neg

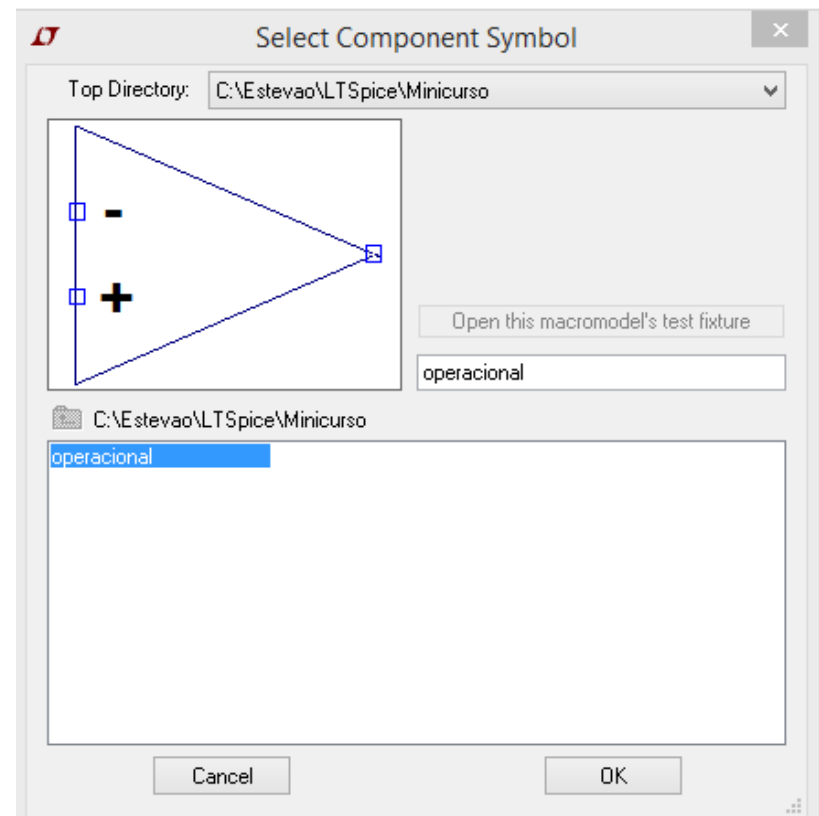
Pino 3 – Out



Salve novamente. Para testar se o LTSpice IV irá associar este símbolo ao esquemático, vá no menu *Hierarchy* e clique em *Open Schematic*.

## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

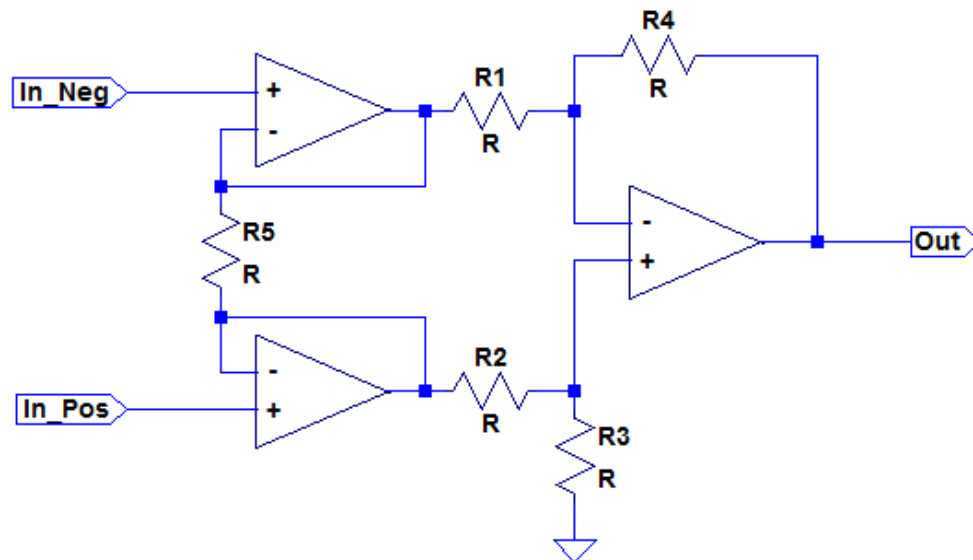
Crie agora outro esquemático, na mesma pasta onde você salvou o símbolo. Salve-o com outro nome, e procure pelo subcircuito na pasta de seleção de componentes. Note que o aplicativo oferece a opção de mudar de pasta para inserir um componente que não esteja na biblioteca default.



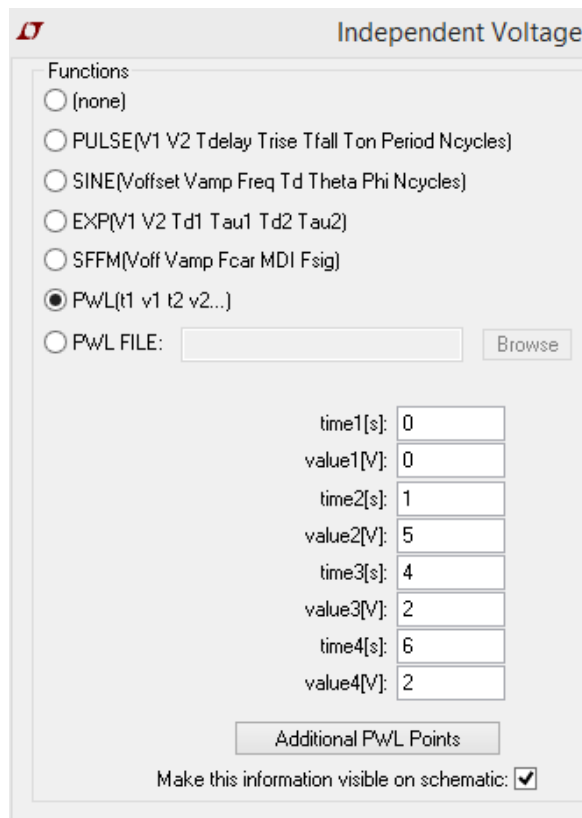


## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

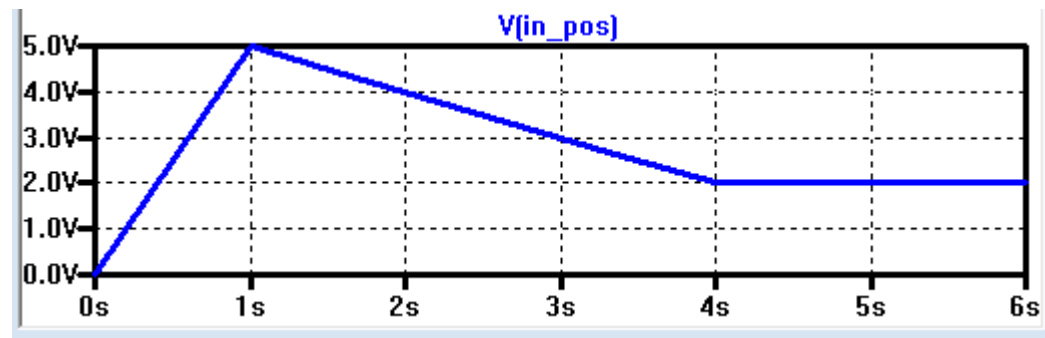
Vamos agora montar um *amplificador de instrumentação*, capaz de amplificar a diferença entre dois sinais de entrada. Três instâncias do bloco “operacional” serão usadas.



## 8. Usando subcircuitos – monte seu próprio amplificador operacional

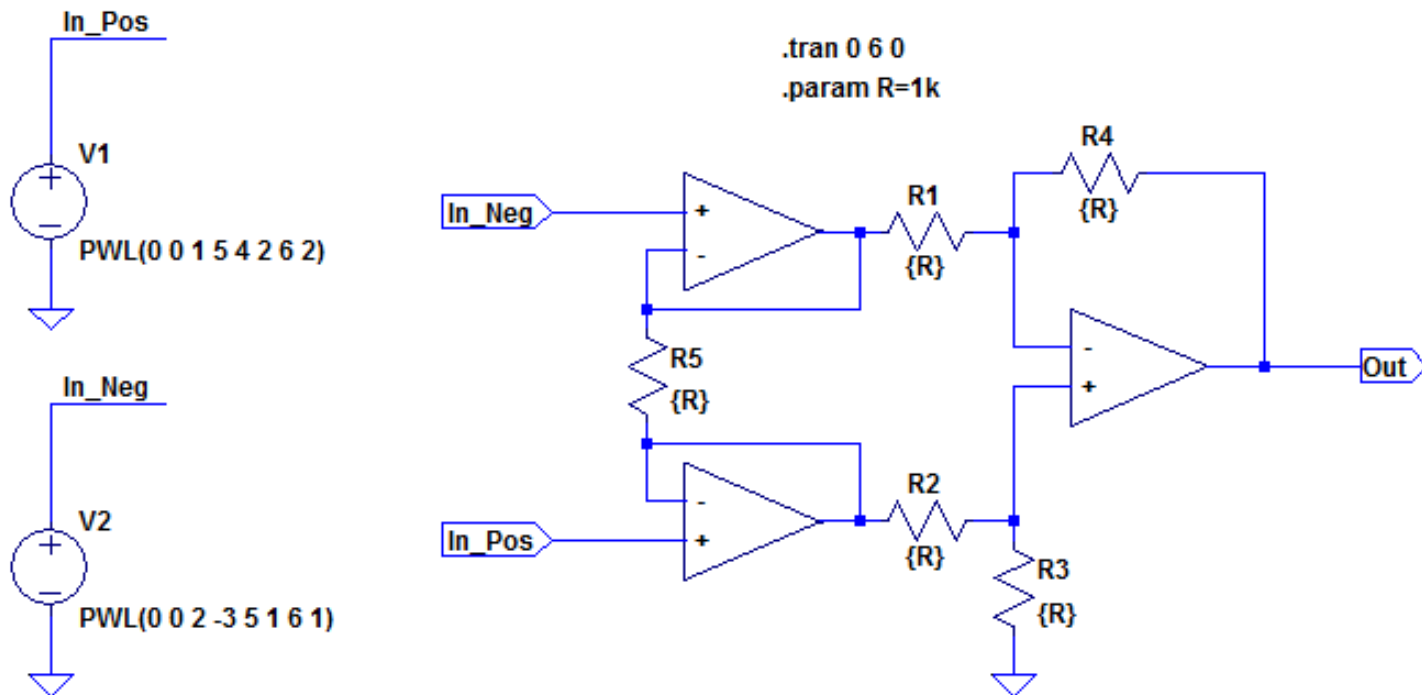


Aproveitando a oportunidade, vamos usar, como fontes de estímulo, dois sinais PWL (*piecewise linear* – linear por partes). Esta fonte é interessante para gerar, por exemplo, sinais de tensão que apresentem, em diferentes intervalos, características diferentes, como ilustra a figura.



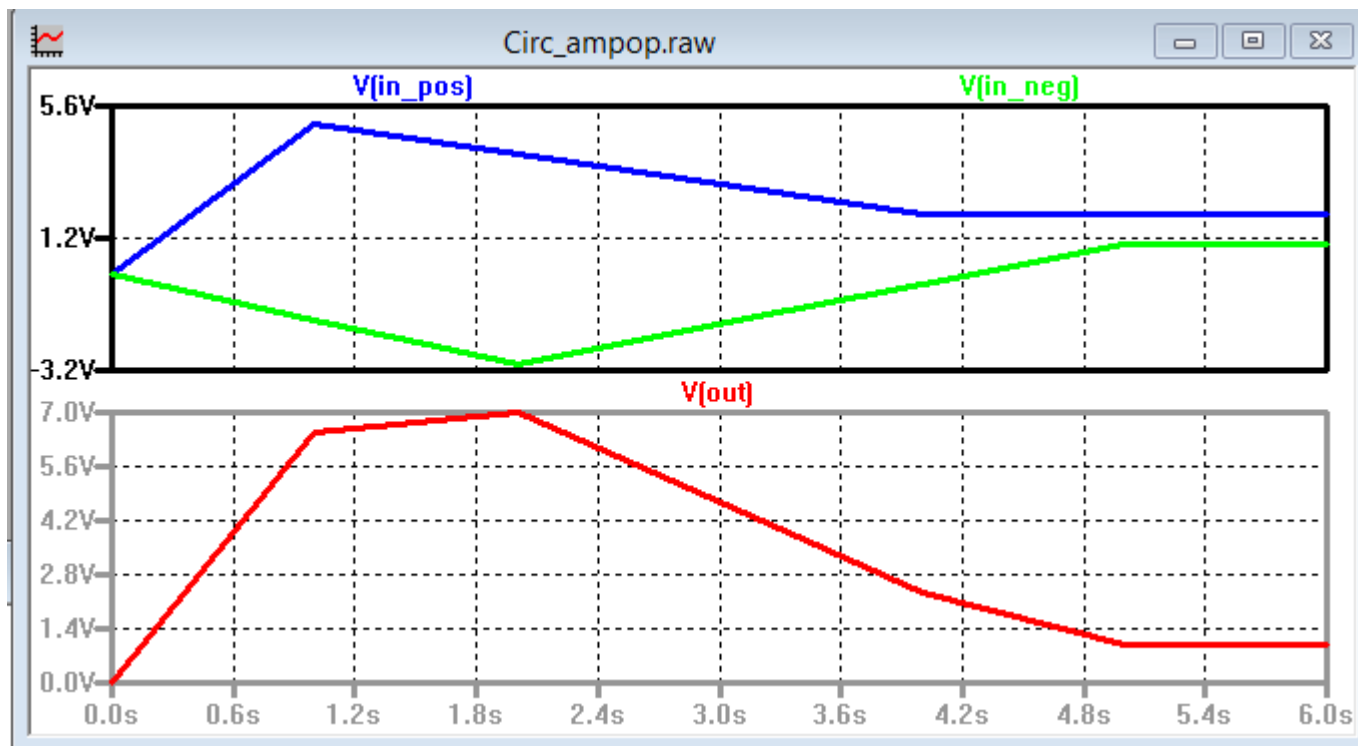
## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

O circuito completo. Observe como inserimos os valores dos resistores. Este pode ser um recurso muito útil!



## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

Simulação transiente



## 8. Usando subcircuitos - monte seu próprio amplificador operacional

Dois exercícios são propostos, a respeito de subcircuitos:

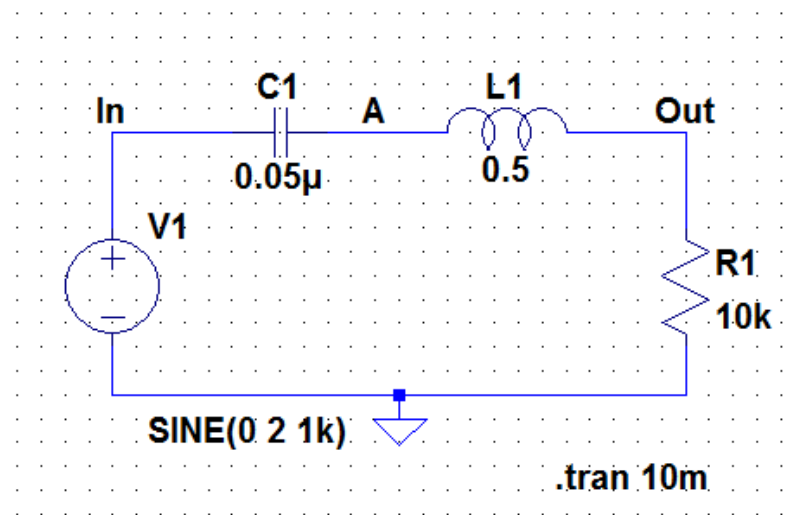
1. Experimente acrescentar ao subcircuito “operacional” características de saturação da saída, ou seja, a saída não poderá ter valor maior que uma tensão-limite positiva, nem menor que uma tensão-limite negativa. Na prática, tais limites são definidos pelas fontes de alimentação do ampop.
2. Crie um símbolo englobando todo o circuito do amplificador de instrumentação, com exceção do resistor R5, que deverá ser conectado externamente. Na prática, o ganho de um amplificador de instrumentação é definido por apenas um resistor externo (o R5), sendo os demais componentes integrados.

## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

Usaremos o circuito RLC da Parte I para ilustrar um importante tipo de simulação no SPICE: a análise AC, ou resposta em frequência. Este tipo de análise é particularmente útil ao se estudar o comportamento de filtros (passivos ou ativos).

Na análise AC, o simulador considera a fonte senoidal, com uma amplitude definida pelo usuário, e executa uma varredura na frequência do sinal.

Abra o esquemático original e salve com outro nome.



## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

Clique na fonte V1 e selecione “none”.  
Nos campos *AC Ampitude* e *AC Phase*  
insira o valor da amplitude e fase do sinal  
V1. Para a amplitude, digite 1. A fase é  
opcional, ou você pode inserir 0.

Resta configurar a simulação AC, clicando  
em *Simulate/Edit Simulation Cmd*.

Source - V1

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic: ☒

Small signal AC analysis(.AC)

AC Amplitude:

AC Phase:

Make this information visible on schematic: ☒

Parasitic Properties

Series Resistance[Ω]:

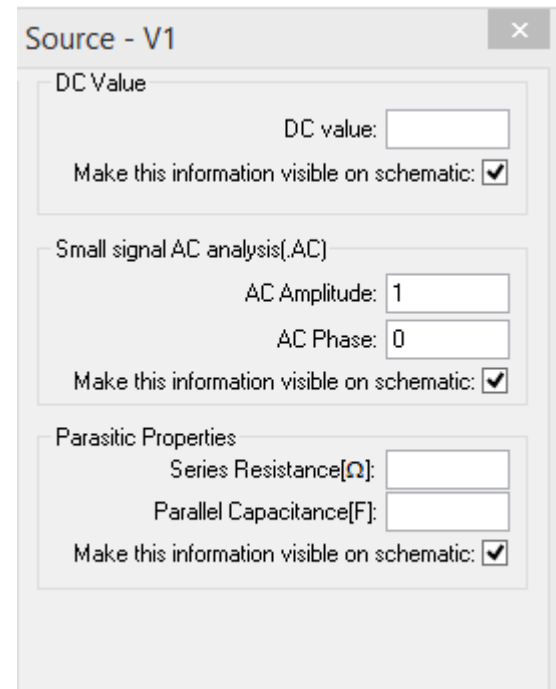
Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on schematic: ☒

## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

Na aba AC Analysis, constam os seguintes campos:

- *Type of Sweep*: onde se escolhe uma varredura por décadas, oitavas, linear ou a partir de uma lista específica.
- *Number of points*: quantidade de pontos por década, oitava, ou número total de pontos, de acordo com a escolha do primeiro campo.
- *Start Frequency*: frequência de início de varredura. Não pode ser zero
- *Stop Frequency*: frequência de parada da varredura.



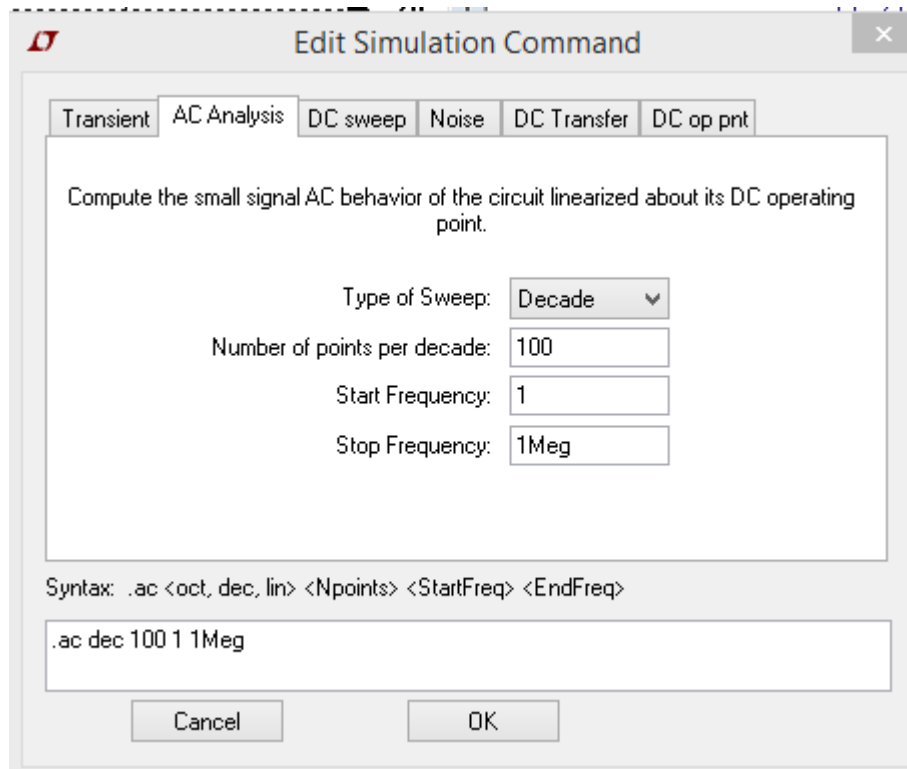
The image shows a dialog box titled "Source - V1" with a close button (X) in the top right corner. It contains three sections:

- DC Value**: A text input field for "DC value:" and a checkbox labeled "Make this information visible on schematic:" which is checked.
- Small signal AC analysis(.AC)**: Two text input fields, "AC Amplitude:" with the value "1" and "AC Phase:" with the value "0", and a checkbox labeled "Make this information visible on schematic:" which is checked.
- Parasitic Properties**: Two text input fields, "Series Resistance[Ω]:" and "Parallel Capacitance[F]:", and a checkbox labeled "Make this information visible on schematic:" which is checked.



## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

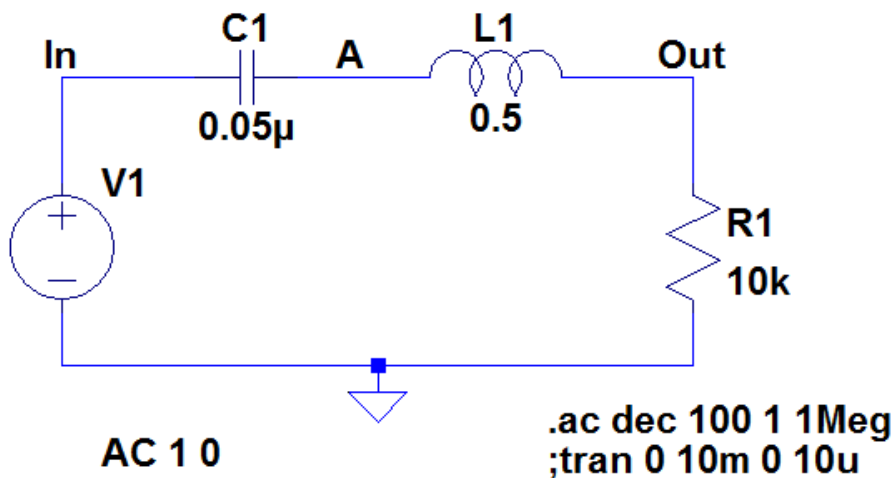
Configure os parâmetros, a princípio, conforme orienta a figura a seguir.



Dê OK e inclua a diretiva de simulação no esquemático.

## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

O circuito fica conforme apresentado na figura.

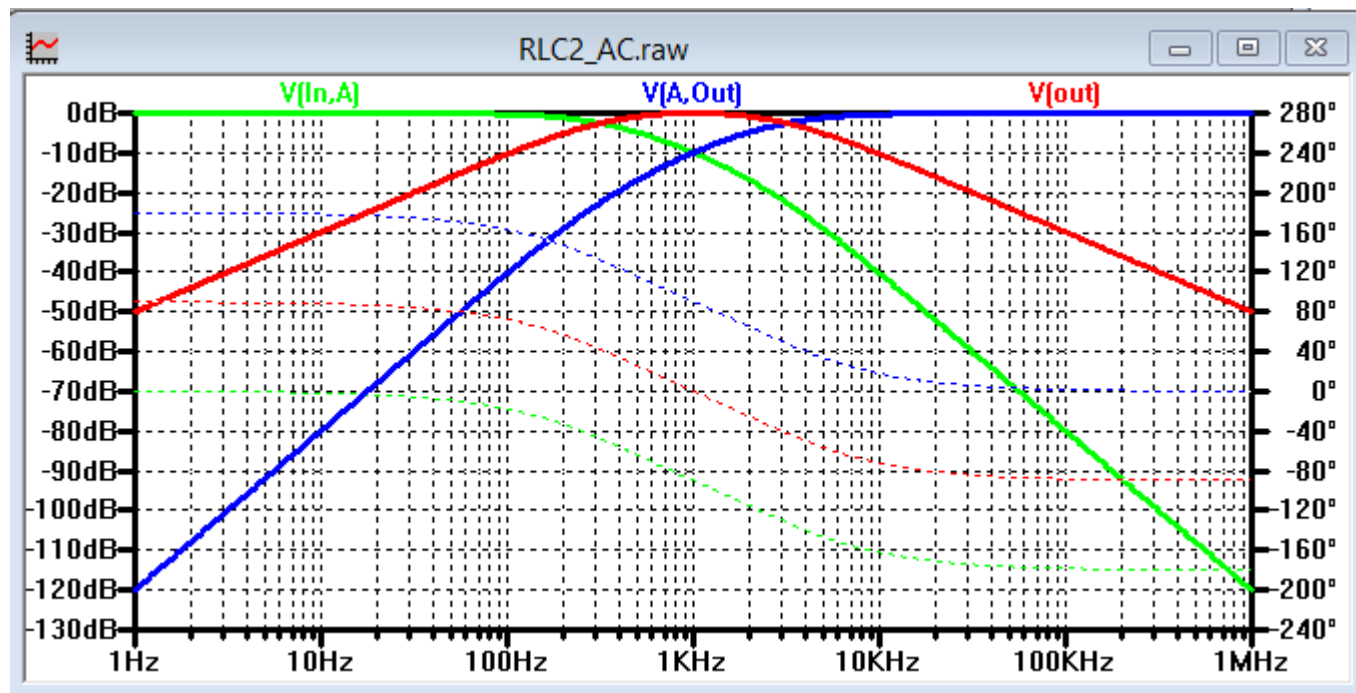


Se algum tipo diferente de análise tiver sido configurado anteriormente, a diretiva anterior aparece comentada (;) automaticamente. Diferente de outros simuladores SPICE, o LTSpice IV somente realiza um tipo de análise por vez.

Rode a simulação, e verifique as tensões em C1, L1 e R1.

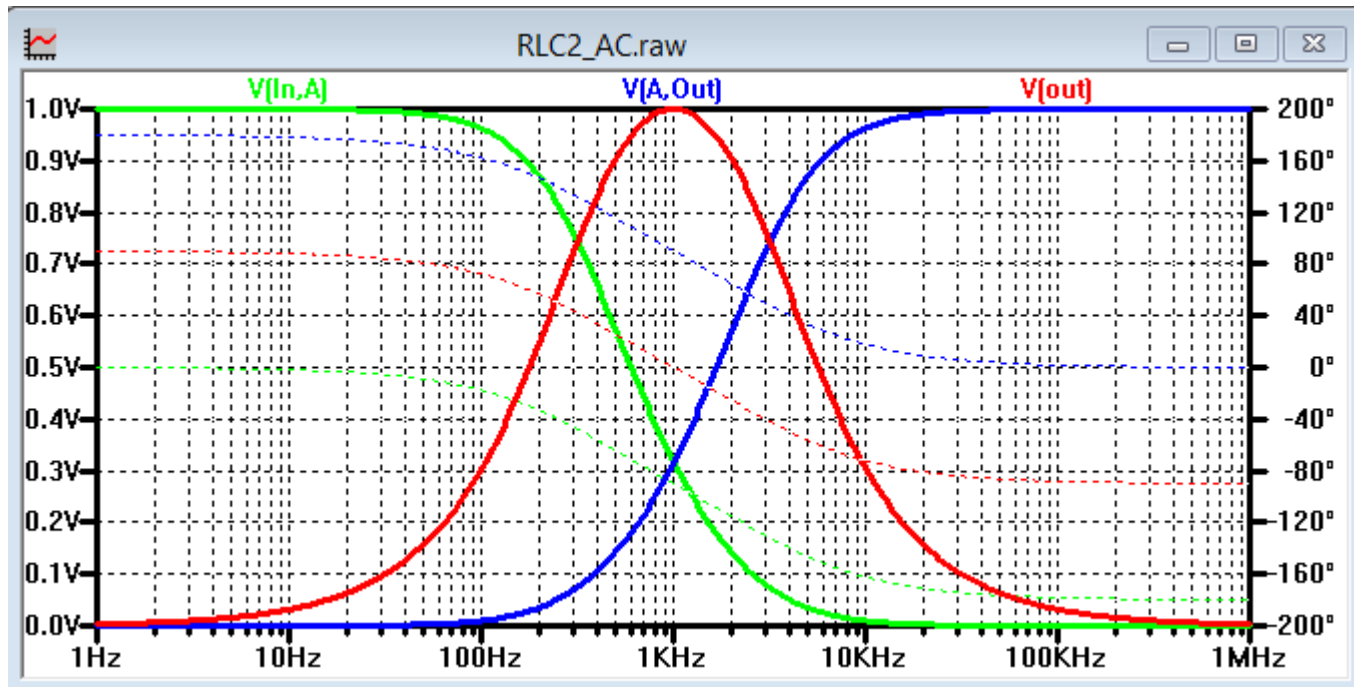
## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

O resultado é mostrado na figura a seguir. A representação das amplitudes na análise AC é, por default, em decibéis (?). As fases estão em graus.



## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

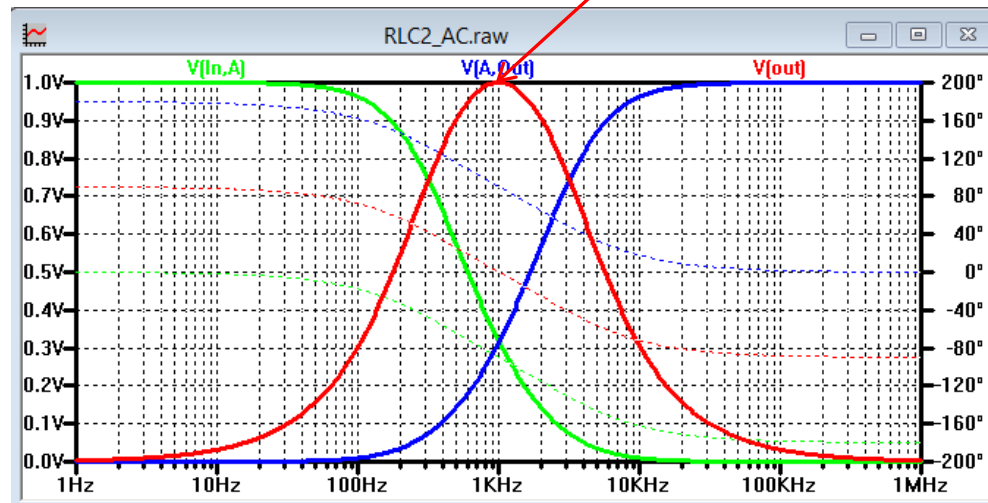
Um novo ajuste no eixo vertical permite mudar a representação de decibéis para linear. Talvez neste momento esta forma de visualizar o resultado seja mais esclarecedora.



## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

Da figura, fica evidente uma ressonância em 1 kHz, onde as reatâncias indutiva e capacitiva se cancelam, e toda a tensão da fonte aparece nos terminais do resistor. Observe que as tensões no capacitor e indutor para esta frequência possuem mesma amplitude e fases opostas.

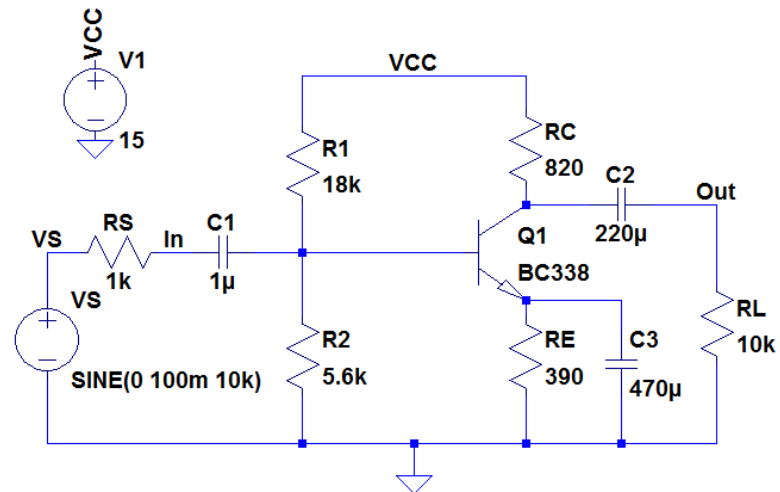
Frequência de ressonância (1 kHz)



## 9. Resposta em frequência - circuito RLC

Aplicamos a análise AC a um circuito linear. No caso de circuitos com elementos não-lineares, a análise AC é realizada linearizando-se todos os elementos em seus pontos de operação DC.

Experimente, por exemplo, realizar a análise AC do amplificador a transistor do Exercício 3.

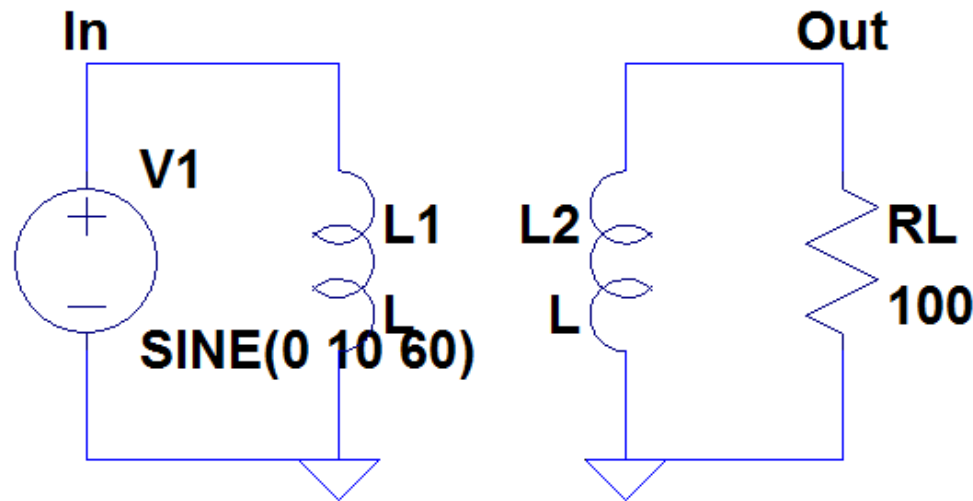


## 10. Simulando transformadores

- Muitas pessoas acham não ser possível simular transformadores em plataformas SPICE, com exceção de alguns aplicativos onde este elemento já está incorporado à biblioteca.
- De fato, o SPICE não possui o transformador ideal, mas pode trabalhar com indutores acoplados magneticamente. Ou seja, é possível simular o transformador, obedecendo alguns critérios.
- Vamos ver como simular, por exemplo, um transformador com relação de transformação 1:2.

## 10. Simulando transformadores

Monte o circuito da figura a seguir. L1 e L2 são indutores comuns, e nesta figura, ainda desacoplados. Note que posicionamos o nó de referência em ambos os lados (o SPICE não admite nós flutuantes).

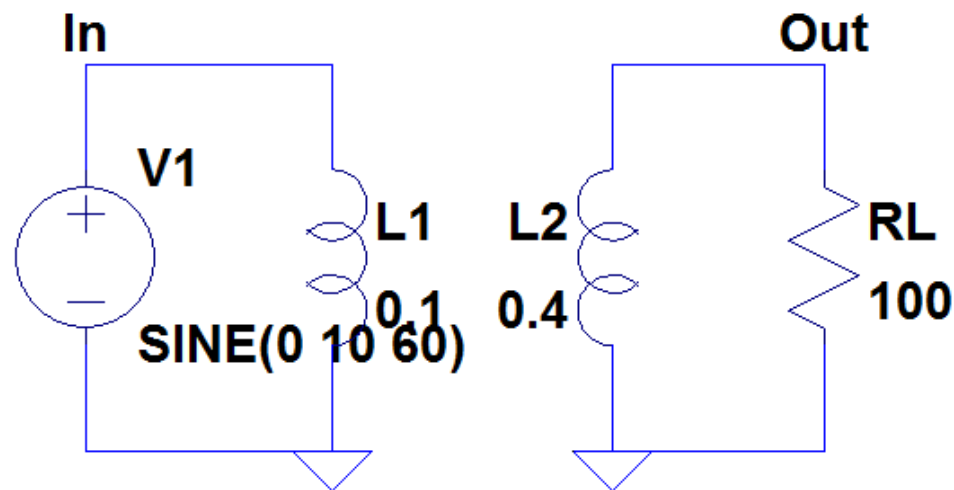


```
.tran 0 300m 0 100u
```



## 10. Simulando transformadores

A indutância é proporcional ao *quadrado* do número de espiras. Logo, a relação entre espiras (a grosso modo, a relação de transformação) de 1:2 deve corresponder a uma relação entre indutâncias de 1:4. Escolhemos 0,1 H e 0,4 H para L1 e L2, respectivamente.



.tran 0 300m 0 100u

## 10. Simulando transformadores

O SPICE possui uma diretiva “K” para acoplamento de indutores. Vamos inserir no circuito a diretiva

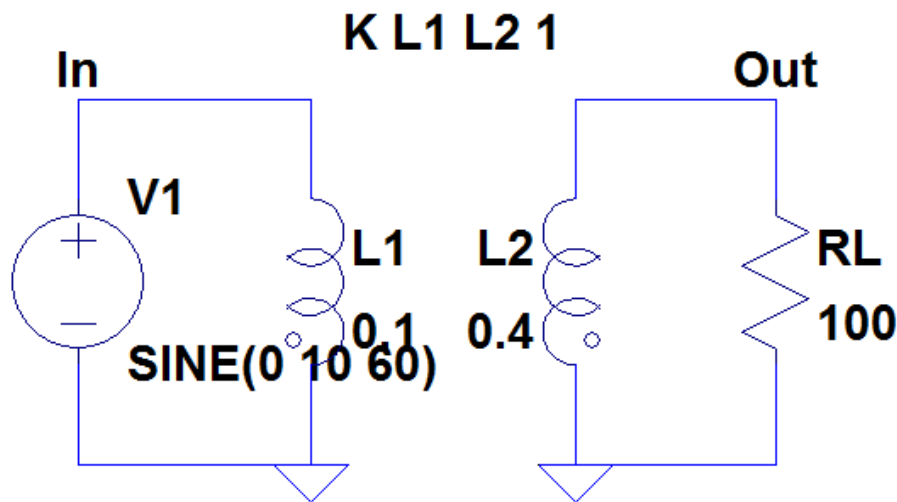
K L1 L2 1

Observe o que acontece com a representação de L1 e L2.

O índice 1 indica o fator de acoplamento entre as bobinas, neste caso igual a 100% (sem indutância de dispersão).

$$-1 \leq K \leq 1$$

Pois bem, rode a simulação.

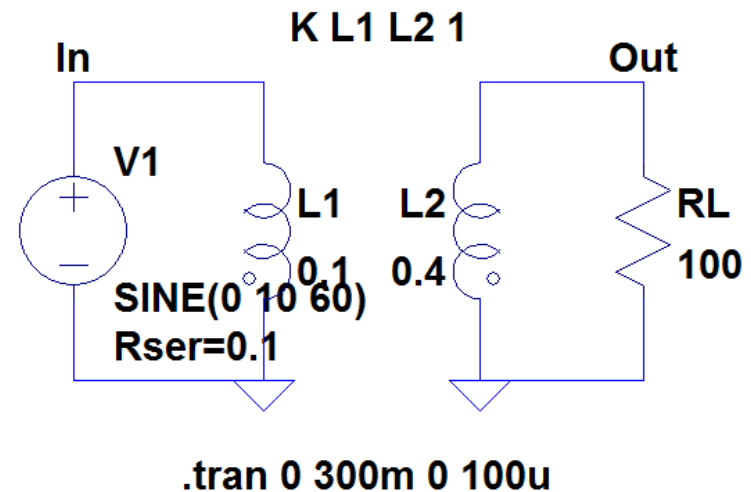
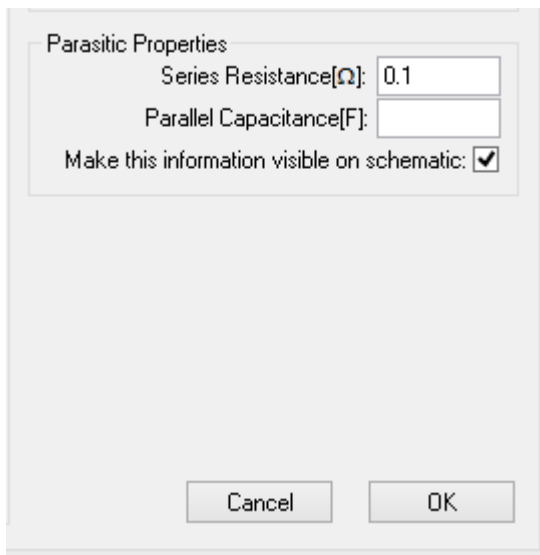


.tran 0 300m 0 100u

## 10. Simulando transformadores

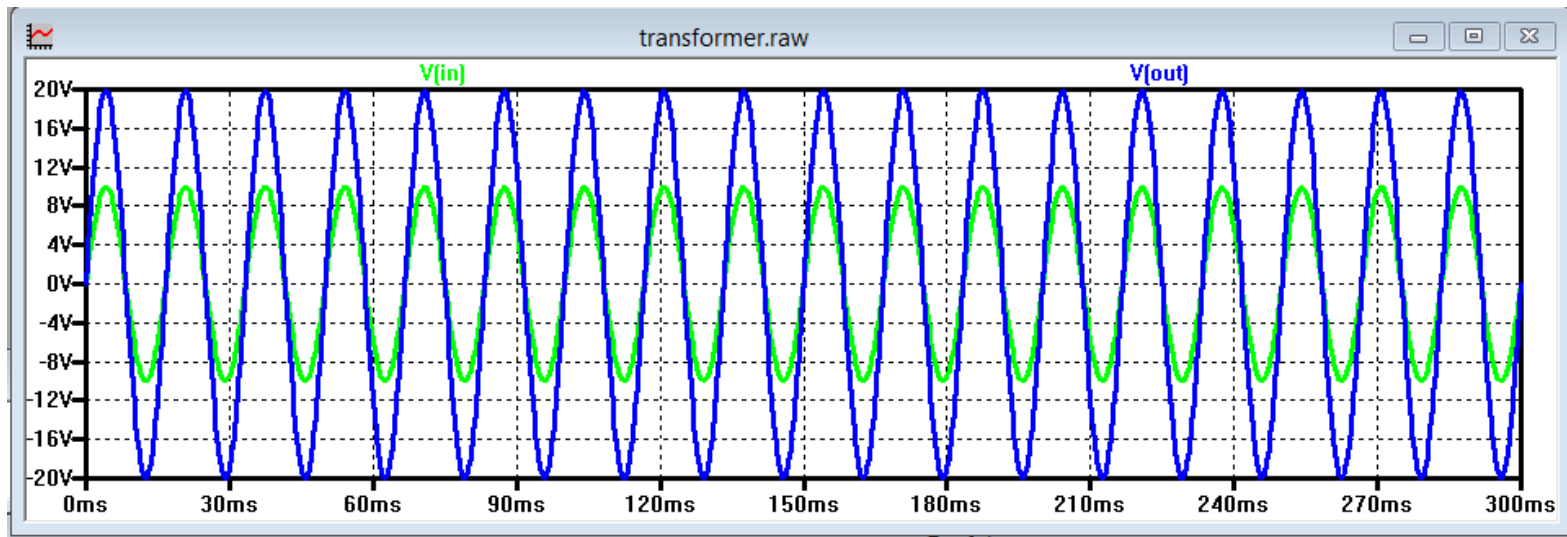
Provavelmente você recebeu uma mensagem de erro do LTSpice IV, dizendo ser necessário adicionar alguma resistência série entre a fonte V1 e o indutor L1.

Felizmente, isso é fácil de resolver no LTSpice IV, que prevê para a fonte de tensão uma resistência parasita série.



## 10. Simulando transformadores

Execute novamente a simulação e verifique a relação entre as tensões  $V(\text{Out})$  e  $V(\text{In})$ .



Observe também o que ocorre com as correntes nos indutores. Temos ou não um transformador?

## 11. Exemplos do LTSpice IV - Ponte de Wien

- O circuito a seguir está na pasta */examples/Educational* do LTSpice IV. Nesta pasta estão diferentes exemplos com propósito educacional. Abra o arquivo *Wien.asc*.
- Trata-se de um oscilador de Wien, que usa como elemento ativo o ampop LT1001, da Linear Technologies. Ao se clicar com o botão direito no componente, você tem a chance de abrir um outro arquivo, denominado Text Fixture, onde é apresentado um circuito de teste do dispositivo.
- Você pode ainda ser direcionado ao Website da Linear para acessar o datasheet do componente.
- Execute a simulação e verifique o resultado.
- O LT1001 é um macromodelo, e se você quiser saber como é, abra a biblioteca */lib/sub/LTC.lib*, onde a descrição deste e de outros subcircuitos está incluída.

## 12. Exemplos do LTSpice IV - Conversor Step-Down (Buck) integrado

- Na pasta *examples/jigs* estão diversos circuitos que usam componentes da Linear (diversas finalidades).
- A Linear oferece uma grande gama de conversores estáticos de energia integrados. Verificaremos o funcionamento de um conversor *step-down (buck)* integrado, o LTC3411. Lembre-se que simulamos um conversor *buck* com chaves e transistores discretos, nos Exercícios 4 e 5.
- Execute a simulação e verifique os resultados.
- Não perca a viagem! Tente encontrar a frequência de chaveamento deste dispositivo, monitorando a tensão no pino SW.
- Um ponto interessante: encontre o modelo *LTC3411.sub* na pasta */lib/sub* e tente abrir (do LTSpice IV, por exemplo). ☹

# Conclusão

- É quase impossível apresentar um exemplo para atender a cada necessidade. No entanto, esperamos que estes aqui apresentados sirvam de orientação para que você efetue suas simulações no LTSpice IV com desenvoltura.
- Uma fonte adicional onde se encontram símbolos, modelos e macromodelos para o LTSpice IV pode ser encontrada em [http://www.ltwiki.org/index.php5?title=LTspiceIV-library\\_Library\\_Listing\\_Expanded](http://www.ltwiki.org/index.php5?title=LTspiceIV-library_Library_Listing_Expanded)

# Obrigado!

Contato:

Prof. Estêvão Coelho Teixeira

Faculdade de Engenharia, Sala 4273

Tel: 2102-6385, Ramal 32

E-mail: [estevao@engenharia.ufjf.br](mailto:estevao@engenharia.ufjf.br)