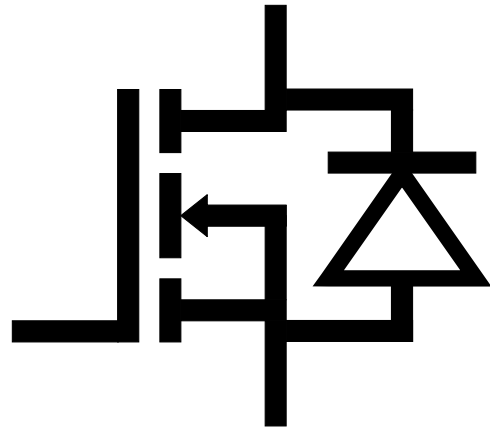


**ESCOLA DE  
ENGENHARIA MAUÁ**



**ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

**Edição 2006**  
**Revista e elaborada pelo Prof. Rodrigo Cutri**  
**Sob coordenação do Prof. Nilson De Lucca**



## **Índice**

INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO PSIMCAD .....	5
Experiência 1 : “Light-Dimmer” (Simulação em PC) .....	11
Experiência 2:“Light-Dimmer” (Montagem e Teste em bancada) .....	14
Experiência 3 : Flip-flop de Potência .....	15
Experiência 4 : Minuteria eletrônica sem réles, utilizando FET de potência..	19
Experiência 5 : Snubber .....	21
Experiência 6 : Retificador Monofásico não controlado .....	25
Experiência 7 : Retificador Monofásico controlado .....	29
Experiência 8 : Retificador Trifásico não controlado .....	31
Experiência 10 : Chopper .....	33
Experiência 11 : Chopper - Montagem Experimental .....	35
Experiência 12 : Conversor Step-up (Simulação) [Boost].....	37
Experiência 13 : Análise de um inversor estático monofásico .....	39
Experiência 14 : Conversores ressonantes (Simulação) .....	42



# INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

## PSIMCAD

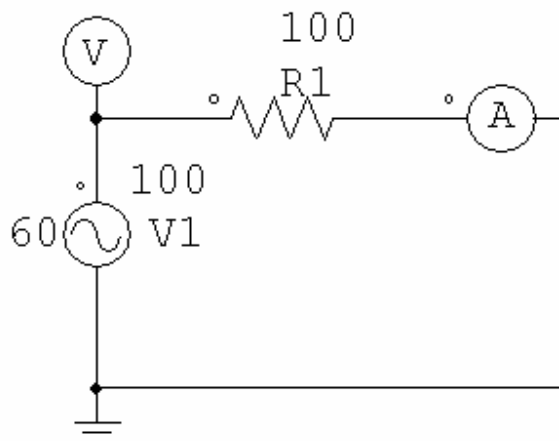
Prof. Rodrigo Cutri

Fev/2004

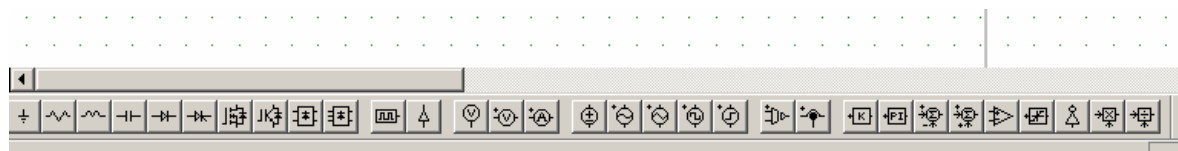
Download Demo : [www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com)


A fim de facilitar a familiarização com a interface gráfica do software, os comandos básicos serão descritos abaixo através de um exemplo simples :

Monte o circuito abaixo com  $R=100\Omega$  e  $V1=100V$ , 60Hz.



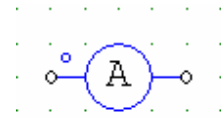
Para montar o circuito acima, basta arrastar os componentes da barra localizada na parte inferior da tela:



e interliga-los com o “lápiz” que é acionado através da tecla  . Basta clicar sobre os componentes duas vezes para mudar suas propriedades.

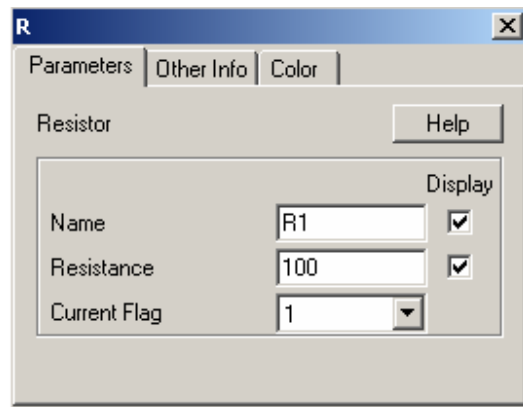
Deve ser definido um ponto de terra como referência em todos os circuitos .

As tensões e correntes instantâneas são obtidas através das pontas de prova :



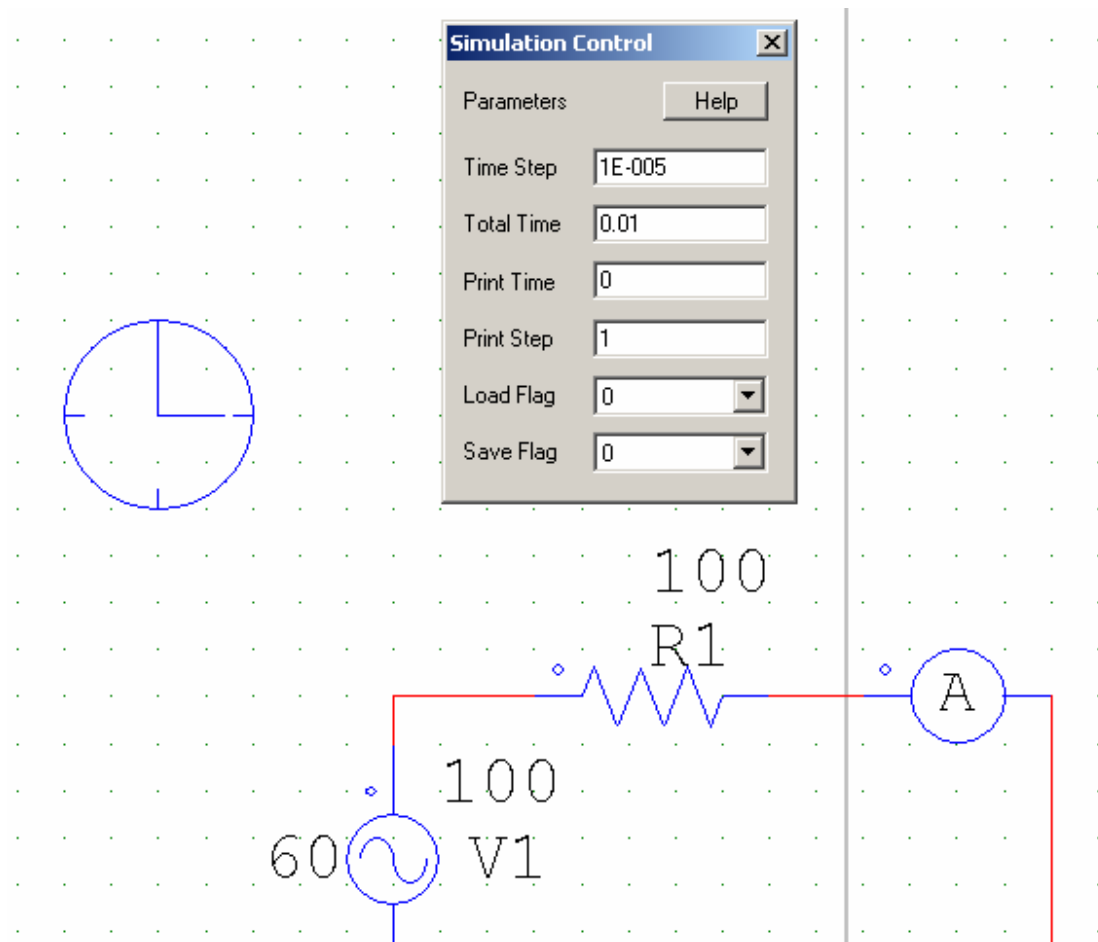
Mede tensão entre o nó e o terra      Mede a tensão entre dois nós      Mede a corrente no ramo

As correntes dos componentes podem ser medidas sem a utilização das pontas de prova, habilitando-se o “Flag de corrente” (“current flag”=1, de acordo com a figura abaixo).



O nome do componente e seu valor podem ser definidos pelo usuário. Se a opção display estiver habilitada estes parâmetros serão visualizados na tela.

Para definir os parâmetros da simulação, no menu **Simulate**, acesse a opção **simulation control** e arraste-o para a área de trabalho.

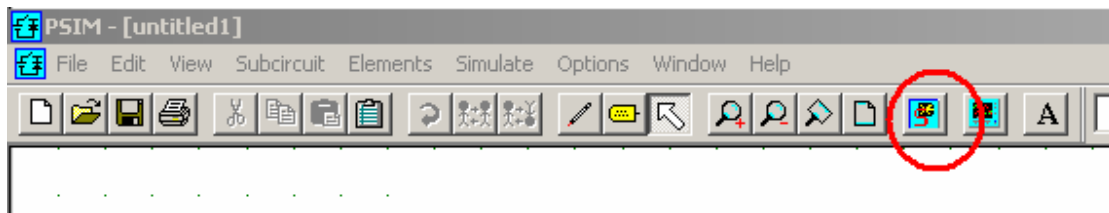


No componente **simulation control** o usuário pode definir :

- o passo da amostragem (**Time-Step**);
- o tempo total da simulação (**Total Time**)
- o instante inicial do gráfico a ser exibido (**Print Time**)
- o número de saltos entre os pontos calculados para visualização (**Print Step**)

Atribuindo-se um valor N ao **Print Step**, exibem-se os pontos calculados com saltos de N pontos. Na versão Demo o número de pontos é restrito (<6000).

Para realizar a simulação basta pressionar o botão **Run Simulation**.



Após o término da simulação será aberto o programa de visualização de formas de onda **Simview**, que permite :

- visualizar as correntes e tensões obtidas pelas pontas de prova ou dos componentes com “flag current” habilitado;
- medir as amplitudes e tempos através de cursores;
- realizar operações matemáticas com as variáveis;
- calcular o espectro da forma de onda (FFT), etc.

Para a inserção das formas de onda, basta clicar no botão:

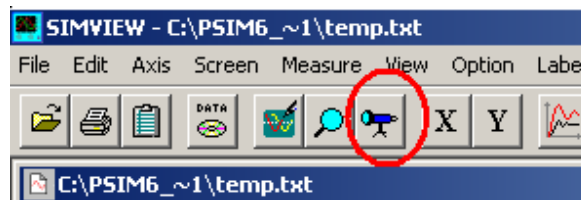


Será aberto um menu que permite a escolha das variáveis a serem exibidas.

Deve-se tomar cuidado de não representar no mesmo gráfico variáveis com amplitudes muito diferentes, impedindo assim a correta visualização das mesmas.

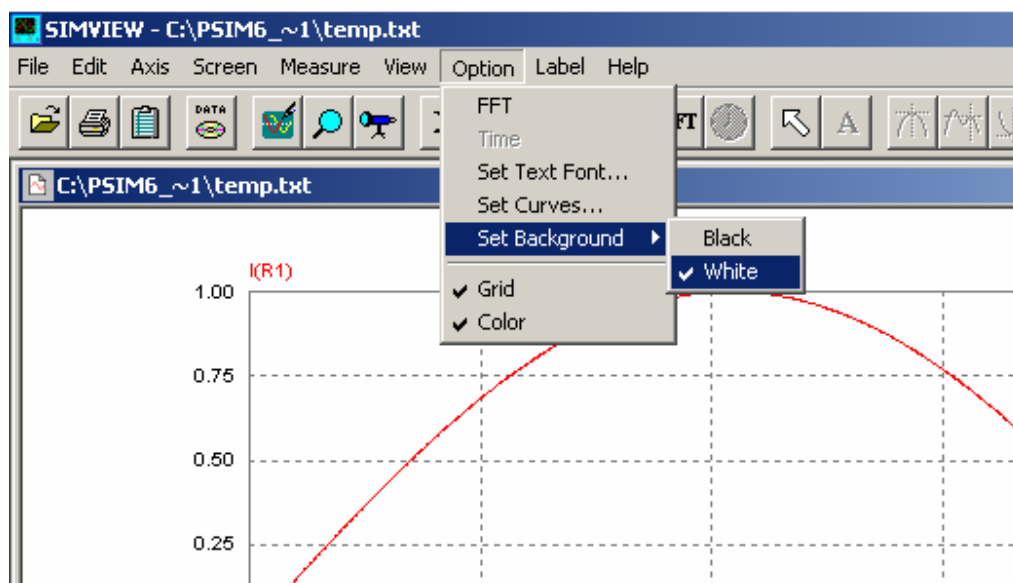


Para a visualização dos valores de amplitude e tempo utilize o botão cursor :



Existem restrições na versão DEMO quanto ao passo de integração utilizado. Utilizar passos de integração muito pequenos implica em longos tempos de simulação e um número maior de pontos calculados.

Para alterar a cor de fundo do gráfico vá ao menu **Option/Set Background** e escolha a opção **White**:



No menu **“Elements/Others/Probes”**, existem medidores de tensão e corrente CC e CA, watímetros, medidor de fator de potência e etc. Estes medidores possuem um filtro onde a frequência de corte (FC) deve ser especificada. Valores baixos de FC implicam em maiores

tempos de acomodação do sinal medido. Valores elevados estabilizam o sinal mais rapidamente, no entanto, provocando o aparecimento de uma ondulação no sinal do medidor. O valor correto pode ser obtido por tentativa e erro.

## Experiência 1 : “Light-Dimmer” (Simulação em PC)

### 1. Introdução Teórica

Um “light-dimmer” é um dispositivo ou sub-conjunto que tem a finalidade de proporcionar a variação de luminosidade de um ambiente, mediante o controle da tensão aplicada em uma lâmpada ou em um conjunto de lâmpadas.

O circuito de um “light-dimmer” monofásico para lâmpadas incandescentes pode ser apreciado na figura 1.

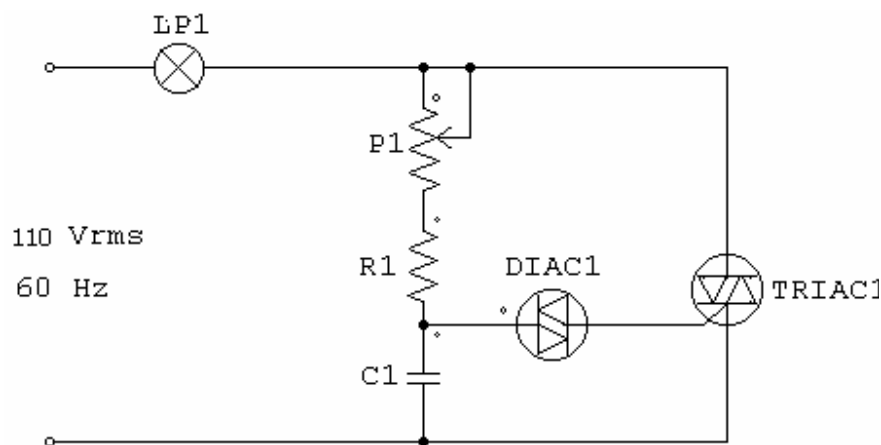


Fig.1: Light-Dimmer monofásico

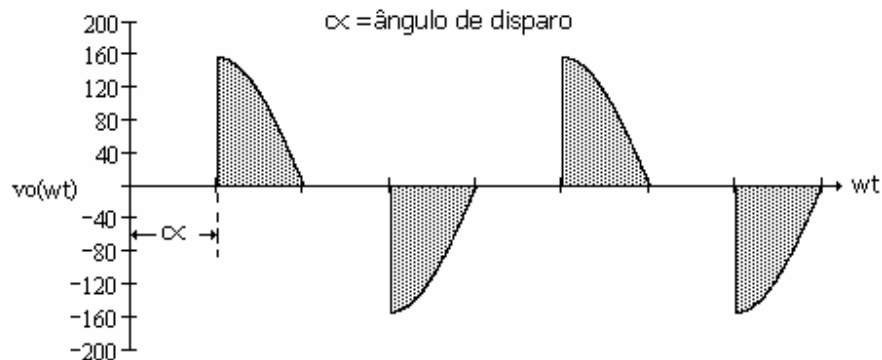
O TRIAC 1 e seus componentes associados permitem controlar a tensão eficaz aplicada sobre a lâmpada LP1 em função da posição do cursor do potenciômetro P1.

A variação do valor ôhmico de P1 provoca a variação da defasagem da tensão no capacitor C1 relativamente à tensão de entrada. Quando a tensão em C1 atingir o nível de transição do DIAC-1 teremos o “disparo” do TRIAC. Nesse instante a tensão na lâmpada passa a ser praticamente igual à tensão de entrada, pois a queda de tensão no TRIAC é bem pequena quando este se encontra no estado de condução.

Em outras palavras podemos dizer que a tensão eficaz na lâmpada é uma função do ângulo de disparo do TRIAC. Quanto maior for o ângulo de disparo menor será a tensão eficaz na lâmpada.

Concluimos portanto, que se variando o cursor de P1 no sentido de se aumentar o seu valor ôhmico, estaremos aumentando o ângulo de disparo do TRIAC e conseqüentemente reduzindo a luminosidade proporcionada pela lâmpada.

O cálculo da expressão do valor eficaz da tensão aplicada em função do ângulo de disparo pode ser efetuado a partir do gráfico da referida tensão :



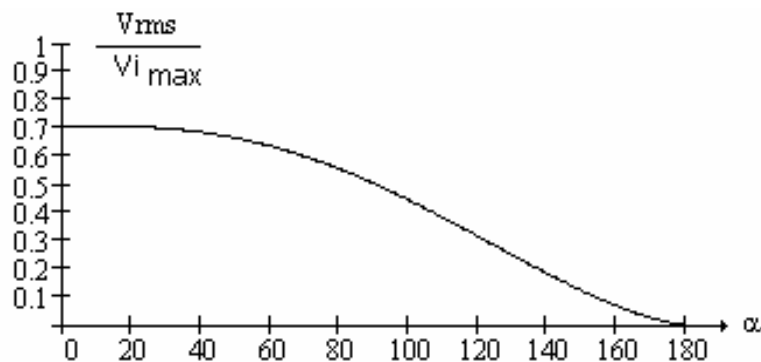
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{i_{max}}^2 \cdot \text{sen}^2(\omega t) d(\omega t)}$$

resolvendo obtemos:

$$V_{rms} = V_{i_{max}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi}}$$

Observemos que para  $\alpha = 0$  obtemos a já bem conhecida relação  $V_{rms} = \frac{V_{i_{max}}}{\sqrt{2}}$ .

Para  $\alpha = \pi$  (radianos) a tensão eficaz  $V_{rms}$  se anula. O gráfico da referida tensão em função do ângulo de disparo resulta o indicado a seguir:



## **2. Simulação do circuito com o PSIM**

O PSIM é um software de simulação de circuitos de Eletrônica de Potência. A versão estudante pode ser obtida via Internet, sem qualquer custo, acessando-se o “site” [www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com) .

Inicialmente deveremos desenhar o circuito, selecionando-se da biblioteca do PSIM todos os componentes necessários (R1, P1, C1, DIAC, TRIAC, etc.). Após a interligação de todos os componentes deveremos associar a cada um o valor correspondente, por exemplo,  $4700 \Omega$  ,  $0,1 \mu\text{F}$  , etc. Deveremos também colocar uma “ponta de prova” (voltímetro) em cada ponto de interesse. Não esquecer de associar um nó de “Terra” ao circuito.

## **3. Parte prática**

3.1 Desenhar o circuito do “Light-Dimmer” monofásico utilizando o software PSIM.

Obs. No lugar da lâmpada utilizar um resistor de  $100 \Omega$  . Adotar os seguintes valores para os componentes:

C1 =  $0,22 \mu\text{F}$

R1 =  $4700 \Omega$

P1 =  $100 \text{K}\Omega$  - Tap position = 0,8

V1 =  $110 \text{V}_{\text{rms}}$  – 60 Hz

3.2 Executar a simulação e obter as formas de onda seguintes:

- a) Tensão de entrada
- b) Tensão no capacitor C1
- c) Tensão na saída do DIAC
- d) Tensão no TRIAC
- e) Tensão sobre a lâmpada

3.3 Altere o cursor de P1 para as posições correspondentes a 100 % , 90 % , 60 % e re-execute a simulação, desenhando novamente as formas de onda.

3.4 O que acontece quando alteramos o valor de C1 para  $0,39 \mu\text{F}$ , considerando-se a posição do cursor de P1 em 80 % ?

## **4. Relatório**

Apresentar o diagrama elétrico desenhado com o PSIM, imprimindo-se o mesmo. Apresentar as formas de onda solicitadas nos itens 3.2 e 3.3.

Responder a pergunta do item 3.4 , comparando as formas de onda da tensão na lâmpada para os dois valores do capacitor C1.

## Experiência 2: “Light-Dimmer” (Montagem e Teste em bancada)

### 1. Parte prática

1.1 Montar o circuito do “light-dimmer” monofásico utilizando o diagrama elétrico indicado na experiência anterior. Para facilitar apresentamos novamente a seguir o referido diagrama:

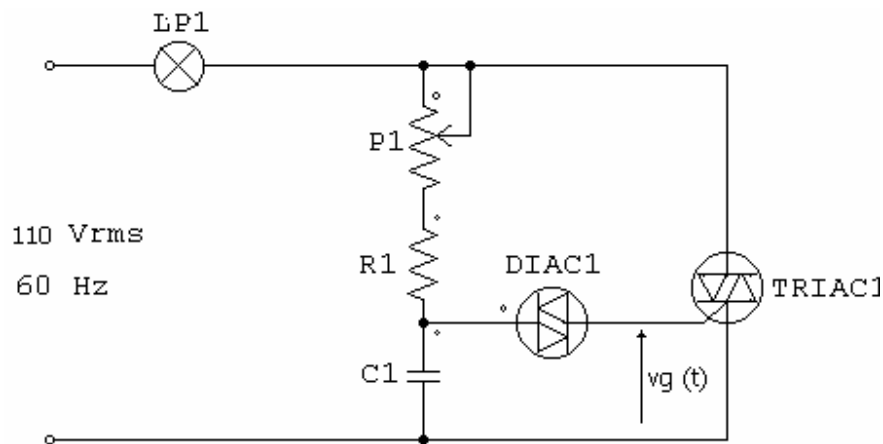


Fig. 1: Light-Dimmer monofásico

Adotar inicialmente os seguintes valores para os componentes:

$$C1 = 0,22 \text{ uF}$$

$$R1 = 4700 \text{ } \Omega$$

$$P1 = 100 \text{ K}\Omega$$

LP1 = lâmpada incandescente de 25 ou 40 watts

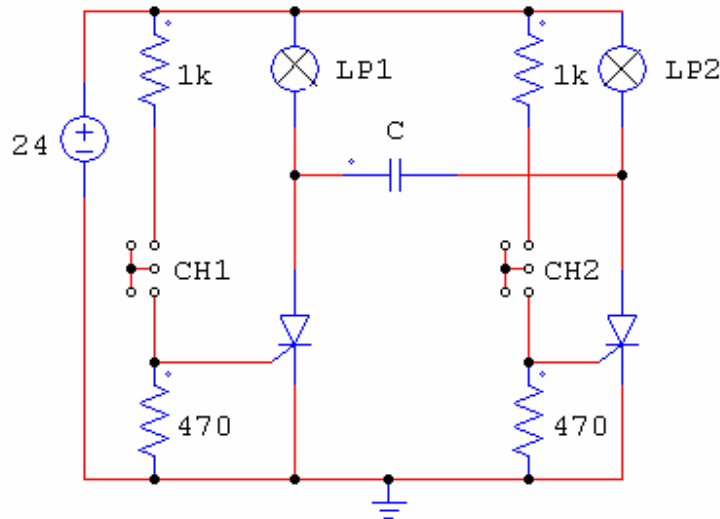
$$V1 = 110 \text{ Vrms} - 60 \text{ Hz}$$

- 1.2 Testar o funcionamento do circuito, ligando a entrada do mesmo a uma tomada de 110 Vrms da bancada.
- 1.3 Utilizando o osciloscópio, anotar, para diversos valores de P1, as formas de onda da tensão no capacitor, tensão de disparo  $v_g(t)$ , tensão entre os terminais principais do TRIAC, e tensão na lâmpada.
- 1.4 Anotar o valor ôhmico de P1 que provoca um ângulo de disparo de 90 graus.
- 1.5 Com o valor ôhmico de P1 do item anterior, mudar o valor de C1 para 0,1 uF e determinar, com auxílio do osciloscópio, o novo valor do ângulo de disparo.
- 1.6 Com base nas formas de onda observada determinar o valor da tensão de transição do DIAC.

## Experiência 3 : Flip-flop de Potência

### 1. Parte prática

1.1 Montar o circuito do flip-flop de potência utilizando o diagrama elétrico indicado abaixo.



Adotar inicialmente o valor de  $C = 1 \mu\text{F}$ .

1.2 Explique o funcionamento do circuito.

1.3 Meça o valor da resistência do conjunto “Lâmpada+resistor” a frio : \_\_\_\_\_

1.4 Teste o funcionamento do circuito, preenchendo a tabela de acordo com a seqüência abaixo:

Seqüência	CH1	CH2	LP1	LP2
1	0	0		
2	0	1		
3	1	0		
4	1	1		

Obs.: 0 – desligado / 1 - ligado

1.5 Mude o valor de C para 0.27 uF ,verifique o que acontece e preencha novamente a tabela.

Seqüência	CH1	CH2	LP1	LP2
1	0	0		
2	0	1		
3	1	0		
4	1	1		

1.6 Repita o item anterior considerando C= 0.22 uF.

Seqüência	CH1	CH2	LP1	LP2
1	0	0		
2	0	1		
3	1	0		
4	1	1		

1.7 Repita o item anterior considerando C= 0.1 uF.

Seqüência	CH1	CH2	LP1	LP2
1	0	0		
2	0	1		
3	1	0		
4	1	1		

1.8 O que aconteceu ao funcionamento do circuito ao reduzirmos o valor do capacitor C ?

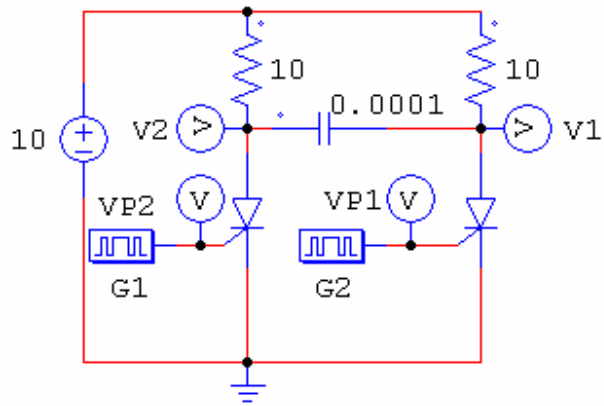
1.9 Desligue o circuito e meça novamente o valor da resistência do conjunto “Lâmpada+resistor” à quente: \_\_\_\_\_.

1.10 Calcule, baseado no experimento, a mínima constante de tempo do conjunto C1+“Lâmpada+resistor” para qual o circuito funciona perfeitamente.

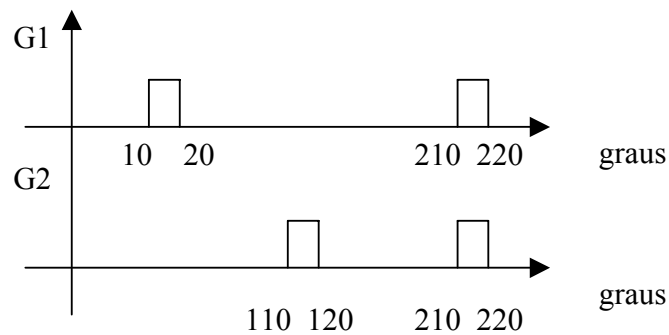
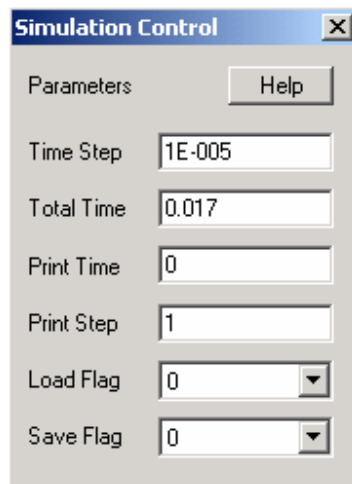
1.11 Simule o circuito abaixo no software PSIM, plotando as formas de onda de VP1,VP2, V1 e V2 para uma situação de perfeito funcionamento e uma situação de “erro lógico”.

(Os pontos fornecidos para os blocos Gating (G1 e G2) permitem verificar ao longo do tempo os 4 estados do conjunto de chaves CH1 e CH2)

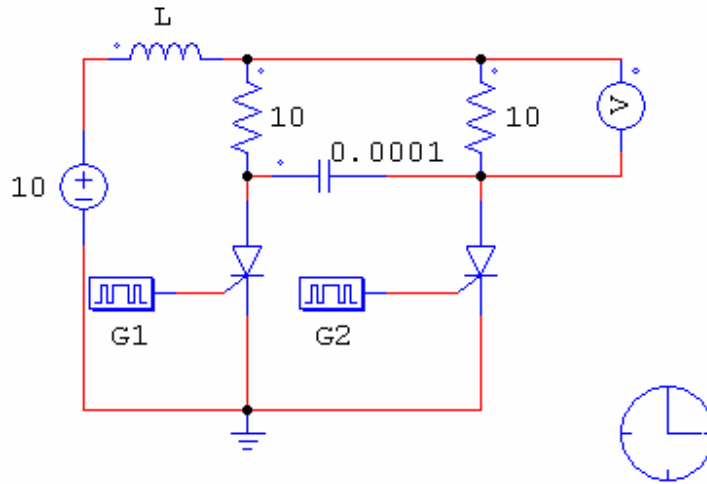




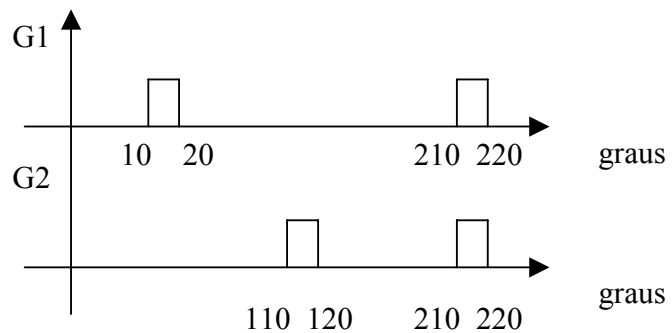
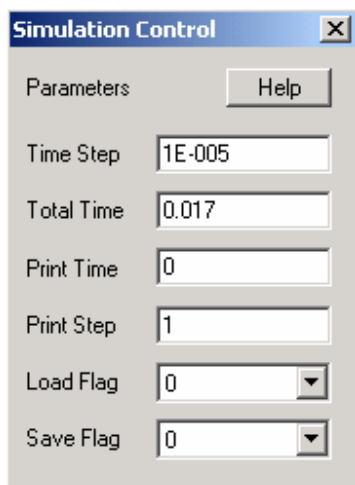
	frequência	pontos		
G1	60	110	120	210 220.
G2	60	10	20	210 220.



1.12 Simule o circuito abaixo no software PSIM, plotando a tensão (corrente) sobre o resistor para os valores de  $L=0, 100\mu\text{H}$  e  $1\text{mH}$ .



	frequência	pontos		
G1	60	110	120	210 220.
G2	60	10	20	210 220.

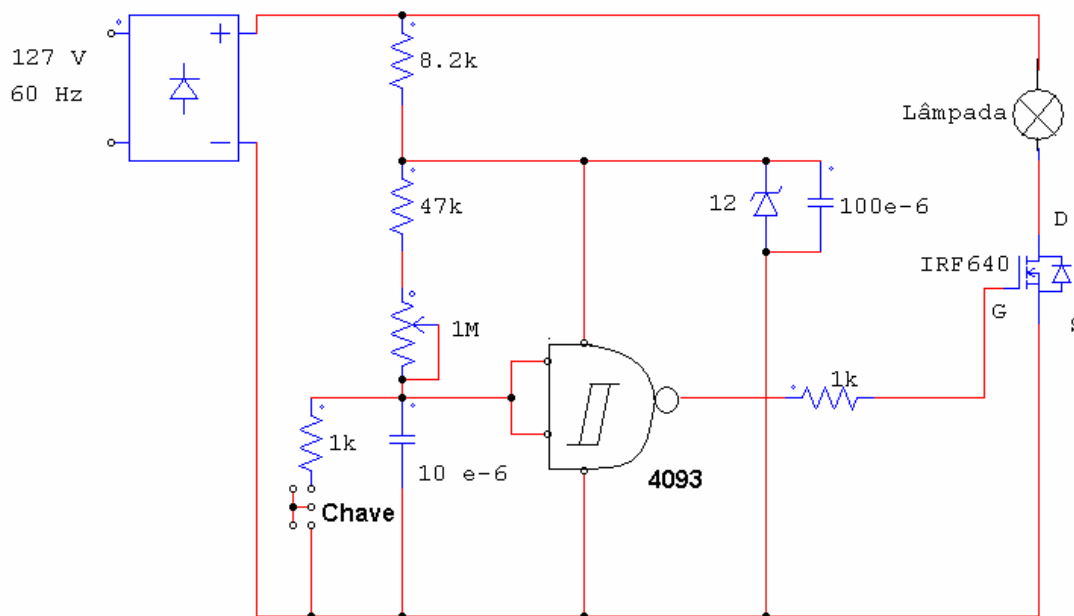


O que se verifica? Qual a finalidade do indutor no circuito? A sua ausência poderia acarretar problemas?

## Experiência 4 : Minuteria eletrônica sem réles, utilizando FET de potência

### Parte prática

- 1.1 Identifique com o multímetro os terminais do FET de potência.
- 1.2 Monte o circuito da minuteria eletrônica utilizando o diagrama elétrico indicado abaixo.



- 1.3 Explique o funcionamento do circuito.
- 1.4 Qual a finalidade do zener no circuito ? qual a função do capacitor em paralelo com o zener ?
- 1.5 O que acontece ao variarmos o valor do potenciômetro de 1MΩ ?
- 1.6 Desenhe as formas de onda abaixo, plotando seus pontos notáveis :
  - a) Tensão em C1
  - b) Tensão no Zener
  - c) Tensão na saída do 4093
  - d) Tensão dreno-source do FET
  - e) Tensão na lâmpada

1.7 Apresente como ficaria o circuito elétrico da minuteria simulado no PSIM. Que modificações foram feitas ? Por quê ? Apresente as formas de onda simuladas do item 1.6 quando a chave está fechada.

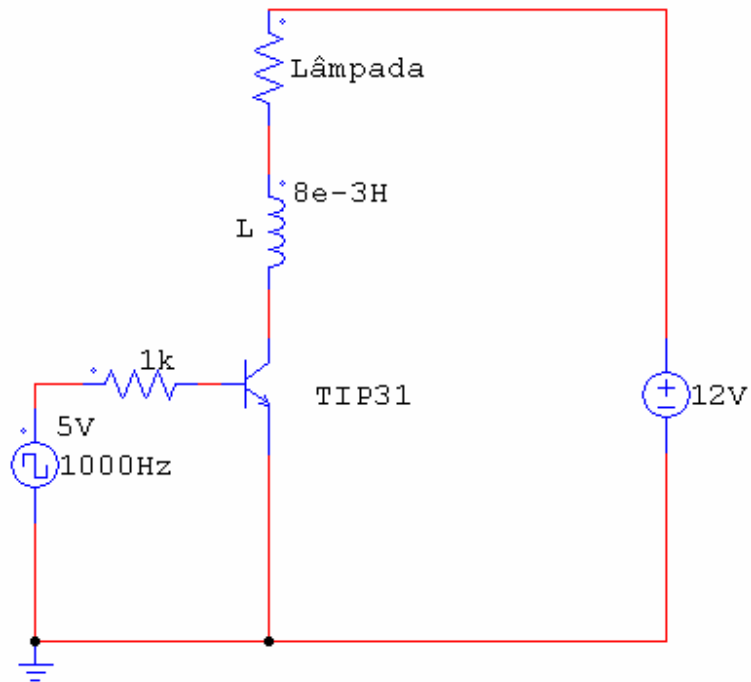
#### Lista de Material

	Caixa fios/ cabos
01	4093
01	Protoboard
01	Potenciômetro 1 M $\Omega$
01	Resistor 1k / 1k / 47 k $\Omega$ ½ W
01	Resistor 8k2 $\Omega$ 2 W
01	Capacitor 10uF/ 100 uF 16 V
01	Diodo zener 12V – 1W
01	Lâmpada 100 W 220V
01	Suporte para lâmpada
01	Placa retificadora/ pte de diodos
01	Fet IRF640
01	Osciloscópio Analógico
01	Divisor resistivo com resistores 220k/ 22k 2W

## Experiência 5 : Snubber

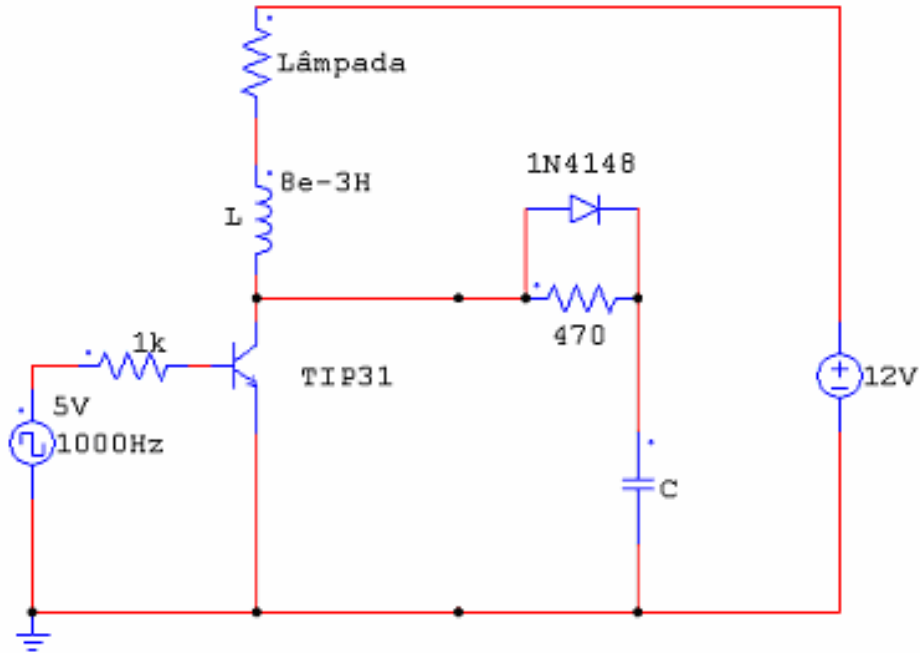
### Parte prática

1.1 Monte o circuito abaixo :



1.2 Meça com o osciloscópio a tensão VCE. Desenhe a forma de onda e explique o que aconteceu.

1.3 Acrescente um “snubber” ao circuito conforme o desenho abaixo : ( $C=0.22 \mu\text{F}$ )



1.4 Meça com o osciloscópio a tensão VCE e desenhe sua forma de onda.

1.5 Altere o valor de C para  $0.47 \mu\text{F}$  e repita o item 1.6.

1.6 Altere o valor de C para  $1 \mu\text{F}$  e repita o item 1.6.

1.7 Altere o valor de C para  $4.7 \mu\text{F}$  e repita o item 1.6.

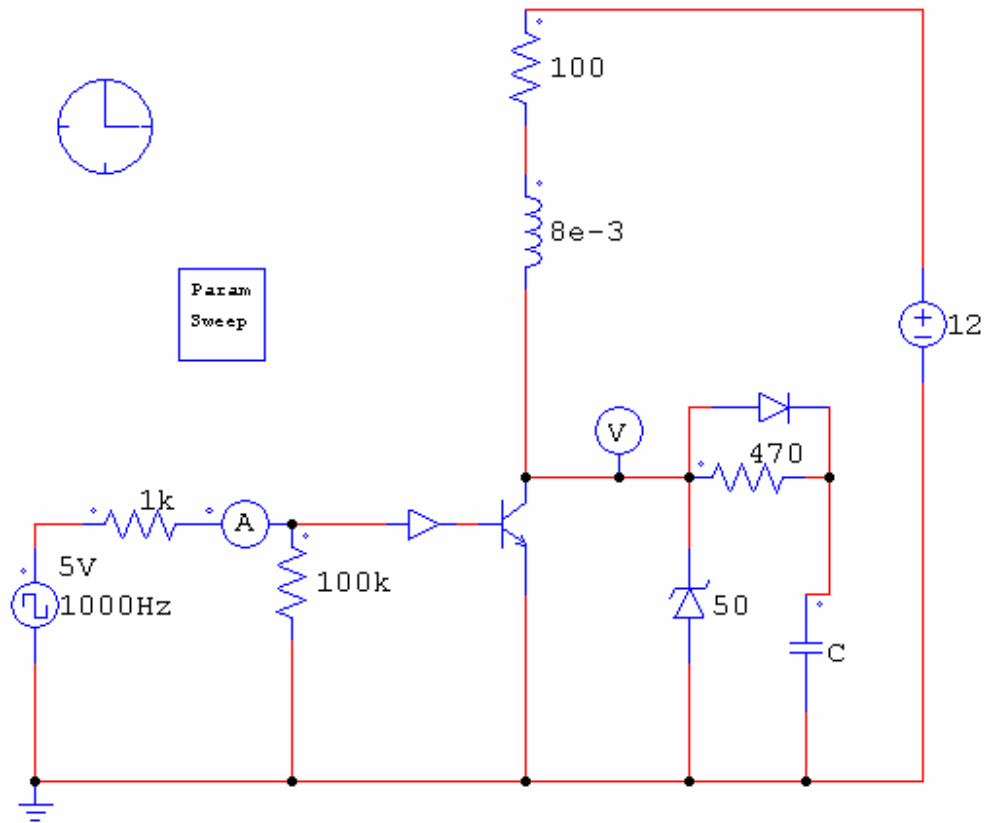
1.8 Explique o que aconteceu a tensão VCE quando alteramos o valor do capacitor.

1.9 Analise qualitativamente o que acontece com a potência consumida pelo circuito ao alteramos o valor do capacitor ?

2.0 Adotando  $R=470 \text{ Ohms}$ . Calcule o valor do snubber RC de modo que a constante de tempo de descarga do capacitor seja de 20% do tempo total do sinal em nível alto.

2.1 Simule o circuito elétrico da experiência no PSIM. Que modificações foram feitas ? Por quê ? Apresente num único gráfico as formas de onda simuladas da tensão VCE para os valores de C de  $0,1 \mu\text{F}$  à  $1 \mu\text{F}$  com intervalo de  $0.2 \times 10^{-6}$  (para isto utilize o bloco Param sweep que permite simular o circuito alterando-se um parâmetro de um componente dentro de uma faixa pré-definida de valores).

Dica : utilize um resistor de  $100 \text{ Ohms}$  no lugar da lâmpada e  $L=8 \text{ mH}$



Param Sweep

**Simulation Control** [X]

Parameters

Time Step

Total Time

Print Time

Print Step

Load Flag  [v]

Save Flag  [v]

### Lista de Material

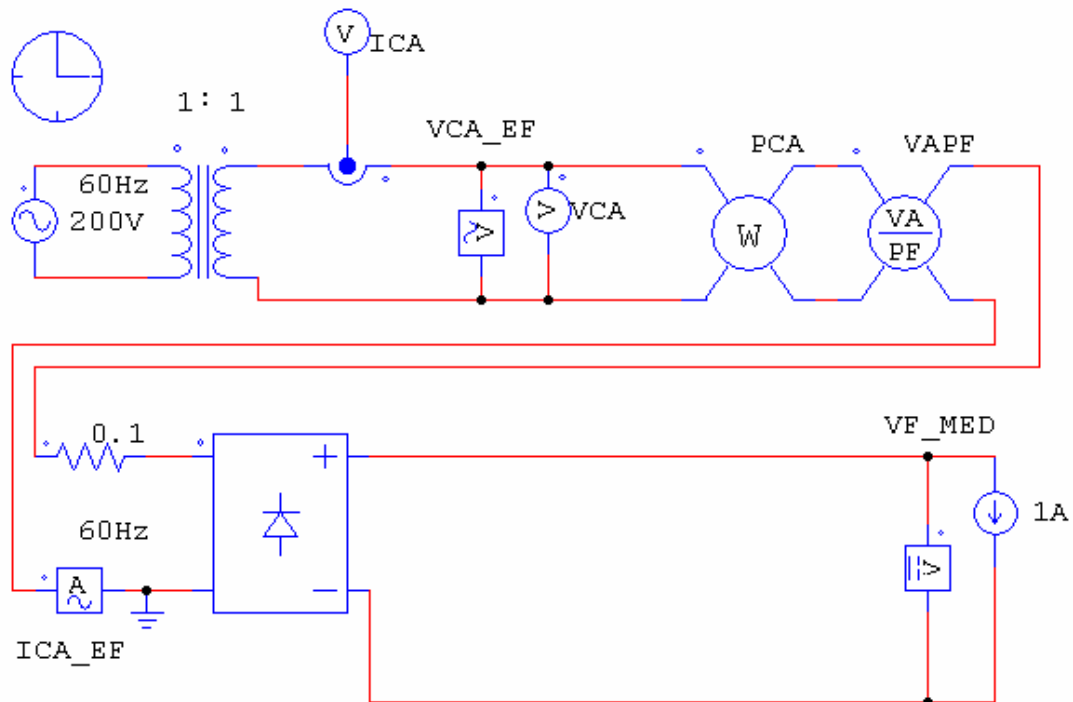
01	Indutor bobina casada
01	Resistor 1k / 470 Ohms
01	Lâmpada 12V
01	Capacitor 1uF/ 4.7 uF/ 0.47 uF / 0.22 uF
01	Placa conexão Darlington
01	Placa Universal
01	TIP 31 (soquetado)
01	Diodo 1N4148
	Cabos
01	Fonte 12 V
01	Osciloscópio Analógico
01	Gerador de Funções



## Experiência 6 : Retificador Monofásico não controlado

### Parte prática

1.1 Monte o circuito abaixo :



Nos medidores onde for necessário utilize a frequência de corte = 20Hz.



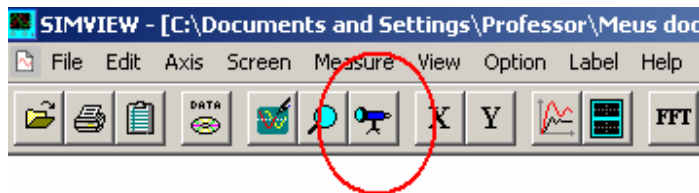
1.2 Plote as formas de onde abaixo :

**SUGESTÃO PLOTE CADA SINAL EM UMA FOLHA A FIM DE MELHORAR A VISUALIZAÇÃO DO FENÔMENO**

**PLOTE NOVAMENTE O SINAL DANDO ZOOM NAS REGIÕES NECESSÁRIAS A FIM DE FACILITAR SUA COMPREENSÃO DO FENÔMENO**

- a) Tensão eficaz de entrada (VCA\_EF) / Tensão de entrada (VCA)
- b) Tensão média de saída (VF\_MED)
- c) Potência ativa de entrada (PCA)
- d) Corrente eficaz de entrada (ICA\_EF) / Corrente na entrada (ICA)
- e) Fator de deslocamento (VAPF\_DPF)

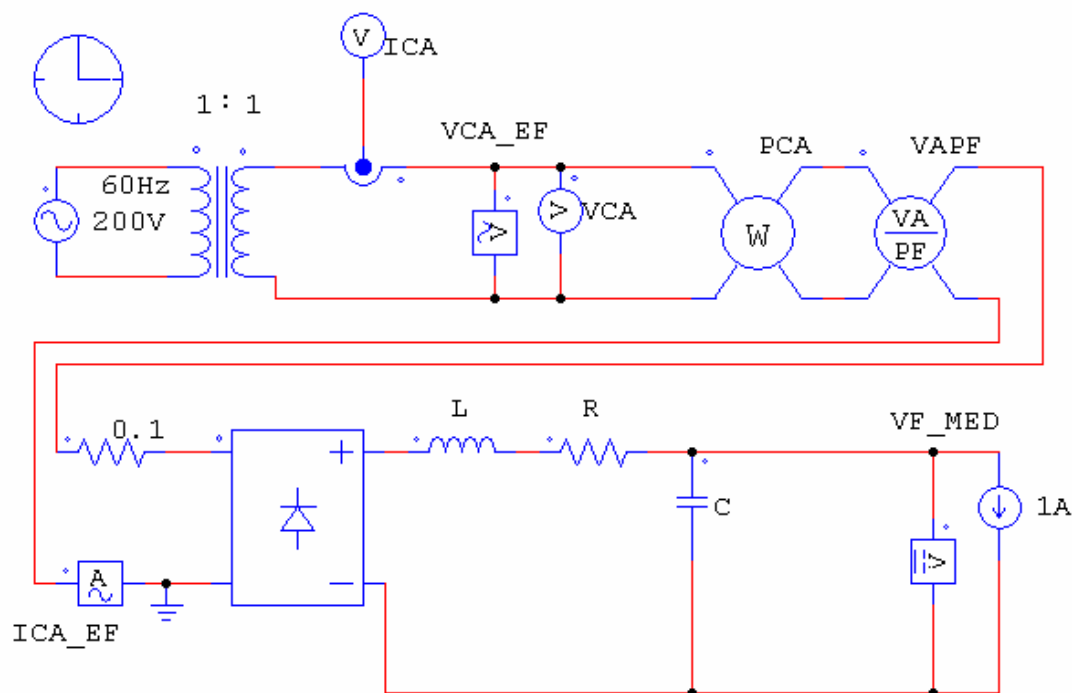
Com o auxílio do cursor



e lembrando que :  $FP = Pca / (Vca\_ef * Ica\_ef) = (\text{Fator de distorção} * \text{Fator de defasagem})$   
preencha a tabela abaixo :

Pca (W)	Ica_ef (A)	Ica_pico (A)	Vca_ef (V)	FP	Vf_media (V)	DPF

1.3 A seguir, vamos analisar o comportamento do circuito com a inserção de um capacitor e um indutor no lado DC.



1.4 Simule novamente o circuito para cada caso abaixo, repetindo o 1.2 e preenchendo a tabela abaixo :

caso	L (mH)	Resistência interna de L ( $\Omega$ )	C ( $\mu$ F)
A1 (filtro capacitivo)	0.001	0.0001	1000
A2 (filtro capacitivo)	0.001	0.0001	2000
A3 (filtro capacitivo)	0.001	0.0001	5000
B1 (filtro LC)	2	0.23	1000
B2 (filtro LC)	6	0.23	1000
B3 (filtro LC)	10	0.23	1000
B4 (filtro LC)	30	0.23	1000

**UTILIZE O COMANDO PARAM SWEEP E PLOTE OS CASOS A1,A2 E A3 NO MESMO EIXO ASSIM COMO OS CASOS B1,B2,B3 E B4 NO MESMO EIXO**

caso	Pca (W)	Ica_ef (A)	Ica_pico (A)	Vca_ef (V)	FP	Vf_media (V)	DFP
Sem filtro nenhum							
A1							
A2							
A3							
B1							
B2							
B3							
B4							

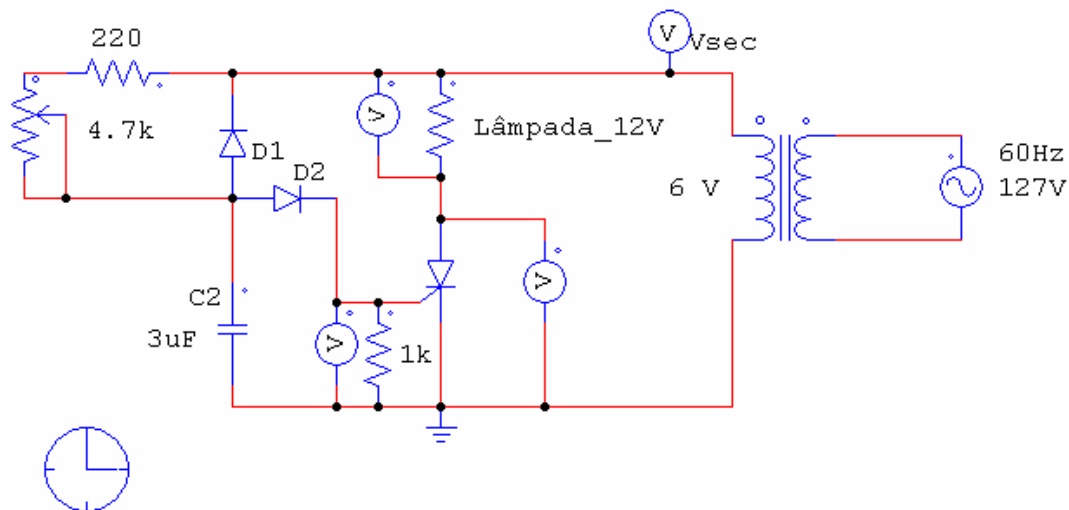
1.5 O que aconteceu com os valores de pico logo no início do chaveamento da corrente na rede ? que problemas podem ocorrer para valores elevados de corrente de pico ? como é conhecida na literatura técnica esta corrente ? Que medidas podem ser tomadas para diminuir o seu valor ?

1.6 O que aconteceu com o fator de potência conforme fomos alterando os casos ? Por quê ? Plote uma curva da variação do fator de potência com a variação do valor do filtro capacitivo e outra curva da variação do fator de potência com a variação do filtro indutivo.

## Experiência 7 : Retificador Monofásico controlado

### Parte prática

1.1 Monte o circuito abaixo :



Observe o funcionamento do circuito variando o potenciômetro e verificando a variação da luminosidade da lâmpada.

1.2 Ajustando o potenciômetro de modo a termos condução até  $180^\circ$ , medindo com o osciloscópio, desenhe as formas de onda da tensão no gate, da tensão sobre a lâmpada e da tensão entre o anodo e catodo do SCR.

1.3 Ajuste o potenciômetro para termos um ângulo de condução qualquer abaixo de  $90^\circ$  e entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  e repita o item 1.2.

1.4 Explique o funcionamento do circuito.

1.5 Existem outros circuitos de disparo do SCR. Cite e explique um deles.

1.6 Simule um retificador em ponte com SCR controlado. A partir das simulações realizadas desenhe um gráfico do valor médio de saída em função do ângulo de condução.

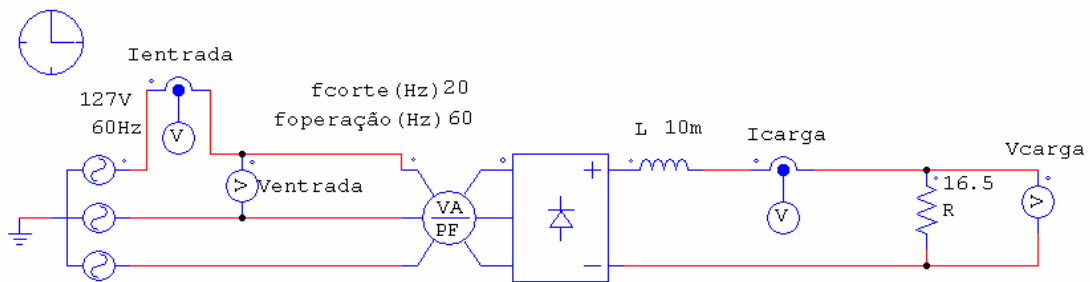
1.7 Nesta mesma simulação, o que acontece com o fator de potência e com a distorção harmônica da corrente ao aumentarmos o ângulo de condução ?



## Experiência 8 : Retificador Trifásico não controlado

### Parte prática

1.1 Monte o circuito abaixo :



BDIODE3		
Parameters   Other Info   Color		
Three-phase diode bridge		
Name	BD32	<input type="checkbox"/>
Diode Voltage Drop	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_1	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_2	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_3	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_4	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_5	0	<input type="checkbox"/>
Init. Position_6	0	<input type="checkbox"/>
Current Flag_1	1	<input type="checkbox"/>
Current Flag_2	0	<input type="checkbox"/>
Current Flag_3	0	<input type="checkbox"/>
Current Flag_4	0	<input type="checkbox"/>

1.2 Plote as formas de onda abaixo :

**SUGESTÃO PLOTE EM UMA FOLHA APENAS OS SINAIS DE CORRENTE E EM OUTRA, APENAS OS SINAIS DE TENSÃO A FIM DE MELHORAR A VISUALIZAÇÃO DO FENÔMENO**

**PLOTE NOVAMENTE O SINAL DANDO ZOOM NAS REGIÕES NECESSÁRIAS A FIM DE FACILITAR SUA COMPREENSÃO DO FENÔMENO**

- a) Tensão linha-linha de entrada
- b) Tensão da carga
- c) Corrente de entrada
- d) Espectro da corrente de entrada
- e) Corrente no diodo D1
- f) Corrente na carga
- g) Espectro de corrente na carga
- h) Fator de potência na entrada ( $f_{\text{corte}}=20\text{Hz}$ )

Quantos pulsos possui a tensão da carga ? Calcule o ripple pico-a-pico e depois qual a taxa percentual da relação do ripple com o nível médio do sinal.

1.3 Varie o valor de L de 0.5mH para 20.5mH (taxa de variação 4mH) e repita o item 1.2 c/f/h. (Obs.: Dê um zoom na região de interesse e plote cada gráfico em uma folha)

- a) O que aconteceu com o a forma de onda da corrente ? Explique a finalidade do L para o desempenho do circuito.
- b) Qual a influência da variação do L no fator de potência da entrada ?

1.4 Através da análise espectral da corrente de entrada ( $L=0.5\text{mH}$ ), calcule a relação % dos harmônicos até 9º em relação à fundamental e calcule a distorção harmônica total da corrente de entrada

1.4 Coloque um capacitor em paralelo com a carga e varie-o de 100uF à 2000uF (taxa 400uF).

- a) Investigue a influência do capacitor sobre o ripple de tensão. Desenhe um gráfico da relação percentual do ripple/valor médio em função do valor do capacitor. (Obs.: você deve esperar o valor estabilizar, sendo assim aumente o tempo de simulação para 60ms)
- b) Por que tivemos um salto na tensão da carga nos momentos logo após  $t=0$  ? o que pode ser feito para evitá-lo ?



## Experiência 10 : Chopper

### Teoria

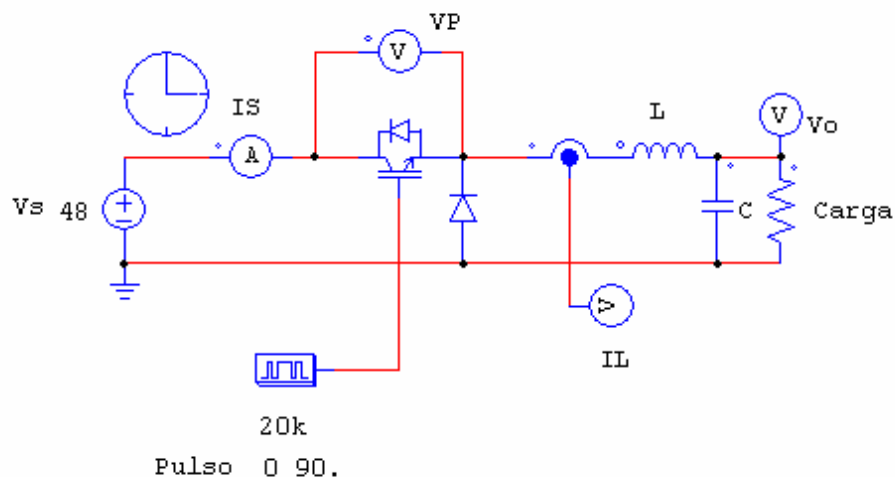
Frequência de chaveamento	:	$f_s$
Período de chaveamento	:	$T_s$
Tempo em nível alto	:	$t_{on}$
“Duty cycle”	:	$k=t_{on}/T_s$
Tensão de entrada DC	:	$V_s$
Tensão média de saída	:	$V_{o\_dc}=k.V_s$
Corrente média de saída	:	$I_{o\_dc}=V_{o\_dc}/R$
Corrente de entrada DC	:	$I_{s\_dc}=k.I_{o\_dc}$
Potência DC de saída	:	$P_{o\_dc}=V_{o\_dc}*I_{o\_dc}$
Potência média na entrada	:	$P_{in}=V_s*I_{s\_dc}$
Ripple da corrente do indutor	:	$\Delta I_L=V_{o\_dc}*(V_s-V_{o\_dc})/(L*f_s*V_s)$
Ripple da tensão de saída	:	$\Delta V_C=\Delta I_L/(8*C*f_s)$

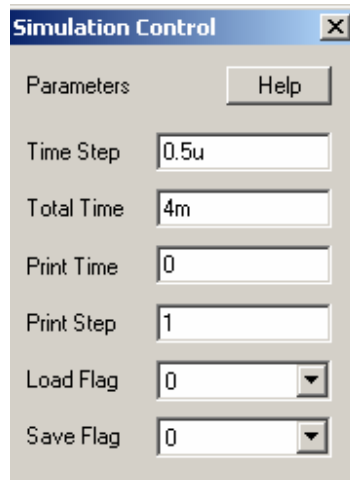
### Dados de projeto :

$f_s$	=	20kHz
$V_s$	=	48 V
Carga	=	5 $\Omega$
Ripple da tensão de saída	menor ou igual a 2.5 %	
Ripple da corrente do indutor	menor ou igual a 5 %	

### Parte prática

1.1 Simule o circuito abaixo:





A) Determine os valores de L e C para o filtro LC do circuito.

1.2 Plote as formas de onda de  $V_s$ ,  $I_s$ ,  $V_o$ ,  $I_L$  e  $V_P$  .

1.3 Compare os resultados simulados de  $\Delta I_L$  e  $\Delta V_C$  com os valores calculados.

1.4 Simule novamente o circuito com carga 2.5 e 10  $\Omega$  e comente os efeitos da variação da carga com a variação da tensão de saída e do rendimento do circuito ( $P_{o\_dc}/P_{in}$ ).

1.5 Simule o circuito para k entre 0 e 1 com passo de 0.25 e comente a influência do duty cycle no ripple de corrente e na tensão média de saída.

1.6 Qual a função deste circuito ?

1.7 Qual a função do diodo neste circuito ? \* Este diodo é comumente conhecido como diodo de freewheeling.

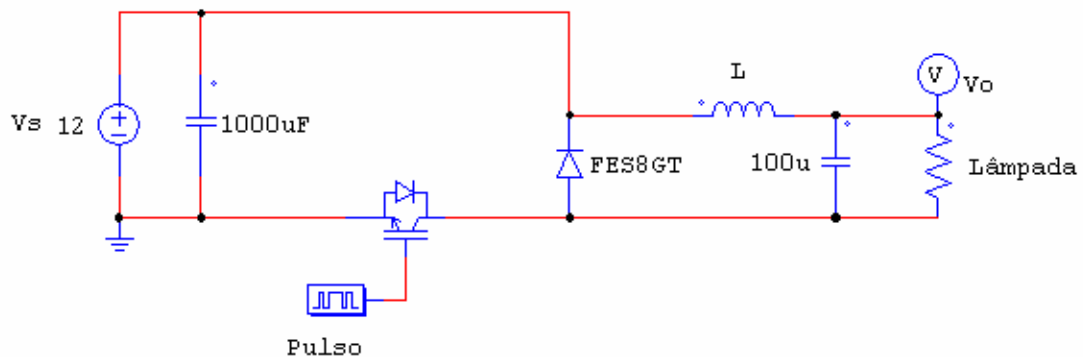
## Experiência 11 : Chopper - Montagem Experimental

Teoria

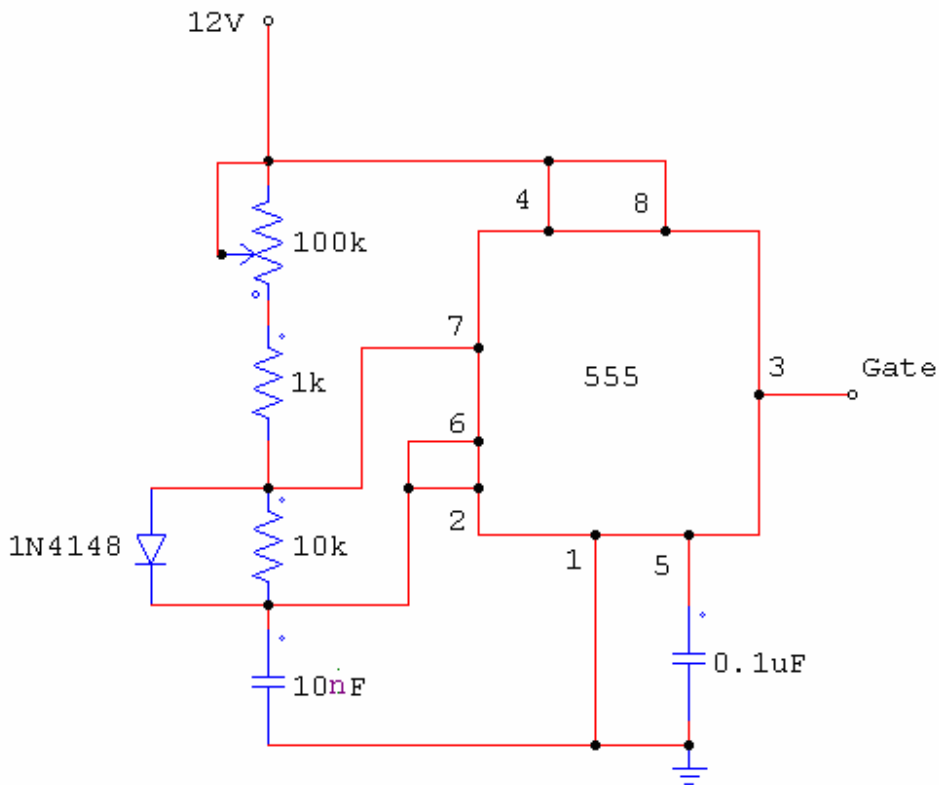
Frequência de chaveamento	:	$f_s$
Período de chaveamento	:	$T_s$
Tempo em nível alto	:	$t_{on}$
“Duty cycle”	:	$k=t_{on}/T_s$
Tensão de entrada DC	:	$V_s$
Tensão média de saída	:	$V_{o\_dc}=k.V_s$
Corrente média de saída	:	$I_{o\_dc}=V_{o\_dc}/R_L$
Corrente de entrada DC	:	$I_{s\_dc}=k.I_{o\_dc}$
Potência DC de saída	:	$P_{o\_dc}=V_{o\_dc}*I_{o\_dc}$
Potência média na entrada	:	$P_{in}=V_s*I_{s\_dc}$
Ripple da corrente do indutor	:	$\Delta I_L=V_{o\_dc}*(V_s-V_{o\_dc})/(L*f_s*V_s)$
Ripple da tensão de saída	:	$\Delta V_C=\Delta I_L/(8*C*f_s)$

Monte o circuito abaixo :

### Parte prática



Como chave utilize o FET IRF840 e como circuito de gatilho o circuito abaixo :



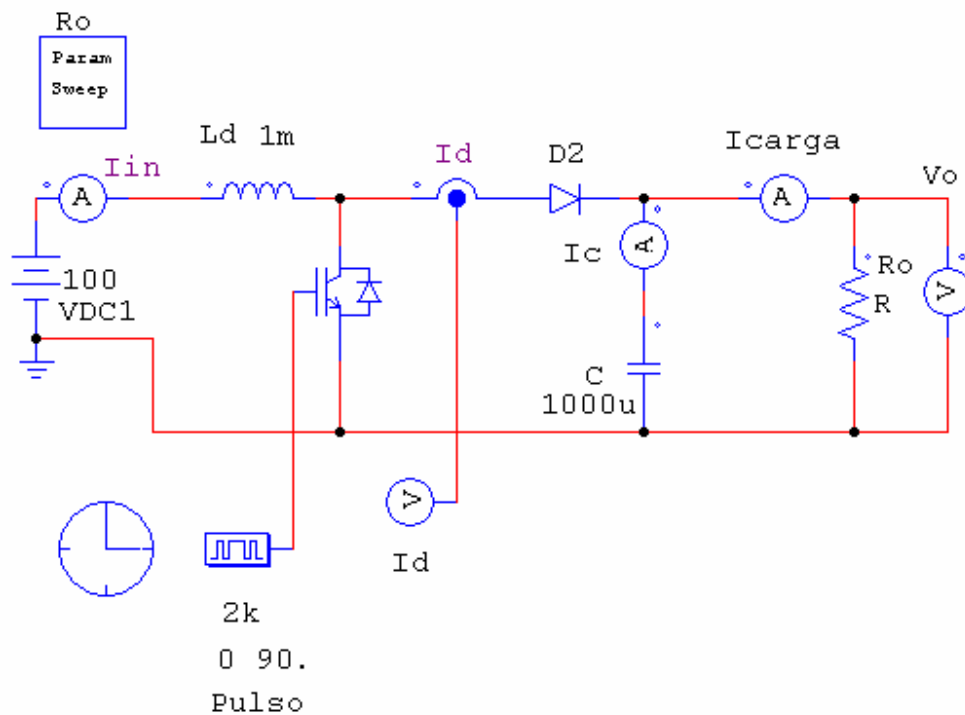
Para efetuar medidas de corrente coloque um resistor de 1 Ohm/ 10 W em série com o indutor.

- 1.1 Desenhe as formas de onda da tensão no gate, corrente e tensão na carga para a máxima e mínima excursão do potenciômetro e determine qual a máxima e mínima frequência obtida. Qual o ripple obtido na tensão e na corrente ?
- 1.2 Explique o funcionamento do circuito.
- 1.3 Coloque um potenciômetro de  $1k\Omega$  em série com a carga e determine o ponto onde o circuito passa a apresentar comportamento descontínuo.
- 1.4 Calcule o rendimento real do circuito, a partir de medidas efetuadas da tensão e corrente na entrada e na saída.

## Experiência 12 : Conversor Step-up (Simulação) [Boost]

### Parte prática

1.1 Simule o circuito abaixo :



1.2 Mantenha  $L=1\text{mH}$ , varie a carga de 15 a 40 Ohms (com incremento de 5 Ohms) e plote as formas de onda abaixo :

- tensão de saída ( $V_o$ )
- corrente de entrada ( $I_{in}$ )
- corrente da carga ( $I_{carga}$ )
- corrente do diodo ( $I_d$ )
- corrente do capacitor ( $I_c$ )

1.3 Determine a função e explique o funcionamento deste circuito?

1.4 Para qual carga o circuito deixa o modo de operação contínua e passa para o modo de operação descontínua?

1.5 Determine pela simulação a variação do ripple da tensão de saída para os casos de condução contínua e compare com os valores calculados teoricamente.

### 1.6 Exercício:

Deseja-se utilizar um conversor “step-up” para aumentar a tensão proveniente de um sistema de baterias de 48 Volts para 155 V. Considerando-se que a potência da carga é 500 W e que a frequência de comutação é de 2 kHz calcule:

- a) a razão cíclica necessária
- b) o valor de L para que  $\Delta I_L / I_L = 0,2$
- c) o valor de C para que o “ripple” na tensão de saída seja de 1%

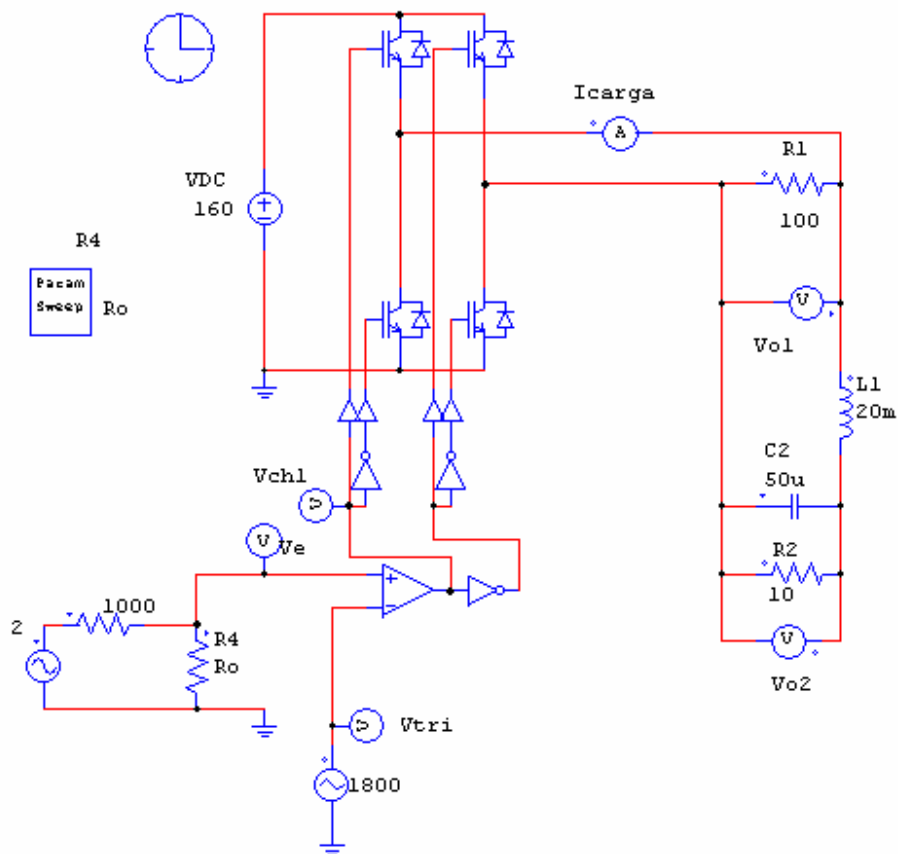
A seguir simule o circuito calculado, comprove o resultado esperado e faça uma lista dos materiais necessários para montar este circuito, definindo o tipo e código, a quantidade, o fabricante e o valor de cada componente.

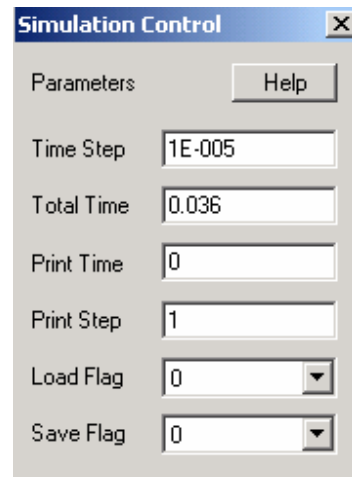
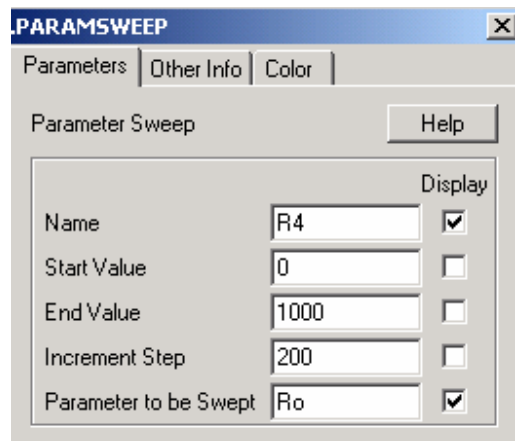
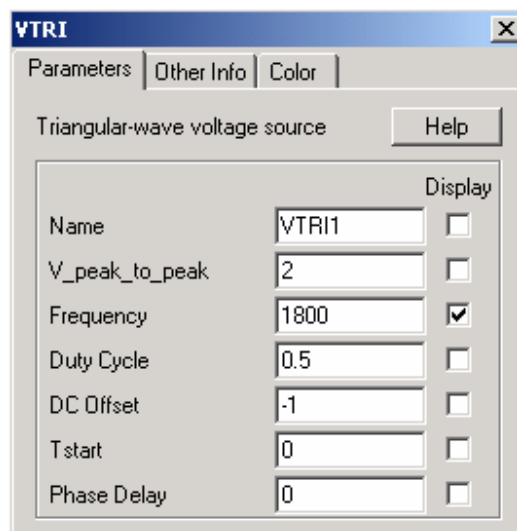
### 1.7 Enumere algumas vantagens e desvantagens do conversor “step-up” .

## Experiência 13 : Análise de um inversor estático monofásico

### Parte Prática

1.1 Simule no PSIM o circuito abaixo:





1.2 Plote as seguintes formas de onda:

- Tela 1 – Tensão  $v_{tri}$  e tensões de entrada  $V_e$ . Dar um “zoom” para deixar na tela apenas o segundo ciclo das senóides.
- Tela 2 – Tensão de comando da chave 1 ( $V_{ch1}$ ) para  $R_4 = 800$  ohms.
- Tela 3 – Tensão na saída da ponte inversora ( $V_{o1}$ ) para  $R_4 = 800$  ohms.
- Tela 4 – Tensões de saída  $V_{o2}$  para os diversos valores do índice de modulação  $m_a$ .

1.3 Para melhor visualizar os detalhes das tensões de saída ( $V_{o2}$ ), deletar as telas 1, 2 e 3 e seleccionar com a ferramenta “zoom” apenas o segundo ciclo das senóides.

1.4 Verificar o valor aproximado do “ripple” pico a pico correspondente à frequência de comutação, quando  $R_4 = 200$  ohms, na tensão de saída do inversor.



1.5 Mude a frequência de comutação para 900 Hz e 7200 Hz, e repita o item 1.4. Analise a influência da frequência de comutação sobre o desempenho e características do circuito.

1.6 Para a frequência de comutação de 7200 Hz, qual é o valor eficaz da tensão de saída ( $V_{o2}$ ) quando  $R_4 = 800$  ohms? Compare este valor com o valor teórico.

1.7 Altere o valor do indutor de saída para 10 mH e repita o item 1.6. Comente a razão das diferenças observadas.

1.8 Calcule o valor do índice de modulação **ma** para todos os valores simulados do resistor  $R_4$ .

## **Experiência 14 : Conversores ressonantes (Simulação)**

### *Breve introdução teórica*

Nas topologias em que as chaves semicondutoras comutam a corrente total da carga a cada ciclo, elas ficam sujeitas a picos de potência que colaboram para o "stress" do componente, reduzindo sua vida útil. Além disso, elevados valores de  $di/dt$  e  $dv/dt$  são potenciais causadores de interferência eletromagnética (IEM).

Quando se aumenta a frequência de chaveamento, buscando reduzir o tamanho dos elementos de filtragem e dos transformadores, as perdas de comutação se tornam mais significativas sendo, em última análise, as responsáveis pela frequência máxima de operação dos conversores. Dificilmente esta frequência ultrapassa 50kHz para uma potência superior a 100W.

Por outro lado, caso a mudança de estado das chaves ocorra quando tensão e/ou corrente por elas for nula, o chaveamento se faz sem dissipação de potência.

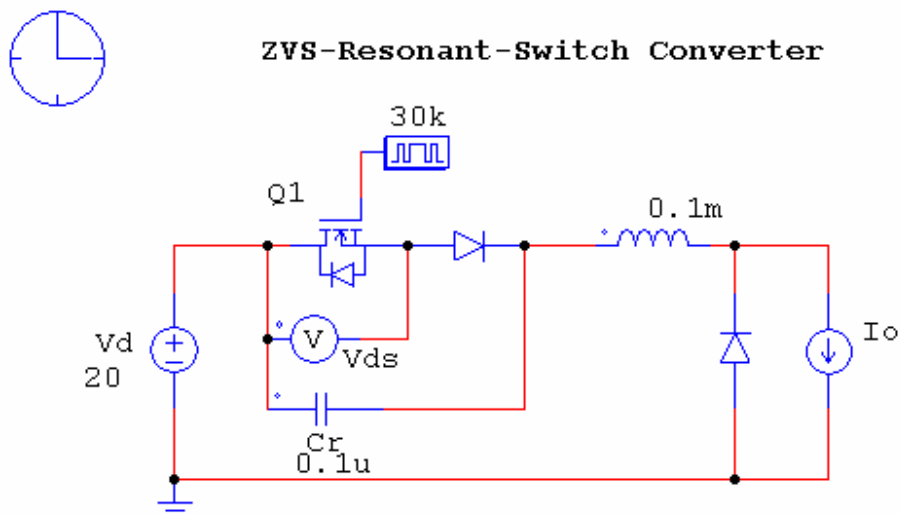
Analisaremos a seguir algumas topologias básicas que possibilitam tal comutação não-dissipativa. A carga "vista" pelo conversor é formada por um circuito ressonante e uma fonte (de tensão ou de corrente). O dimensionamento adequado do par L/C faz com que a corrente e/ou a tensão se invertam, permitindo o chaveamento dos interruptores em situação de corrente e/ou tensão nulas, eliminando as perdas de comutação.

Os conversores ressonantes associam às chaves semicondutoras um circuito ressonante (composto por um indutor e um capacitor) de modo que as mudanças de estado das chaves ocorram sempre sem dissipação de potência, seja pela anulação da corrente (ZCS: *zero current switching*), seja pela anulação da tensão (ZVS: *zero voltage switching*).

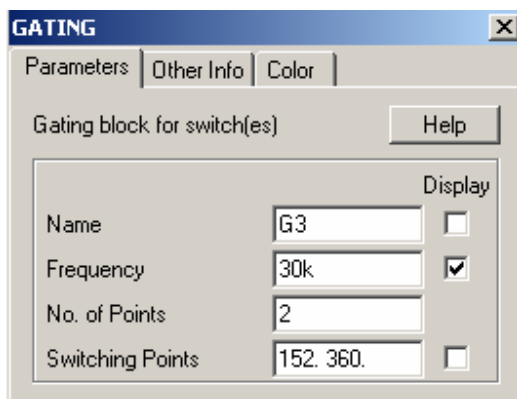
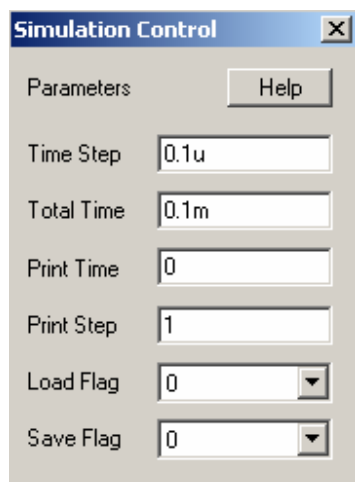
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad \text{Frequência de ressonância}$$

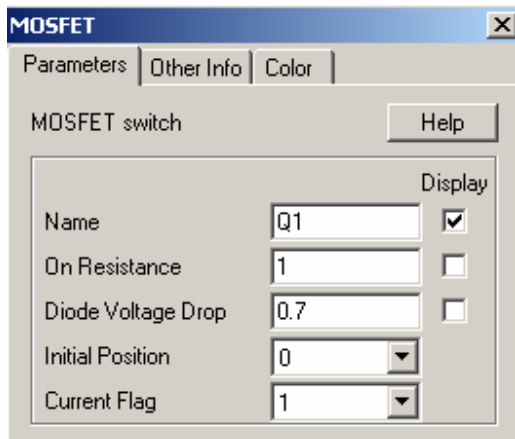
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Impedância característica}$$

1.1 Simule o circuito abaixo :



$I_o=1A$





1.2 Plote as formas de onda da :

- a) corrente que passa pelo indutor L
- b) corrente que circula pela chave
- c) da tensão entre os terminais da chave

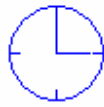
e identifique nas formas de onda quais os trechos correspondentes a condução de cada componente.

1.3 Calcule a frequência de ressonância imposta ao circuito do conversor. Compare seu valor com o valor da frequência de chaveamento do circuito.

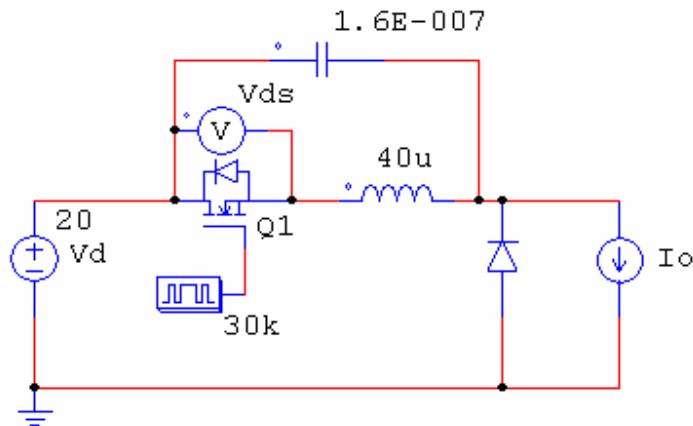
1.4 Comprove que o valor máximo da tensão sobre o capacitor é  $V_c = V_d + Z_o \cdot I_o$

1.5 Retire o capacitor e o indutor ressonantes do circuito, refaça novamente o item 1.2.

1.6 Simule o circuito abaixo :



**ZCS Resonant-switch converter**



$I_o=1A$

**Capacitor**

Parameter	Value	Display
Name	Cr	<input type="checkbox"/>
Capacitance	1.6E-007	<input type="checkbox"/>
Init. Cap. Voltage	0	<input type="checkbox"/>
Current Flag	1	<input type="checkbox"/>

**Simulation Control**

Time Step	0.5u
Total Time	0.2m
Print Time	0.1m
Print Step	1
Load Flag	0
Save Flag	0

**MOSFET**

Parameter	Value	Display
Name	Q1	<input checked="" type="checkbox"/>
On Resistance	1	<input type="checkbox"/>
Diode Voltage Drop	0.7	<input type="checkbox"/>
Initial Position	0	<input type="checkbox"/>
Current Flag	1	<input type="checkbox"/>

**GATING**

Parameter	Value	Display
Name	G1	<input type="checkbox"/>
Frequency	30k	<input checked="" type="checkbox"/>
No. of Points	2	<input type="checkbox"/>
Switching Points	0.155	<input type="checkbox"/>

1.2 Plote as formas de onda da :

- a) corrente que passa pelo capacitor
- b) corrente que circula pela chave
- c) da tensão entre os terminais da chave

e identifique nas formas de onda quais os trechos correspondentes a condução de cada componente.

1.3 Calcule a frequência de ressonância imposta ao circuito do conversor. Compare seu valor com o valor da frequência de chaveamento do circuito.

1.4 Comprove que o valor máximo da corrente que passa pela chave é  $I_t = I_o + V_d/Z_o$

1.5 Retire o capacitor e o indutor ressonantes do circuito, refaça novamente o item 1.2.

1.6 Compare os tipos de comutação ZVS e ZCS segundo a escolha da chave utilizada.