

PSPICE[®]

Simulação de Circuitos Analógicos e Digitais

Guia Passo-à-Passo

Versão Estudante 9.1

2003

PROF. RODRIGO CUTRI

**PROIBIDA A REPRODUÇÃO POR QUALQUER MEIO SEM A PRÉVIA
AUTORIZAÇÃO POR ESCRITO DO AUTOR
RESPEITE O DIREITO AUTORAL
CÓPIA ILEGAL É CRIME**

DEDICATÓRIA

À minha família e a minha querida namorada pela dedicação e apoio constantes

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e professores Mário Pagliaricci e Nilson de Lucca pelo incentivo e orientações sem as quais esta obra não estaria concluída .

À Escola de Engenharia Mauá e seus alunos que nos inspiram em buscar cada vez mais o aperfeiçoamento e a busca em divulgar o conhecimento

“Só o conhecimento traz o poder” (Freud)

OBJETIVOS

esta obra tem por objetivos introduzir as simulações de circuitos analógicos e digitais através do software PSpice , servindo como guia passo-à-passo para as principais análises e componentes utilizados num curso de Engenharia Elétrica

SUGESTÕES E COMENTÁRIOS : rodrigocutri@hotmail.com

SITE DO AUTOR :

WWW.ANGELFIRE.COM/PRO/PSPICE

DISTRIBUIÇÃO :

Livraria Esquadro Ltda
Praça Mauá , 01 – Bairro Mauá – Cep 09580.500
São Caetano do Sul - São Paulo – Brasil
Tel . 4232.1447 – Fax . 4232.1443
liv.esquadro@ig.com.br

TREINAMENTOS E DISTRIBUIÇÃO DO SOFTWARE PSPICE :

Anacom Software e Hardware Ltda.
Rua Nazaret, 807 – Bairro Barcelona
São Caetano do Sul, SP Brasil 09551-200
Fone (0xx) 11 3422-4200 Fax (0xx) 11 3422-4242
E-mail: treinamento@anacom.com.br
www.anacom.com.br

ÍNDICE

PSpice.....	5
Aviso e Termo de Responsabilidade.....	6
1.Desenhando um esquema de um circuito elétrico.....	7
1.1 Simulando o circuito	16
2. DC SWEEP (Variando parâmetros p/ obter a Curva de Transferência). 20	
3. Teorema da Superposição e Proporcionalidade	32
3.1 A função de transferência (Transfer Function)	32
3.2 Medindo a resistência equivalente do circuito	35
4. AC SWEEP (Variando a frequência).....	37
4.1 Gráfico em função da frequência	37
4.2 Gráfico da Análise AC na frequência de 1kHz à 10 kHz	41
4.3 Gráfico de Bode.....	45
4.4 Análise do Ganho de um Amplificador	48
4.5 Ganho do Amplificador Operacional	50
4.6 Variação Automática do Ganho do Amplificador Operacional.....	53
4.6.1 Análise Paramétrica.....	53
4.7 Indutância Mútua.....	58
5 . TRANSIENT (Análise Transitória)	61
5.1 Circuito com capacitor com condições iniciais.....	61
5.2 Resposta Transitória do Indutor	69
5.3 Circuito Grampeador com Zener	72
5.4 Análise de Fourier na Tela Gráfica	76
5.5 Análise de Fourier com PSpice	82
5.6 Integrador com Amplificador Operacional Ideal	89
6. Digital Simulations (Simulação com Circuitos Digitais).....	93
6.1 Alimentação dos Sinais Digitais	93
6.1.1 Fontes de Sinais Digitais	93
6.1.2 Digital Clock (Clock Digital).....	101
6.2 Utilizando ao mesmo tempo componentes analógicos e digitais. 104	
6.2.1 Contador	108
6.3 Observações.....	112
7. Monte Carlo Analyses (Análise do Pior Caso)	113
7.1 Análise do Pior no Divisor de Tensão.....	113
7.2 Análise Monte Carlo do Divisor de Tensão.....	118

PSpice

O pacote Microsim é um software de simulação desenvolvido pela Microsim Corporation. Ele é composto pelos principais programas:

- .**Microsim Schematics**: onde é feita a edição do circuito;
- .**Microsim PSpice**: responsável pela compilação e interpretação;
- .**Microsim Probe**: visualização gráfica dos resultados obtidos;
- .**Microsim Stimulus Editor**: edição dos estímulos de entrada

Basicamente os arquivos são gerenciados pelo **Design Manager** que é automaticamente aberto quando qualquer outro programa é aberto.



Simuladores de circuitos são poderosas ferramentas de software que permitem a análise de sinais elétricos, sem a necessidade da implementação física dos mesmos. Possibilitam uma análise em geral mais rápida, segura e barata do que a montagem física do circuito.

Particularmente para o projeto de circuitos integrados, a simulação é uma ferramenta fundamental, pois a implementação física do chip é um processo caro e demorado. Um circuito integrado só é fisicamente construído quando todas as simulações elétricas do circuito mostram o resultado desejado.

A versão utilizada do PSPICE é de propriedade da CADENCE Design Systems, sendo que a versão utilizada neste apostila é a 9.1 (versão estudante).

Aviso e Termo de Responsabilidade

Esta apostila é escrita com autorização de CADENCE Design Systems .

PSpice é uma marca registrada de CADENCE Design Systems

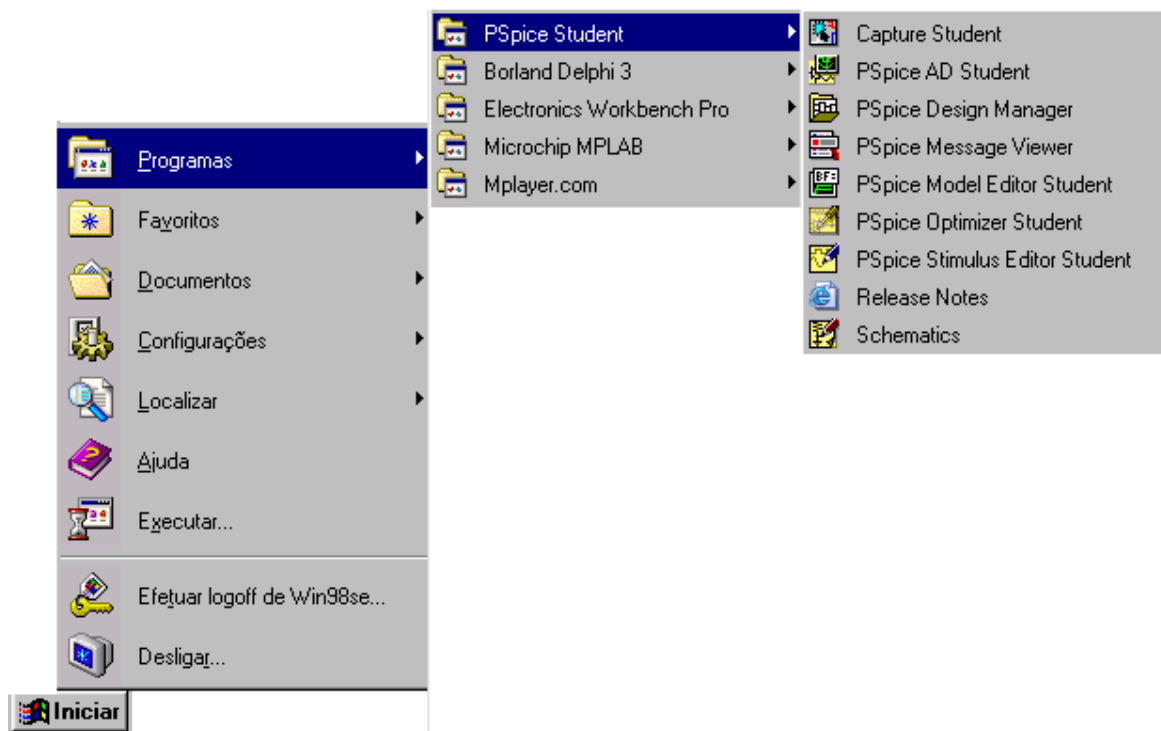
Windows é uma marca registrada de Microsoft Corporation

O autor perante à qualquer pessoa ou sociedade não é responsável com respeito à danos ou perdas causadas pelas informações contidas nesta apostila ou pelo uso de disquetes , cds ou programas que possam acompanhá-la .

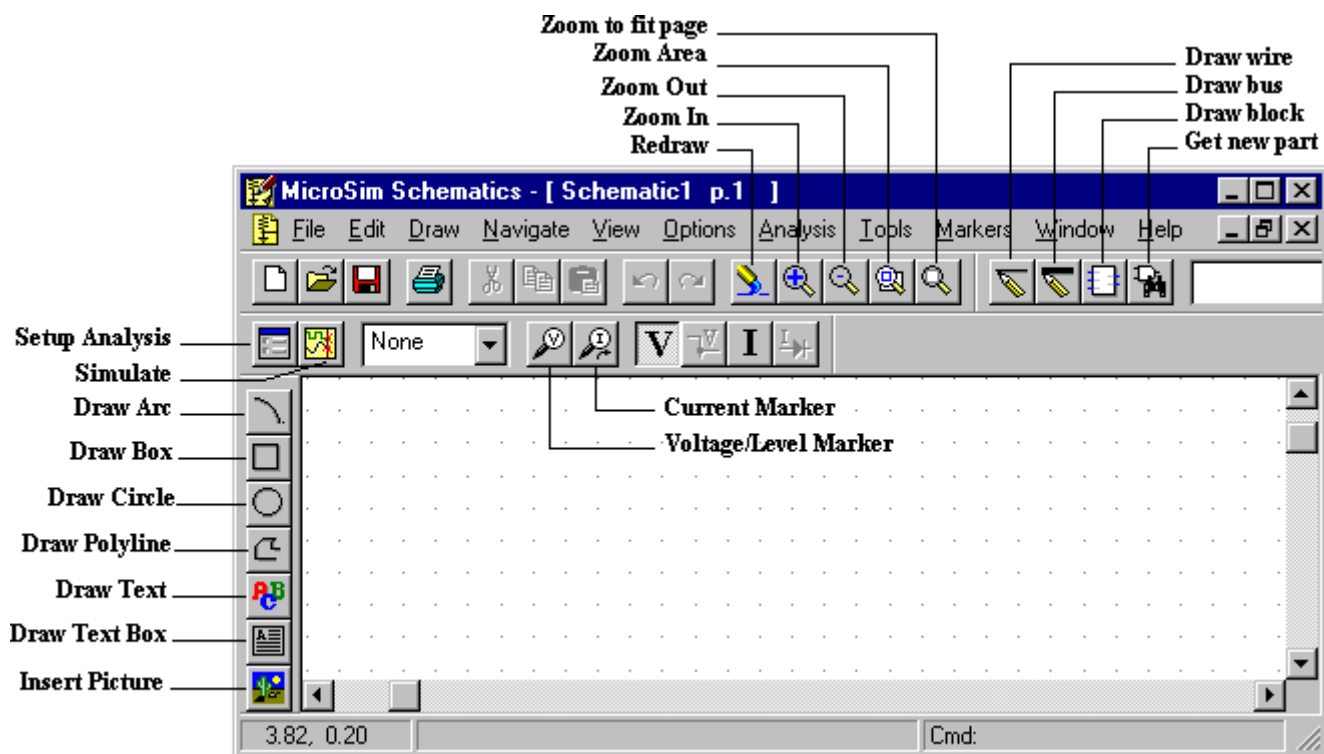
1.Desenhando um esquema de um circuito elétrico

Para iniciar devemos ir ao menu de programas e procurar pela pasta PSpice > Schematics

:



A seguinte tela se abrirá :



Tela do Microsim Schematics e seus ícones

Esta tela também é chamada de folha e é nela que iremos desenhar nossos circuitos .

Instruções Gerais :

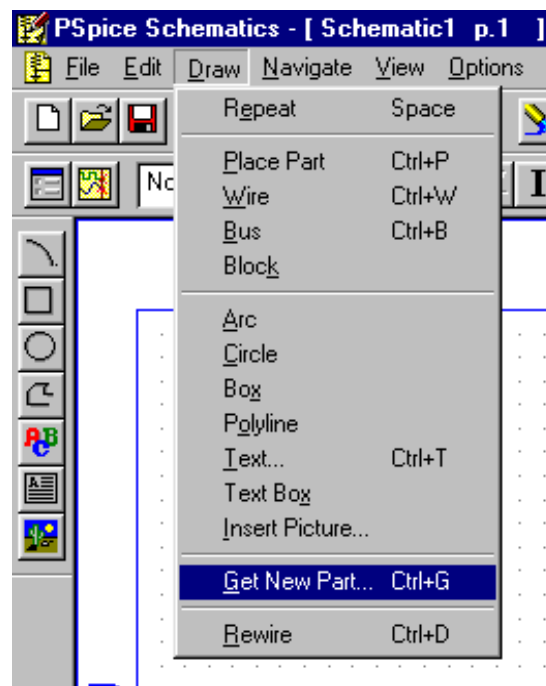
- O Microsim PSpice não distingue entre caracteres maiúsculos e minúsculos.
- O nome de um campo deve começar com uma letra, mas os caracteres que se seguem podem ser letras, números ou: "\$", "_", "*" ou "%". Nomes podem ter 131 caracteres.
- O número de um campo pode ser inteiro ou real. Números inteiros e reais podem ser seguidos por um expoente inteiro(7E-6, 2.136e3) ou um fator de escala simbólico(7U, 2.136K). Veja a tabela dos fatores de escala:

Símbolo	Forma exponencial
F	1E-15
P	1E-12
N	1E-9
U	1E-6
M	1E-3
K	1E3
MEG	1E6
G	1E9
T	1E12

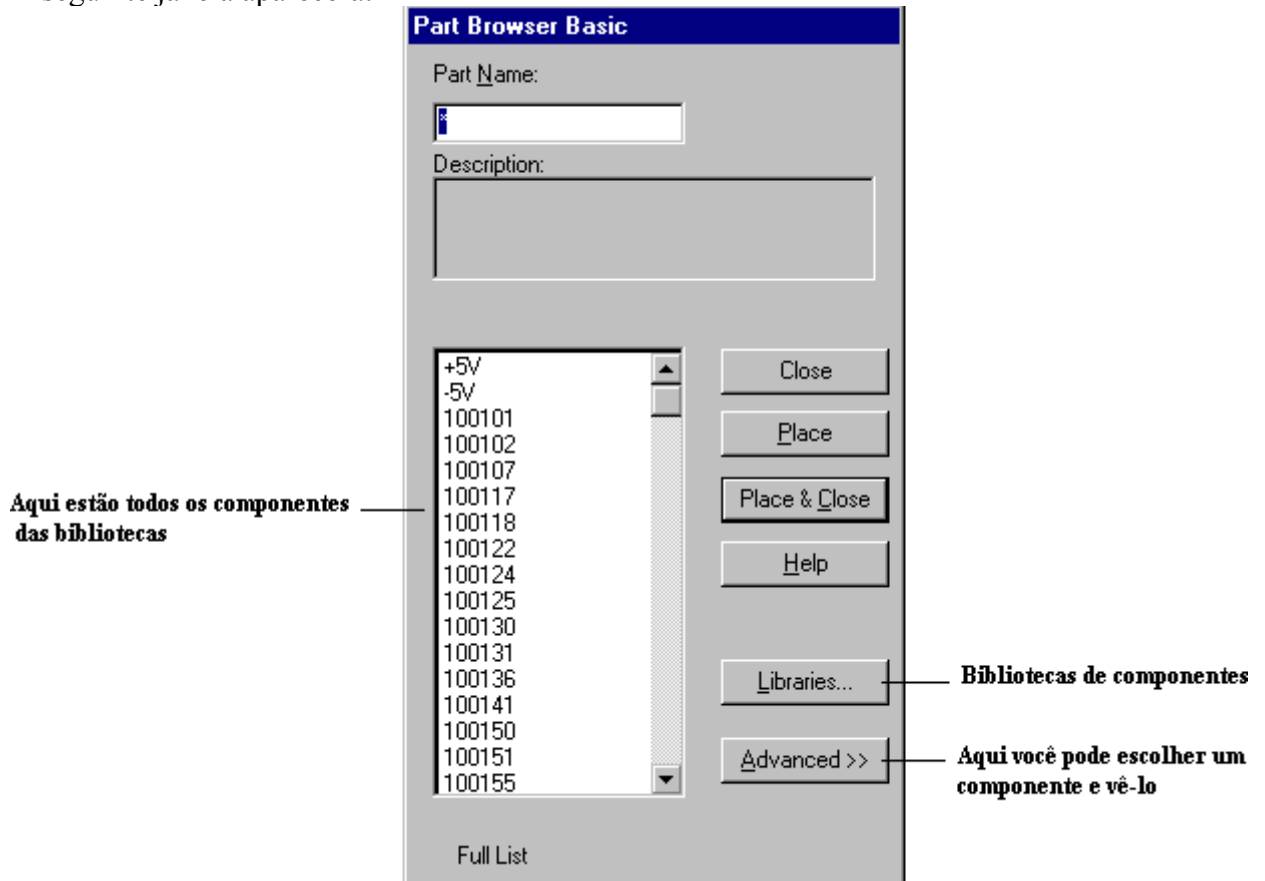
- Letras imediatamente seguindo um número que não são fatores de escala são ignoradas, isso vale também para letras imediatamente seguindo um fator de escala. Por exemplo, 10, 10V, 10Hz e 10A representam o mesmo número. O mesmo pode ser dito para 2.5M, 2.5MA, 2.5Msec e 2.5MOhms.

Vamos agora inserir os componentes que iremos utilizar :

- 1) Clique no menu **Draw > Get New Part**

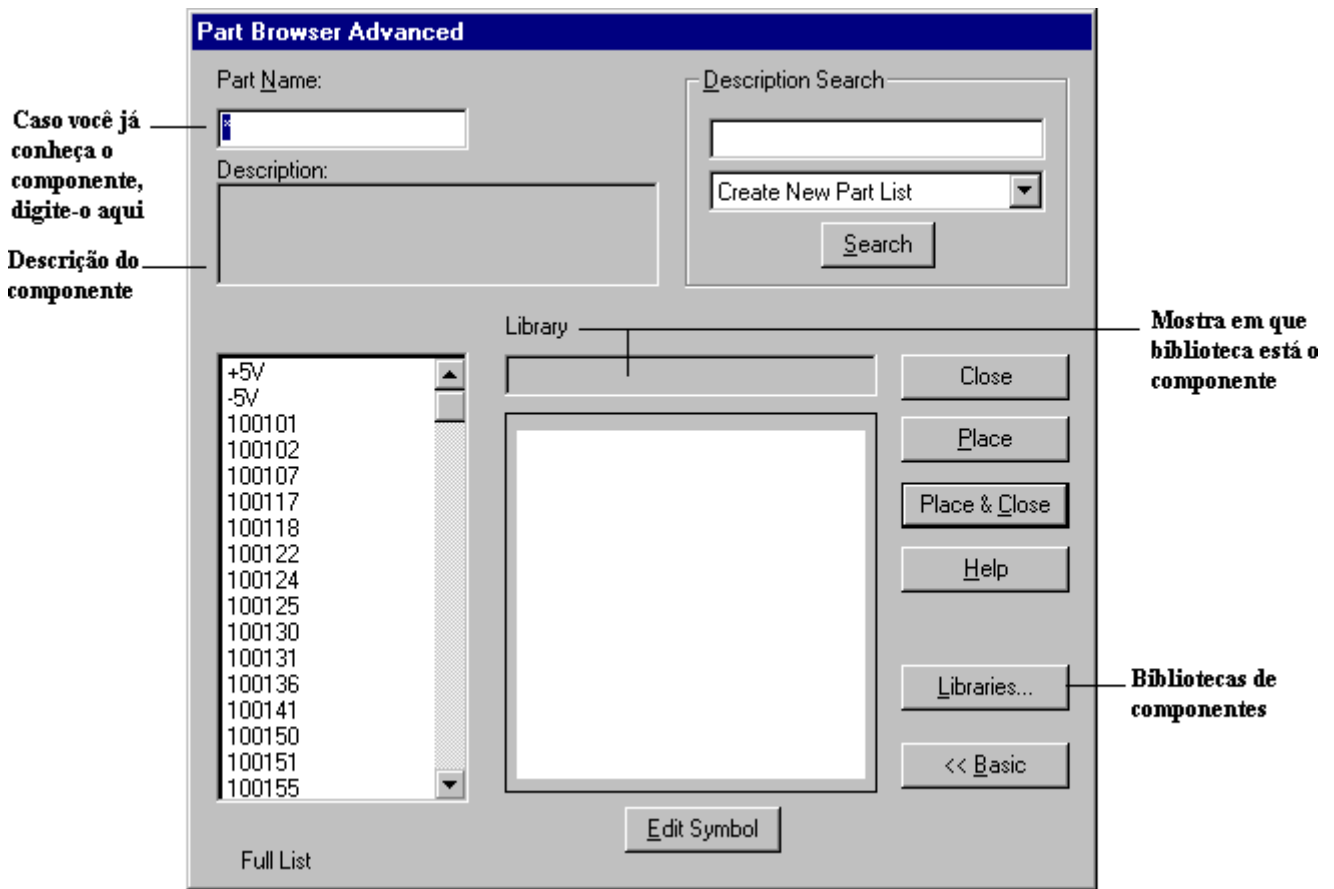


A seguinte janela aparecerá:

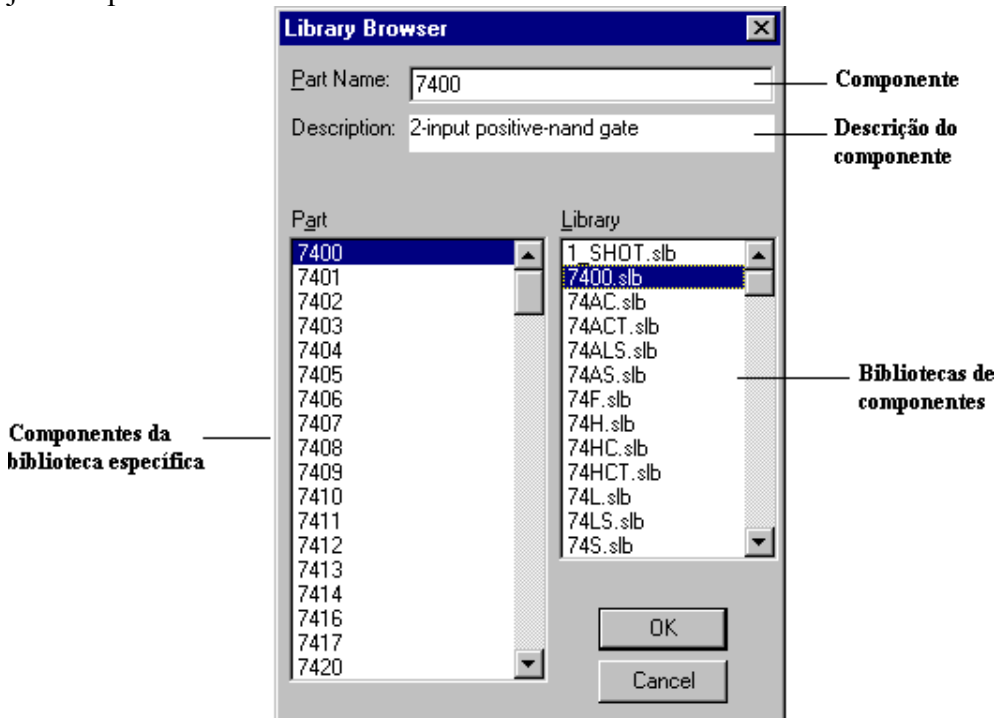


Caso você queira selecionar os componentes e vê-los, clique em **Advanced**.

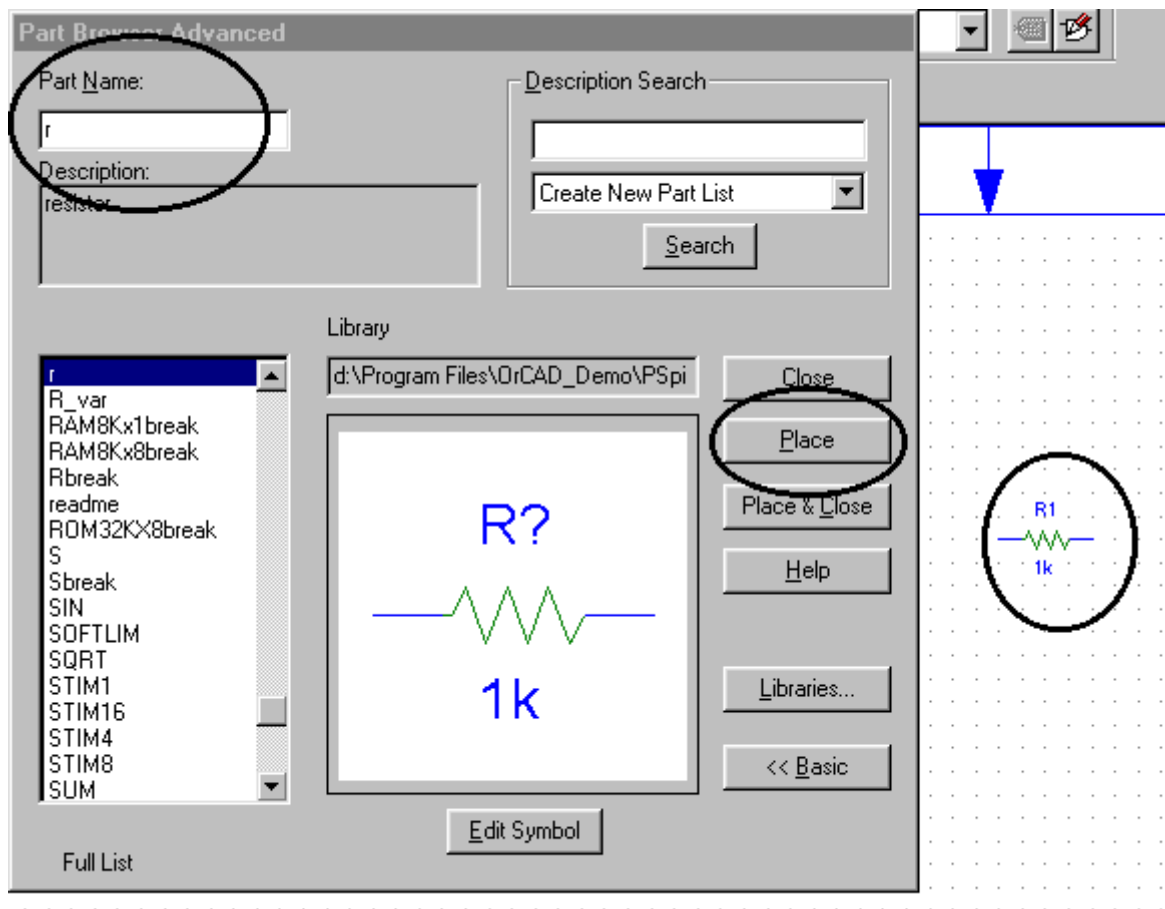
A seguinte janela se abrirá:



Para selecionar os componentes pelas bibliotecas, clique em **Libraries**. A seguinte janela aparecerá:



Para definir os componentes a serem utilizados siga o exemplo :



Em Part Name digite R , você observará a figura de um resistor , a seguir pressione o botão **PLACE** , você agora poderá colocar o componente sobre sua folha apenas clicando com o mouse .

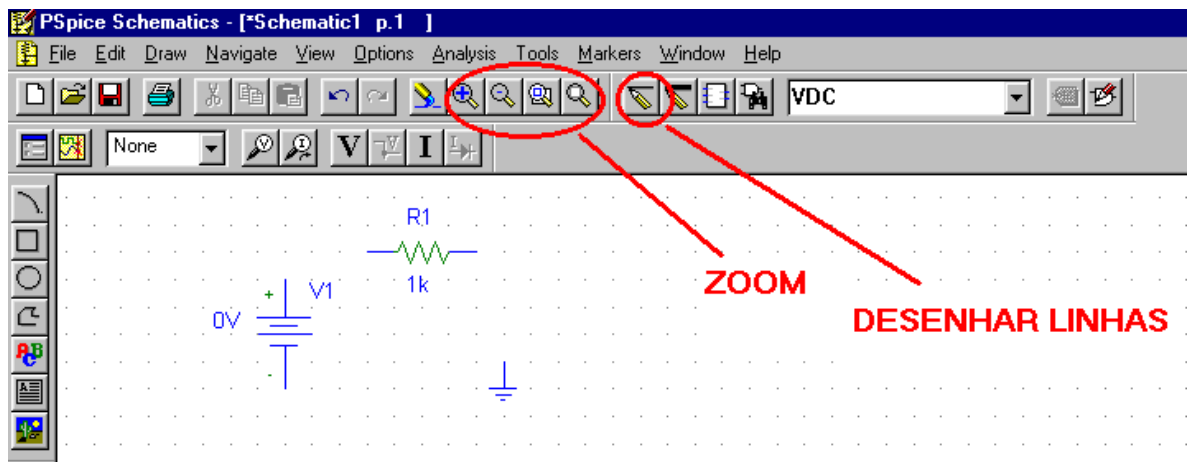
Insira agora os outros componentes que usaremos digitando :

- EGND para terra ;
- VDC para fonte de tensão contínua ;

É obrigatório a presença de um nó "zero", que será o nó de referência (usualmente o nó de "terra" do circuito) , ao qual serão referenciadas todas as tensões calculadas, o "terra" deve sempre ser fixado no circuito .

À seguir pressione o botão **CLOSE** para sair .

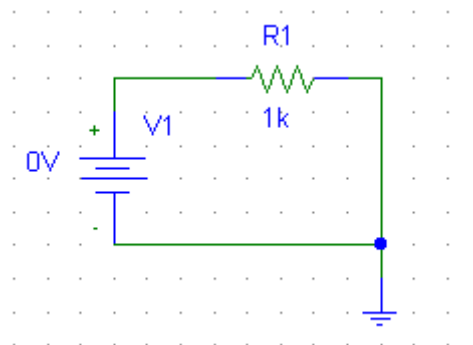
Você deverá ter a seguinte tela agora :



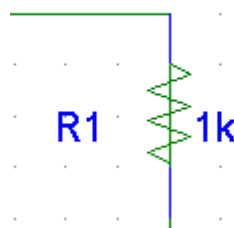
Para melhor visualização utilize os botões de **Zoom** .

Vamos agora desenhar as linhas (wires) que ligarão nosso circuito , para isso clique no botão **Desenhar Linhas (Draw Wire)** , o cursor agora passa a ter a forma de um lápis permitindo que você desenhe as linhas clicando com o mouse no ponto inicial e final da ligação , para sair desta função basta pressionar o lado direito de seu mouse .

Você deve ter agora o seguinte circuito :



CUIDADO PARA NÃO DESENHAR UMA LINHA SOBRE O COMPONENTE O PSPICE ENTENDERÁ COMO UM CURTO E IGNORARÁ O COMPONENTE

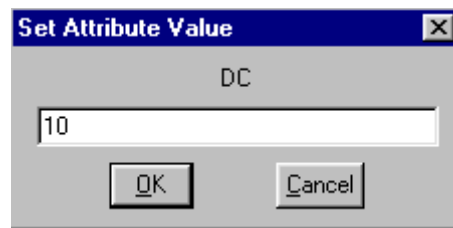


Para imprimir o esquema ou gráfico , selecione o menu **File > Print**

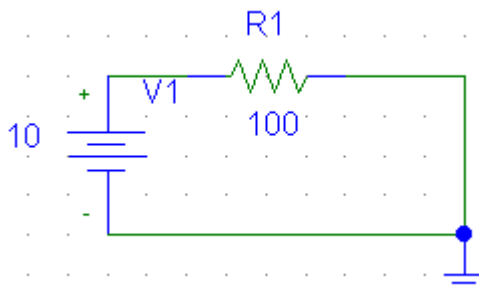
Para rotacionar os componentes , selecione o componente e pressione **Control+R** , ou menu **Edit > Rotate**

Vamos agora explicitar os valores dos componentes :

- 1) Clique 2 vezes sobre o texto **0V** uma caixa de diálogo se abrirá permitindo que você altere o valor da fonte de tensão DC , mude o valor para 10 V e pressione **OK** para confirmar .

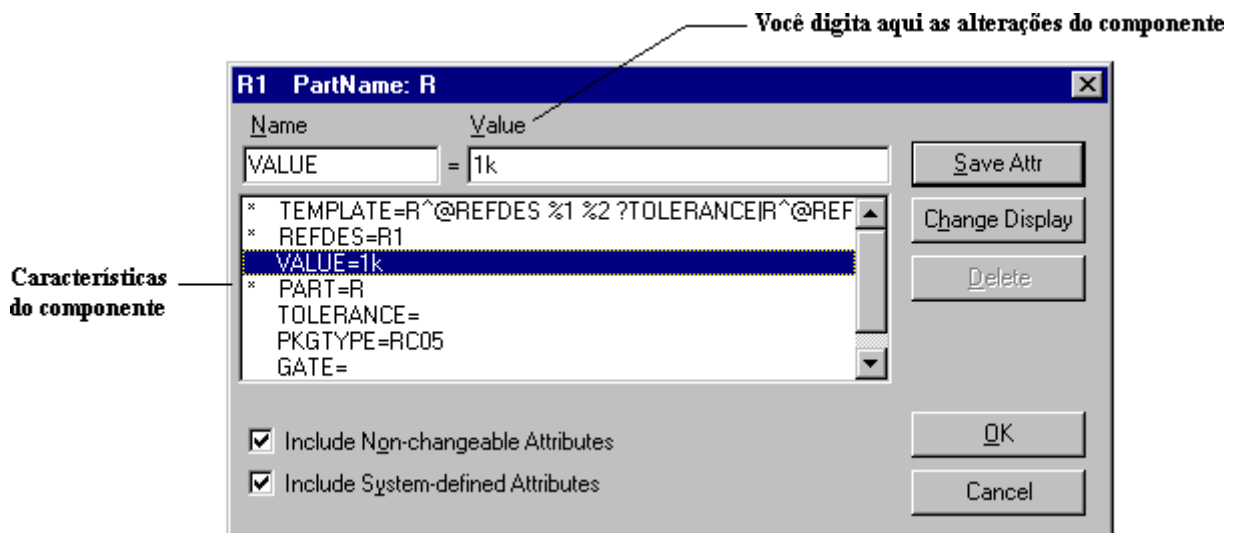


- 2) Vamos agora definir o valor do resistor , clique 2 vezes sobre o texto **1k (valor padrão)** uma caixa de diálogo se abrirá permitindo que você altere o valor da resistência , mude o valor para 100 Ohms e pressione **OK** para confirmar .



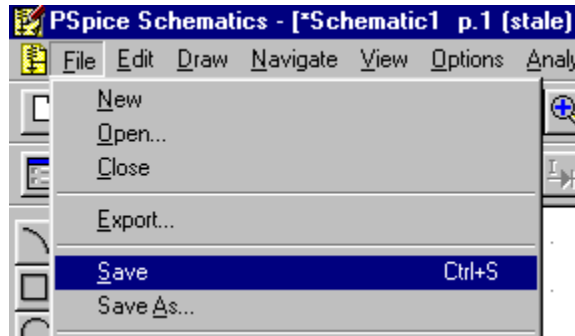
Uma outra maneira de ajustar os valores dos componentes é clicando duas vezes sobre estes.

Por exemplo, ao clicarmos duas vezes sobre um resistor, a seguinte janela aparece:

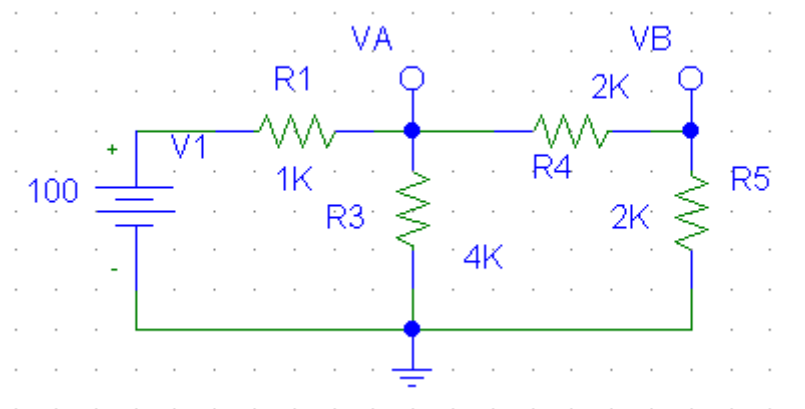


Selecione cada característica do componente e faça a alteração. Ao alterar os valores clique em **Save Attr**. Ao término, clique em **OK**.

Para salvar o esquema desenhado vá ao menu **Arquivo (Files)** , **Salvar Como (Save As)** :



Monte agora o seguinte circuito :

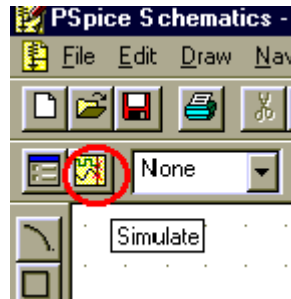


Utilize os componentes VDC , R , EGND e BUBBLE .

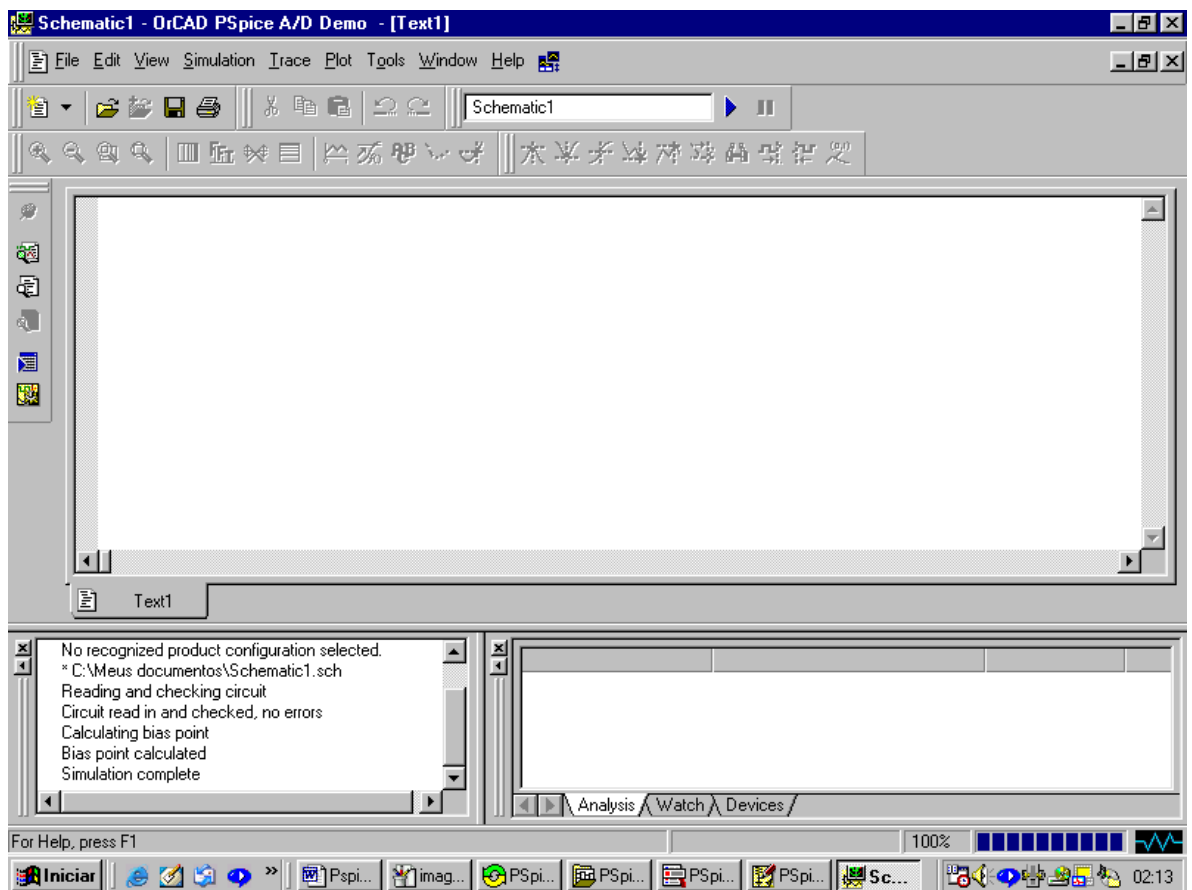
clique 2 vezes sobre o componente Bubble , uma caixa de diálogo se abrirá permitindo que você altere o seu texto , ele servirá como um marco de referência para medirmos o valor da tensão nos resistores (todas as tensões são sempre medidas tendo como referência o terminal terra) .

1.1 Simulando o circuito

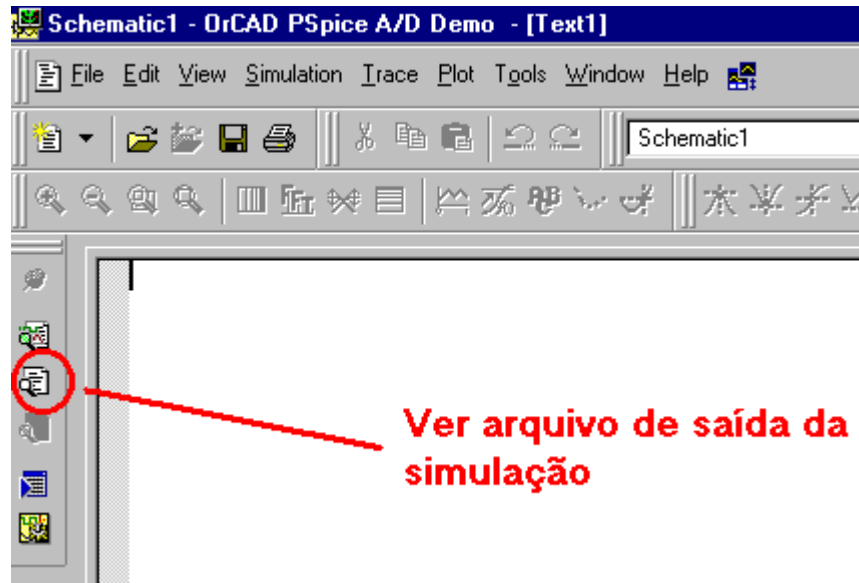
Vamos rodar agora a simulação do programa afim de sabermos qual o valor das tensões nas referências (bubbles) , pressione o botão **Simulate** .



A seguinte tela se abrirá :



Pressione o botão ao lado :



Aparecerá então o arquivo contendo os valores das tensões simuladas do circuito :

```
**** 08/10/02 02:10:56 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****
* C:\Meus documentos\Schematic1.sch

****   CIRCUIT DESCRIPTION

*****

* Schematics Version 9.1 - Web Update 1
* Sat Aug 10 02:04:55 2002

** Analysis setup **
.OP

* From [PSPICE NETLIST] section of PSpicev.ini:
.lib "nom.lib"

.INC "Schematic1.net"

**** INCLUDING Schematic1.net ****
* Schematics Netlist *

V_V1    $N_0001 0 100
R_R1    $N_0001 VA 1K
R_R4    VB VA 2K
R_R5    VB 0 2K
R_R3    0 VA 4K

**** RESUMING Schematic1.cir ****
```

.INC "Schematic1.als"

**** INCLUDING Schematic1.als ****
* Schematics Aliases *

.ALIASES

V_V1 V1(+= \$N_0001 -=0)
R_R1 R1(1= \$N_0001 2=VA)
R_R4 R4(1=VB 2=VA)
R_R5 R5(1=VB 2=0)
R_R3 R3(1=0 2=VA)
_ _ (VA=VA)
_ _ (VB=VB)
.ENDALIASES

**** RESUMING Schematic1.cir ****

.probe

.END

**** 08/10/02 02:10:56 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****

* C:\Meus documentos\Schematic1.sch

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(VA) 66.6670 (VB) 33.3330 (\$N_0001) 100.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME CURRENT

V_V1 -3.333E-02

TOTAL POWER DISSIPATION 3.33E+00 WATTS

**** 08/10/02 02:10:56 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****

* C:\Meus documentos\Schematic1.sch

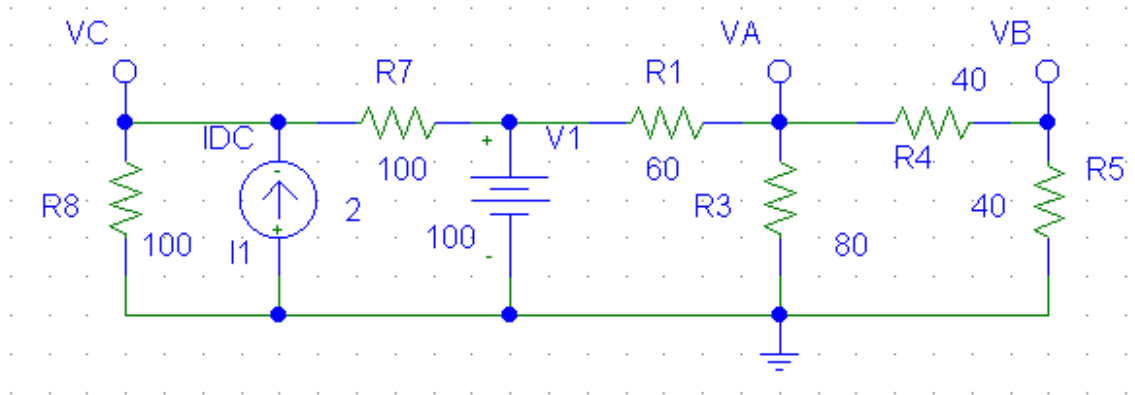
**** OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .01

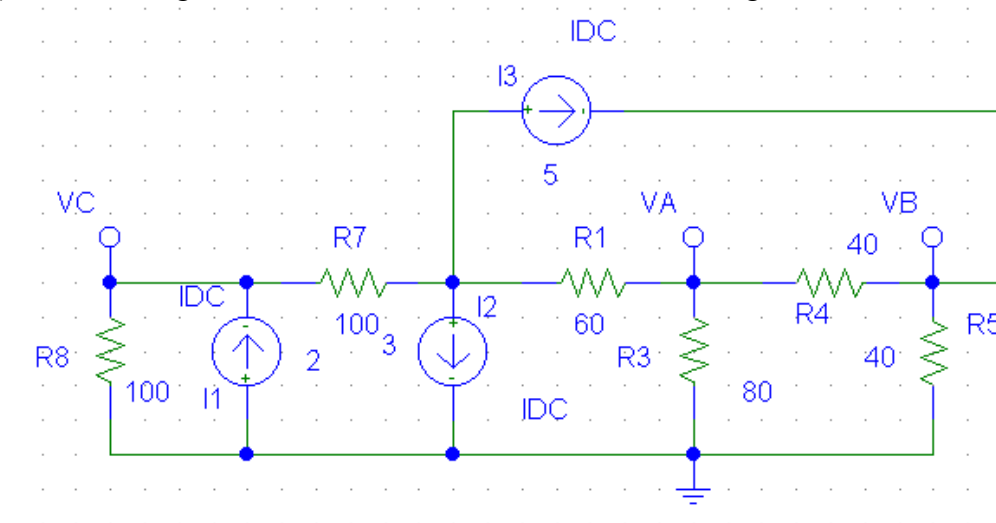
1.2 EXERCÍCIOS

1) Determine agora a tensão V_A , V_B e V_C do circuito à seguir :
(Gerador de Corrente -> IDC)



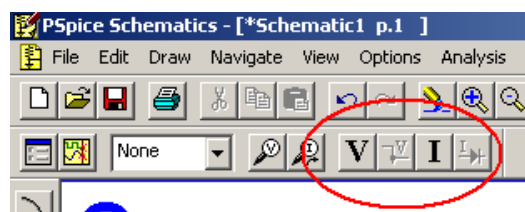
VA (V)	
VB (V)	
VC (V)	

2) Determine agora a tensão V_A , V_B e V_C do circuito à seguir :



VA (V)	
VB (V)	
VC (V)	

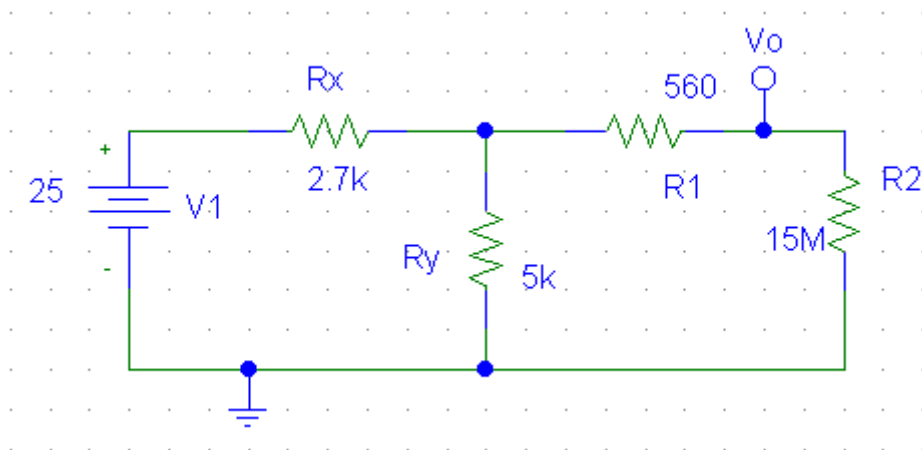
Uma outra maneira de se ver os resultados é através dos botões V (Tensão) e I (Corrente) :



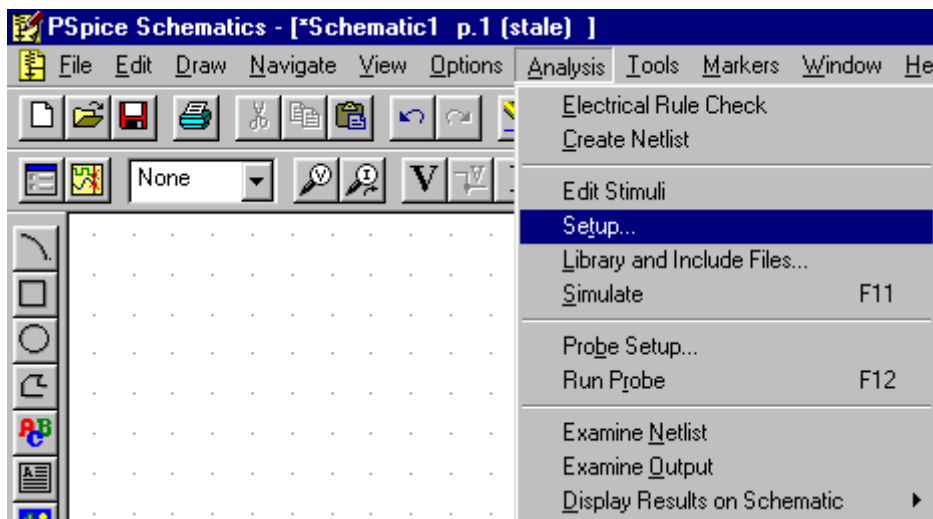
2. DC SWEEP (Variando parâmetros p/ obter a Curva de Transferência)

Até agora para simularmos o circuito com diferentes valores , deveríamos mudar o valor desejado e rodar novamente quantas vezes fossem as análises desejadas , vamos aprender agora como simular o circuito para diferentes valores numa mesma simulação.

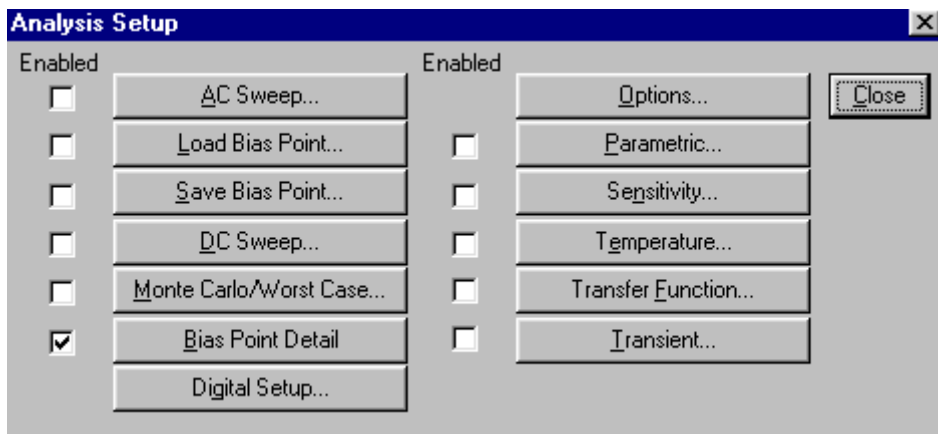
Vamos desenhar o circuito abaixo :



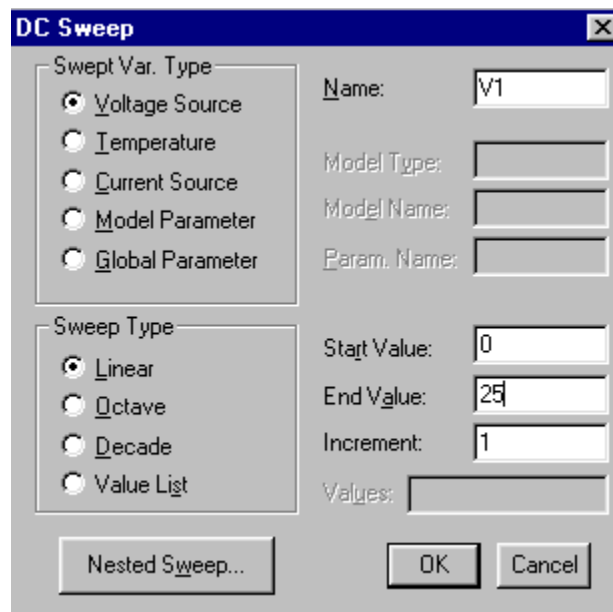
A pergunta é : como varia a tensão V_o quando variamos V_1 . Vamos abrir o menu **Analysis > Setup** .



a seguinte tela se abrirá :



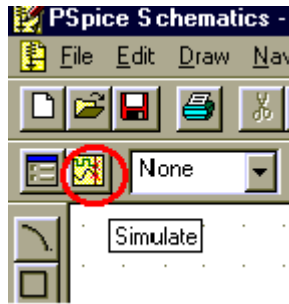
Vamos pressionar o botão DC Sweep , a caixa de diálogo aparecerá , preencha-a conforme o indicado e confirme :



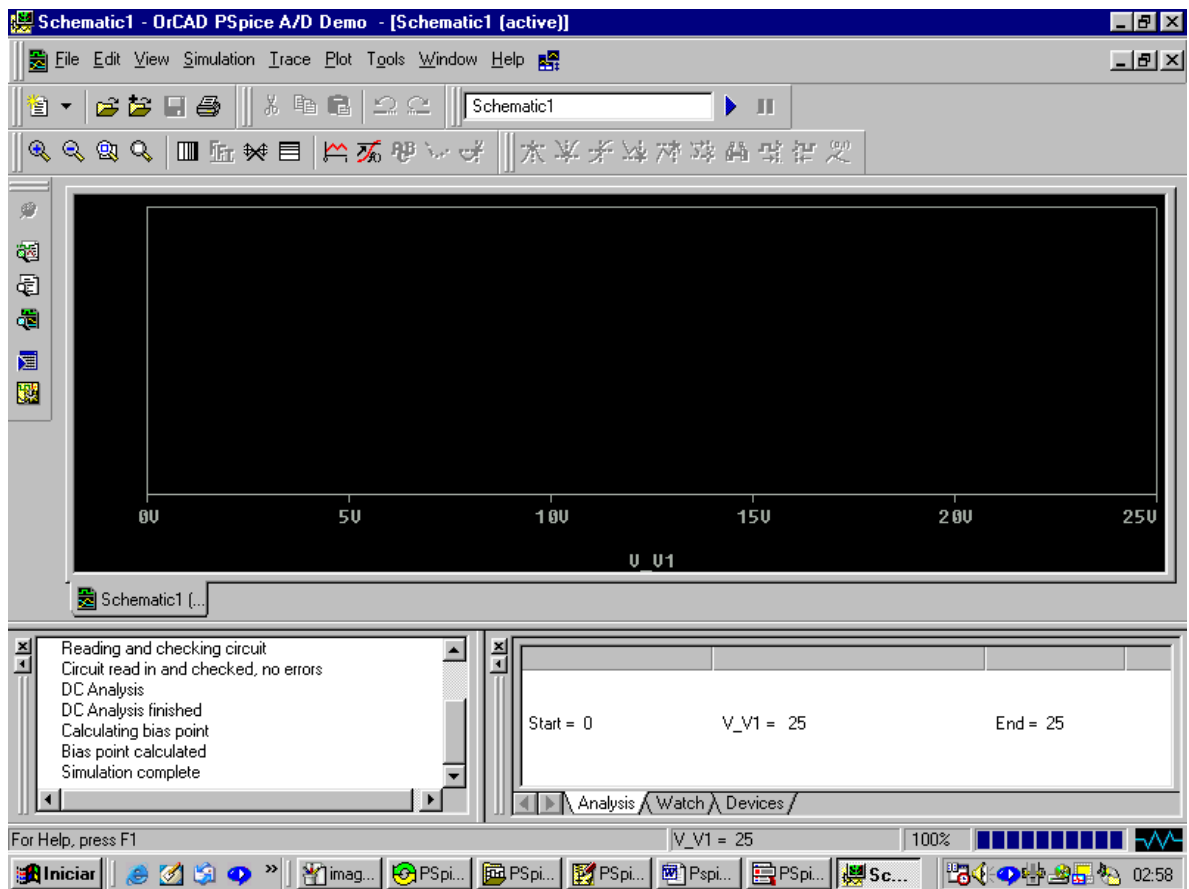
Acabamos de dizer ao programa para simular a variação de uma fonte de tensão (Voltage Source) , indicamos qual fonte sofrerá a variação (Name : V1) , escolhemos o tipo de variação (Linear) e definimos os valores inicial , final e o incremento da variação .

A seguir feche a tela Analysis Setup , verificando que agora o item DC Sweep está selecionado .

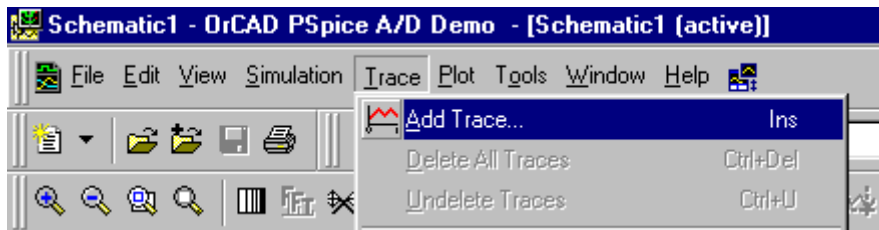
Vamos rodar agora a simulação do programa afim de sabermos qual o valor da tensão em V_o em função de V_1 , pressione o botão **Simulate** .



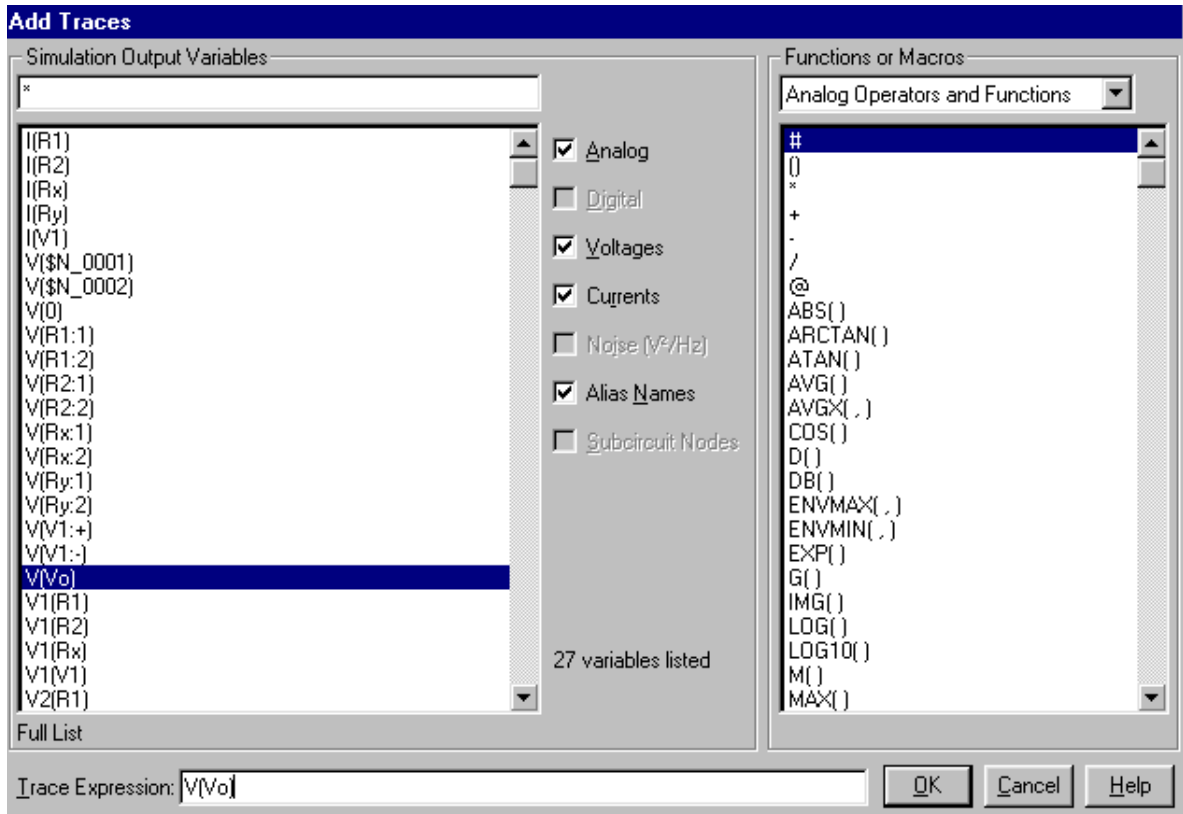
A seguinte tela se abrirá :



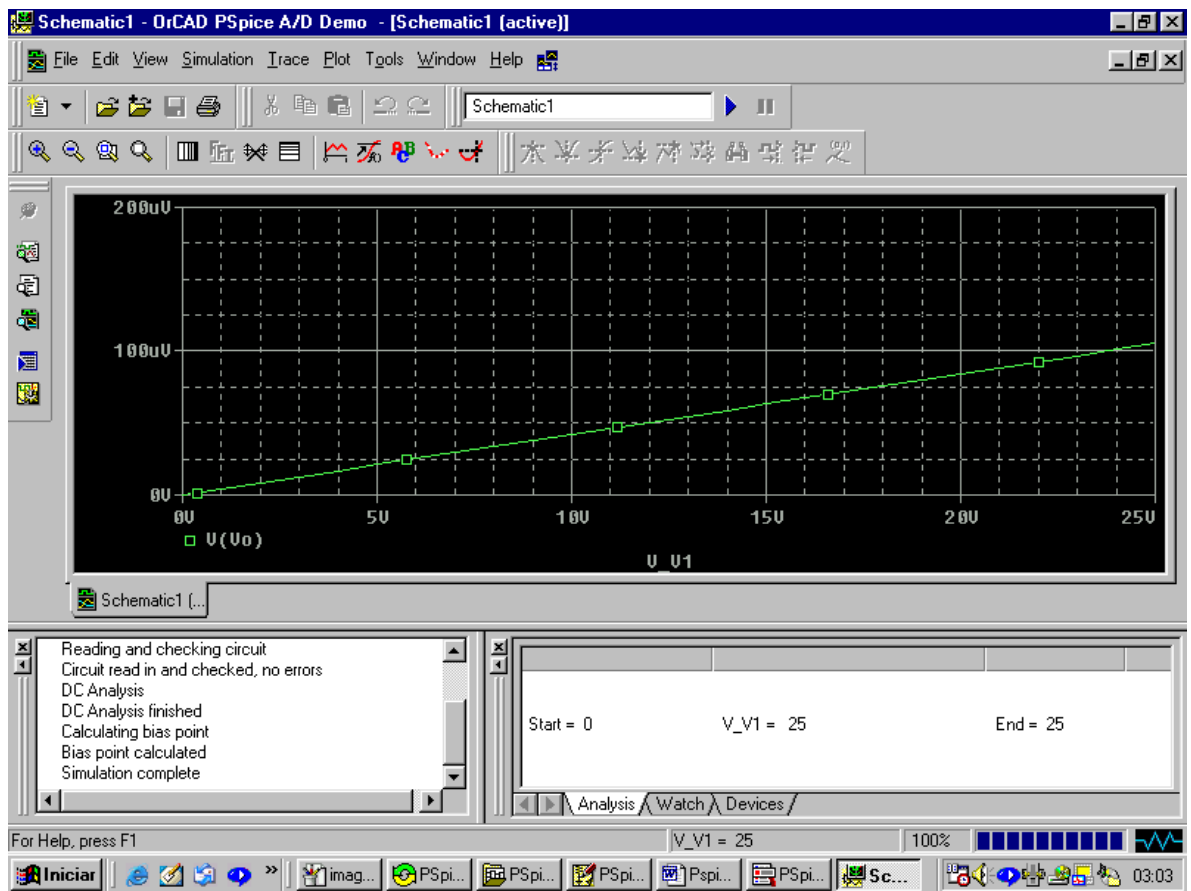
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(V_o)$ e confirme :



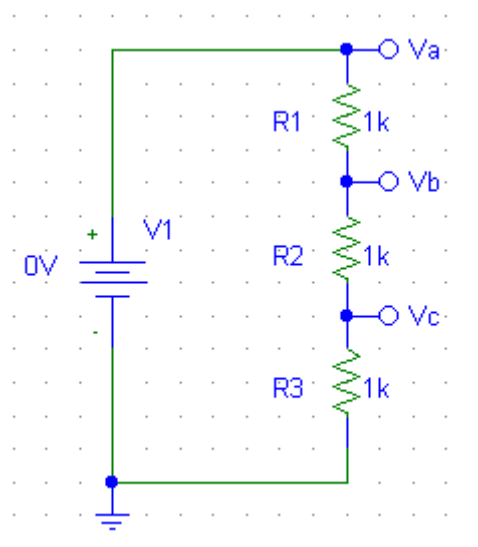
Teremos então o gráfico da variação de V_o em função de V_1 :



Para inserir um novo gráfico no mesmo eixo repita o procedimento (apenas tenha cuidado para não colocar gráficos com valores máximos muito distantes ou você terá problemas de escala para visualização). Você também pode plotar o gráfico de funções utilizando as variáveis de tensão e corrente , bastando escrever a expressão na tela **Add Trace** .

2.1 EXERCÍCIO

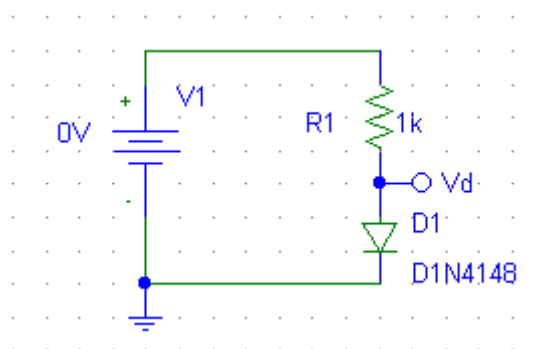
Plote as tensões V_a , V_b e V_c quando a fonte DC varia de 1 à 20 V .



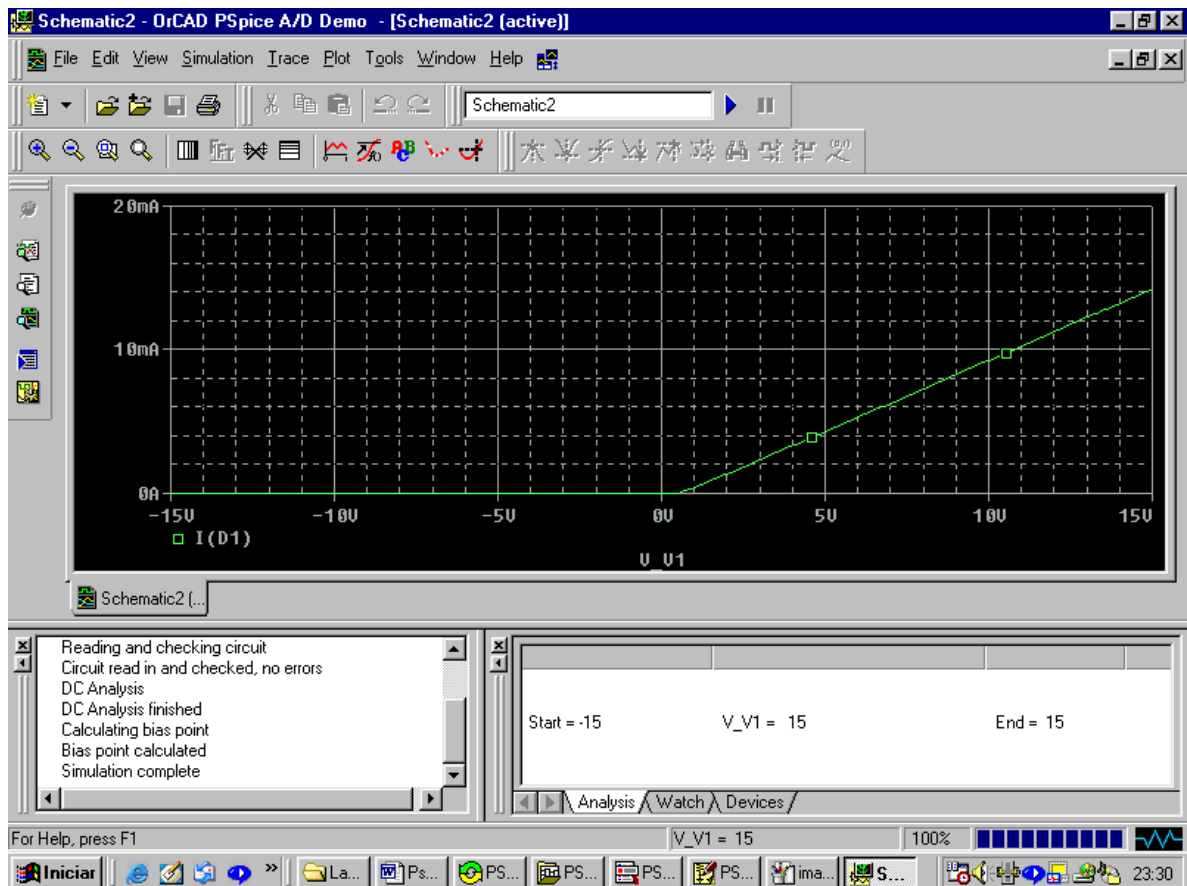
2.2 Curva Característica do Diodo

Componentes : Resistor (R) , Fonte Dc (Vdc) , marcador (Bubble) , Diodo (D1N4148) , Terra (EGND)

Vamos variar a fonte Dc de -15 V à 15 V , modo Linear , incremento 0.1 .

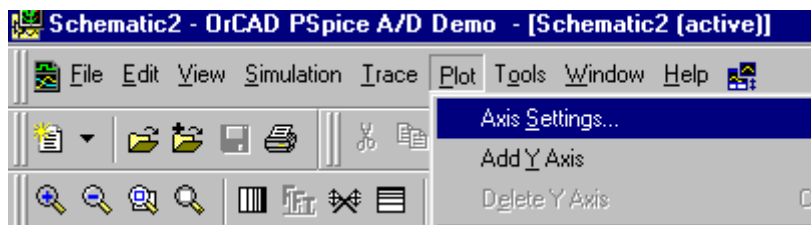


Vamos plotar a corrente $I(D1)$.

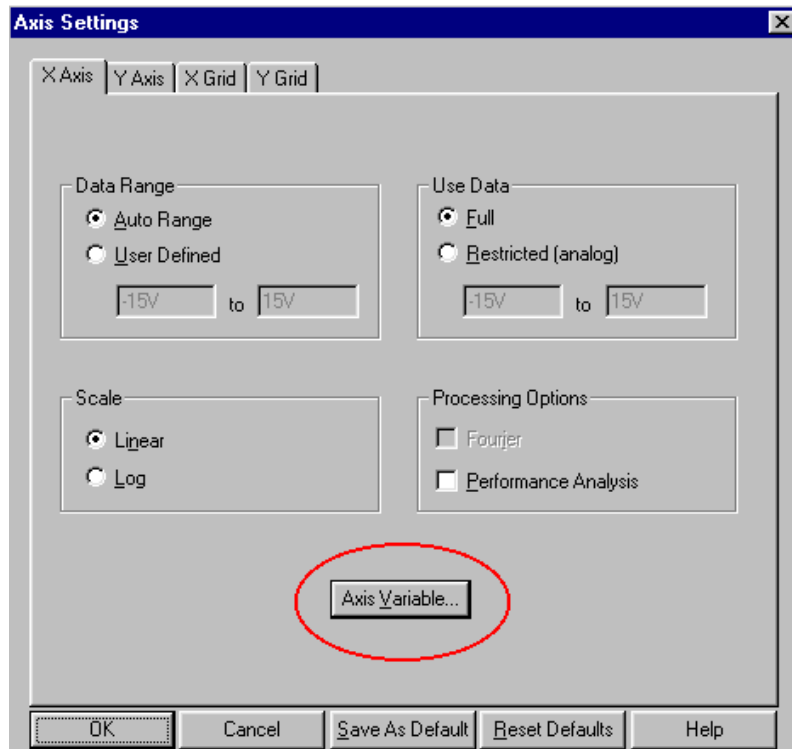


Vamos agora definir o eixo X como sendo a tensão V_d .

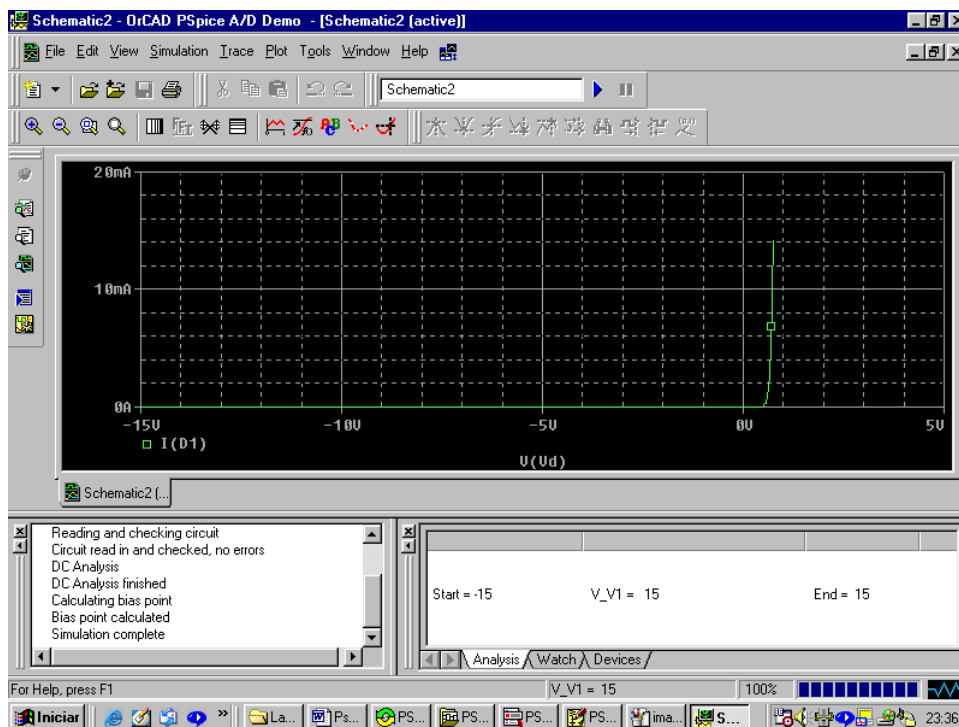
Entre no menu **Plot > Axis Settings**



Agora pressione o botão Axis Variable (para definirmos qual variável estará representada no eixo x) :



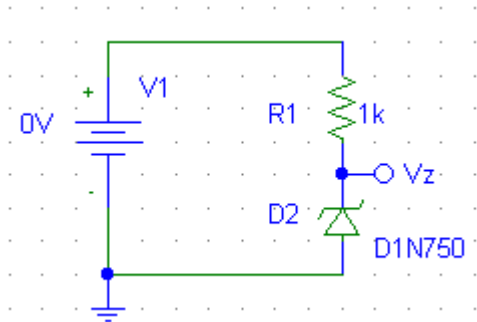
Vamos escolher V(Vd) e confirmar Ok em seguida até retornarmos a tela do gráfico :



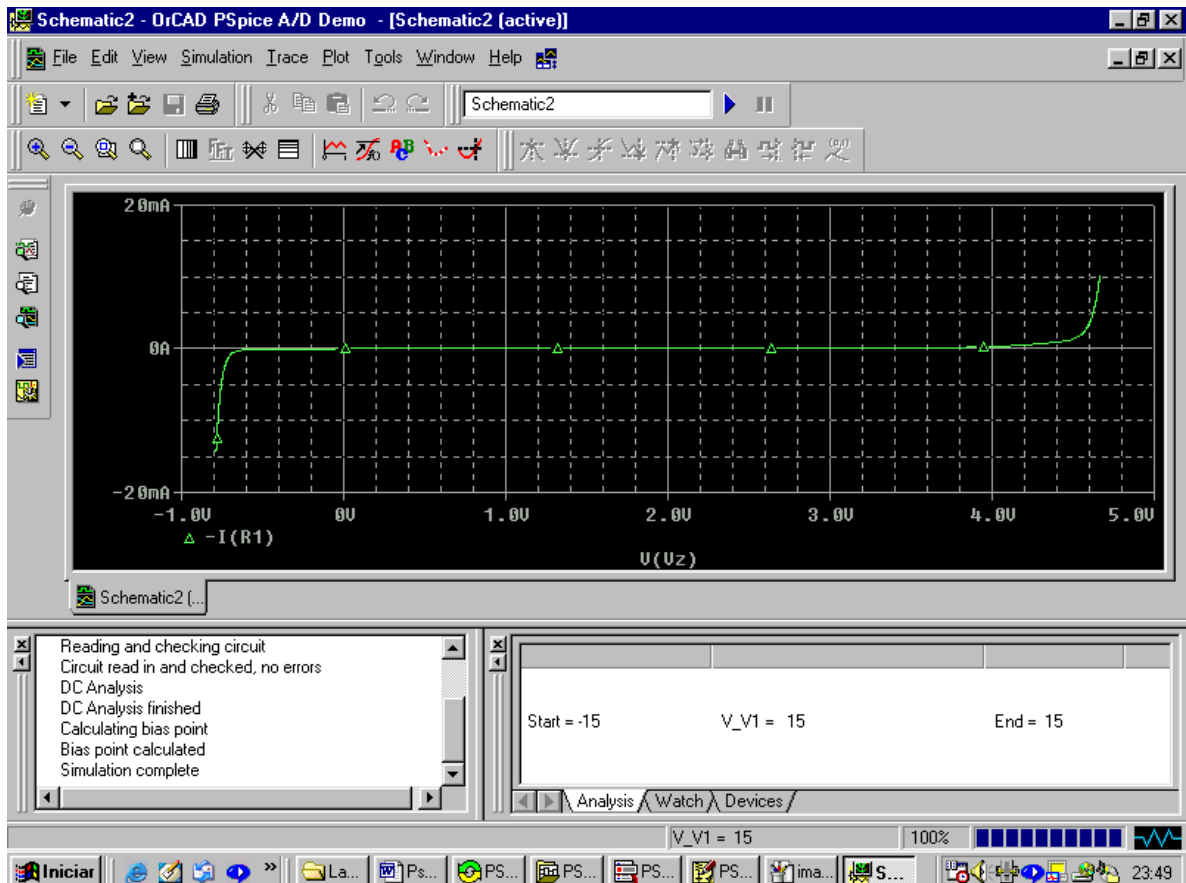
2.3 Curva Característica do Diodo Zener

Plote a curva característica do Diodo Zener do circuito abaixo variando V1 de -15 V à 15 V :

Componentes : Fonte de tensão (Vdc) , Resistor (R) , marcador (Bubble) , Diodo Zener , Terra (EGND)



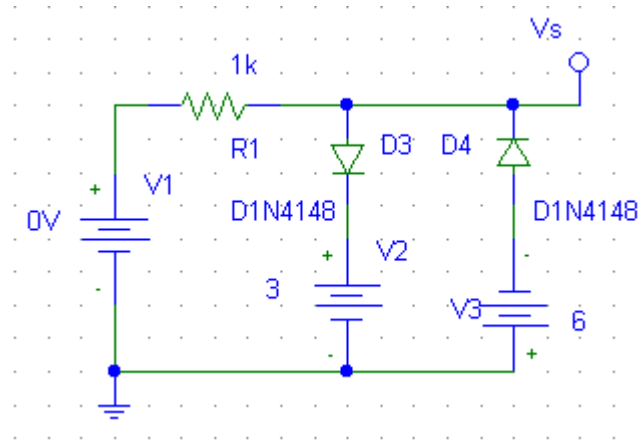
Eixo x : V(Vz)
Eixo y : -I(R1) (para indicar a corrente no sentido positivo da tensão de referência)



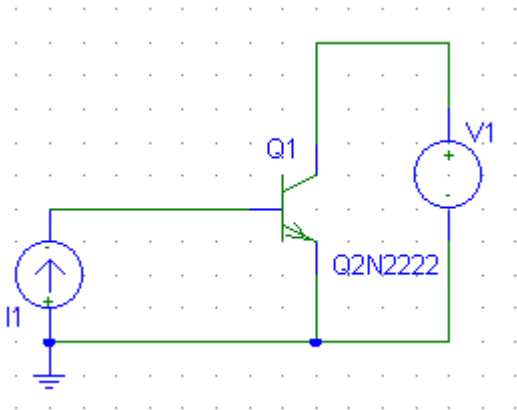
2.4 Circuito com Diodos

Plote a curva correspondente à V_s variando a tensão V_1 de -10 V à 20 V :

Componentes : Fonte de tensão (Vdc) , Resistor (R) , marcador (Bubble) , Diodo , Terra (EGND)

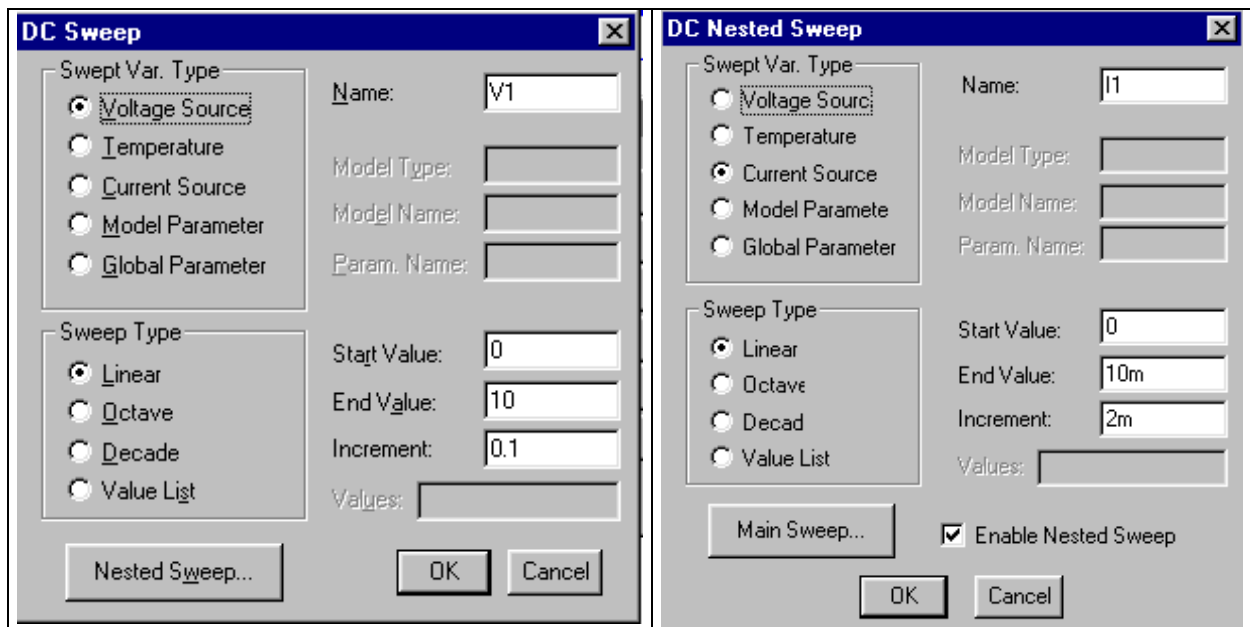


2.5 Curva característica do Transistor



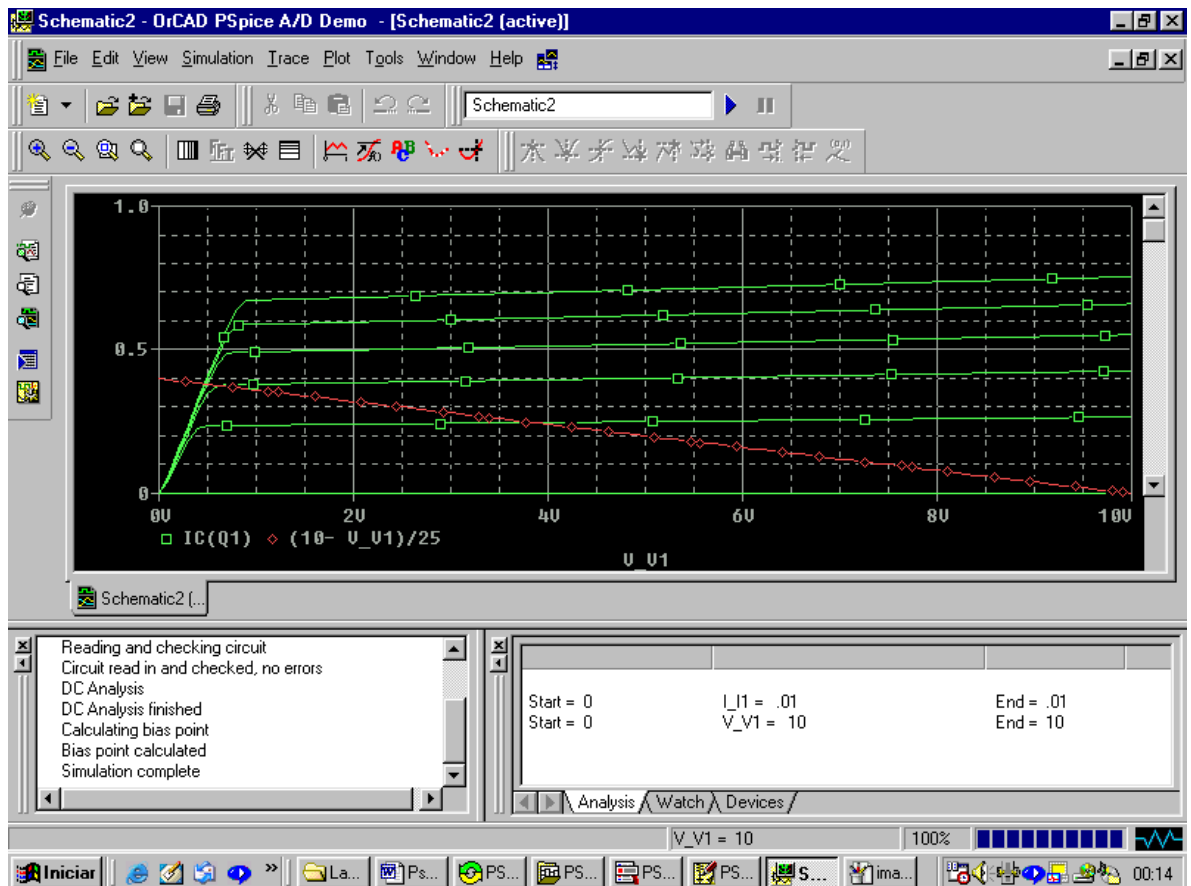
Componentes : Fonte de tensão (VSRC) , Fonte de corrente (ISRC) , Transistor (Q2N222) , Terra (EGND)

Monte o circuito ao lado e configure o **Setup do Analysis** conforme indicado abaixo (não se esqueça de ativar o **Nested Sweep** , afim de variar a corrente simultaneamente com a tensão) .



Quando finalizada a simulação voltaremos ao **Probe** , para visualizarmos a curva basta entrar no **Add Trace >** e selecionar $IC(Q1)$, ou seja , corrente de coletor do transistor .

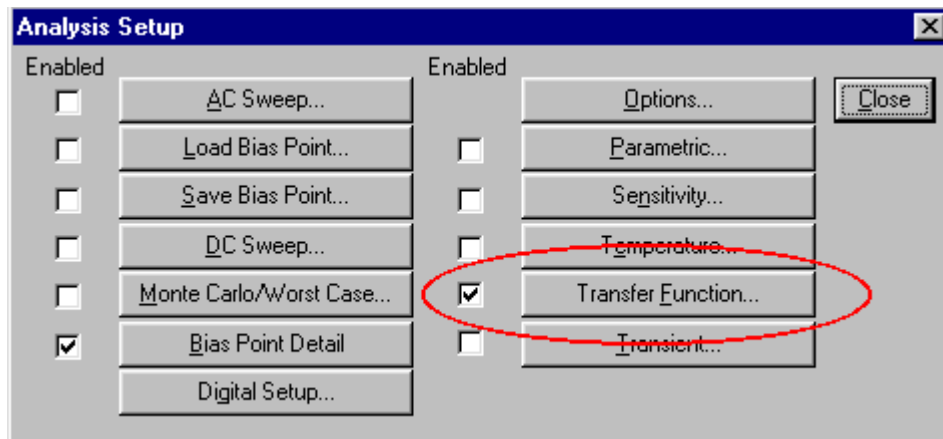
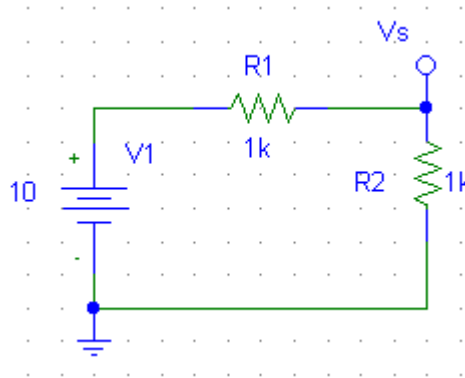
Para desenharmos também a reta de carga , basta acrescentarmos uma nova curva **Add Trace >** , vamos escrever a expressão da reta de carga $(V1_maximo - V_V1)/Rc$, ou seja , definimos um valor para $V1_Maximo$ e um valor para Rc (resistor do coletor) , no exemplo fizemos : $(10-V_V1)/25$.



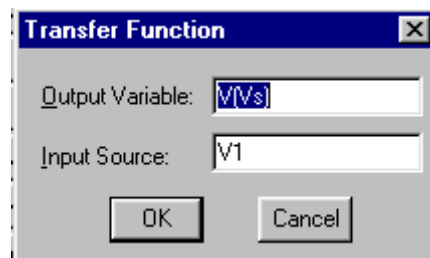
3. Teorema da Superposição e Proporcionalidade

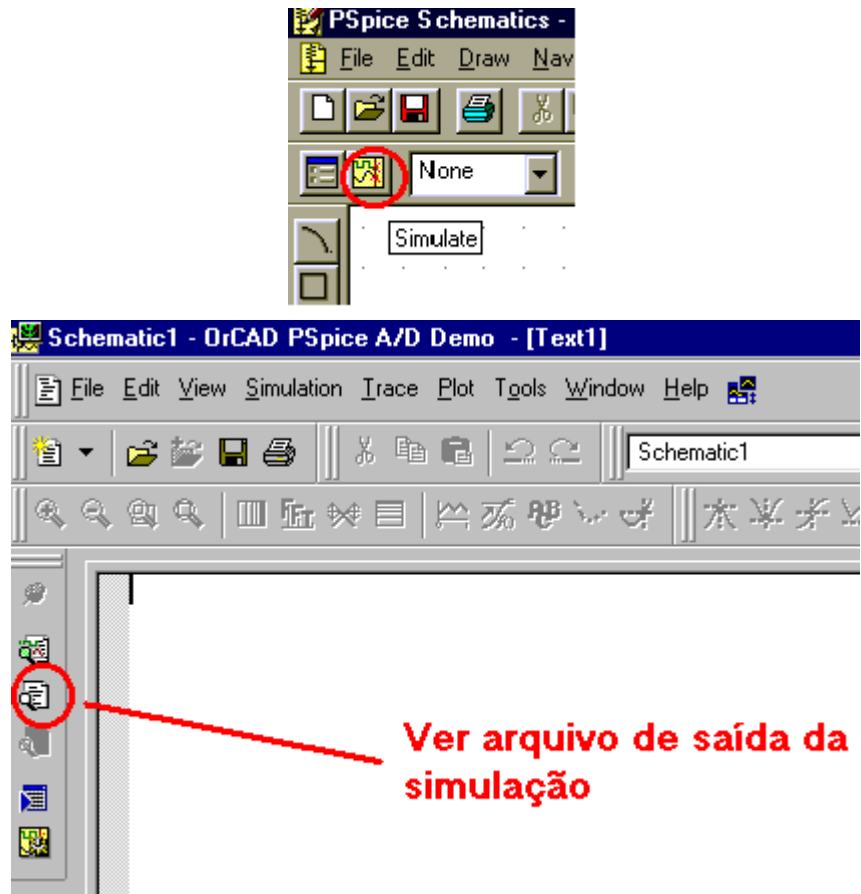
3.1 A função de transferência (Transfer Function)

O comando **Transfer Function** nos diz qual a relação entre uma tensão de saída e uma tensão de entrada, basta ativar a função, definir as variáveis de entrada e saída e simular **Simulate**, a função de transferência estará mostrada no arquivo de saída.



A variável de saída deve ser colocada da forma : V(variável_saída) .





**** SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

$$V(Vs)/V_V1 = 5.000E-01$$

$$\text{INPUT RESISTANCE AT } V_V1 = 2.000E+03$$

$$\text{OUTPUT RESISTANCE AT } V(Vs) = 5.000E+02$$

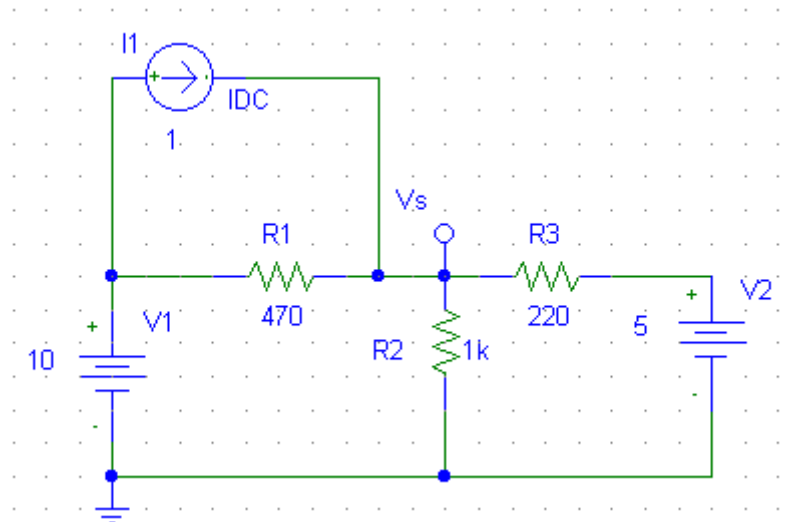
JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .18

Ou seja , $Vs = k1 * V1 = 0.5 * V1$.

EXERCÍCIOS

Vamos aplicar o Teorema da Proporcionalidade e da Superposição afim de descobrir quais as relações de V_1 , V_2 e I_1 com a tensão de saída V_s , para isso vamos montar o circuito a seguir e determinar as constantes k_1 , k_2 e k_3 aplicando o recurso da Função de Transferência (Transfer Function) .



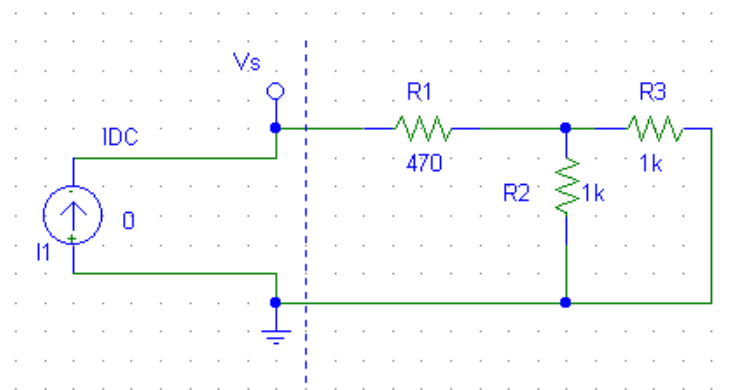
Não se esqueça que para respeitar o teorema temos que zerar as outras fontes que não estão sendo analisadas .

$$V_s = k_1 \cdot V_1 + k_2 \cdot V_2 + k_3 \cdot I_1$$

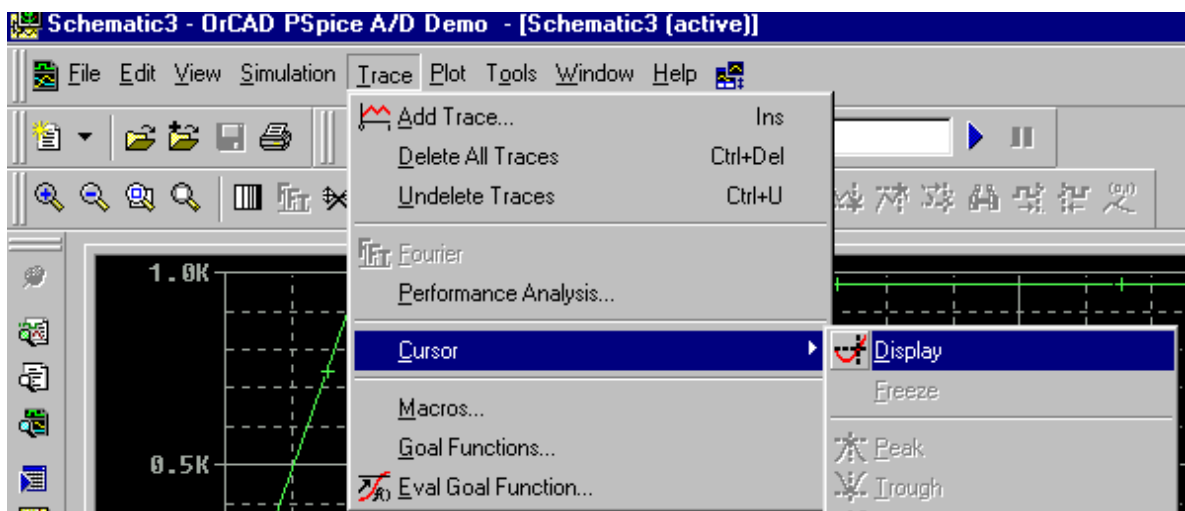
k1	
k2	
k3	

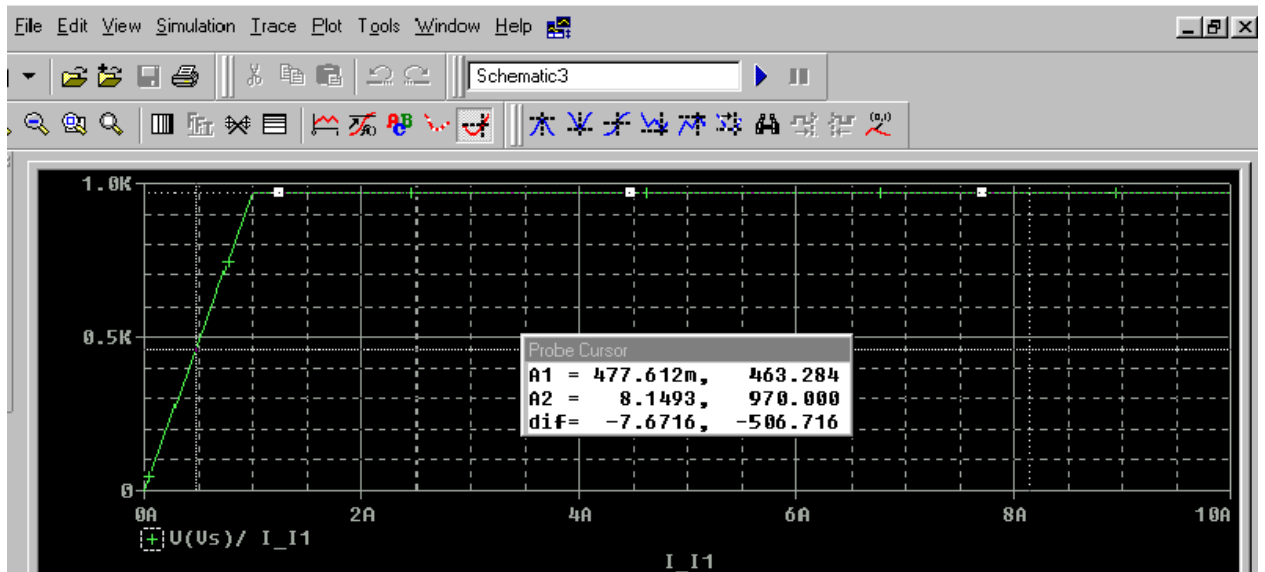
3.2 Medindo a resistência equivalente do circuito

Imagine que nos quiséssemos saber qual a resistência equivalente entre dois pontos quaisquer de um circuito, para isso basta puxarmos dois “fios” daqueles pontos, colocar uma referência (**bubble** Vs) afim de sabermos o valor da tensão naquele ponto e ligarmos um gerador de corrente, aplicamos então o **DC Sweep** fazendo variar a corrente de 0 até um valor qualquer, por exemplo 10, simulamos e plotamos o gráfico de $V(Vs)/I_{I1}$ onde Vs é a tensão no bubble e I1 a corrente do gerador, ao analisarmos o gráfico, a leitura do valor constante é a leitura do valor da resistência equivalente naquele ponto do circuito. (Lembre-se que para medirmos resistência devemos desligar (zerar) qualquer outra fonte de tensão ou corrente no circuito, o método de leitura aqui empregado serve apenas para circuitos com resistores, ou seja, cuja impedância não varia com frequência, para medir a resistência de circuitos com indutores e capacitores utilize um gerador de corrente alternada com fase zero no lugar do gerador de corrente contínua).



Para sabermos o valor exato, vá ao menu Trace > Cursor > Display, uma janelinha se abrirá, clique com o cursor esquerdo do mouse sobre a curva, você terá agora a variação numérica caminhando com o cursor sobre a curva.





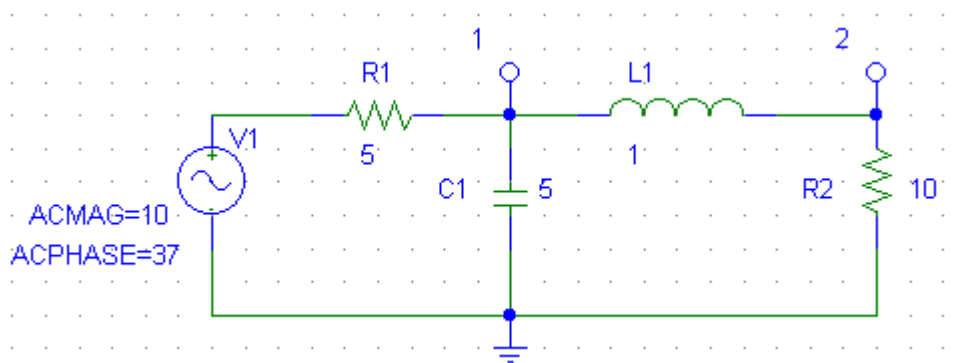
Requivalente = 970 Ohms

4. AC SWEEP (Variando a frequência)

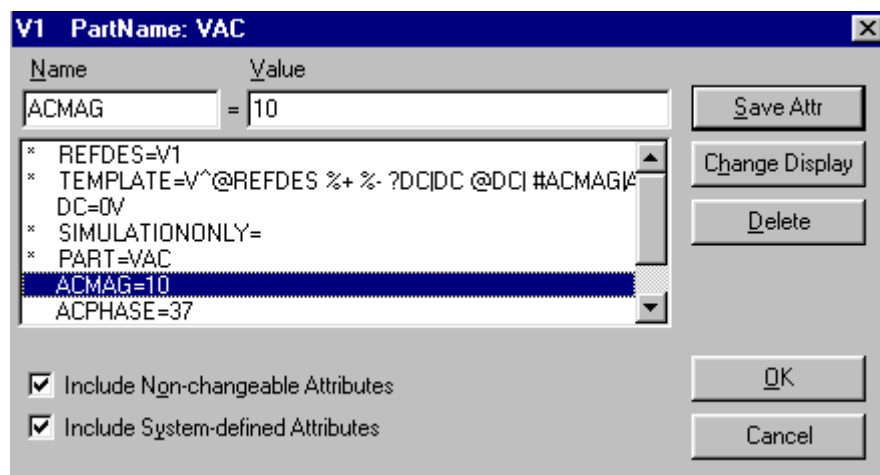
A simulação de circuito com diferentes valores de uma grandeza AC é utilizada em grande parte para a construção de gráficos de Bode, gráficos de ganhos e fases e análise de fasores. O circuito pode ser analisado em uma única frequência ou em múltiplas frequências. Utilizaremos os componentes VAC e IAC nestas simulações.

4.1 Gráfico em função da frequência

Vamos desenhar o circuito abaixo:

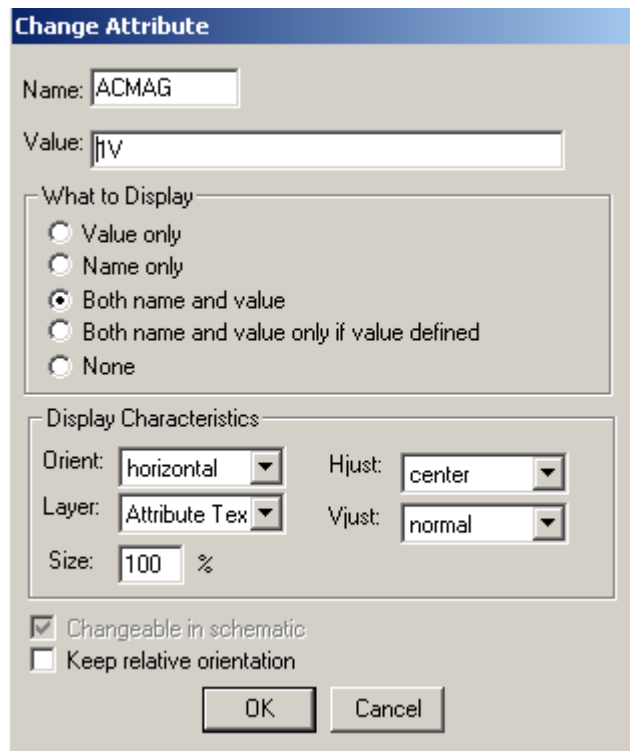


Componentes utilizados: VAC, R, L, C, EGND e BUBBLE.

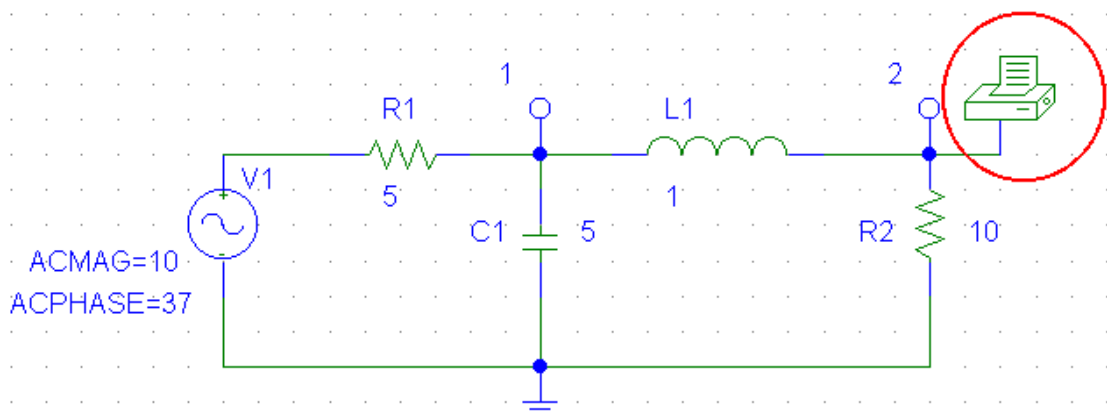


O valor de ACMAG, ou seja, a magnitude da fonte AC pode ser interpretado como um valor RMS ou de Pico, à sua escolha, basta escolher a interpretação desejada e todas as outras tensões obtidas serão também interpretadas da mesma maneira.

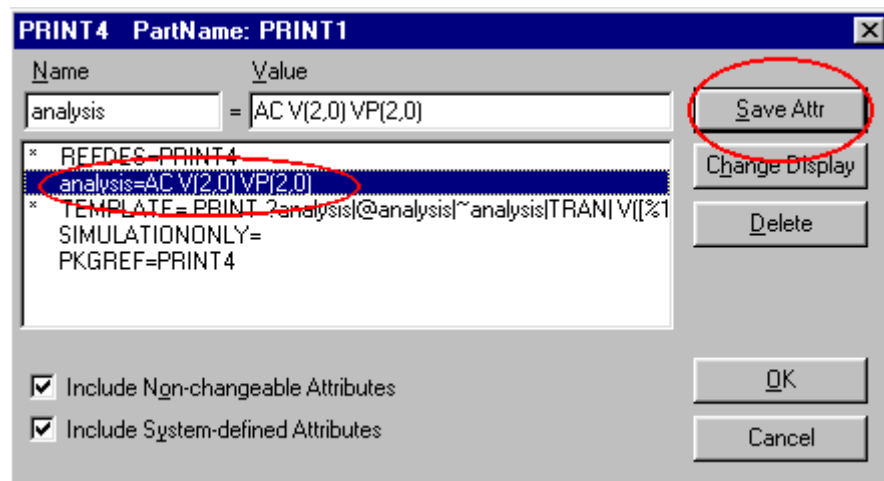
Para que apareçam no circuito os nomes ACMAG e ACPHASE basta clicarmos em **Change Display** quando inserimos os valores e a seguinte tela aparecerá:



Basta seleccionar a forma que desejamos que seja vista (Valor / Nome / Nome e Valor / Nenhum) , a orientação (Vertical/Horizontal) e confirmar com OK . Afim de que os valores desejados de tensão e corrente quando da variação da frequência sejam não somente plotados mas também apareçam no arquivo texto de saída é necessário acrescentar um componente chamado **PRINT**.

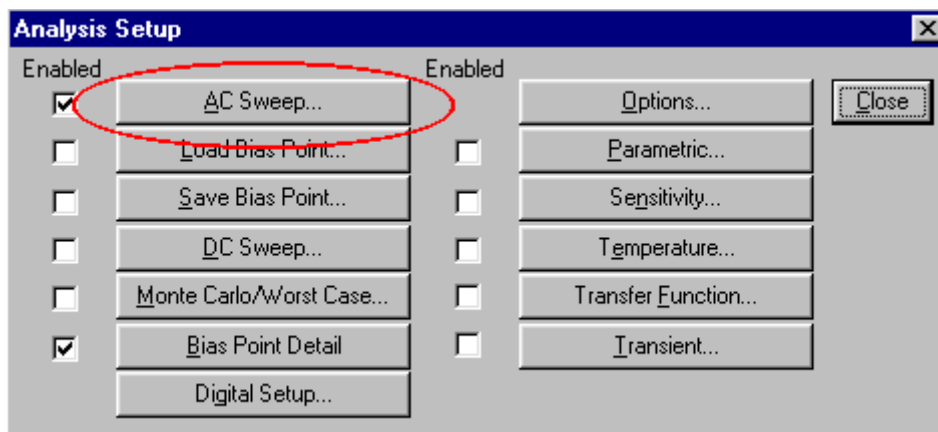


Ao clicarmos 2 vezes sobre este componente teremos a seguinte caixa de diálogo :

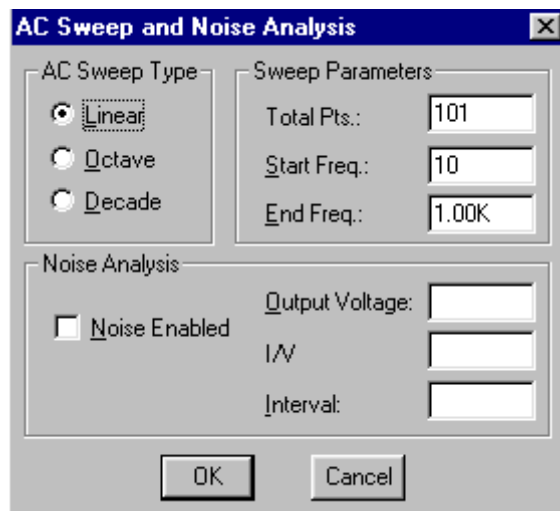


Ao clicarmos sobre a propriedade **analysis** poderemos alterar seu valor , definimos o valor AC V(2,0) VP(2,0) , que significa que queremos o resultado dos valores simulados em AC Sweep da amplitude da tensão V do nó 2 ao terra (0) e da fase da tensão do nó 2 ao terra (0) . Se quisermos saber sobre outros nós basta dar um comando semelhante na mesma caixa de diálogo ou acrescentar um novo componente **PRINT** . Se quisermos saber os valores em relação à corrente basta no lugar de V colocarmos I , assim teríamos AC I(2,0) IP(2,0) . Podemos fazer as combinações de qualquer nó do circuito , não podemos deixar no entanto de conectar o componente **PRINT** ao circuito em qualquer ponto .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .



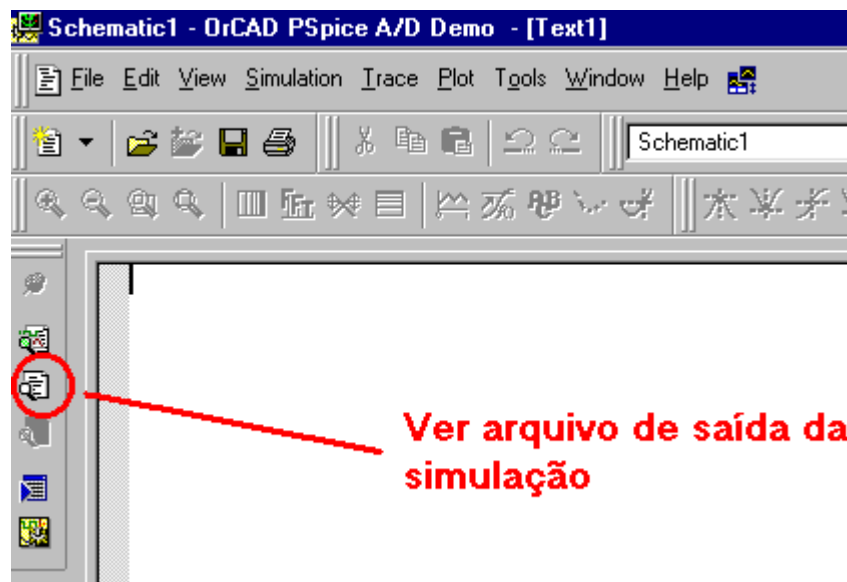
A seguinte tela se abrirá :



Podemos então definir qual a faixa de frequência faremos a análise das tensões e/ou correntes , se quisermos saber sobre uma frequência específica basta selecionarmos para Total Pts : 1 , e Star Freq (frequência inicial) e End Freq (frequência final) iguais .

Veja o exemplo de como é o texto no arquivo de saída para 3 pontos de 10 Hz à 30 Hz :

Pressione o botão ao lado para ver o arquivo de simulação :



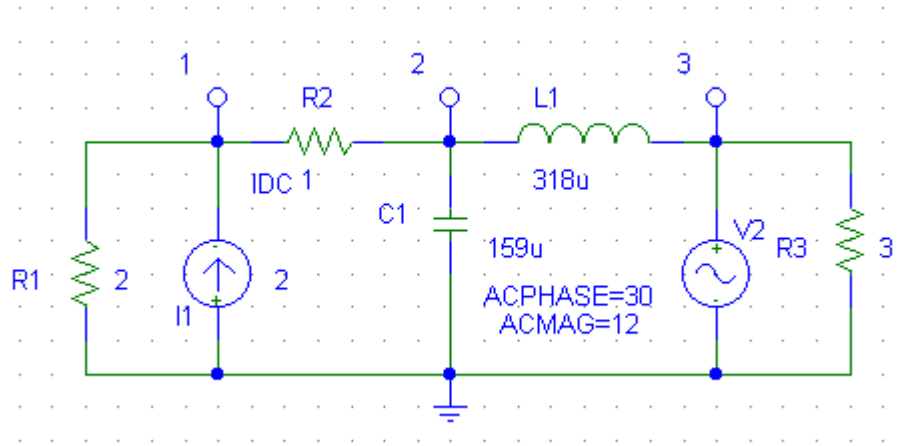
```
**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
FREQ V(2,0) VP(2,0) V(2)

1.000E+01 1.001E-03 -1.339E+02 1.001E-03
```


2.000E+01 2.525E-04 -1.384E+02 2.525E-04
 3.000E+01 1.124E-04 -1.400E+02 1.124E-04

EXERCÍCIOS

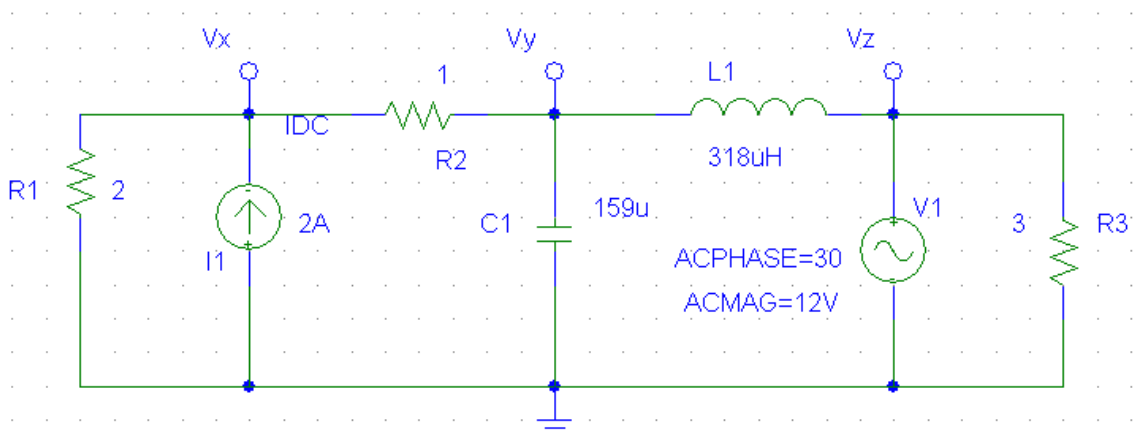
Determine o valor das tensões nos nós 1, 2 e 3 na frequência de 1kHz e 10 kHz .



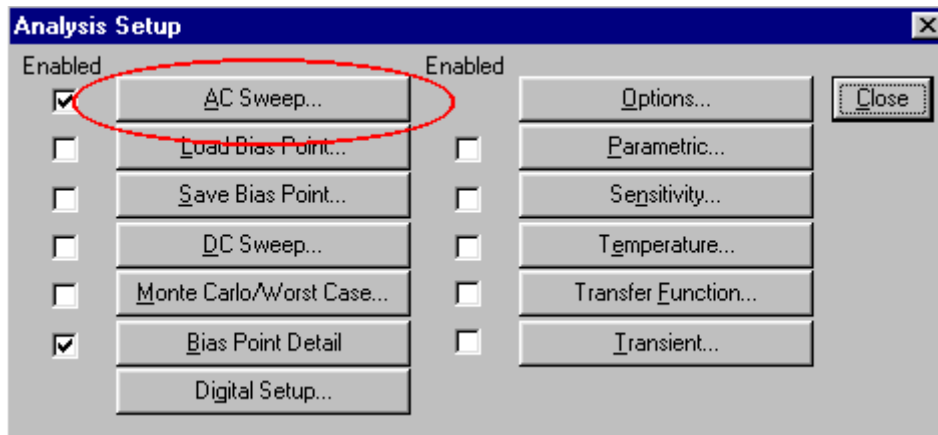
Tensões	F= 1kHz	F= 10 kHz
V1		
V2		
V3		

Componentes : R , L , C , IDC , VAC , EGND , BUBBLE .

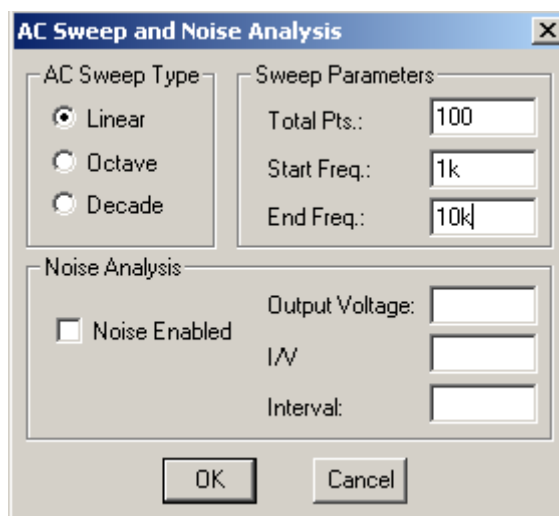
4.2 Gráfico da Análise AC na frequência de 1kHz à 10 kHz



Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .

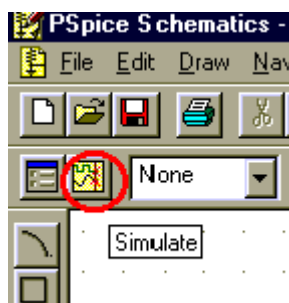


A seguinte tela se abrirá :

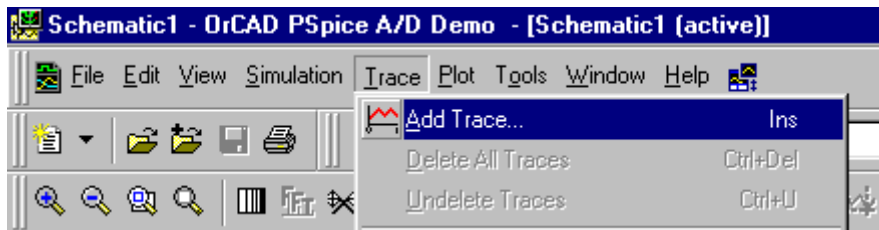


Coloque os valores inicial e final das frequências para a análise , bem como o número de pontos à serem analisados entre os valores inicial e final , à seguir clique em OK .

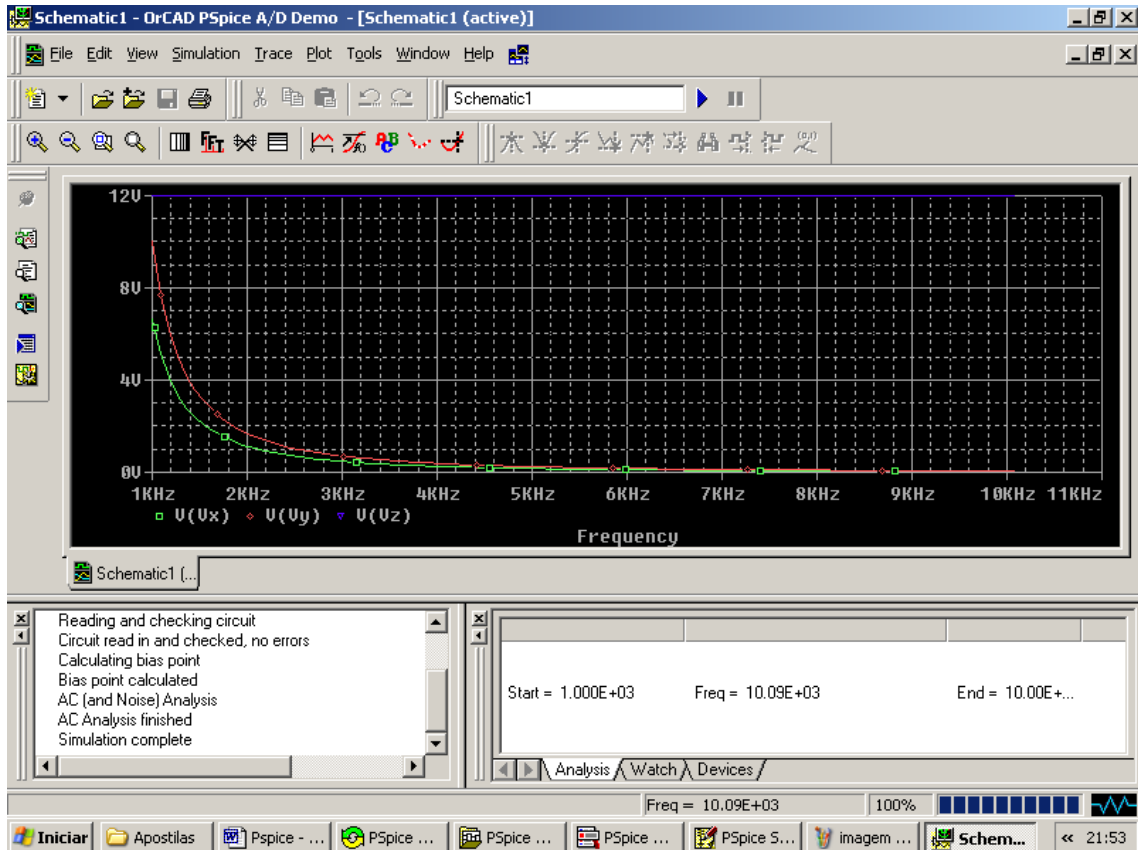
Vamos rodar agora a simulação do programa , pressione o botão **Simulate** .



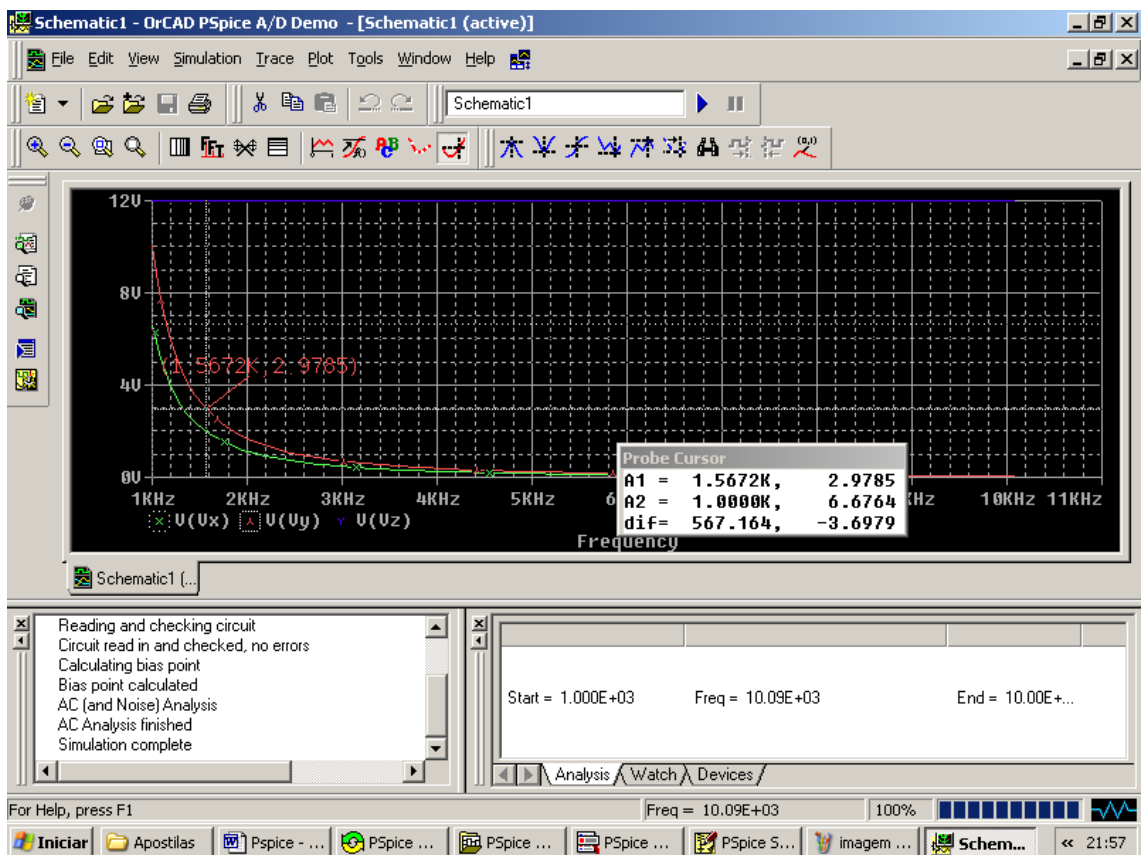
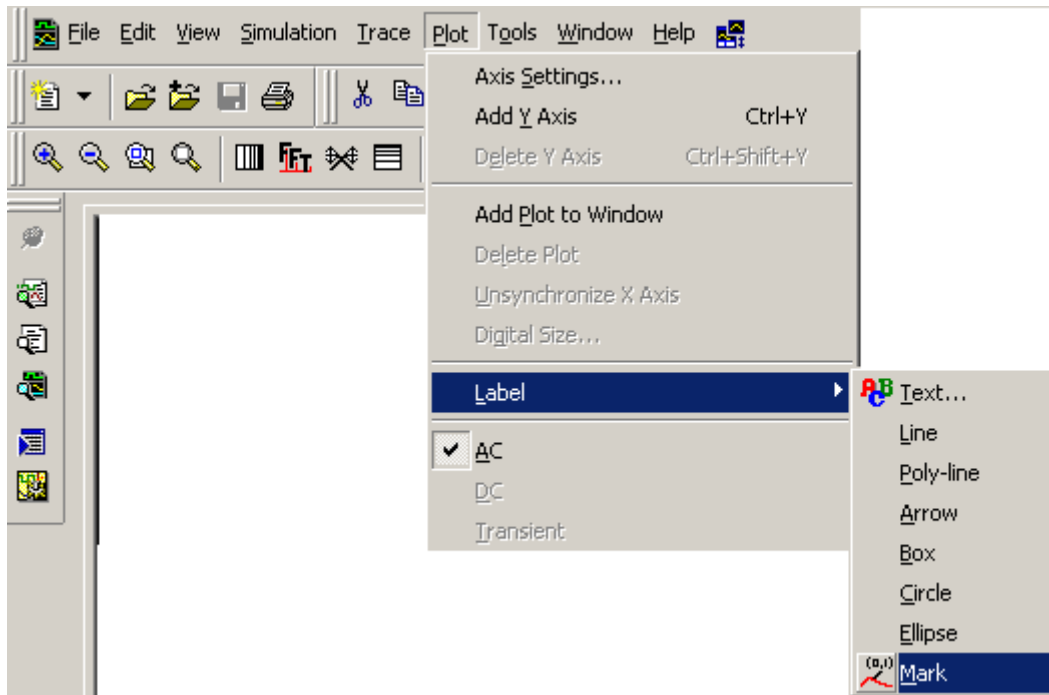
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(V_x)$, $V(V_y)$ e $V(V_z)$ e confirme :



Para marcar algum ponto específico da curva , vá ao menu **Trace > Display > Cursor** para obter o valor do ponto desejado . Depois vá ao menu **Plot > Label > Mark** e teremos assim o ponto identificado no gráfico :

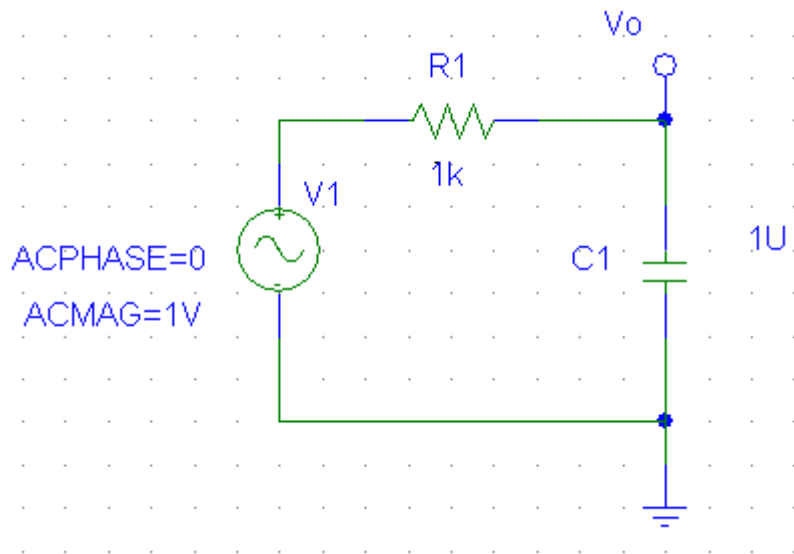


4.3 Gráfico de Bode

Gráficos de Bode permitem visualizar a amplitude e a fase em função da frequência .

Todas as análise AC assumem que estamos trabalhando com um circuito linear : se a saída é 3 V para 1 V da fonte , para uma saída de 30 V teremos 10 V na fonte . Ou seja , não há consideração quanto as limitações físicas dos componentes pois o que é simulado são situações algébricas . Para ser analisadas do ponto de vista real , podemos então simular a análise com amplitude 1 o que permite que analisemos o circuito obtendo assim o valor de seu ganho .

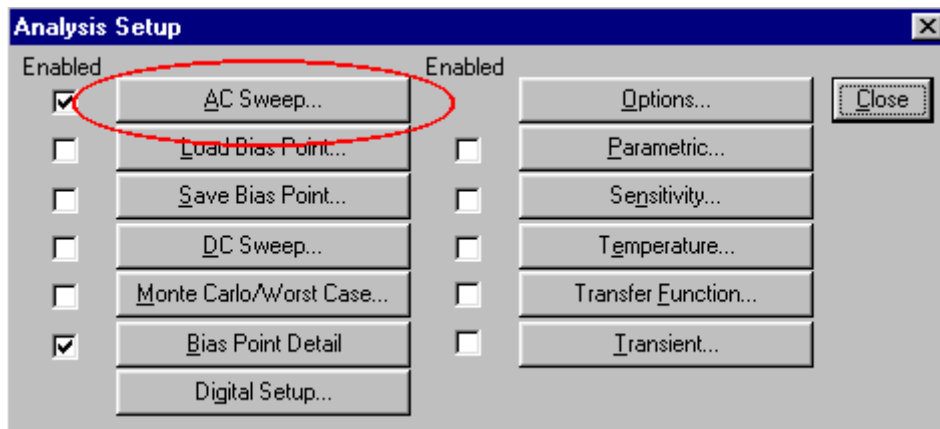
Vamos utilizar o circuito abaixo : (VAC , R , C , EGND , BUBBLE)



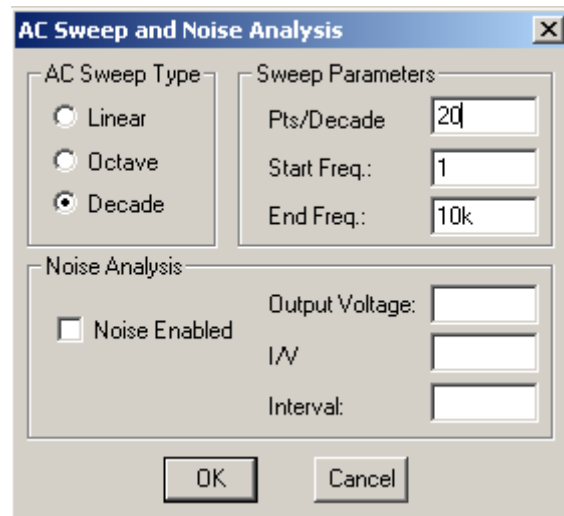
Este circuito é um Filtro Passa Baixas , em alta frequência o capacitor se comporta como um curto , permitindo portanto a passagem somente de baixas frequências .

Pela equação $\omega = \frac{1}{R.C} = 159\text{Hz}$, temos a frequência onde teremos a queda de -3 dB do circuito .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .

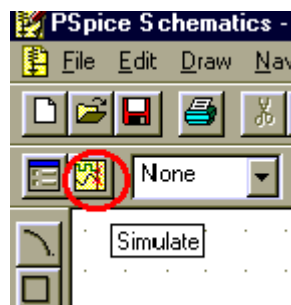


A seguinte tela se abrirá :

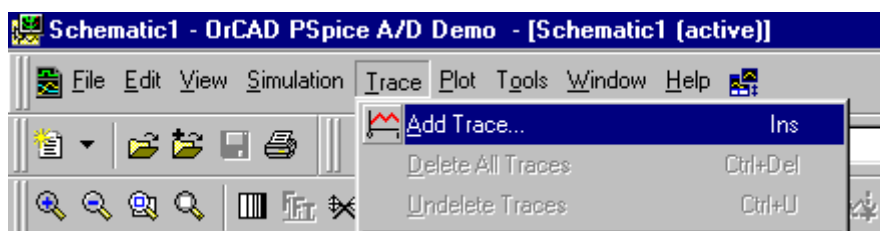


Vamos realizar a análise de 1 à 10 kHz com 20 pontos por década .
À seguir clique em OK .

Vamos rodar agora a simulação do programa , pressione o botão **Simulate** .

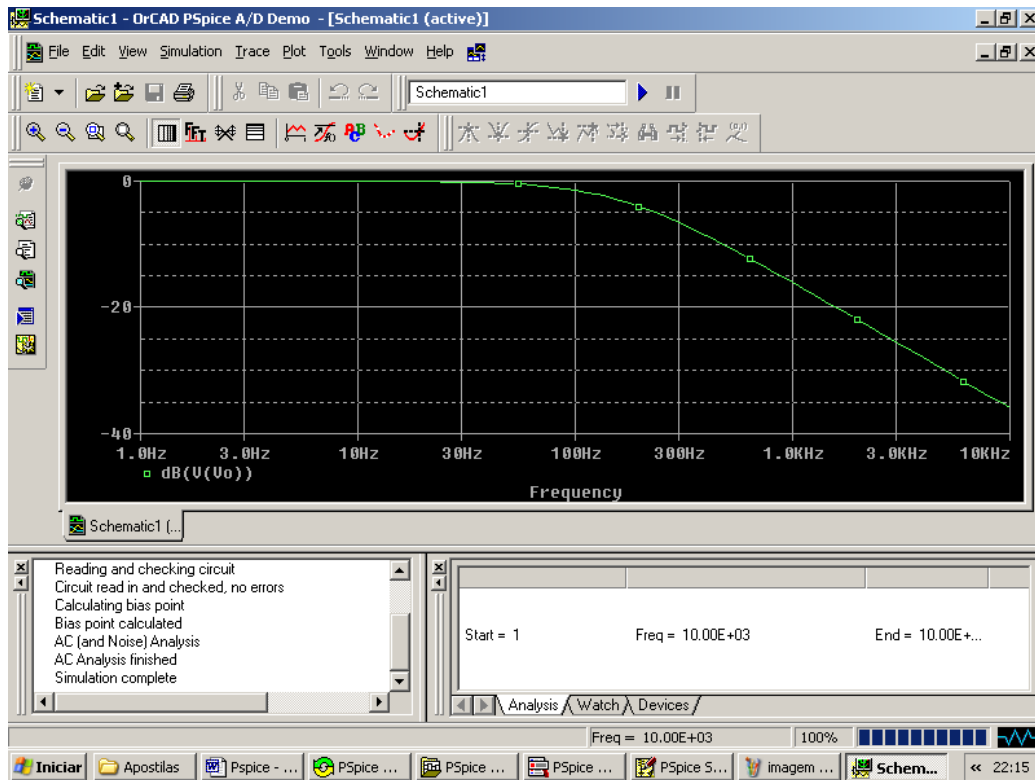


Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



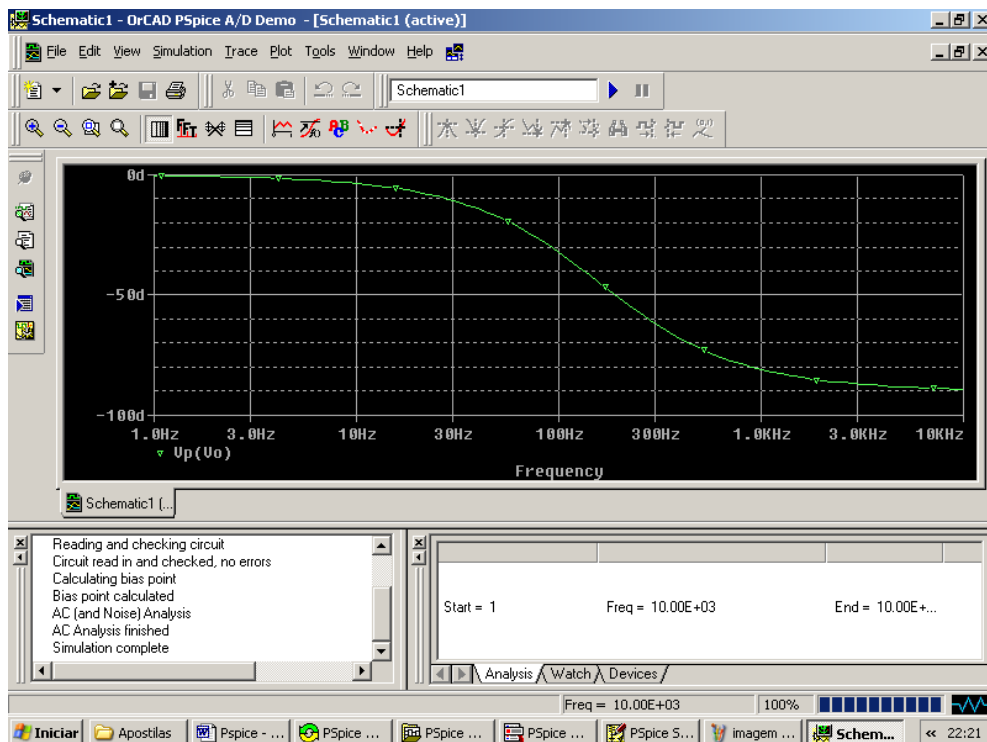
Selecione a tensão $V(V_o)$.

Para mostrar V_o em decibéis basta colocar a expressão $\text{dB}(V(V_o))$ e confirme :



Observe que para ganho 1 temos 0 dB .

Para mostrar a fase de V_o em graus em função da frequência basta colocar a expressão $Vp(V_o)$ e confirme :



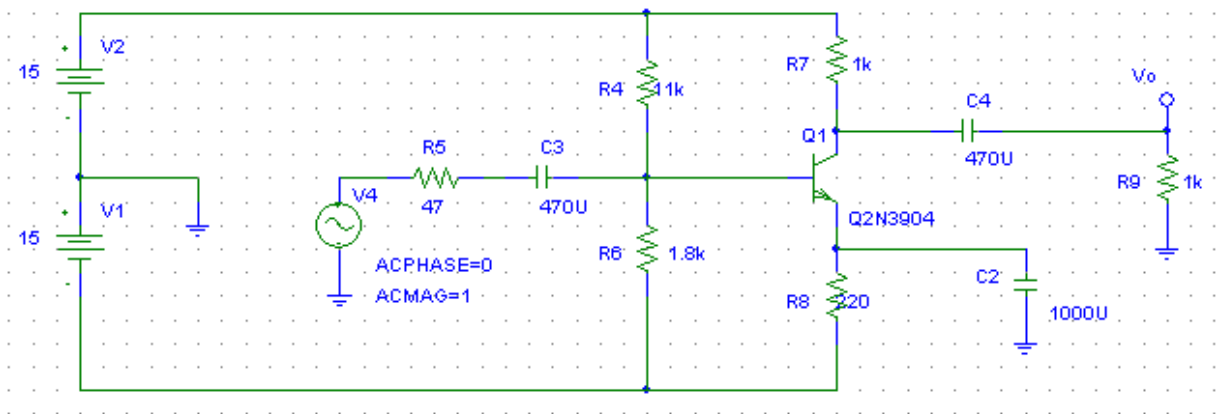
Se quiséssemos o gráfico da corrente I em dB teríamos $\text{dB}(I(R1))$ e para a obtermos o gráfico da fase da corrente basta selecionar a variável desejada na forma $\text{Ip}(\text{variável})$.

4.4 Análise do Ganho de um Amplificador

Uma das mais importantes aplicações da análise em frequência AC Sweep é a resposta em frequência de um amplificador. Se a análise AC Sweep é realizada num circuito com um transistor, o ponto de operação DC é calculado e o transistor é visto como uma variação de um pequeno sinal ao redor do ponto de operação. Esta análise só pode ser utilizada para calcular o ganho de pequenos sinais e resposta em frequência. Outras análises devem ser realizadas na simulação de transitórios vista em outro capítulo.

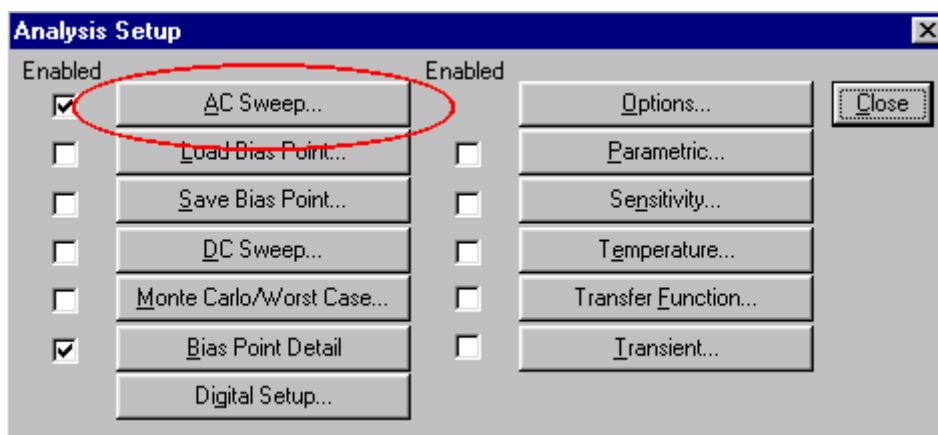
Vamos desenhar o circuito abaixo:

(VDC, R, C, BUBBLE, VAC, EGND, Q2N3904)

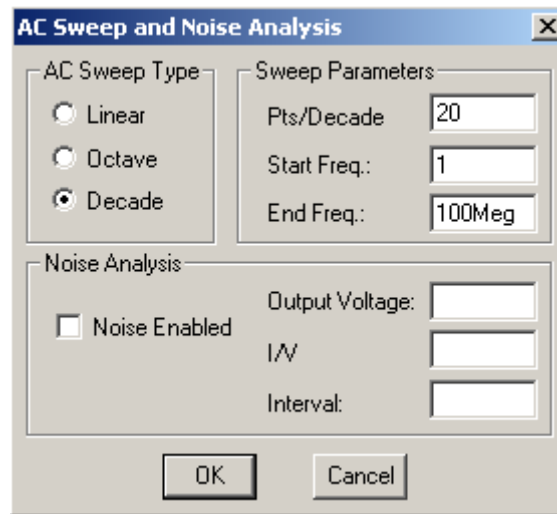


Vamos obter a análise AC deste amplificador de 1 Hz à 100 MHz com 20 pontos por década.

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup**, pressione o botão **AC Sweep**.



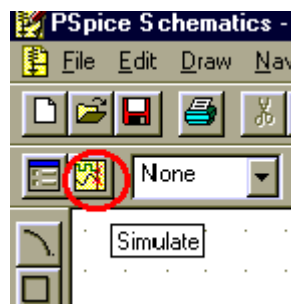
A seguinte tela se abrirá :



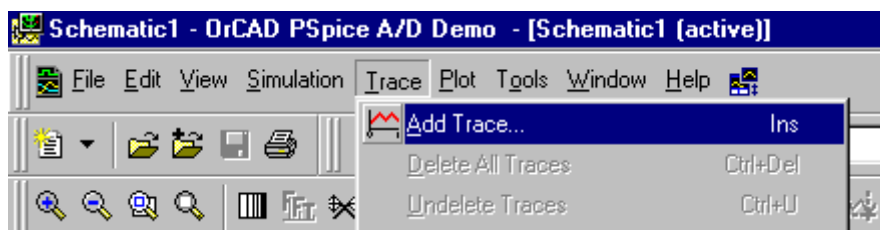
À seguir clique em OK .

Para simular seu amplificador sempre deixe habilitado a opção **Bias Point Detail** .

Vamos rodar agora a simulação do programa , pressione o botão **Simulate** .

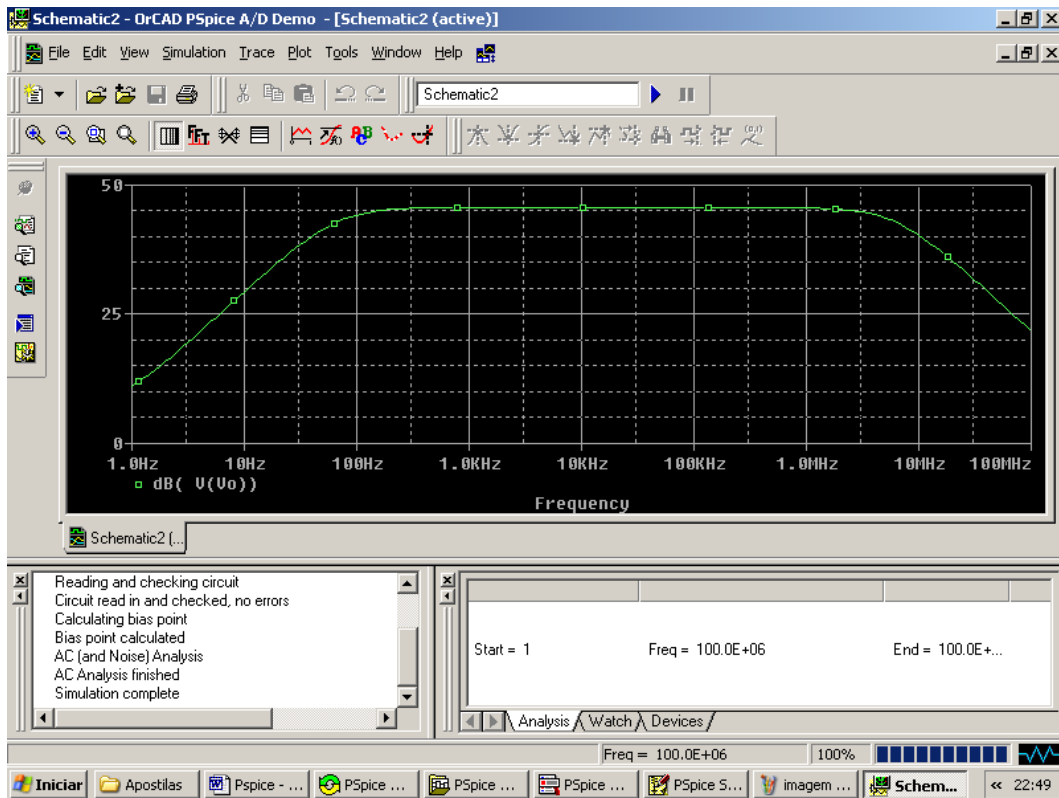


Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão **V(Vo)** .

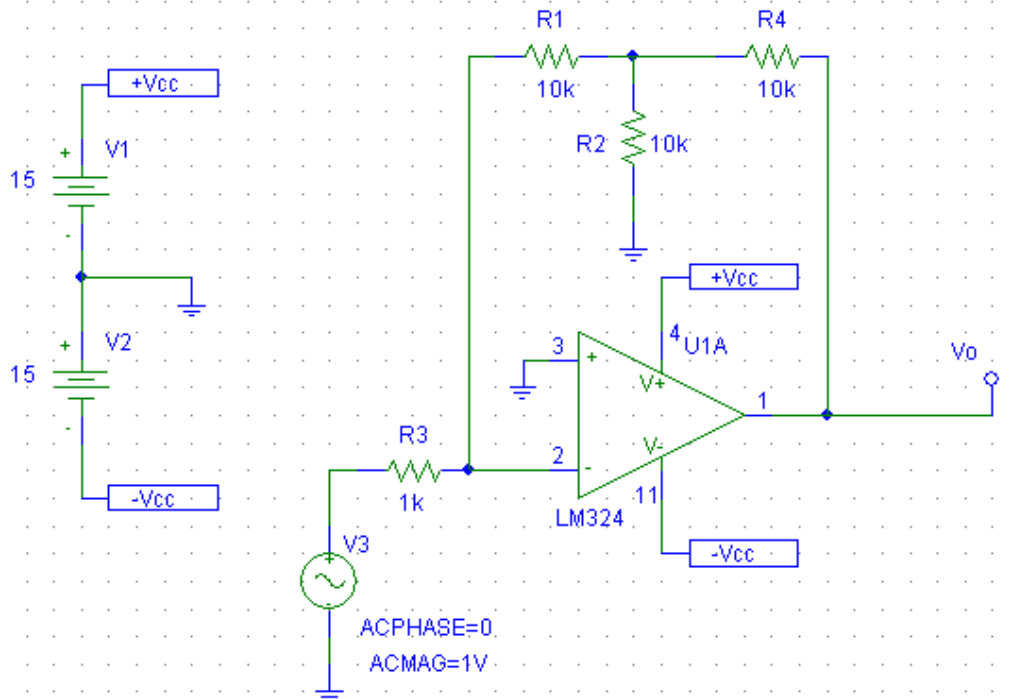
Para mostrar V_o em decibéis basta colocar à expressão $\text{dB}(V(V_o))$ e confirme :



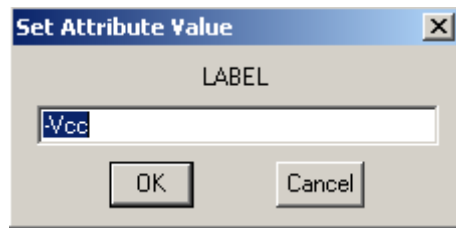
4.5 Ganho do Amplificador Operacional

Neste exemplo vamos utilizar o operacional LM324 .

Vamos desenhar o circuito abaixo : (VDC , EGND , R , C , VAC , LM324 , OFFPAGE , BUBBLE)

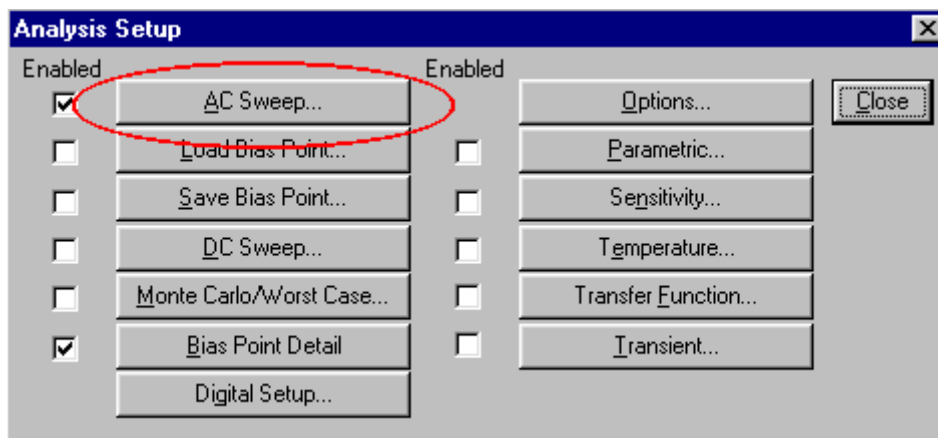


Neste circuito utilizamos um componente chamado OFFPAGE que permite que interliguemos partes distantes do circuito que possuam o mesmo Label . Para definir este Label basta darmos um duplo clique sobre o componente OFFPAGE .

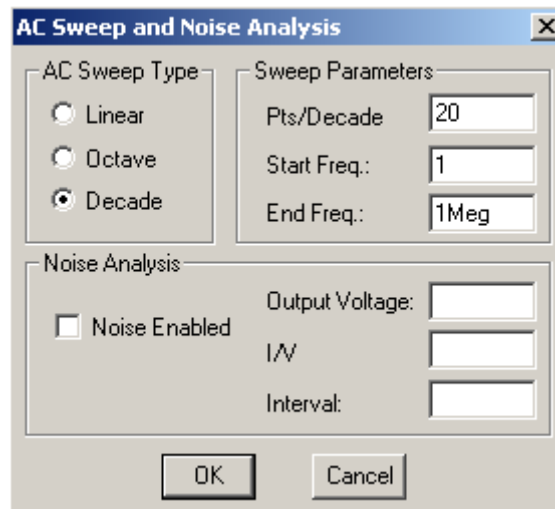


O ganho deste operacional é a relação V_{out}/V_{in} . Lembre da recomendação feita no item 4.3 .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .

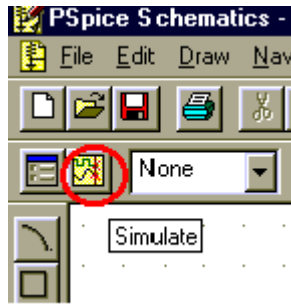


A seguinte tela se abrirá :

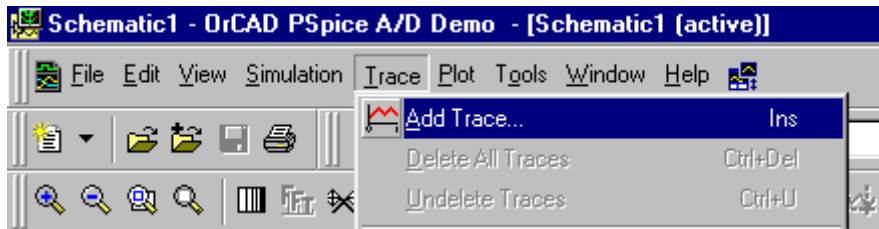


Vamos realizar a análise de 1 Hz à 1 MHz com 20 pts/Década . Clique OK e simule .

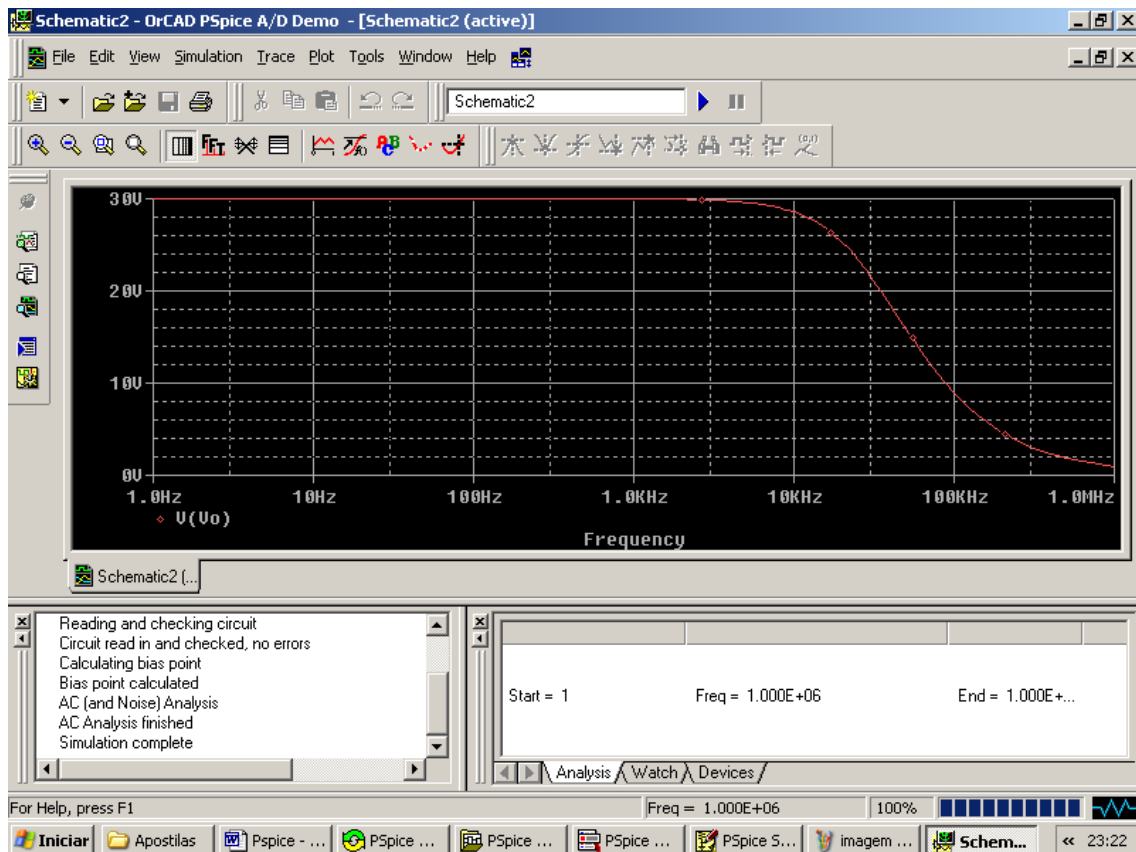
Pressione o botão **Simulate** .



Seleção no Menu **Trace > Add Trace**



Seleção a tensão $V(V_o)$ e confirme :



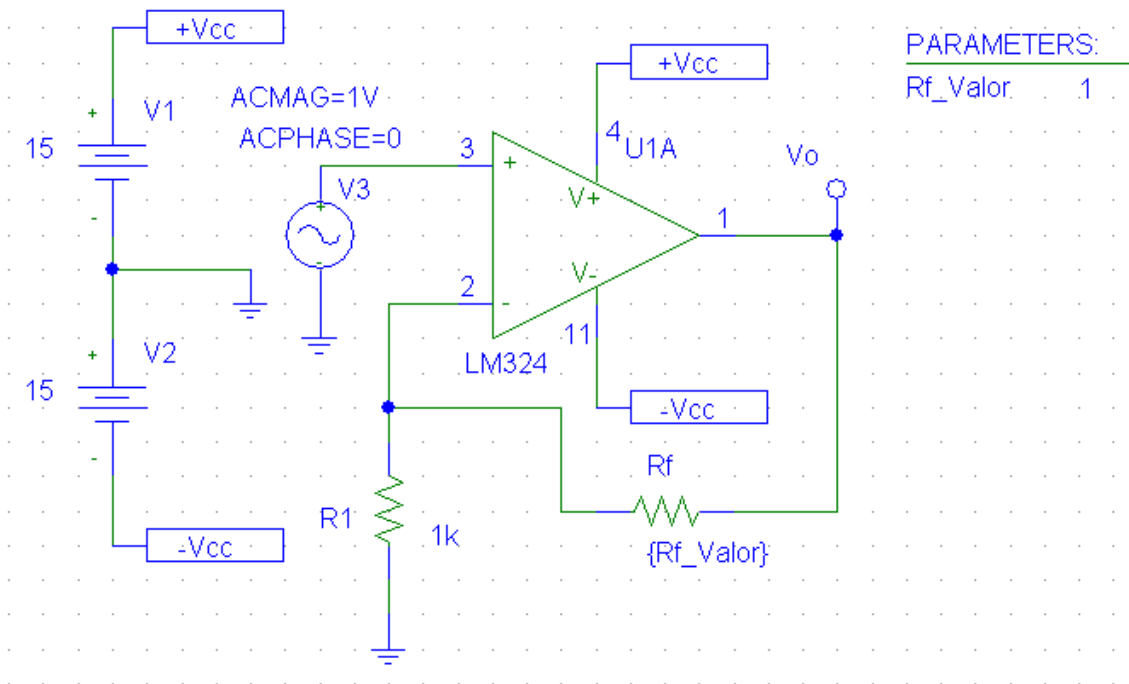
O valor obtido é o ganho do operacional na configuração do circuito analisado .

4.6 Variação Automática do Ganho do Amplificador Operacional

4.6.1 Análise Paramétrica

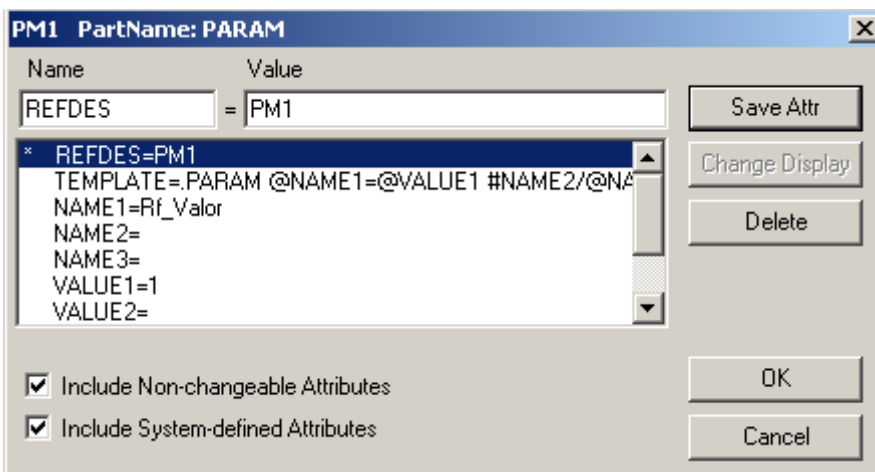
Neste exemplo vamos utilizar o operacional LM324 .

Vamos desenhar o circuito abaixo : (VDC , EGND , R , C , VAC , LM324 , OFFPAGE , PARAM, BUBBLE)

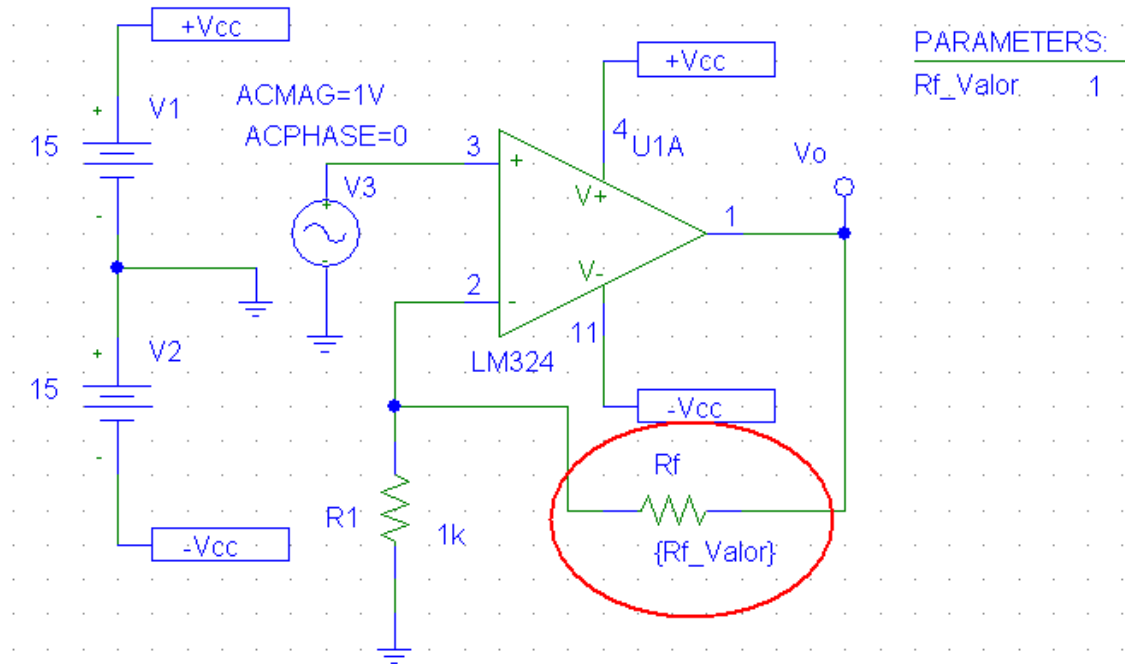


Neste circuito utilizamos um componente chamado **PARAM** que permite possamos realizar a análise para diferentes valores do componente parametrizado .

No nosso exemplo , o componente parametrizado é o **Rf** , ao darmos um duplo clique sobre o componente **PARAM** devemos definir qual o nome do componente parametrizado e qual o seu valor padrão . Assim , vamos definir **NAME1=RF_Valor** e **VALUE1=1** , isso significa que a análise se somente a análise **AC SWEEP** for realizada , ela será feita para o valor de **Rf=1 Ohm** .

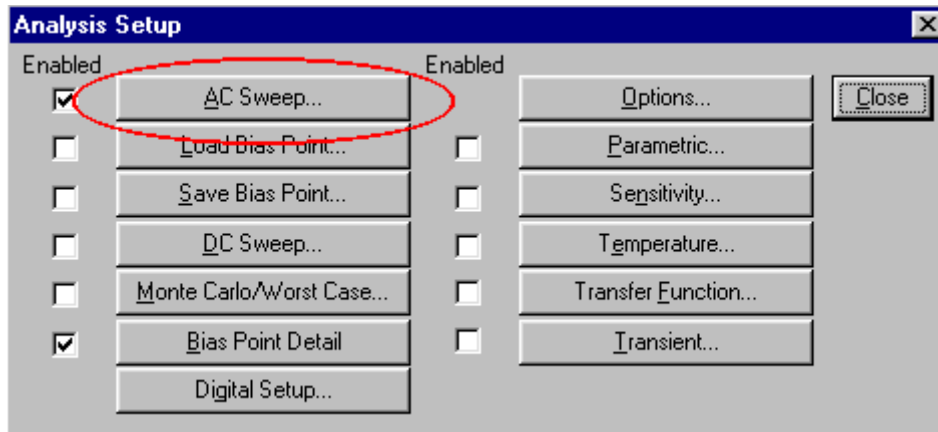


Não podemos esquecer de mudar o valor de **Rf** para **Rf_Valor** .

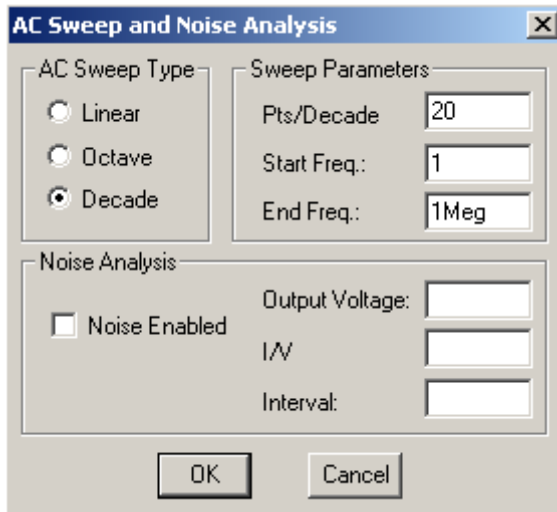


O ganho deste operacional é a relação V_{out}/V_{in} . Lembre da recomendação feita no item 4.3 .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .



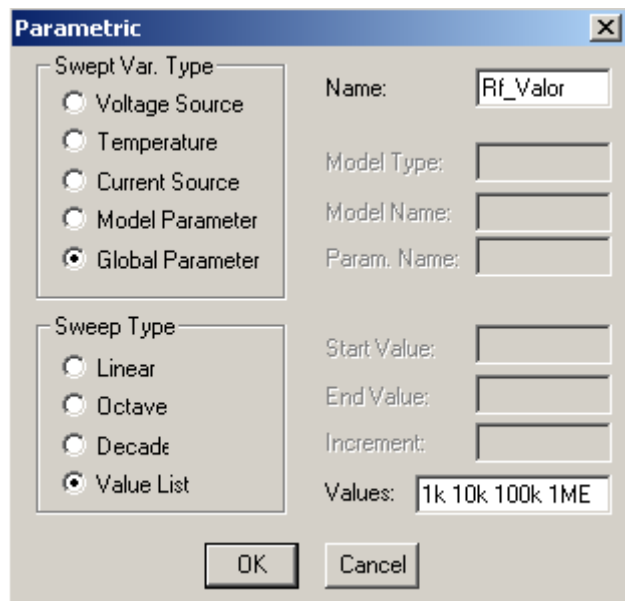
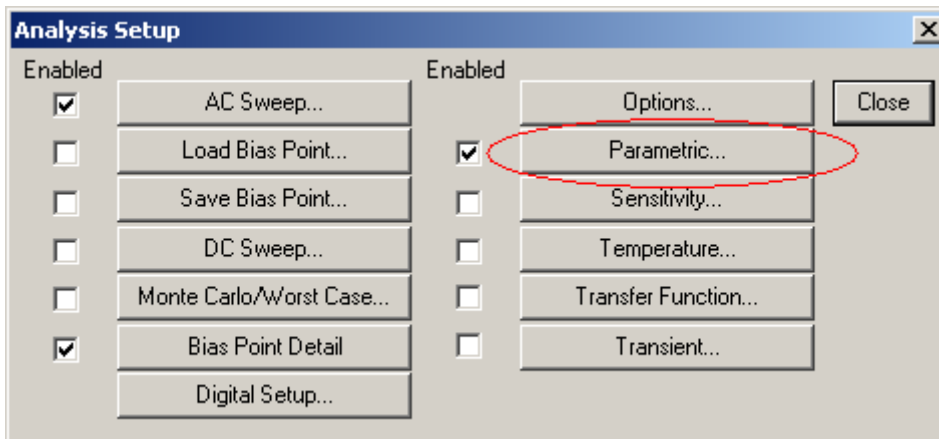
A seguinte tela se abrirá :



Vamos realizar a análise de 1 Hz à 1 MHz com 20 pts/Década . Clique OK para confirmar .

Vamos agora definir para quais valores de Rf realizaremos a análise .

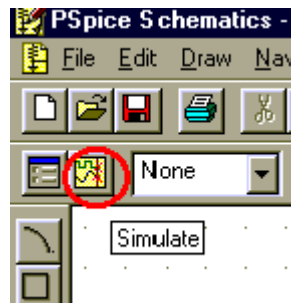
Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Parametric** :



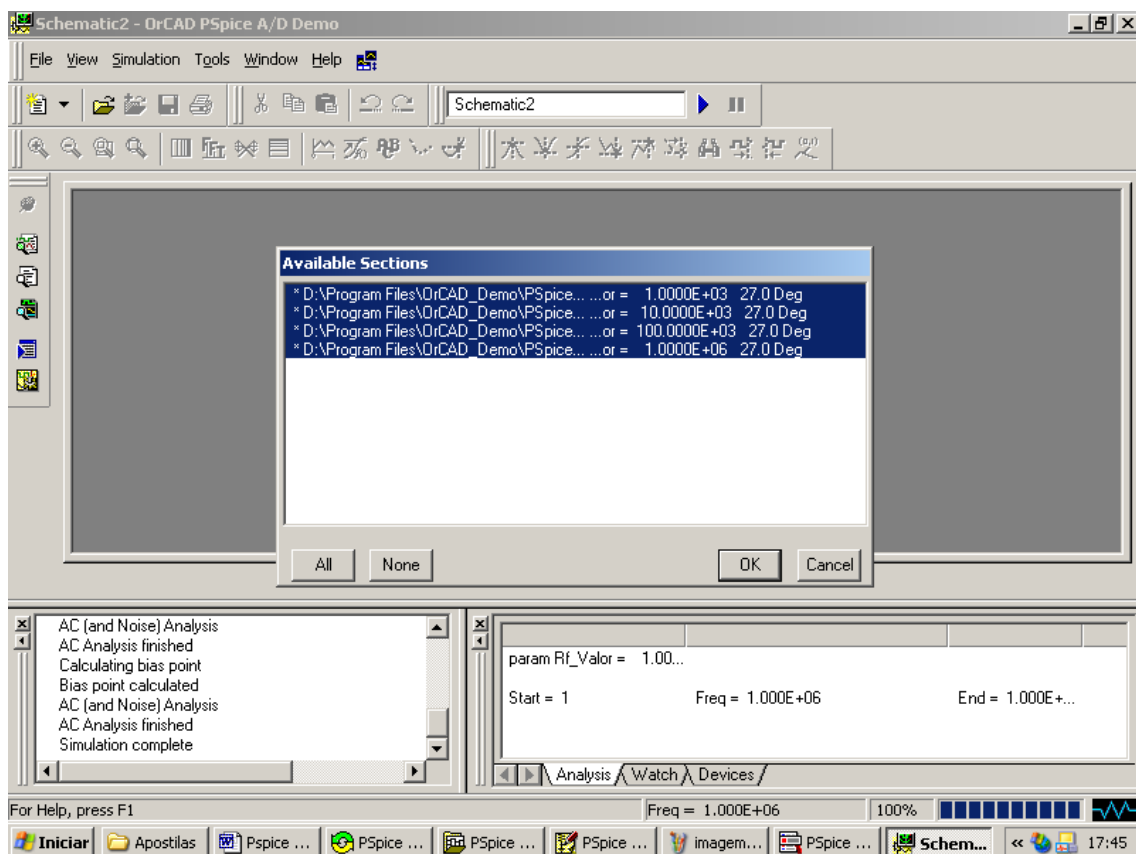
A seguinte tela se abrirá :

Basta definir as opções como a figura acima . A variável que queremos controlar é um parâmetro global de nome Rf_Valor . Queremos que a análise seja feita para uma lista de valores (1k 10k 100k 1MEG) . Note que também temos a opção de definir uma faixa de valores com o incremento que desejarmos . Após a escolha clique em OK e simule .

Pressione o botão **Simulate** .

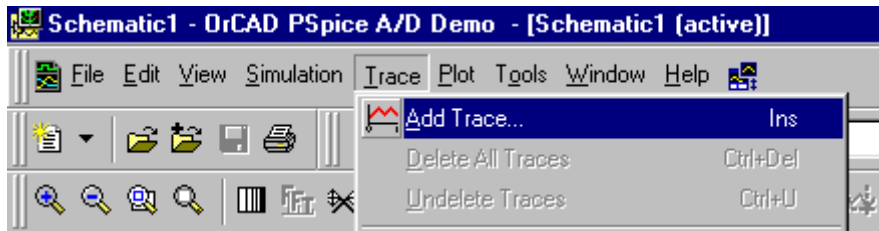


A seguinte tela se abrirá :

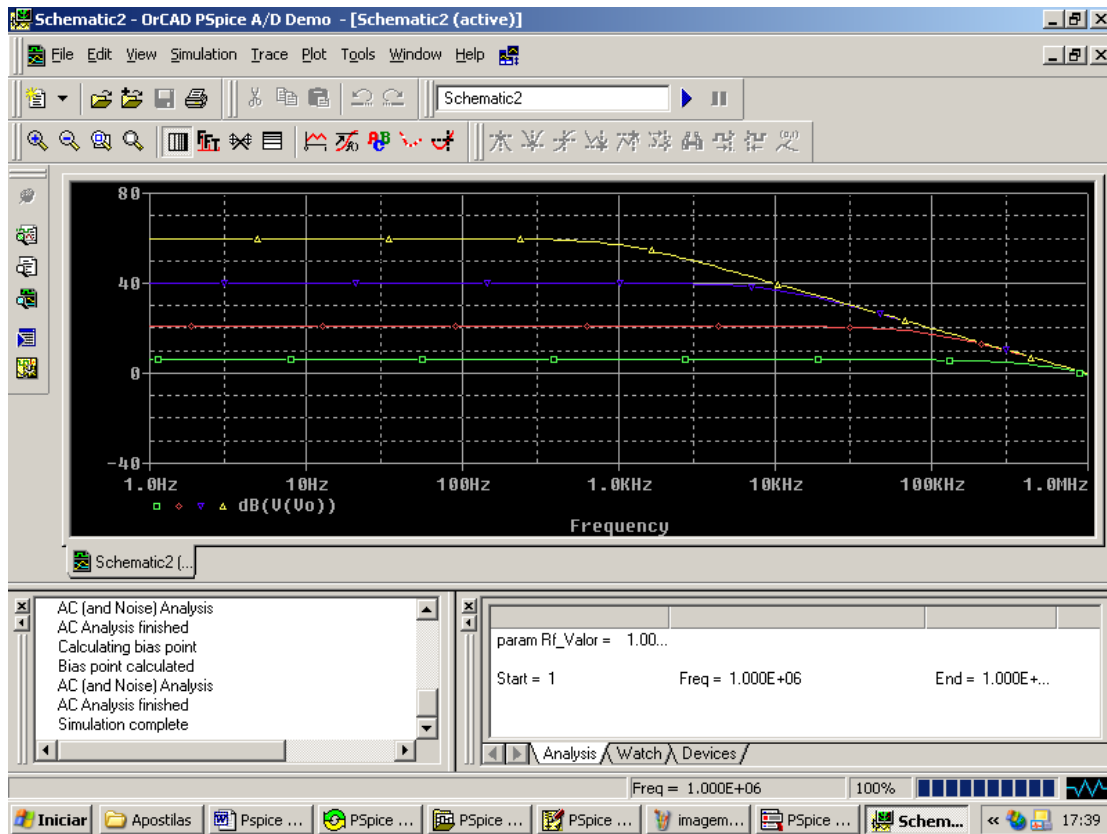


Um pequeno menu aparece , permitindo que escolhamos para quais valores desejamos realizar a análise . Se desejarmos todos basta selecionar >**All** e à seguir **OK** .

Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $\text{dB}(V(\text{Vo}))$ e confirme :

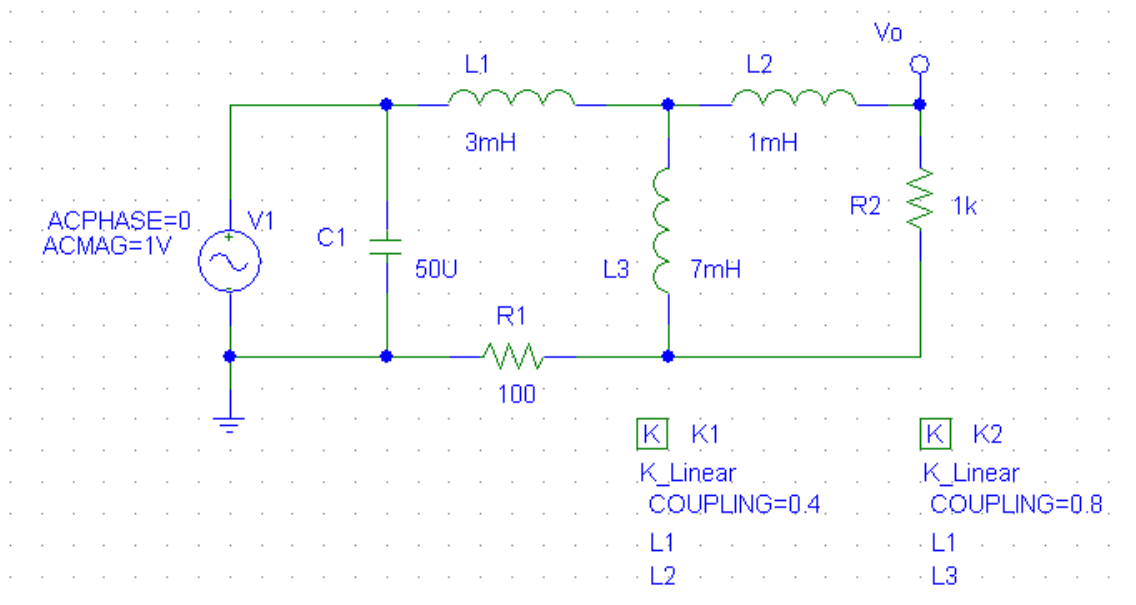


Os gráficos obtidos são o ganho do operacional na configuração do circuito analisado .

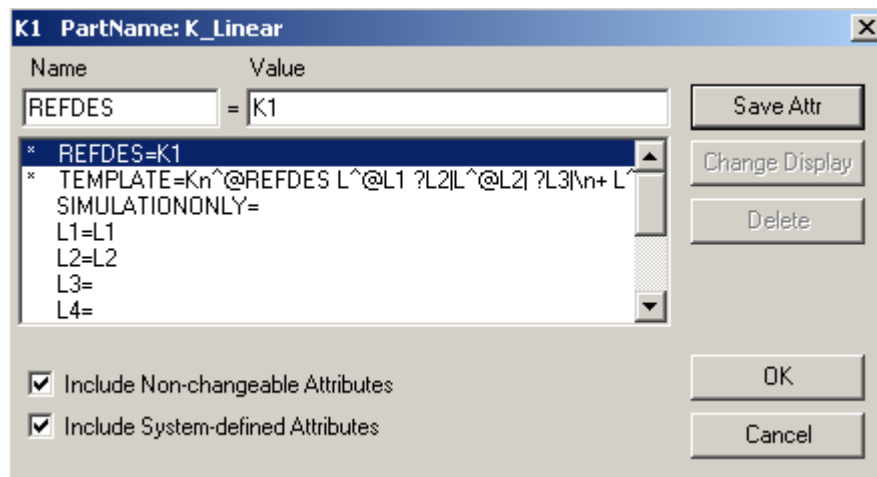
4.7 Indutância Mútua

A indutância mútua requer duas partes : o indutor (L) e o coeficiente de acoplamento entre os indutores (K) . Vamos desenhar o circuito abaixo , tomando o cuidado de inserirmos os indutores com a marcação de polaridade conforme o desenho :

(VCA , BUBBLE , L , K_LINEAR , C , R , EGND)



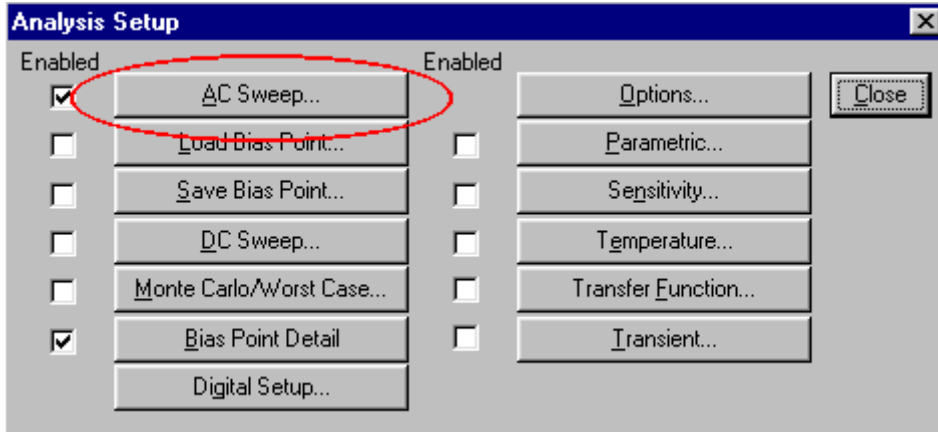
Para definir o acoplamento entre as indutâncias , utilizamos o componente K_Linear . Ao clicarmos duas vezes sobre ele , a seguinte tela se abrirá :



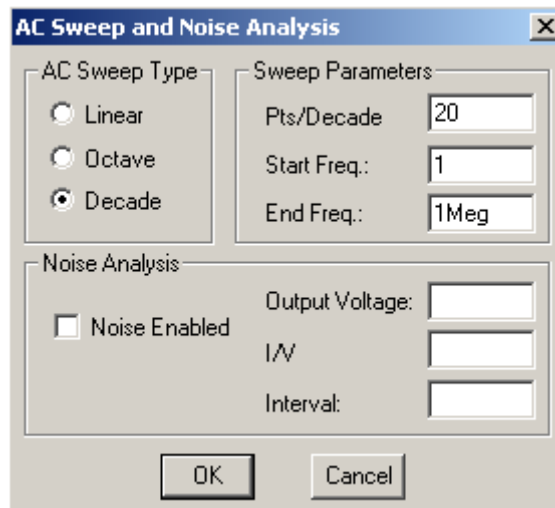
Basta então definir quem é a indutância L1 , L2 , L3 e L4 e qual o coeficiente de acoplamento entre elas COUPLING (sendo que ele deve estar compreendido entre -1 e 1) .

Para o primeiro K_Linear definimos $L1=L1$, $L2=L2$ e $Coupling=0.4$, para o segundo definimos $L1=L1$, $L2=L3$ e $Coupling=0.8$.

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **AC Sweep** .

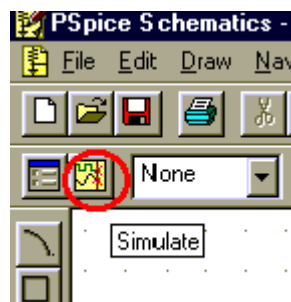


A seguinte tela se abrirá :

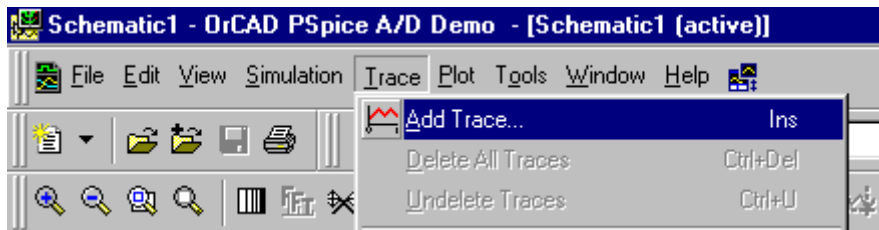


Vamos realizar a análise de 1Hz à 1MHz com 20 pts/Década . Confirme OK e simule .

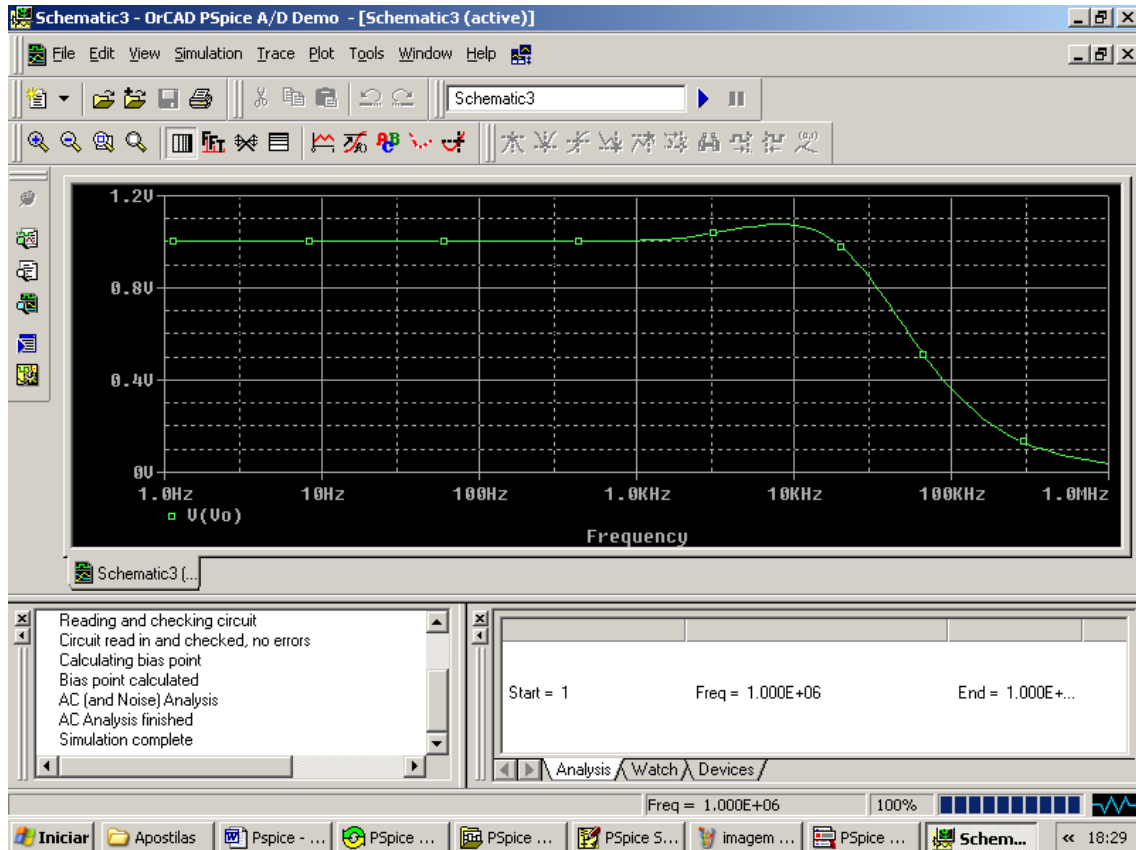
Pressione o botão **Simulate** .



Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(V_o)$ e confirme :



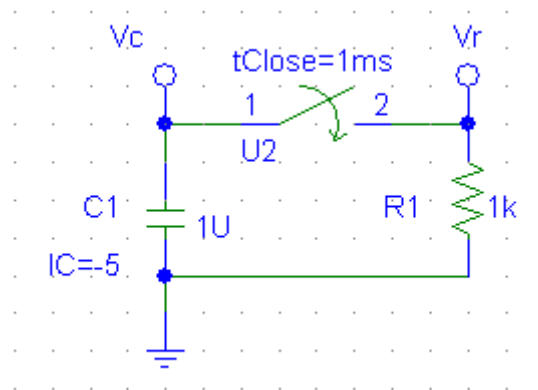
5 . TRANSIENT (Análise Transitória)

A análise Transitória permite visualizarmos formas de onda em função do tempo assim como um osciloscópio .

5.1 Circuito com capacitor com condições iniciais

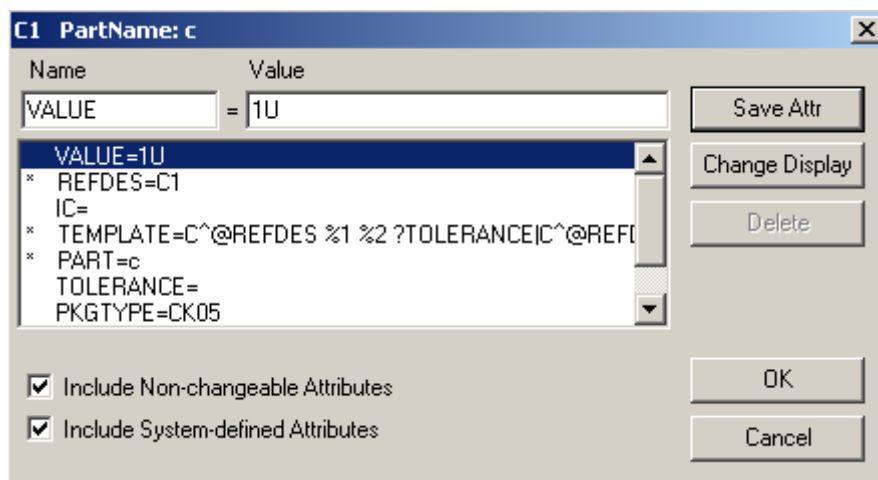
Vamos desenhar o circuito abaixo :

Componentes (BUBBLE , R, C, EGND , Sw_tClose)



Queremos que o capacitor esteja carregado inicialmente com 5 V e que a chave abra em $t=1$ ms .

Inicialmente vamos definir os atributos do capacitor .Ao clicarmos duas vezes sobre o capacitor a seguinte tela se abrirá :



Os atributos são :

VALUE : valor do capacitor em Farads .

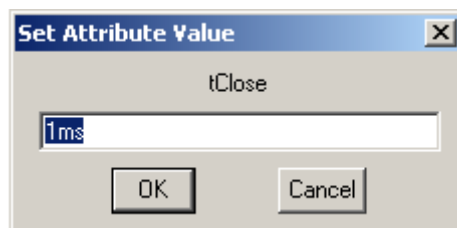
IC : valor da tensão inicial do capacitor em Volts

No nosso caso , VALUE=1U e IC=-5 .

O valor de IC é negativo pois queremos que a tensão sobre o resistor seja positiva .

Valores negativos de IC fazem com que a tensão siga a convenção de bipolo gerador .

Para definir o tempo de abertura da chave basta clicar duas vezes sobre o nome **tClose** e a seguinte tela se abrirá :

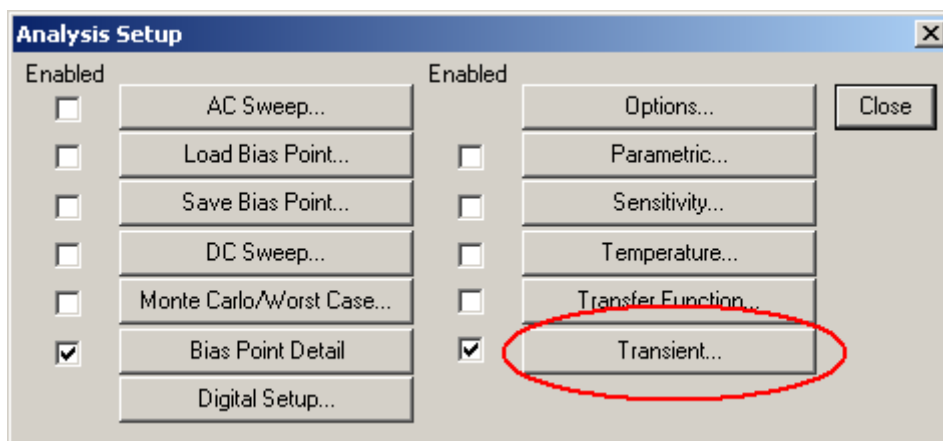


Defina o tempo de 1ms e clique em Ok para sair .

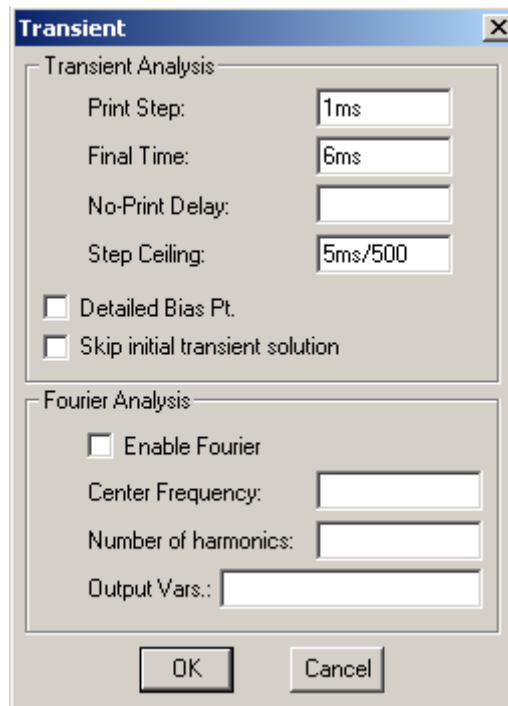
Estamos utilizando uma chave inicialmente aberta que após um certo tempo fechará , componente **Sw_tClose** .

Se quiséssemos uma chave inicialmente fechada que após um certo tempo abra-se deveríamos utilizar o componente **Sw_tOpen** .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



A seguinte tela se abrirá :



Vamos realizar a análise com Print Step 1ms , Final Time 6 ms e Step Ceiling 5ms/500.

O **Print Step** é utilizado para imprimir o texto no arquivo de saída . A cada **Print Step** segundos os valores serão gravados no arquivo de saída . Se este valor for muito pequeno podemos afetar o tempo de simulação deixando-o muito lento .

Final Time define o tempo total da simulação . A simulação será executada de 0 até **Final Time** segundos .

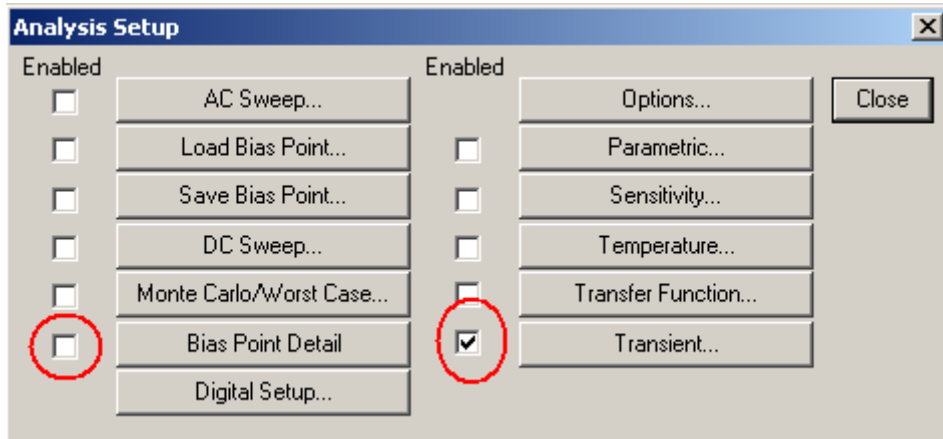
O campo **No-Print Delay** permite definir após qual intervalo queremos no arquivo de saída os resultados da simulação , assim se vamos simular até 1 segundo e nos interessa apenas os valores entre 990 ms e 1s , basta setarmos o **No-Print Delay** para 990 ms . Se não desejamos um intervalo específico podemos deixá-lo em branco . Esse parâmetro é utilizado para diminuir o tempo de simulação em análises longas .

**CUIDADO COM O TEMPO DE SIMULAÇÃO ENTRE OS PONTOS
(STEP CELLING)**

O **Step Ceiling** define o tempo máximo entre os pontos que serão simulados . Quanto menor mais preciso será o meu gráfico , no entanto mais tempo levará a minha simulação . Se deixado em branco o PSpice calculará um tempo de modo que a simulação ocorra no menor tempo possível mantendo o erro dentro de um limite máximo . No nosso caso teremos 500 pontos na simulação pois Step Ceiling = 5ms/500

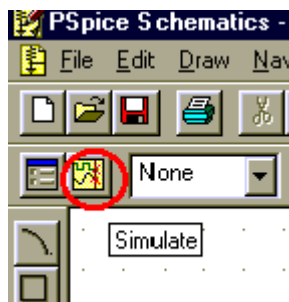
Podemos definir ainda que não queremos as condições iniciais durante a simulação , para isso basta setarmos a opção **Skip Initial Transient Solution** , no nosso caso queremos que a simulação ocorra com os valores iniciais , vamos assim deixá-lo em branco .

Como vamos simular um circuito onde queremos que as condições iniciais sejam calculadas pelo simulador durante a análise transitória devemos **desabilitar a opção Bias Point Detail** .

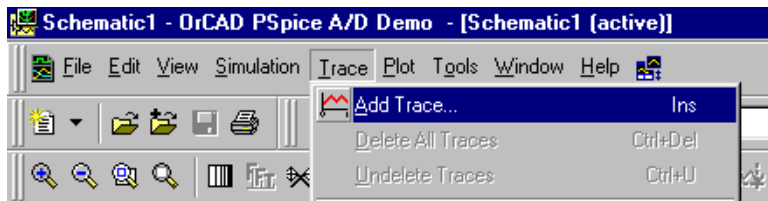


Feche a tela e simule .

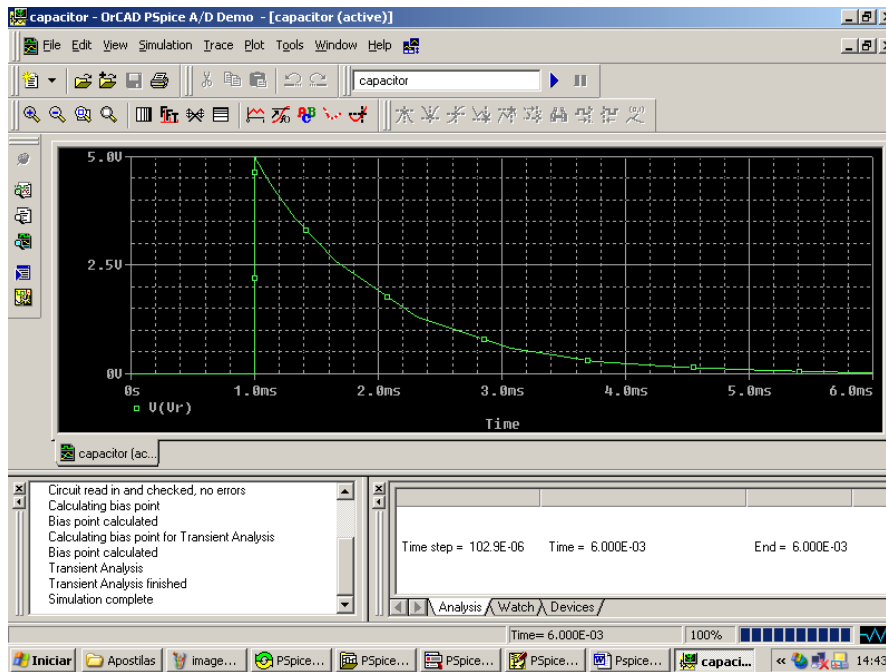
Pressione o botão **Simulate** .



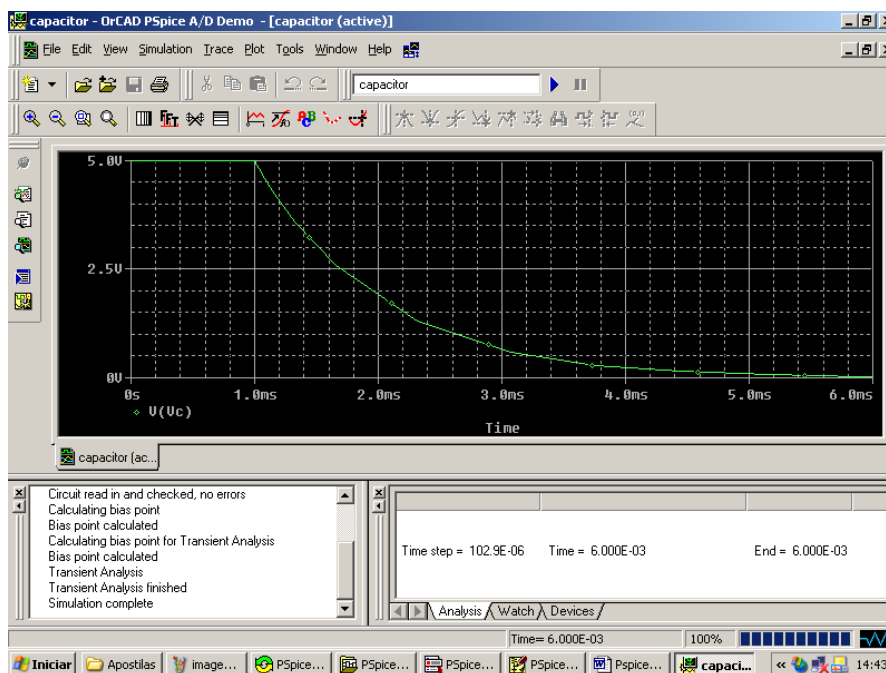
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(V_r)$ e confirme :

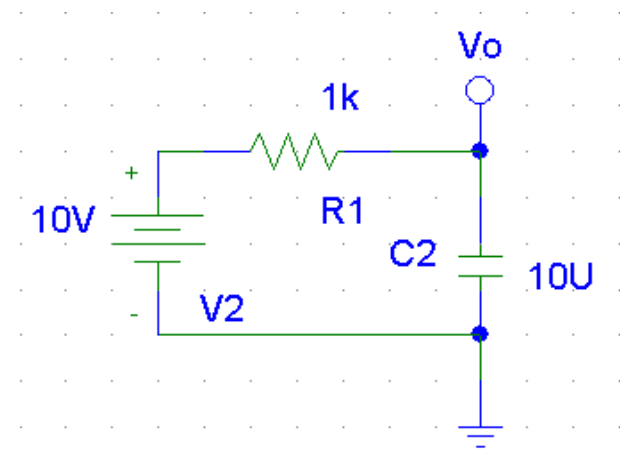


Selecione a tensão $V(V_c)$ e confirme :

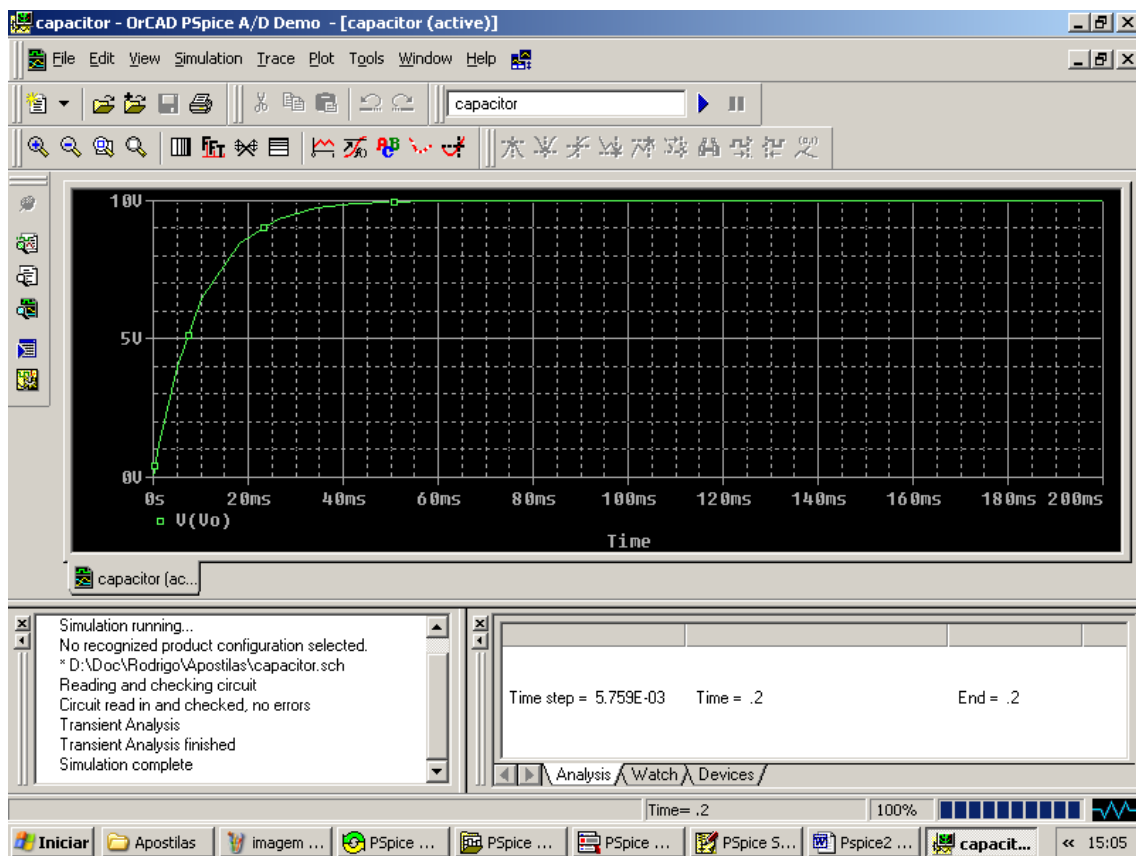


EXERCÍCIOS

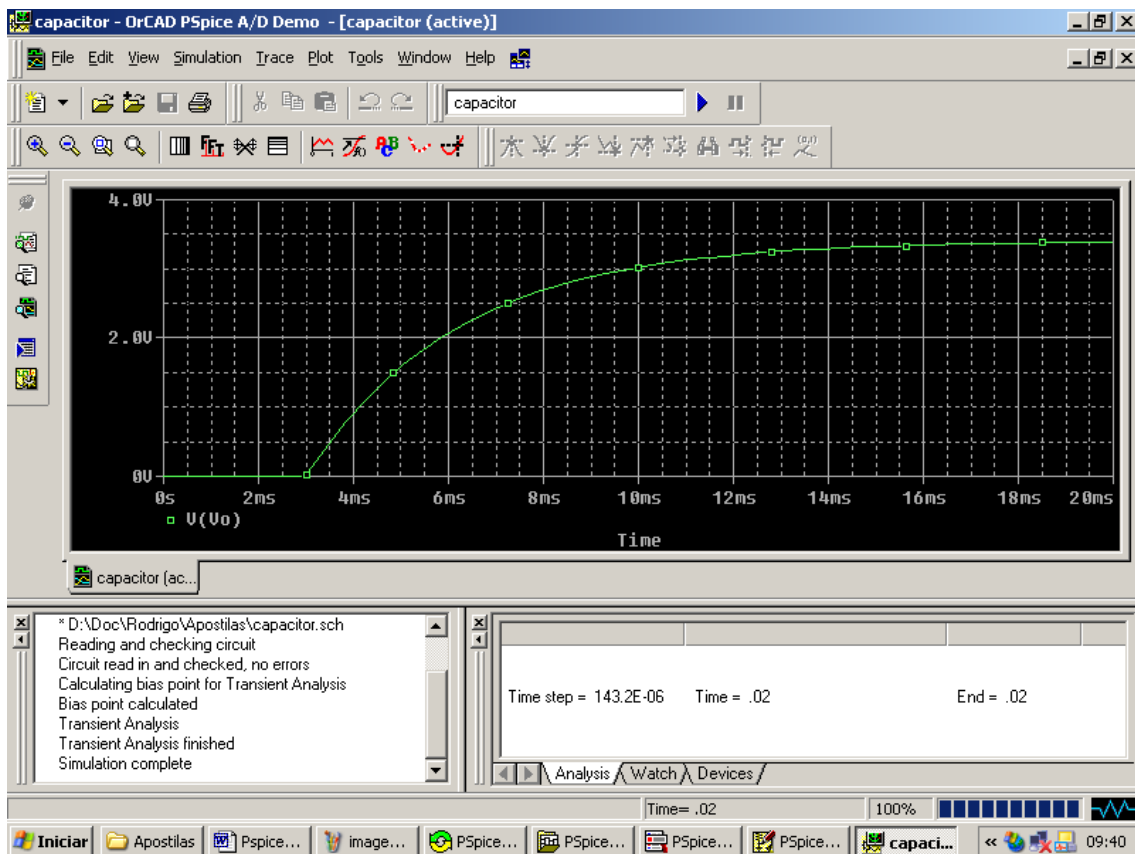
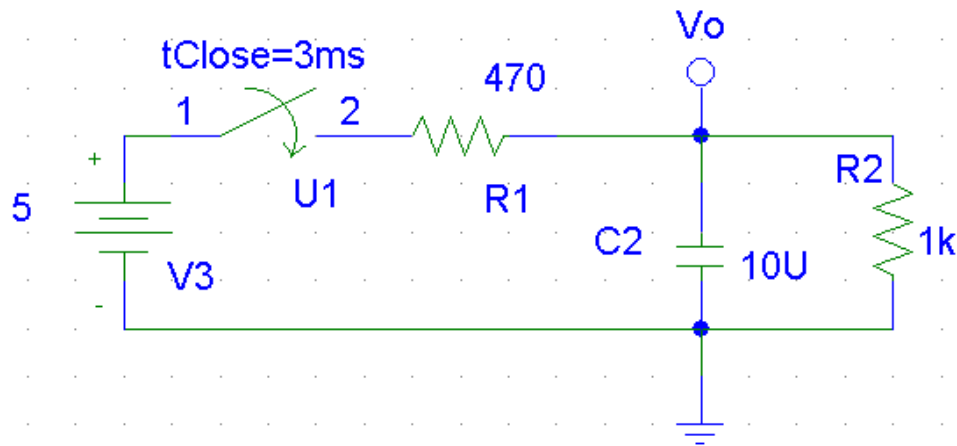
1) Ache a tensão V_o .



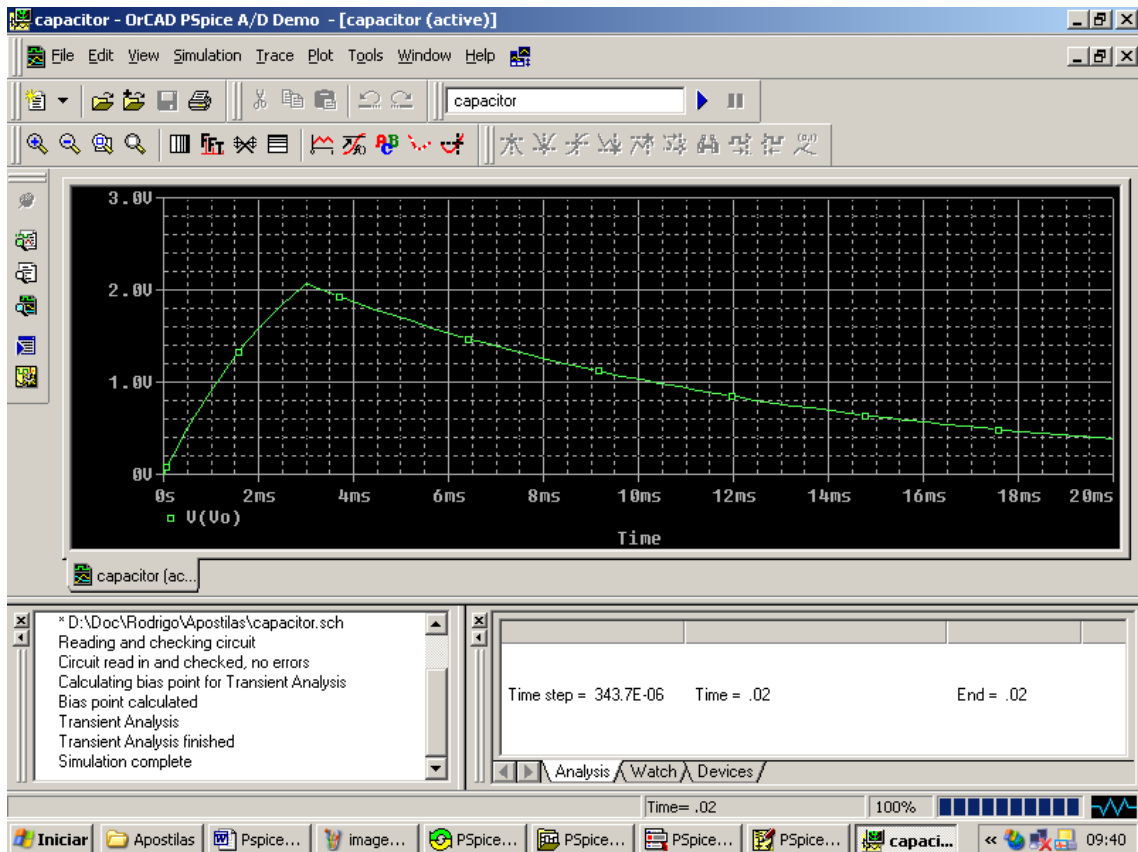
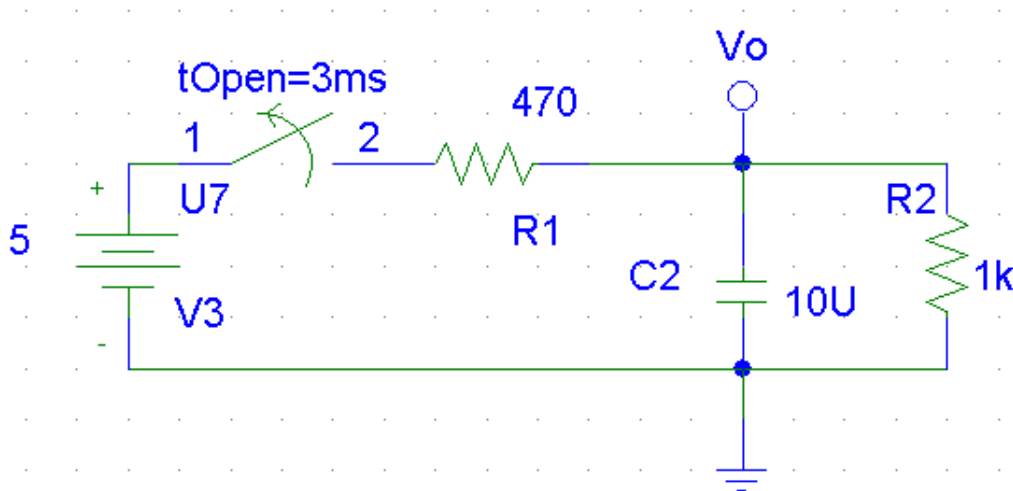
Componentes (VDC , R , C, EGND , BUBBLE)



2) Ache V_o .



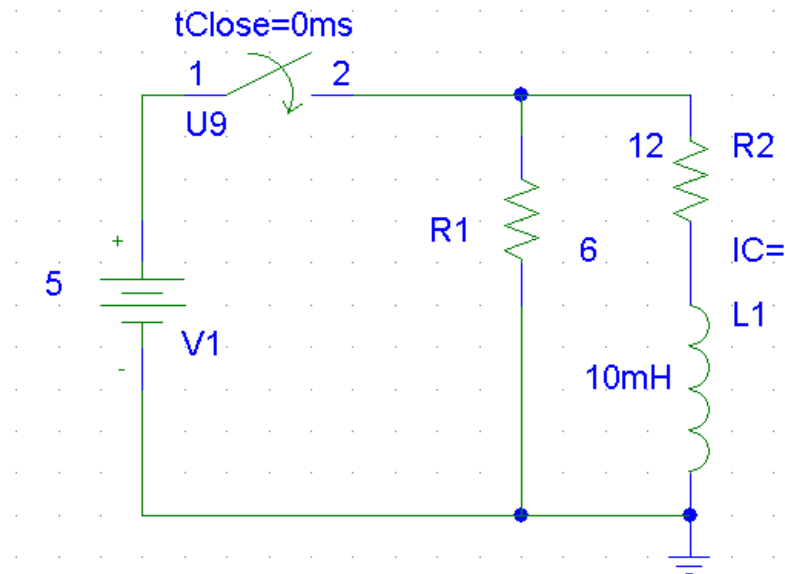
3) Ache V_o .



5.2 Resposta Transitória do Indutor

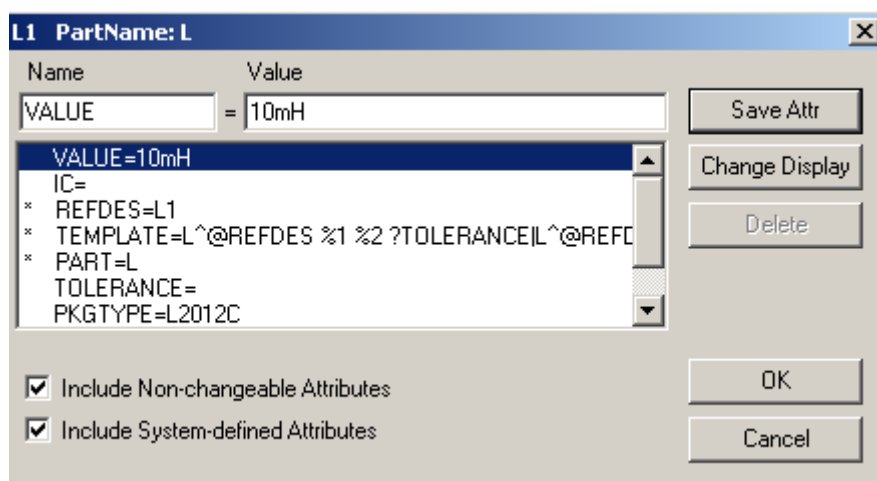
Vamos desenhar o circuito abaixo :

Componentes (BUBBLE , R, L, EGND , Sw_tClose)



Queremos que o indutor esteja descarregado inicialmente , assim $IC=0$ e que a chave abra em $t=0$ ms .

Inicialmente vamos definir os atributos do indutor .Ao clicarmos duas vezes sobre o indutor a seguinte tela se abrirá :



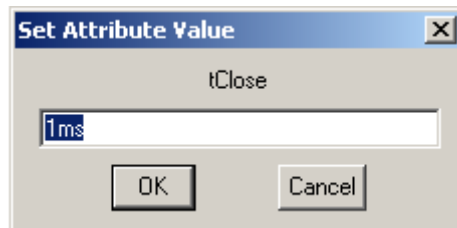
Os atributos são :

VALUE : valor do indutor em Henry .
IC : valor da corrente inicial do indutor em Ampere

No nosso caso , VALUE=10mH e IC=0 .

O valor de IC pode ser positivo ou negativo dependendo do sentido que queremos a corrente inicialmente carregada no indutor .

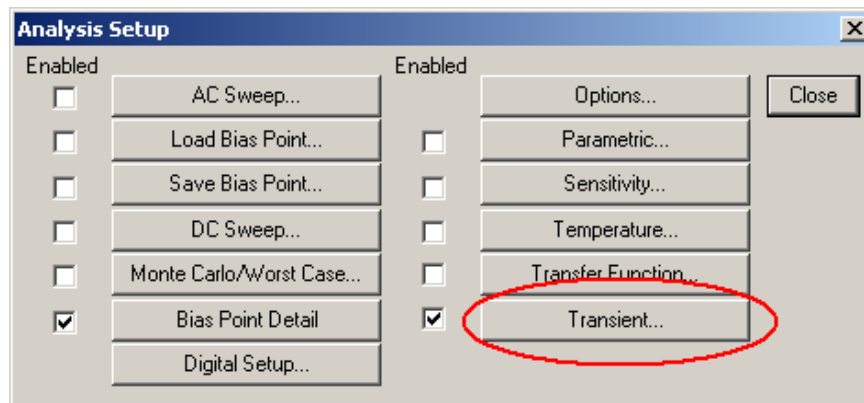
Para definir o tempo de abertura da chave basta clicar duas vezes sobre o nome **tClose** e a seguinte tela se abrirá :



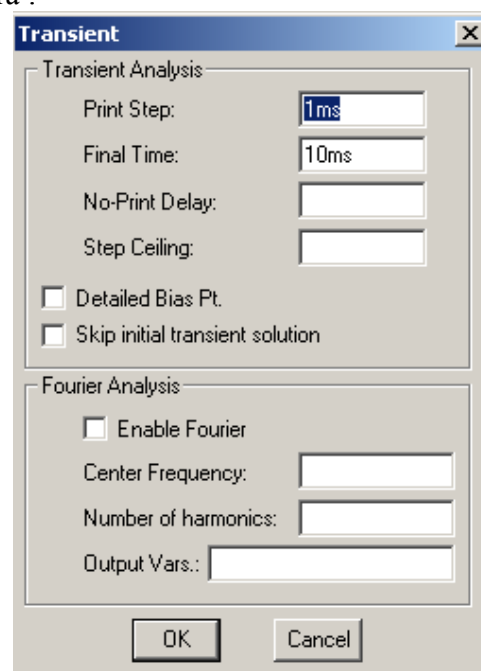
Defina o tempo de 0ms e clique em Ok para sair .

Estamos utilizando uma chave inicialmente aberta que após um certo tempo fechará , componente **Sw_tClose** .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



A seguinte tela se abrirá :

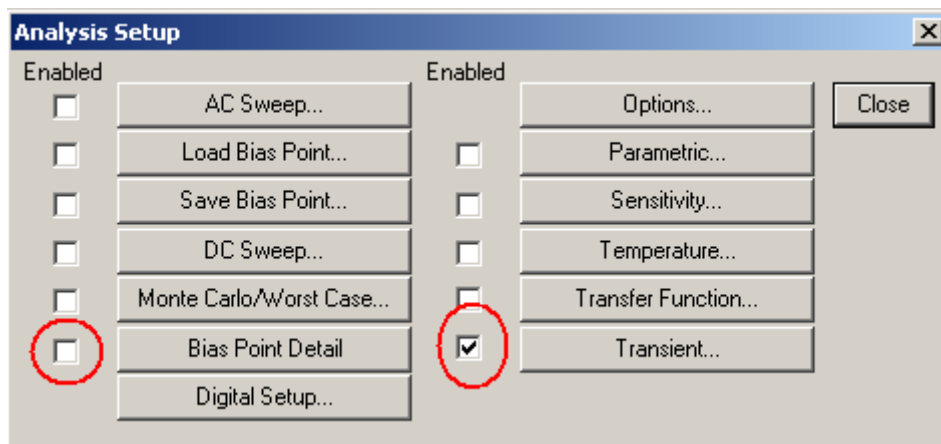


Vamos realizar a análise com Print Step 1ms , Final Time 10 ms .

O **Print Step** é utilizado para imprimir o texto no arquivo de saída . A cada **Print Step** segundos os valores serão gravados no arquivo de saída . Se este valor for muito pequeno podemos afetar o tempo de simulação deixando-o muito lento .

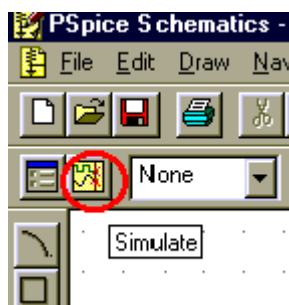
Final Time define o tempo total da simulação . A simulação será executada de 0 até **Final Time** segundos .

Como vamos simular um circuito onde queremos que as condições iniciais sejam calculadas pelo simulador durante a análise transitória devemos **desabilitar a opção Bias Point Detail** .

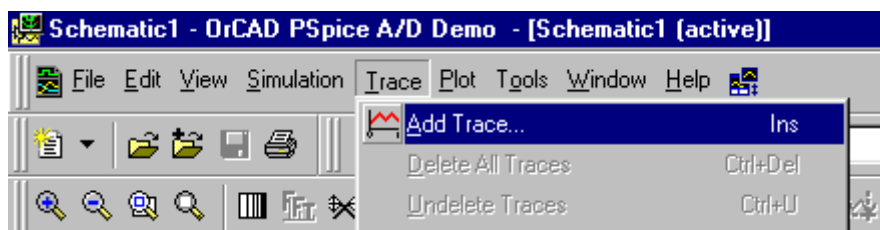


Feche a tela e simule .

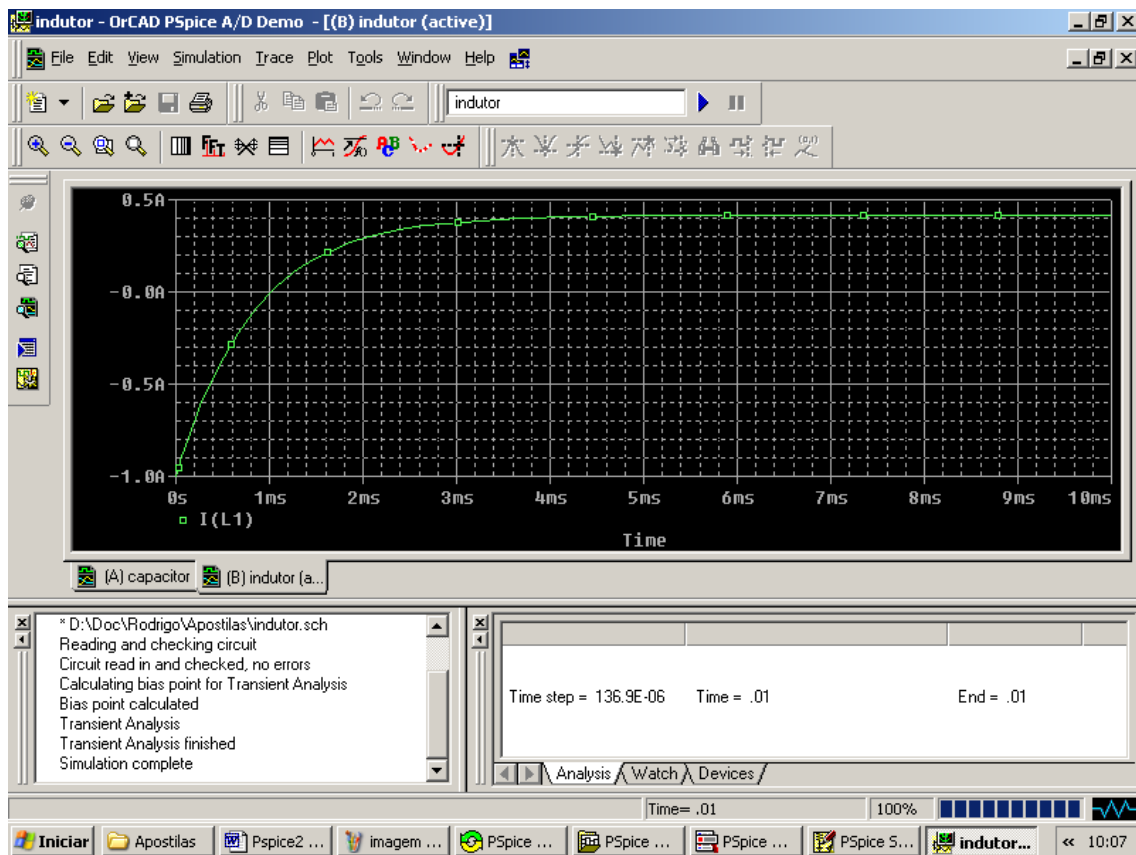
Pressione o botão **Simulate** .



Selecione no Menu **Trace > Add Trace**

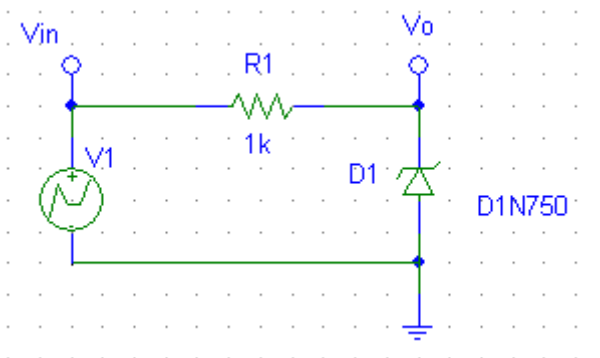


Seleção a corrente I(IL) e confirme :



5.3 Circuito Grampeador com Zener

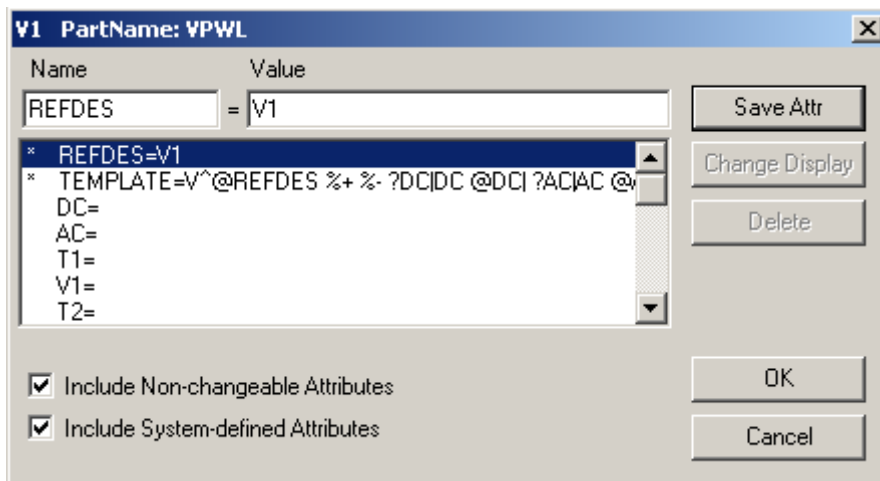
Vamos desenhar o circuito abaixo :



Componentes : (VPWL , R , BUBBLE , EGND , D1N750 (Zener))

O componente VPWL é um tipo de fonte de tensão onde podemos construir segundo a nossa vontade a forma de onda que quisermos desde que ela seja feita por linhas retas .

Clicando duas vezes sobre o componente VPWL teremos :

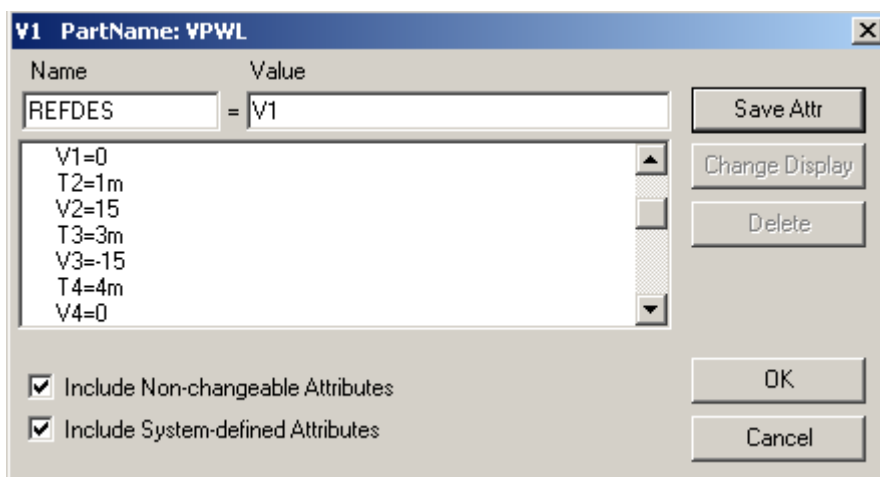


Os atributos DC e AC são para as análises DC e AC respectivamente , como estamos interessados na análise transitória eles podem ser deixados de lado .

A curva é construída de maneira bem simples : no tempo T1 teremos a tensão V1 , no tempo T2 teremos a tensão V2 e assim por diante .

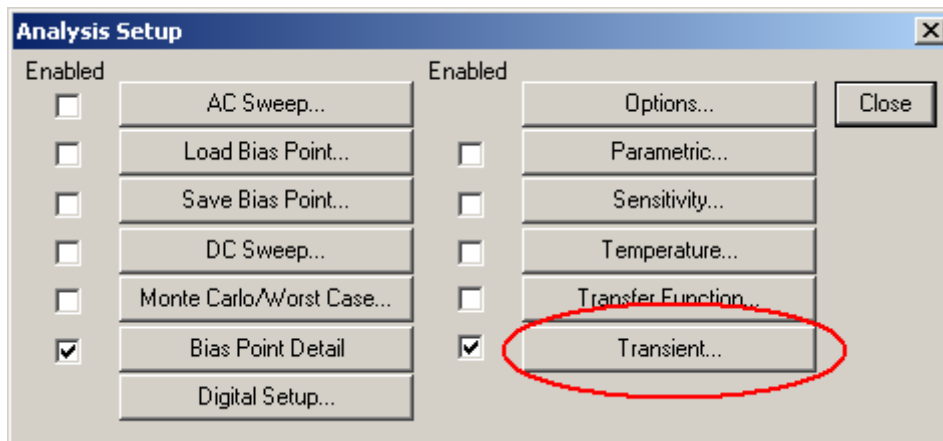
Nós vamos construir uma fonte com uma onda triangular de amplitude +-15 V conforme a tabela abaixo :

T1	T2	T3	T4
0	1m	3m	4m
V1	V2	V3	V4
0	15	-15	0

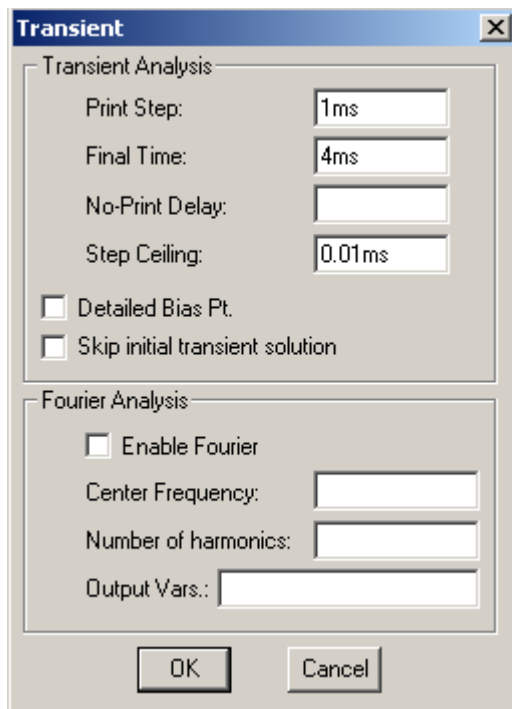


Após definir os parâmetros do componente , clique ok para confirmar .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



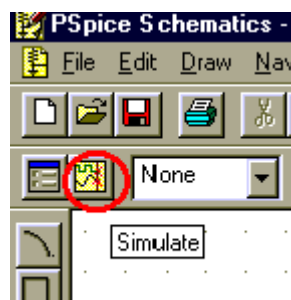
A seguinte tela se abrirá :



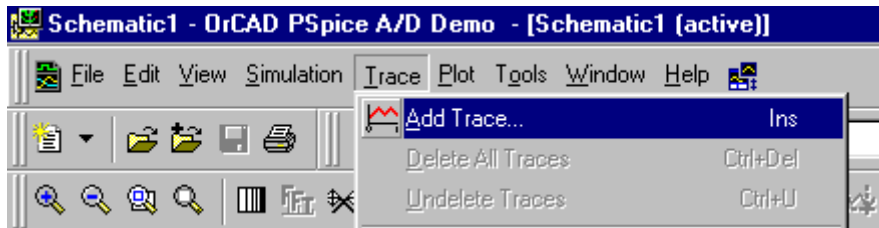
Vamos definir o passo de 1ms
Tempo final de 4 ms e intervalo entre os
pontos de 0.01 ms

Feche a tela e simule .

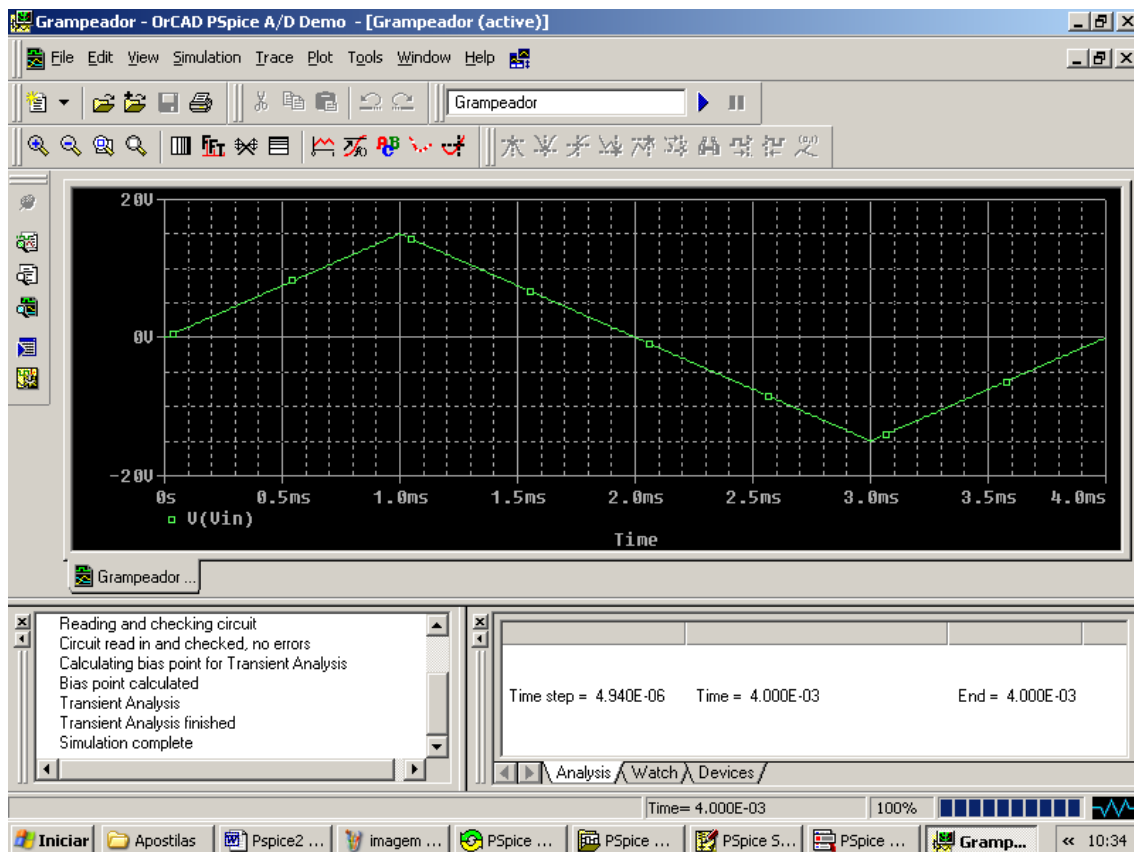
Pressione o botão **Simulate** .



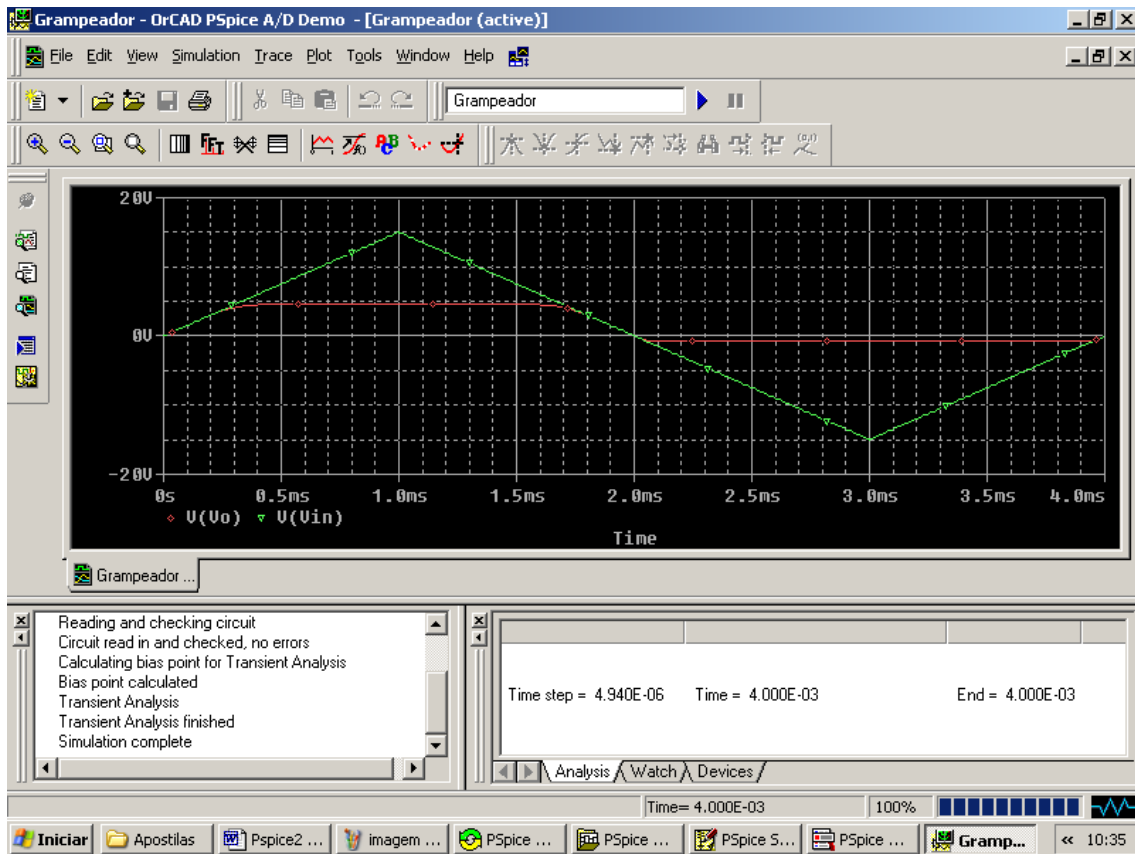
Selecione no Menu Trace > Add Trace



Selecione a tensão V(Vin) e confirme :

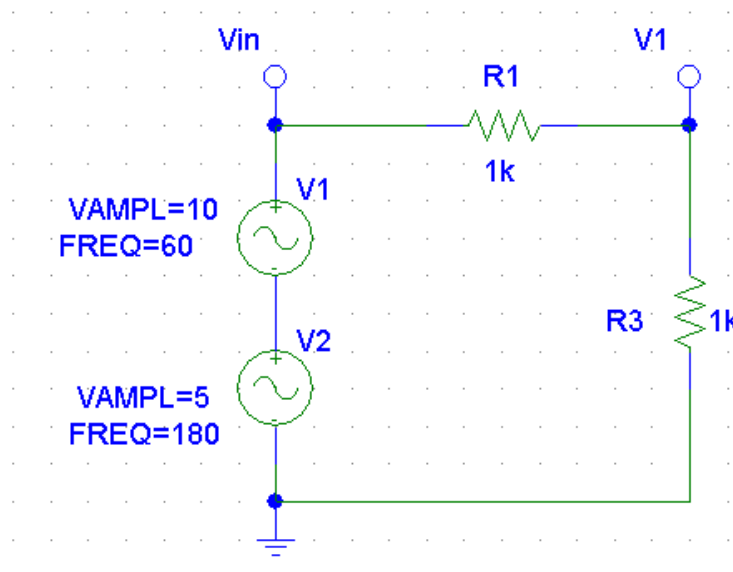


À seguir selecione V(Vo) e confirme :



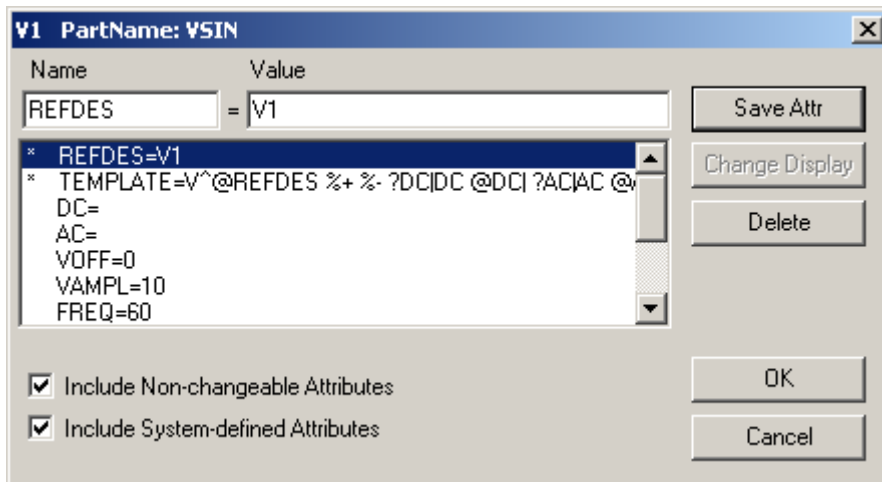
5.4 Análise de Fourier na Tela Gráfica

Vamos desenhar como demonstração o circuito à seguir :



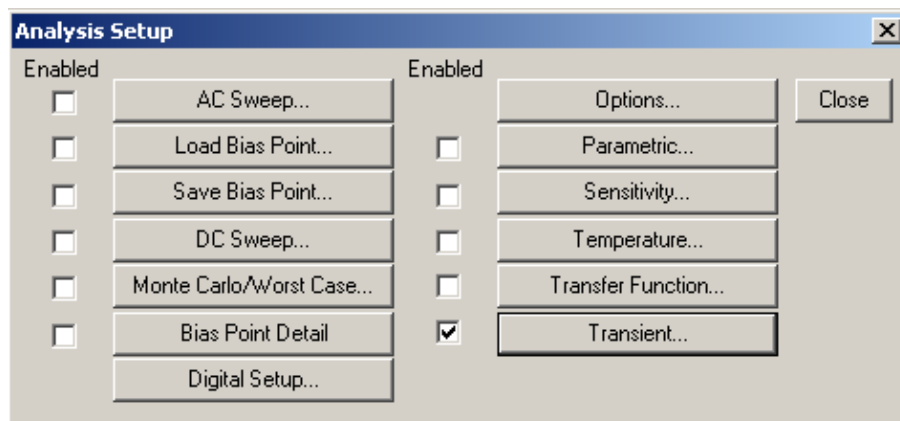
Componentes (VSIN , EGND , R , BUBBLE)

Vamos definir a amplitude e a frequência dos geradores de tensão senoidal , para isso basta dar um duplo clique sobre eles :

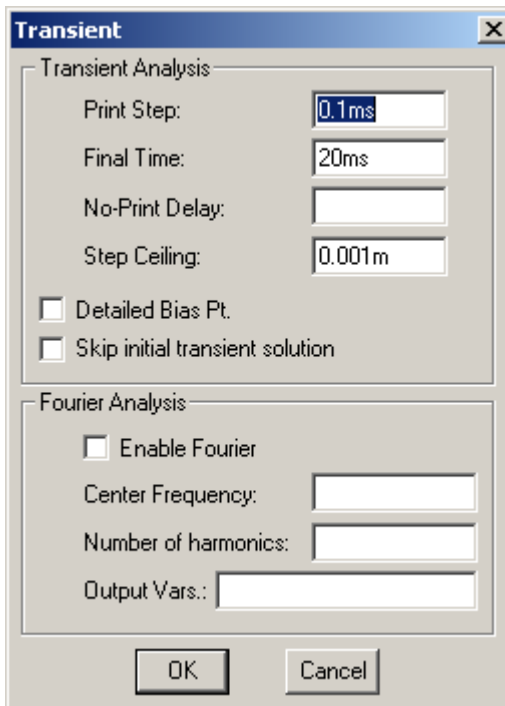


Definimos VOFF=0 (offset), VAMPL=10 (amplitude) e FREQ=60 (Frequência do sinal em Hz) para o 1º gerador e VOFF=0 (offset), VAMPL=5 (amplitude) e FREQ=180 (3º Harmônica) .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



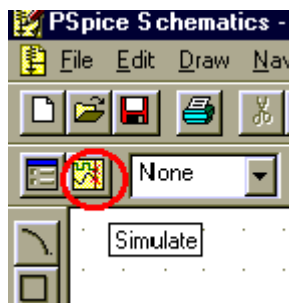
A seguinte tela se abrirá :



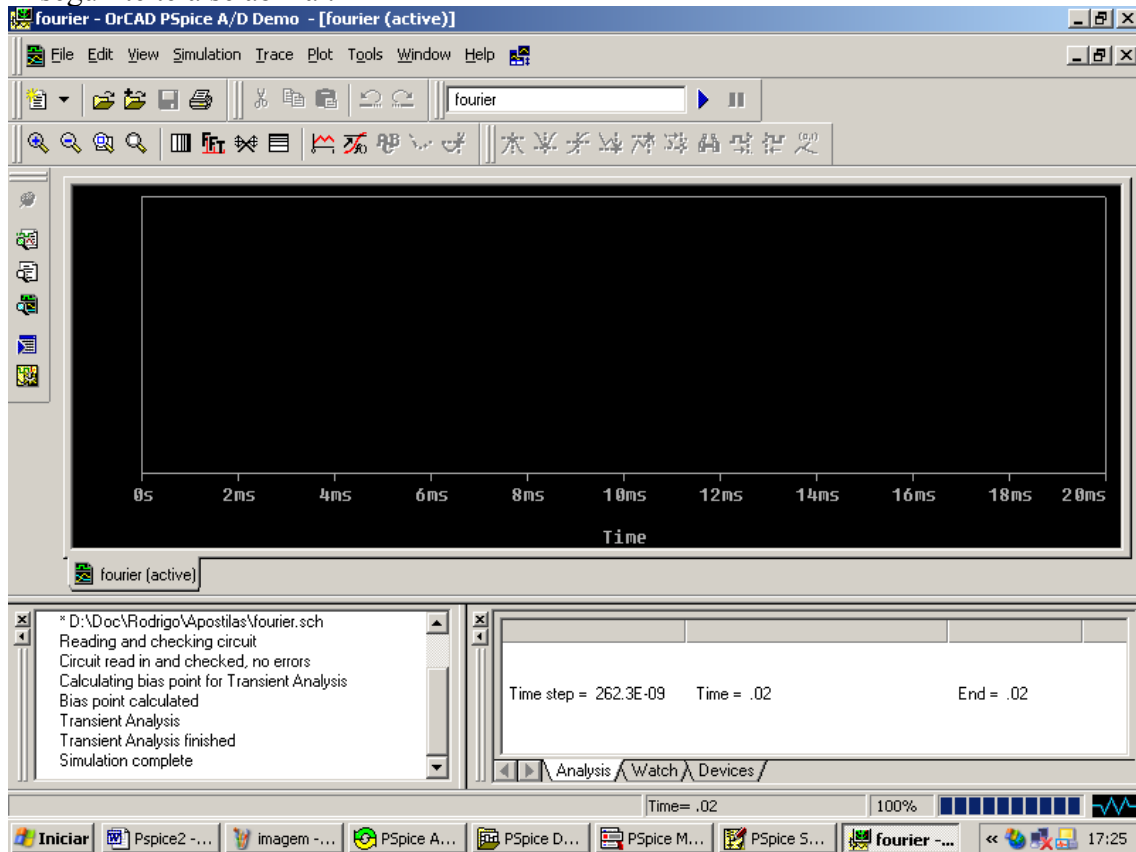
Vamos definir o passo de 0.1ms
Tempo final de 20 ms e intervalo entre os
pontos de 0.001 ms

Feche a tela e simule .

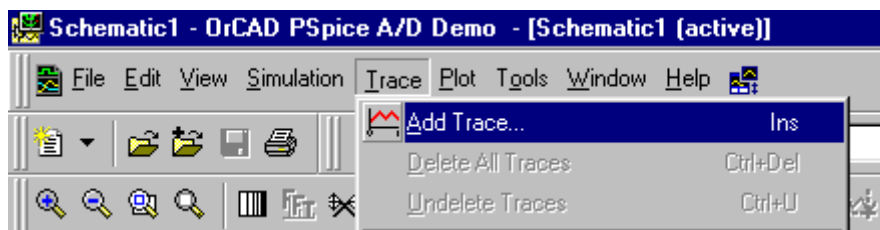
Pressione o botão **Simulate** .



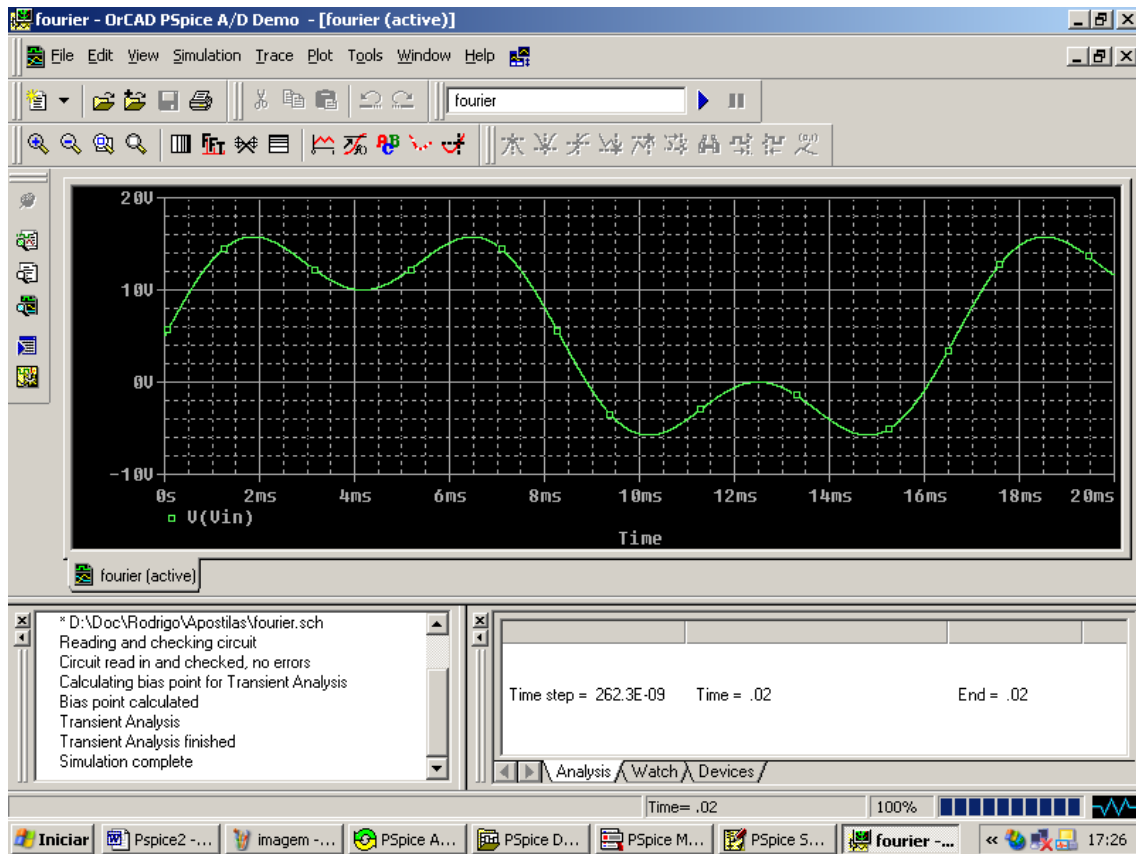
A seguinte tela se abrirá :



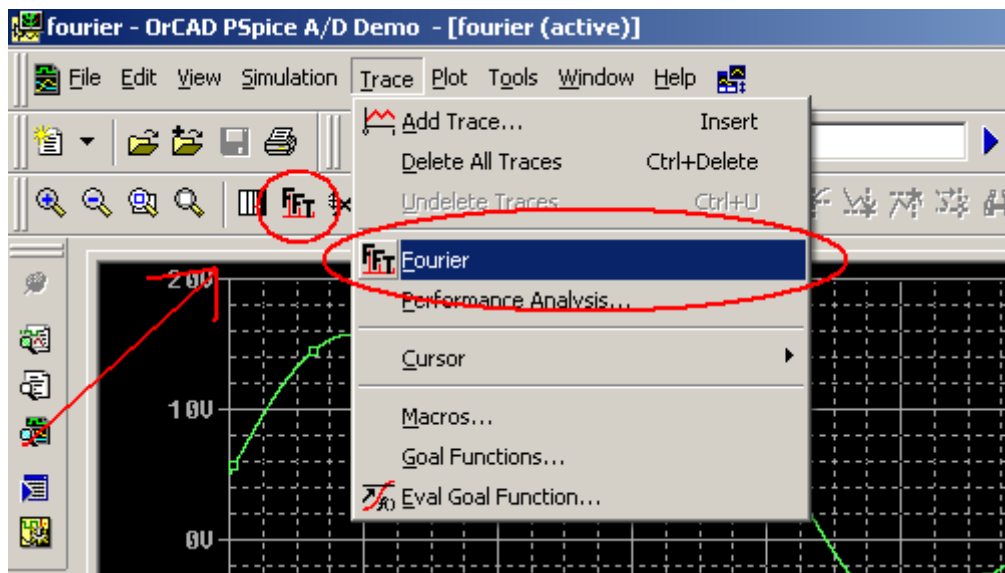
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



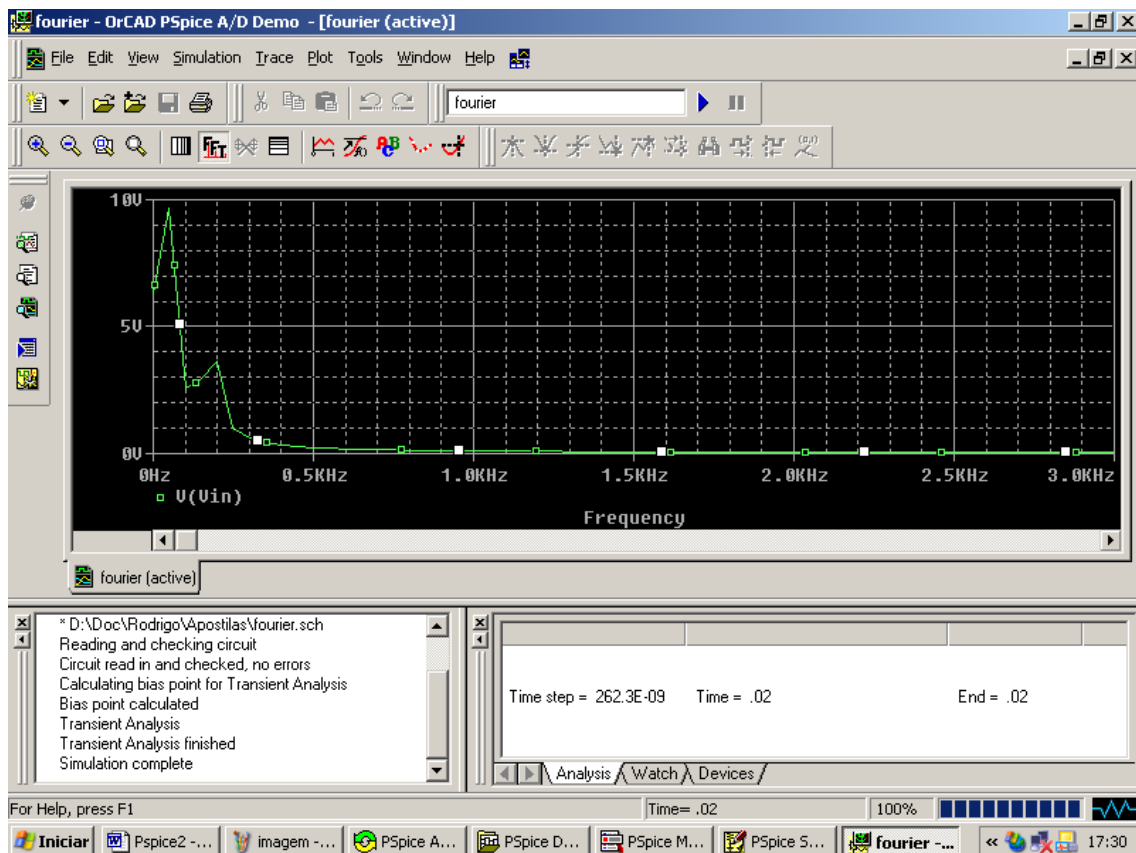
Selecione a tensão V(Vin) e confirme :



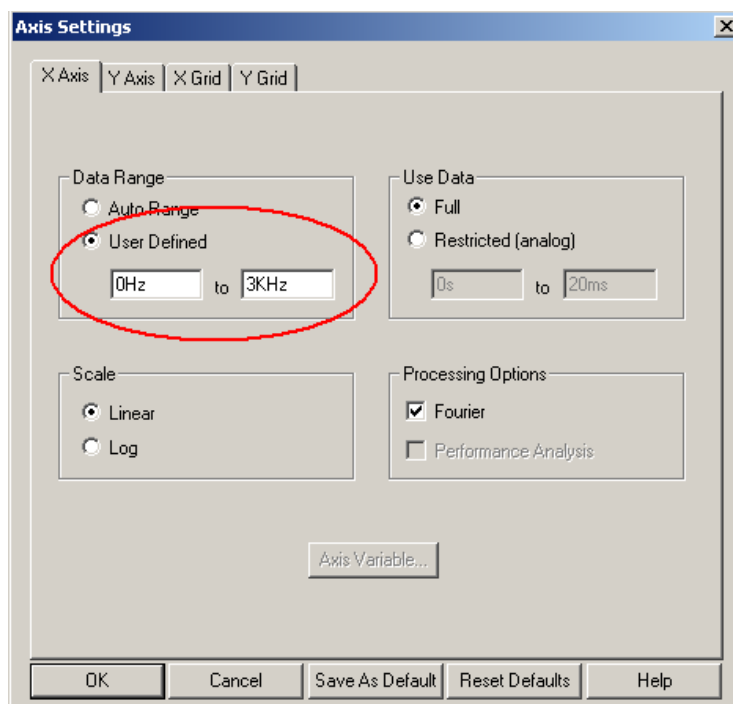
Para observar o espectro do sinal basta clicar sobre o botão FFT ou no menu **Trace > Fourier** :



Teremos então o gráfico com o espectro do sinal plotado :



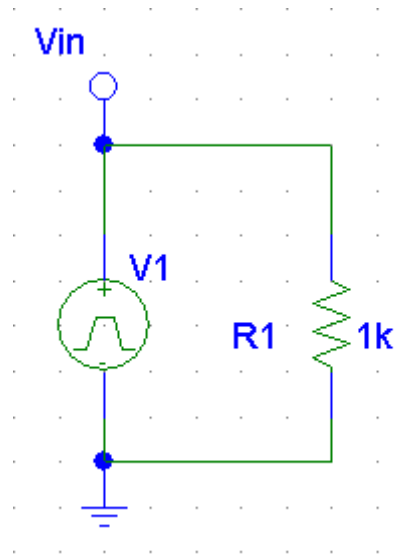
Para melhor visualização , alteramos a escala das freqüências no eixo x , para isso vá ao menu **Plot > Axis Settings** , defina a faixa desejada e clique em Ok :



5.5 Análise de Fourier com PSpice

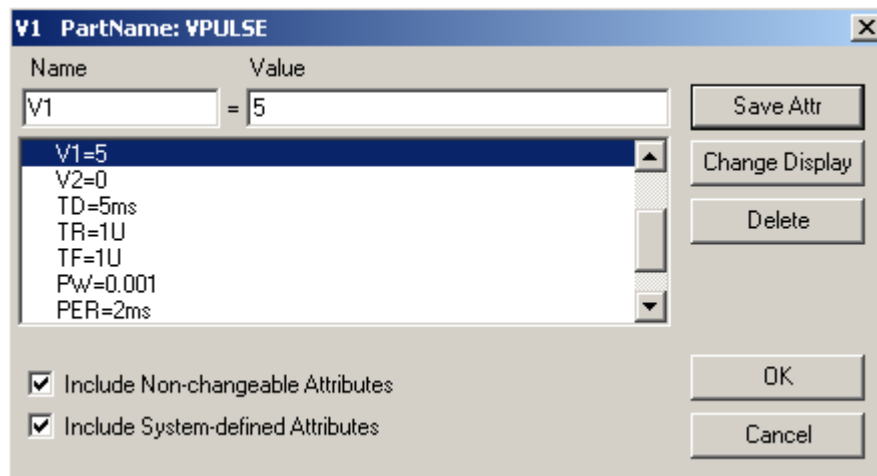
As amplitudes e as frequências componentes de um sinal podem ser obtidas através da análise transitória de um sinal .

Como exemplo vamos desenhar o circuito à seguir :



Componentes (VPULSE , EGND , R , BUBBLE)

O VPULSE é uma fonte de tensão pulsada (pode ser utilizada para criar uma onda quadrada), para ajustar seus parâmetros , vamos clicar duas vezes sobre ele :



Parâmetros do VPULSE :

- Período (PER) : definimos o período da forma de onda em segundos
- Tempo de subida (TR): definimos o tempo de subida do sinal
- Tempo de descida (TF) : definimos o tempo de descida do sinal

- Tamanho do pulso (PW) : definimos o tamanho do pulso , este deve ser menor que o período definido . Para obtermos uma onda quadrada , $PW=PER/2$.
- Tensão inicial (V1) : valor inicial da amplitude da tensão do pulso
- Tensão do pulso (V2) : valor final da amplitude da tensão do pulso
- Tempo de espera (TD) : no começo da análise , a fonte de tensão começa com a tensão inicial (V1) por um tempo igual ao tempo de espera (delay time) . Depois deste tempo a tensão muda do valor inicial para a tensão (V2) .

O pulso terá uma amplitude definida pela faixa de V1 à V2 .

No nosso caso , queremos uma onda quadrada de +- 5V , 1 KHz , assim :

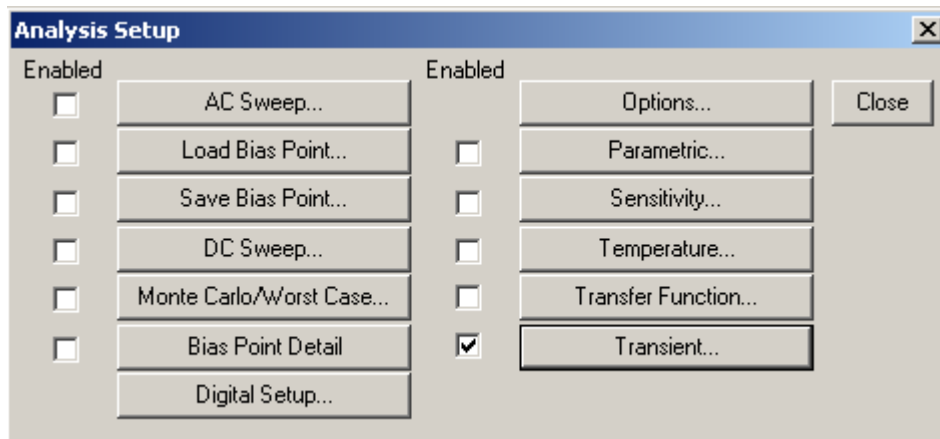
TR=TF= 1 Us ; PER= 2ms ; PW=1 ms ; V1=+5 ; V2=-5 ; TD=0

Após o ajuste dos parâmetros clique OK para sair .

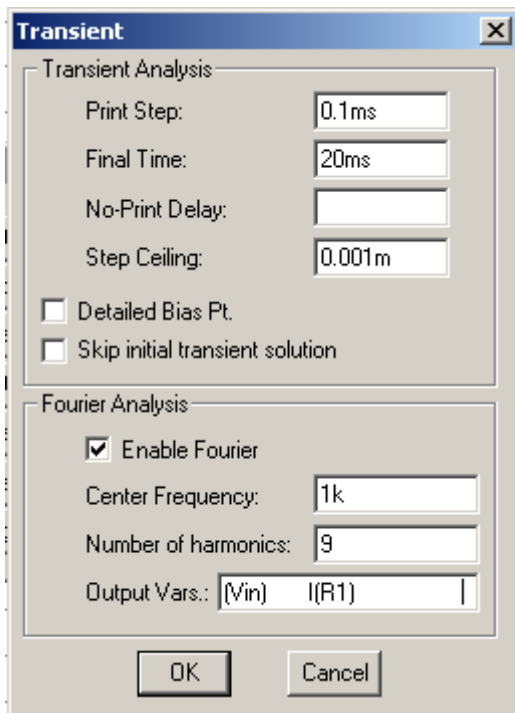
É importante lembrar que tempo de subida e descida não devem ser totalmente zerados pois podem vir a ocasionar erros de convergência em circuitos mais complexos .

Obs .: Como estamos realizando a análise transitória os parâmetros DC e AC ficam em branco , não sendo necessário defini-los .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



A seguinte tela se abrirá :



Vamos definir o passo de 0.1ms
Tempo final de 20 ms e intervalo entre os
pontos de 0.001 ms

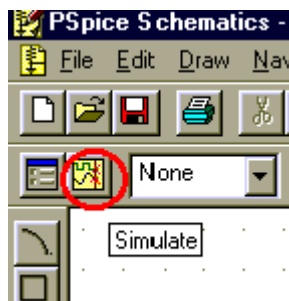
Como queremos a análise de Fourier de
um determinado sinal , vamos habilitar a
análise (Enable Fourier) .

Definimos a frequência central como a
frequência da nossa fundamental , no
nosso caso 1kHz .

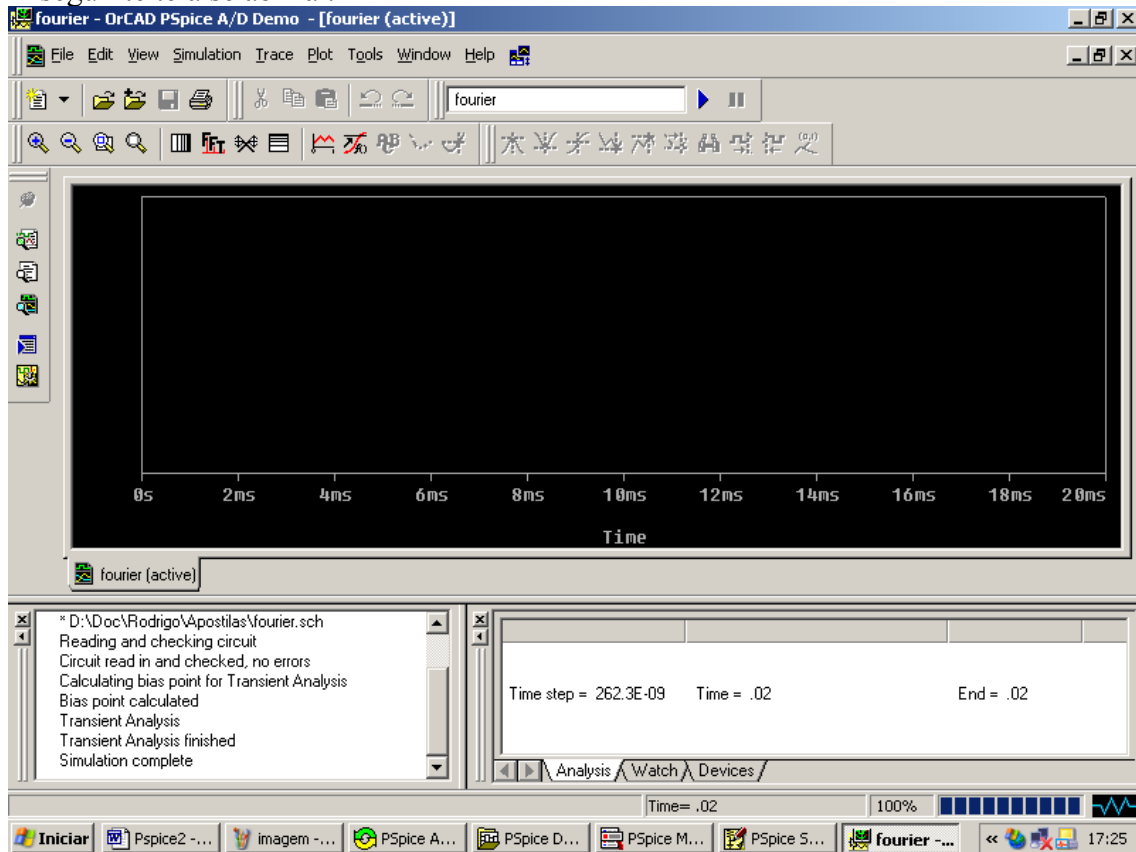
À seguir definimos o nº de harmônicas
que queremos analisar e de quais variáveis
queremos realizar a análise .

Feche a tela e simule .

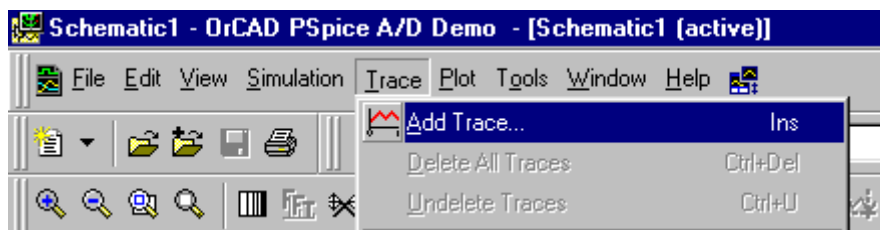
Pressione o botão **Simulate** .



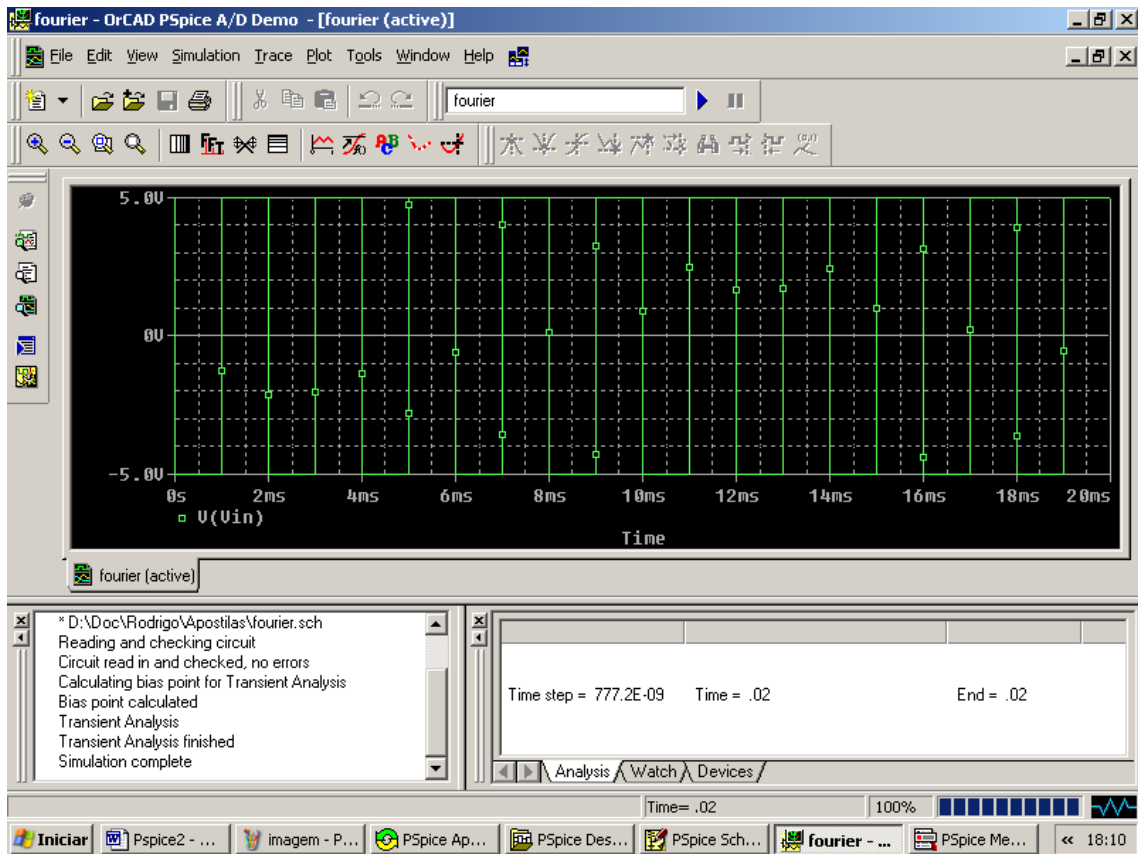
A seguinte tela se abrirá :



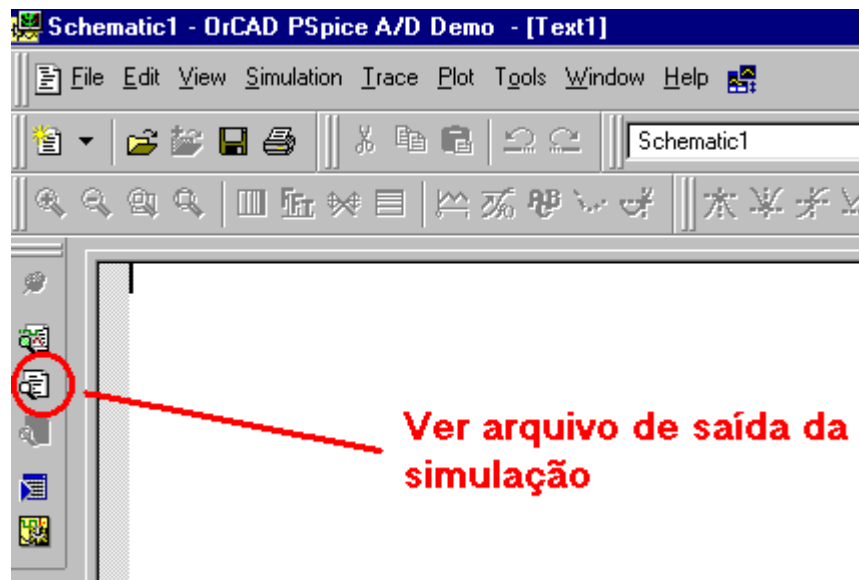
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão V(Vin) e confirme :



Para visualizar o arquivo de saída que contém a análise de Fourier das variáveis , pressione o botão ao lado :



```

**** 04/27/03 18:25:16 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****
* D:\Doc\Rodrigo\Apostilas\fourier.sch
****   CIRCUIT DESCRIPTION
*****

* Schematics Version 9.1 - Web Update 1
* Sun Apr 27 18:25:16 2003
* Analysis setup **
.tran 0.1ms 20ms 0 0.001m
.four 1k 9 V([Vin]) I(R_R1)

* From [PSPICE NETLIST] section of PSpiceev.ini:
.lib "nom.lib"

.INC "fourier.net"
**** INCLUDING fourier.net ****
* Schematics Netlist *

R_R1      0 Vin 1k
V_V1      Vin 0
+PULSE 5 -5 0 1U 1U 0.001 2ms

**** RESUMING fourier.cir ****
.INC "fourier.als"

**** INCLUDING fourier.als ****
* Schematics Aliases *

.ALIASES
R_R1      R1(1=0 2=Vin )
V_V1      V1(+=Vin -=0 )
_         (Vin=Vin)
.ENDALIASES

**** RESUMING fourier.cir ****
.probe

.END

**** 04/27/03 18:25:16 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****

* D:\Doc\Rodrigo\Apostilas\fourier.sch

****   INITIAL TRANSIENT SOLUTION   TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE
(  Vin)  5.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V_V1      -5.000E-03
TOTAL POWER DISSIPATION  2.50E-02 WATTS

**** 04/27/03 18:25:16 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****
* D:\Doc\Rodrigo\Apostilas\fourier.sch

```

**** FOURIER ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(Vin)
 DC COMPONENT = 4.900000E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	FOURIER NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	0.000E+00
2	2.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	9.000E+01
3	3.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	1.800E+02
4	4.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	2.700E+02
5	5.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	3.600E+02
6	6.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	4.500E+02
7	7.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	5.400E+02
8	8.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	6.300E+02
9	9.000E+03	2.000E-01	1.000E+00	-9.000E+01	7.200E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.828427E+02 PERCENT

**** 04/27/03 18:25:16 ***** Evaluation PSpice (Nov 1999) *****
 * D:\Doc\Rodrigo\Apostilas\fourier.sch

**** FOURIER ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(R_R1)

DC COMPONENT = -4.900000E-03

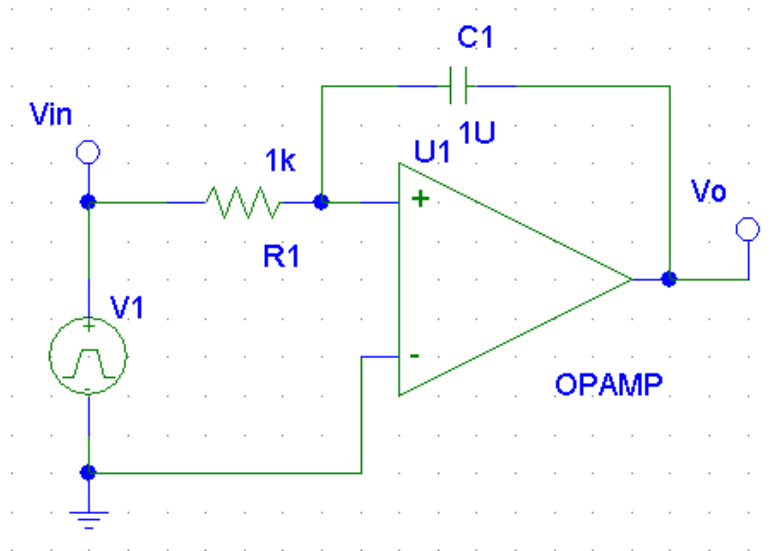
HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	FOURIER NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	0.000E+00
2	2.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-9.000E+01
3	3.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-1.800E+02
4	4.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-2.700E+02
5	5.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-3.600E+02
6	6.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-4.500E+02
7	7.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-5.400E+02
8	8.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-6.300E+02
9	9.000E+03	2.000E-04	1.000E+00	9.000E+01	-7.200E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.828427E+02 PERCENT

JOB CONCLUDED
 TOTAL JOB TIME 2.56

5.6 Integrador com Amplificador Operacional Ideal

Vamos desenhar o circuito à seguir :



Componentes (OPAMP , EGND , VPULSE , R , C , BUBBLE)

Neste circuito estamos utilizando um amplificador operacional ideal , este componente deve somente ser utilizado para fins de simulação . Seu comportamento não corresponde totalmente à realidade quando da montagem de um protótipo . Ele é muito útil devido à limitação do número de amplificadores reais que podem ser utilizados na versão estudante do PSpice , já que ele não apresenta restrições quando ao número de seu uso .

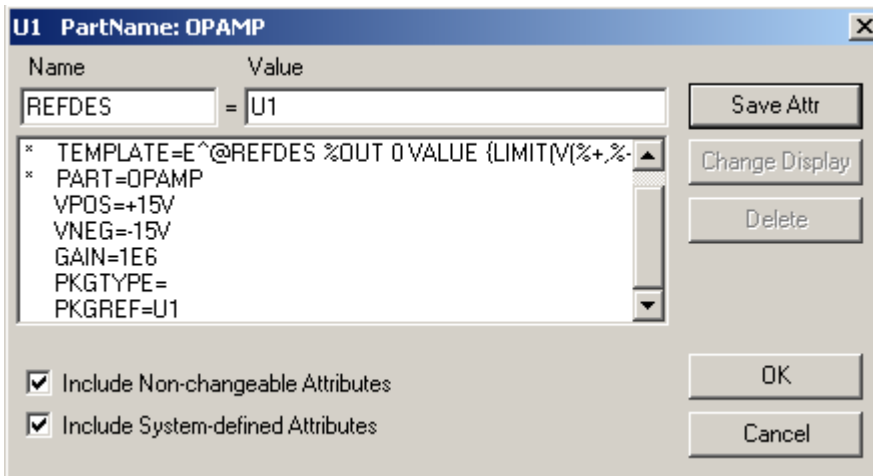
Vamos definir os parâmetros do VPULSE (Secção 5.4) :

No nosso caso , queremos uma onda quadrada de +- 10V , 1 KHz , assim :

TR=TF= 1 Us ; PER= 1ms ; PW=0.5 ms ; V1=+10 ; V2=-10 ; TD=0

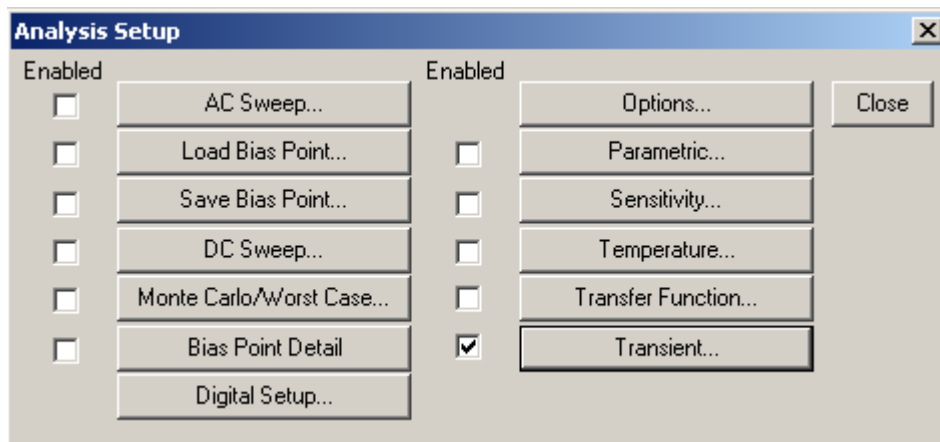
Após o ajuste dos parâmetros clique OK para sair .

Podemos definir também os parâmetros do operacional , como ganho (GAIN) e tensão de alimentação (VPOS/VNEG) :

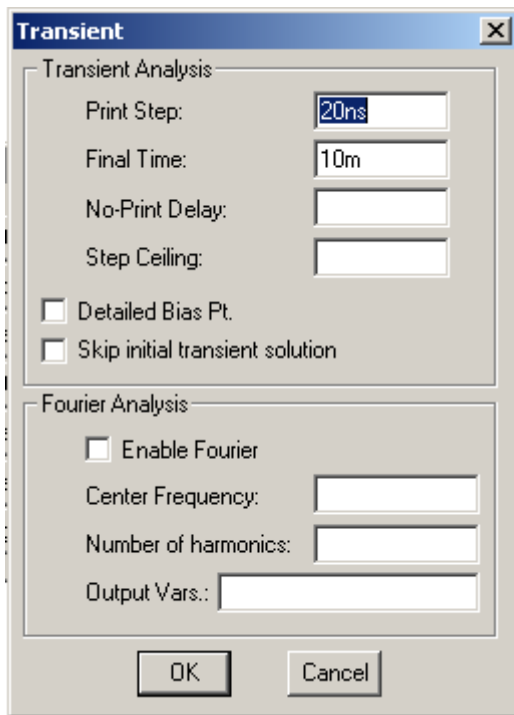


Ao definirmos os valores de alimentação do operacional ideal estamos também definindo seus valores de saturação (limite máximo e mínimo de tensão de saída) .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



A seguinte tela se abrirá :

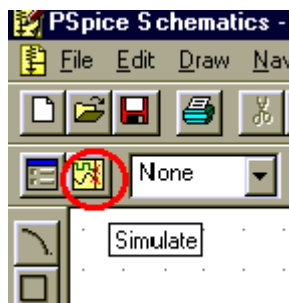


Vamos definir o passo de 20 ns
Tempo final de 10 ms

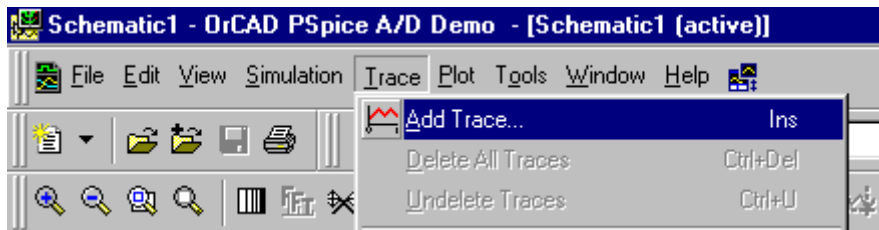
A simulação deve demorar um pouco , se
desejar uma simulação mais rápida altere
o Print Step

Feche a tela e simule .

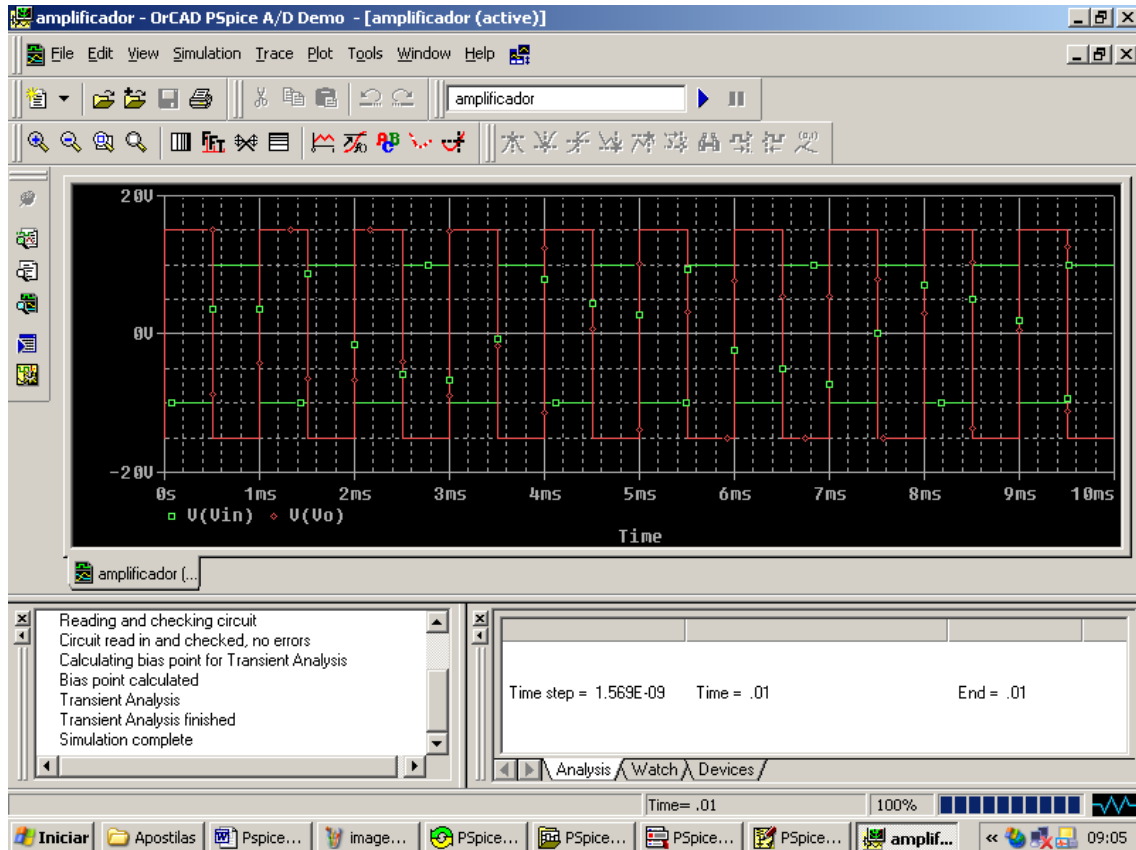
Pressione o botão **Simulate** .



Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(Vin)$ e $V(Vo)$ e confirme :



6. Digital Simulations (Simulação com Circuitos Digitais)

O PSpice pode simular circuitos puramente analógicos , puramente digitais ou uma associação de ambos . Na versão do estudante temos limitações quanto ao número de componentes e nós que podemos simular o que não permite que utilizemos circuitos muito complexos . Os circuitos digitais podem ser analisados sob qualquer tipo de simulação que já estudamos , mas geralmente nos interessamos mais pela análise transitória onde podemos observar o sinal da saída dos pinos em um determinado intervalo de tempo . Por isso vamos demonstrar a utilização dos circuitos digitais com ênfase na análise transitória (secção 5) .

6.1 Alimentação dos Sinais Digitais

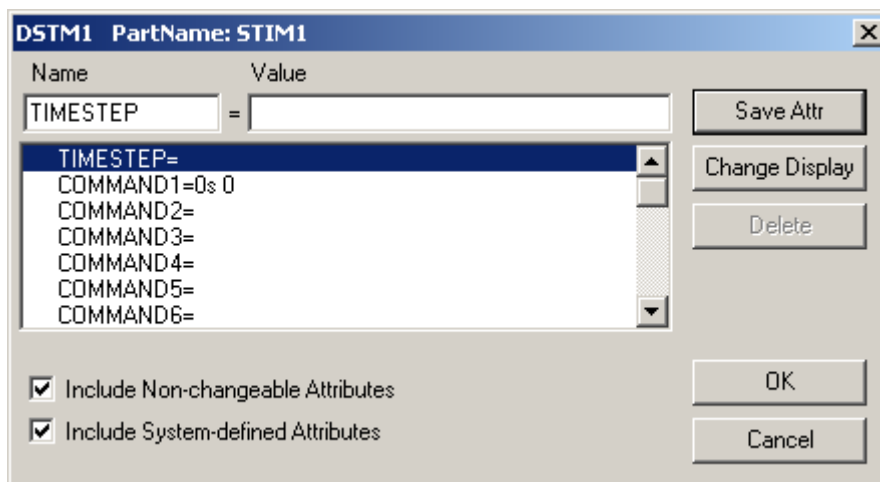
Apesar de termos que utilizar fontes analógicas para alimentar nossos circuitos digitais o PSpice faz internamente a conversão Analógico-Digital afim de providenciar um sinal digital para os componentes digitais . Essas conversões são realizadas por pequenos circuitos mas que farão que a simulação fique mais longa e que o limite de uso da versão estudante seja logo alcançado . Por isso vamos nos dedicar a conhecer fontes de alimentação digitais .

6.11 Fontes de Sinais Digitais

A fonte **STIM** nos permite definir qualquer seqüência de bits no tempo .



Ao clicarmos duas vezes sobre ela a seguinte tela se abrirá :

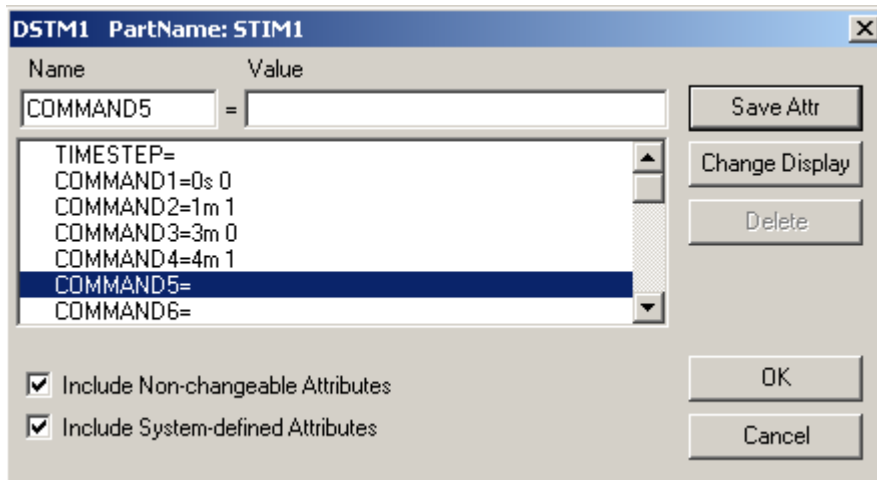


Ela nos permite definir os tempos e as amplitudes de nosso sinal , como se definíssemos a carta de tempos daquele sinal .

No nosso exemplo temos :

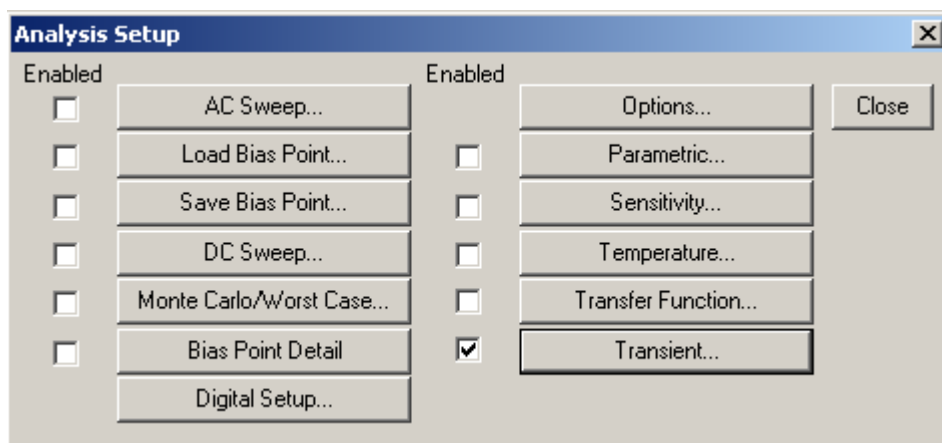


TEMPO ABSOLUTO

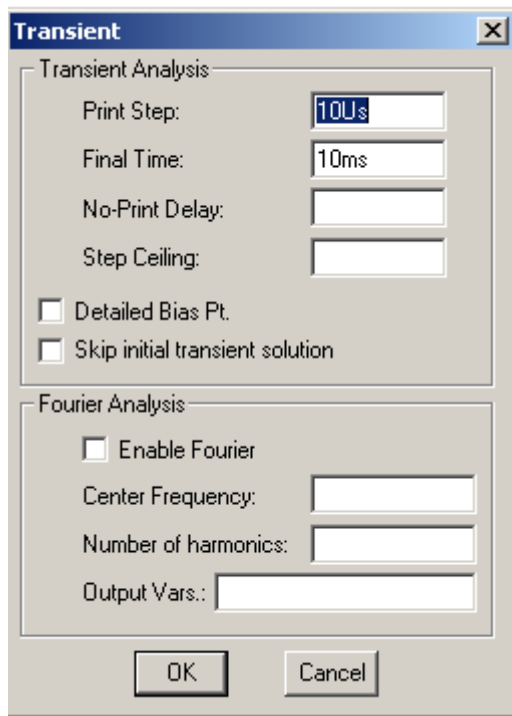


Ou seja , do tempo 0 até 1 ms teremos nível 0 , de 1m até 3ms nível 1 , de 3ms à 4 ms nível 0 e de 4ms em diante nível 1 .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .



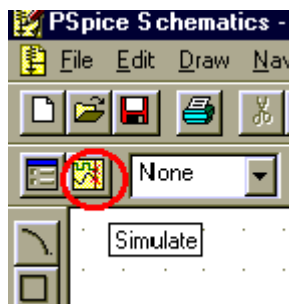
A seguinte tela se abrirá :



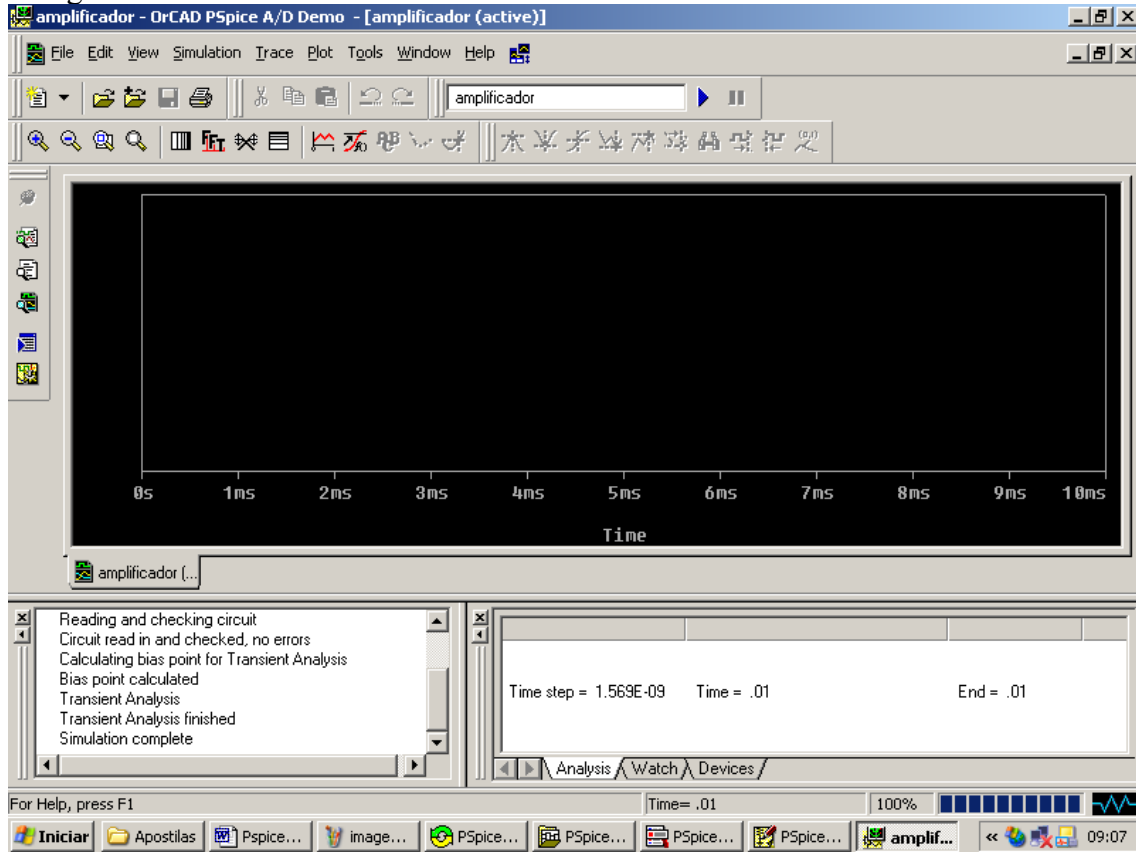
Vamos definir o passo de 10 Us
Tempo final de 10 ms

Feche a tela e simule .

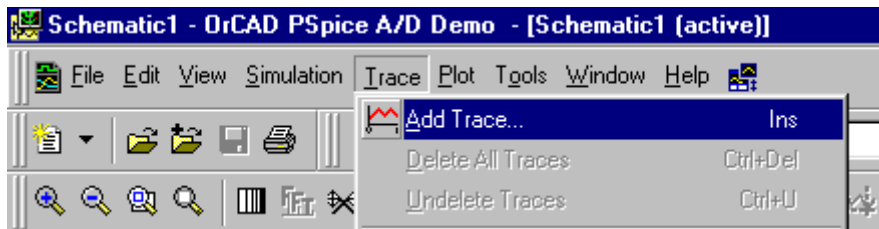
Pressione o botão **Simulate** .



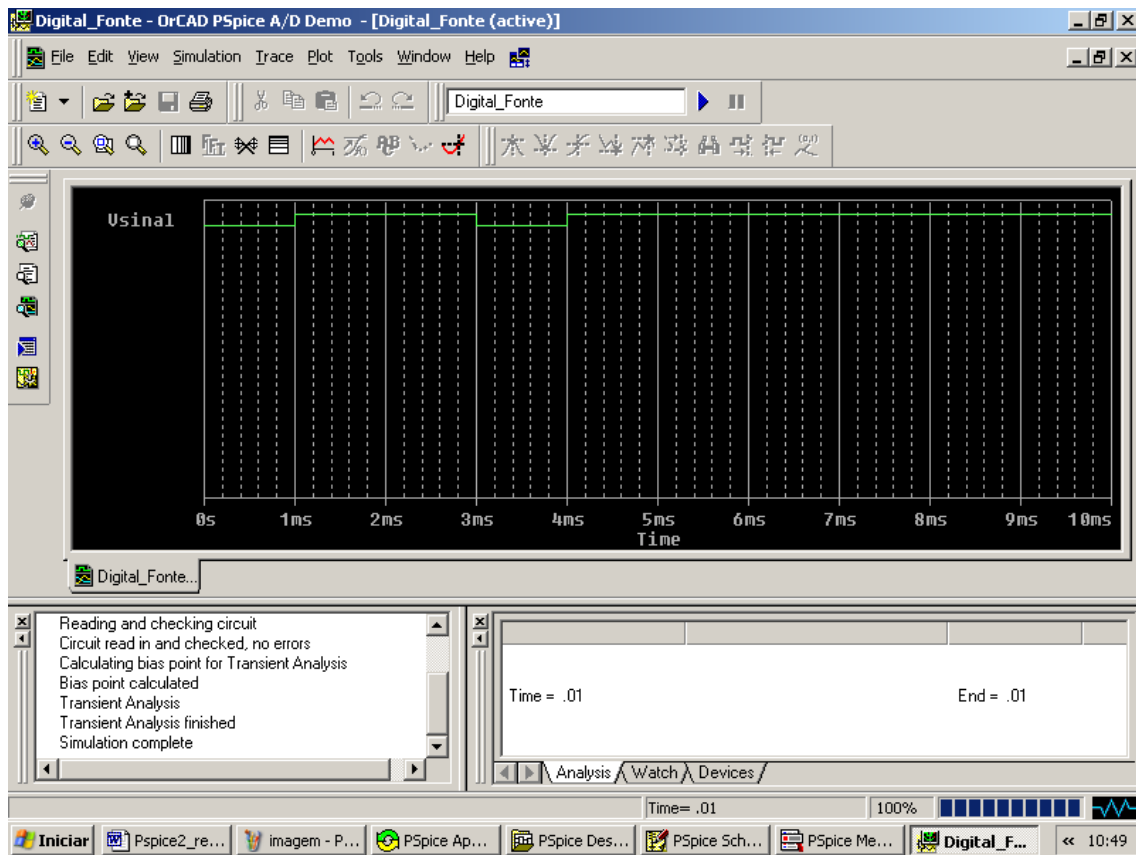
A seguinte tela se abrirá :



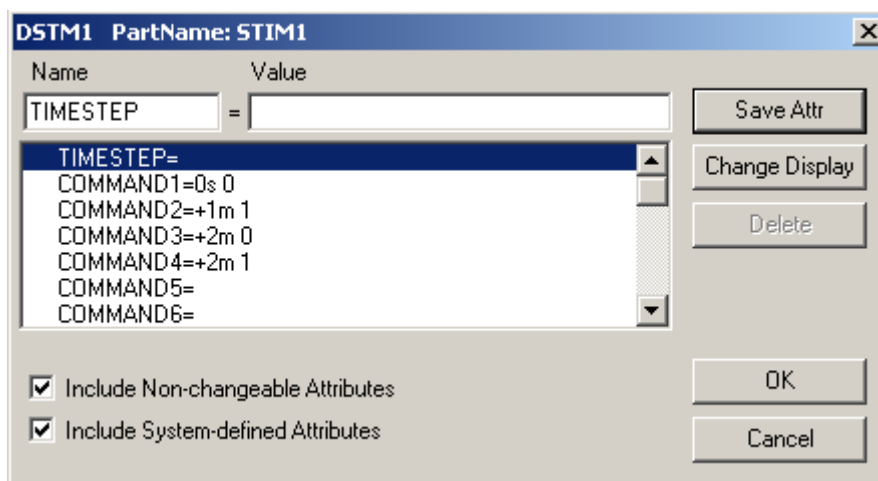
Selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão V(Vsinal) e confirme :

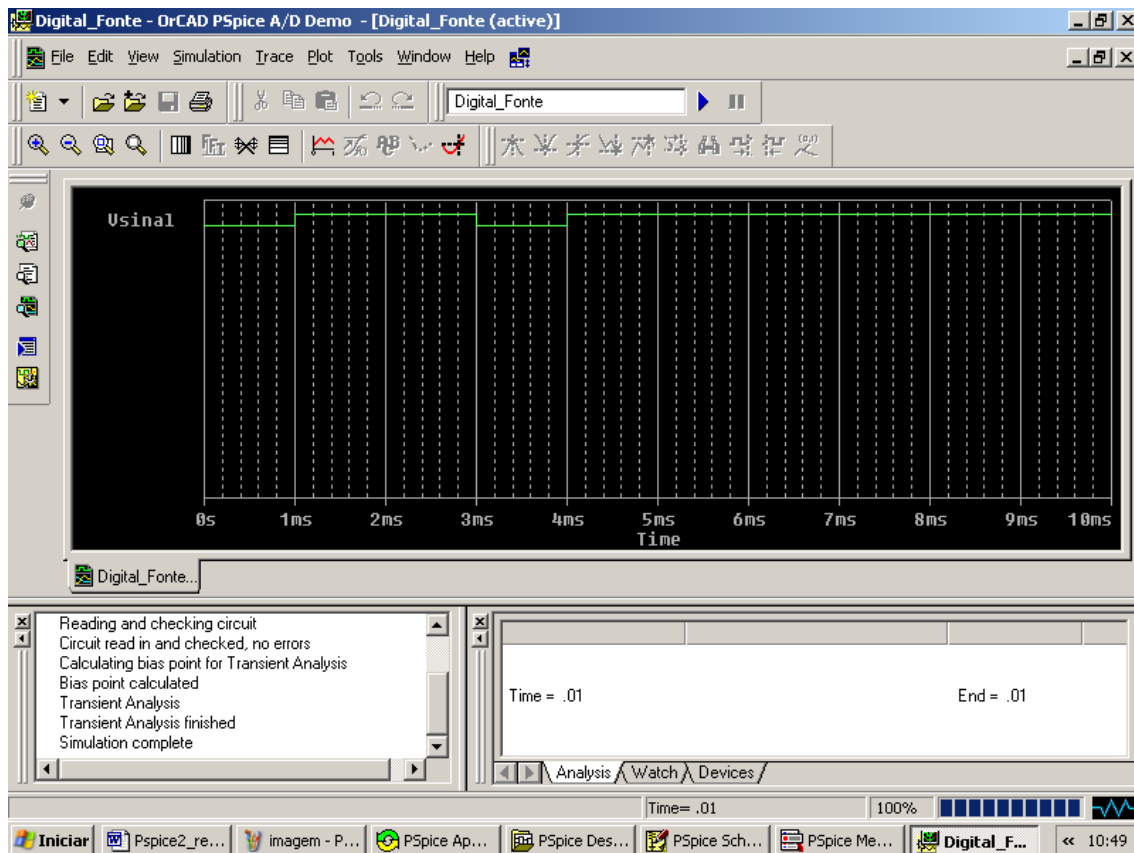


TEMPO RELATIVO



Ao configurarmos como tempo relativo , teremos os tempos sendo definimos à partir do último instante . Vamos definir a mesma forma de onda do exemplo anterior utilizando tempo relativo . O sinal permanece em zero no instante inicial até 1 ms , mudando para o nível 1 , permanece lá por 2ms e muda para o nível 0 , permanece por 2ms e muda para o nível 1 onde fica pelo restante do tempo .

Procedemos da mesma forma para plotar o sinal de V(Vsinal) .

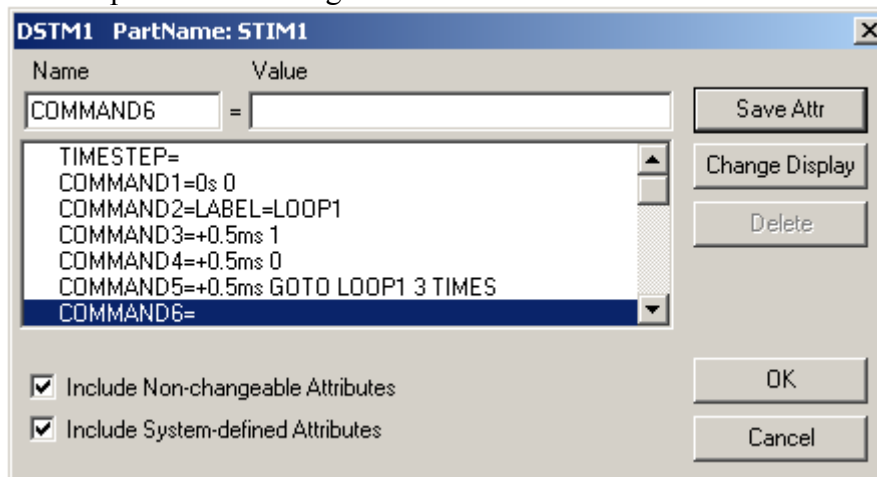


REPETIÇÃO DE LOOPS

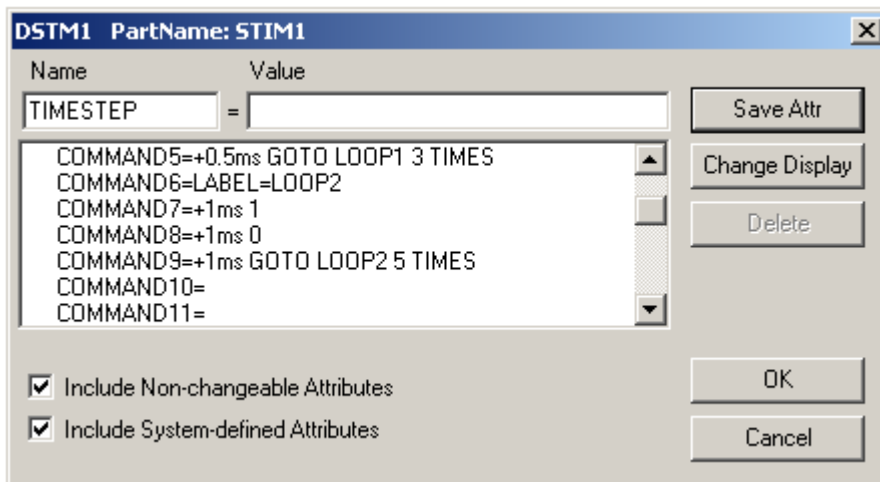
Como muitos sinais são periódicos um comando chamado **GOTO** é utilizado para termos o looping do sinal .

Vamos demonstrá-lo produzindo um sinal de clock de 1kHz por quatro pulsos de clock e um sinal de 500 Hz por seis pulsos de clock :

Vamos definir os parâmetros da seguinte maneira :

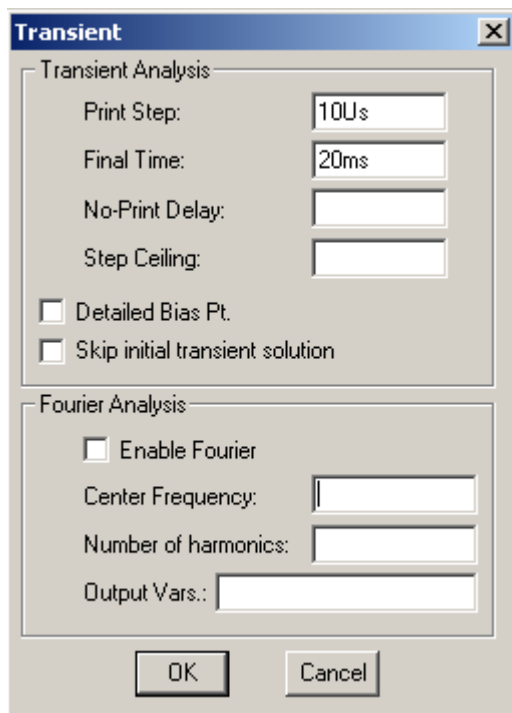


Como não é possível demonstrar todos os parâmetros em uma única imagem vamos continuar sua edição em outra imagem :



Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .

A seguinte tela se abrirá :

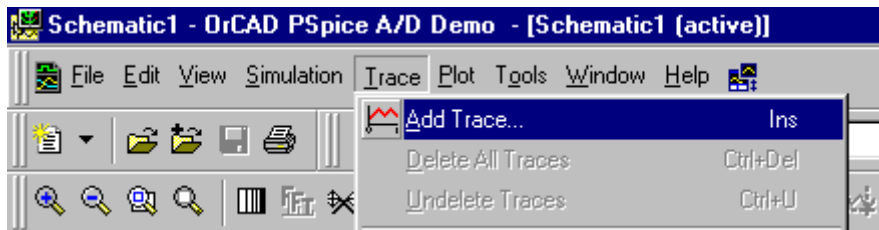


Vamos definir o passo de 10 Us
Tempo final de 20 ms

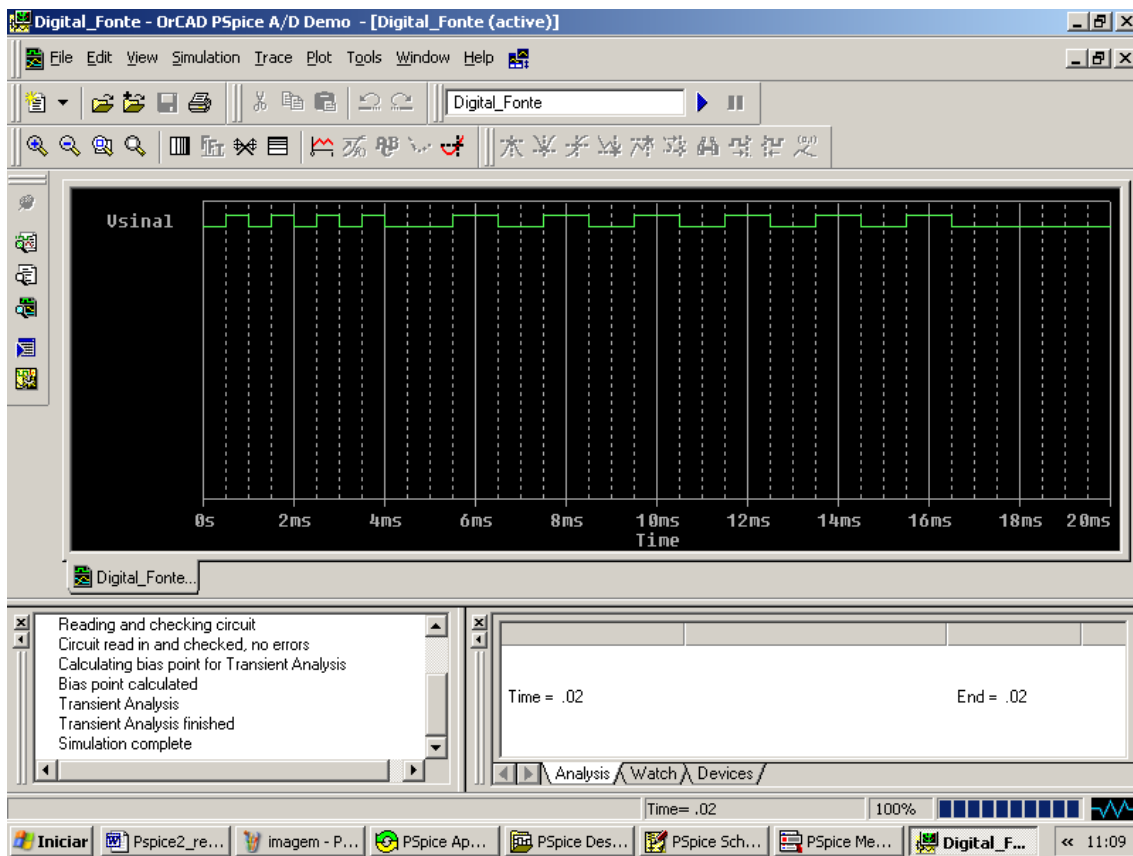


Feche a tela e simule .Pressione o botão **Simulate** .

A tela do Probe (Gráfica) se abrirá , selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão V(Vsinal) e confirme :

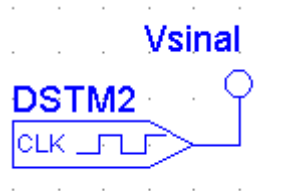


Se desejarmos que um loop de um pulso se repita indefinidamente use “-1” para o número de vezes que o loop deve ser repetido :

COMMAND9 = +1ms GOTO LOOP2 -1 TIMES

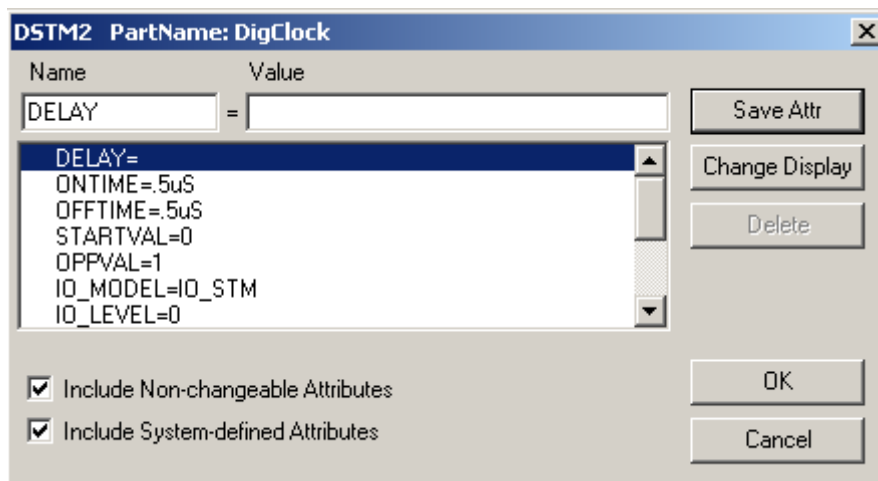
6.1.2 Digital Clock (Clock Digital)

Se quisermos utilizar um clock com uma frequência constante , um componente chamado **DigClock** é utilizado :



Este componente nada mais é do que um caso particular do componente STIM visto na secção anterior .

Ao clicarmos duas vezes sobre ela a seguinte tela se abrirá :



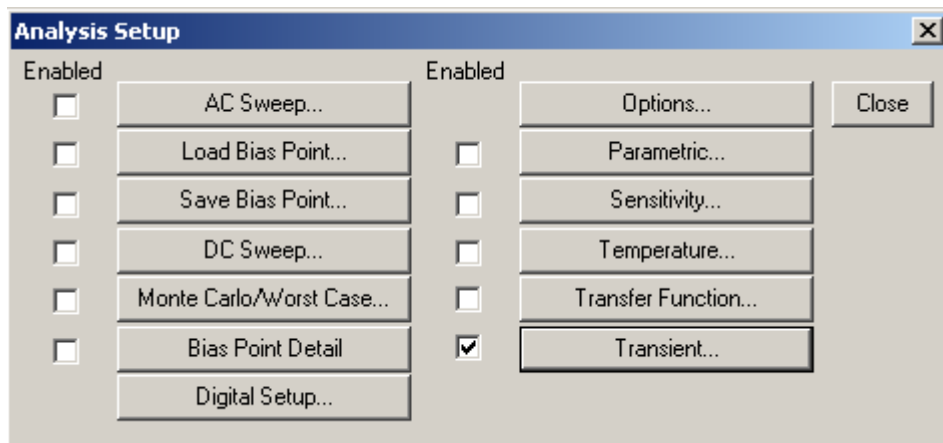
Os atributos são :

- DELAY : define o tempo de espera do sinal em zero até começarem os pulsos
- ONTIME : define o tempo em que o sinal ficará em nível alto (1)
- OFFTIME : define o tempo em que o sinal ficará em nível baixo (0)
- STARVAL : se 0 permite o funcionamento do clock , se 1 desabilita o clock e o deixa em nível alto
- OPPVAL : se 1 permite o funcionamento do clock , se 0 desabilita o clock e o deixa em nível baixo

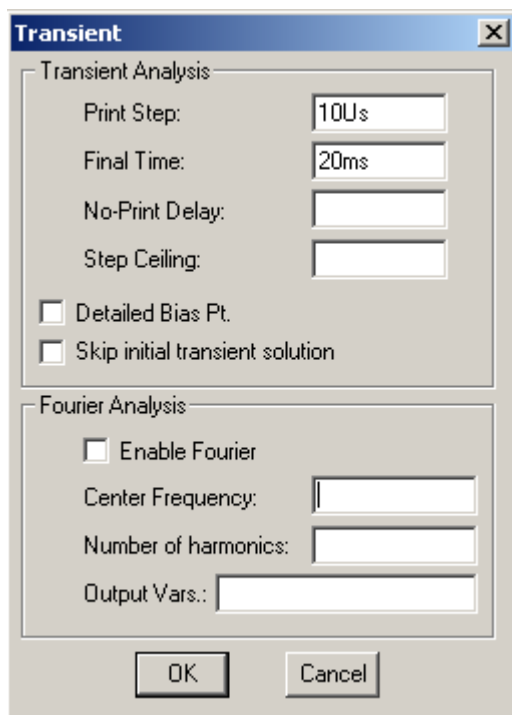
No nosso exemplo , queremos um sinal de 1kHz com tempo de espera de 0.5 ms , definimos : DELAY= 0.5ms ; ONTIME = 0.5 ms ; OFFTIME =0.5 ms ; STARVAL=0 e OPPVAL=1 . Clique ok para confirmar e sair .

Observe que a onda não necessariamente tem que ser quadrada podendo assumir também a forma retangular .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .

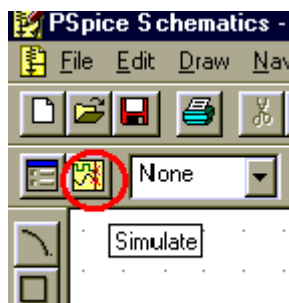


A seguinte tela se abrirá :

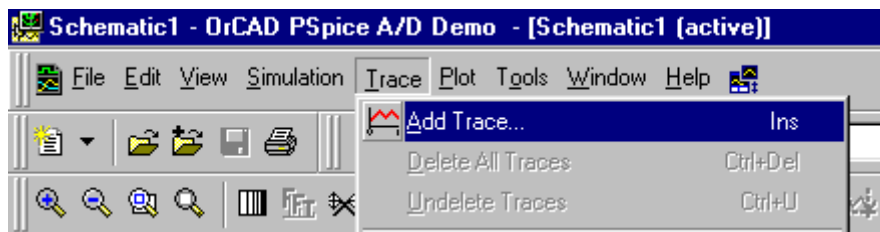


Vamos definir o passo de 10 Us
Tempo final de 20 ms

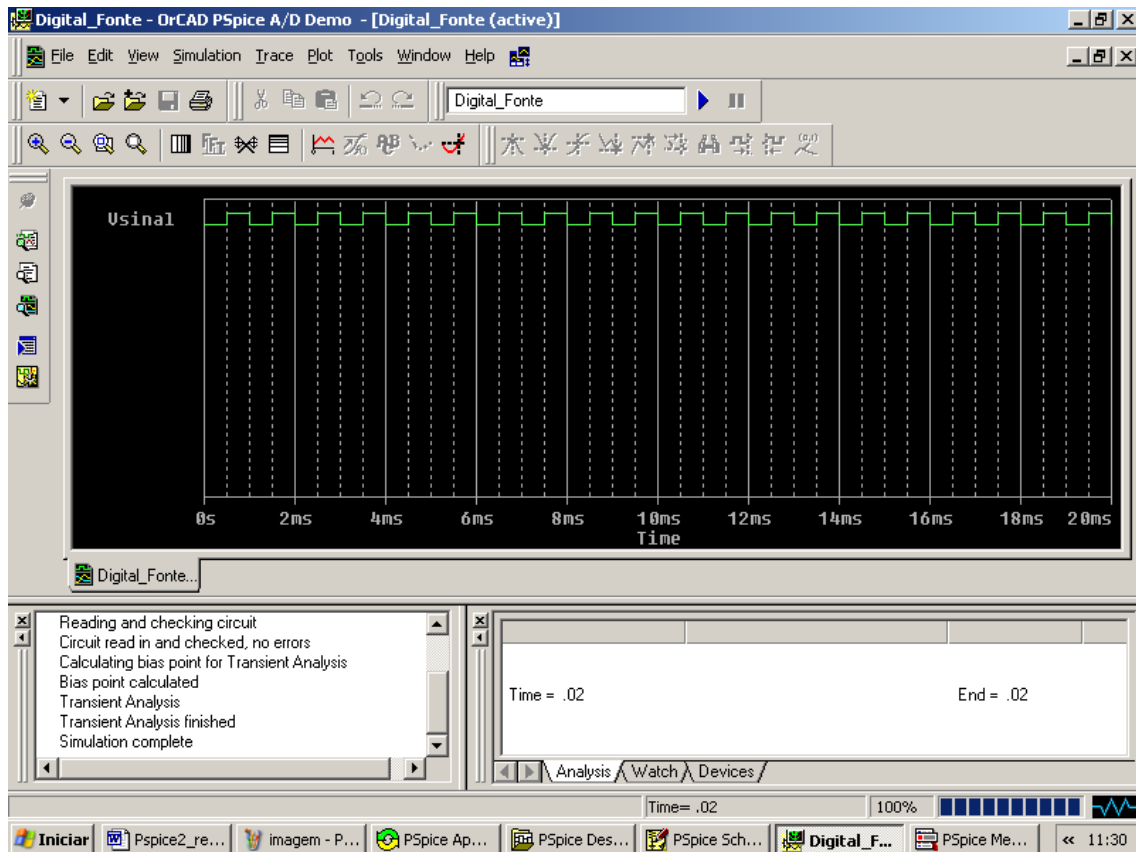
Feche a tela e simule .
Pressione o botão **Simulate** .



A tela do Probe (Gráfica) se abrirá , selecione no Menu **Trace > Add Trace**

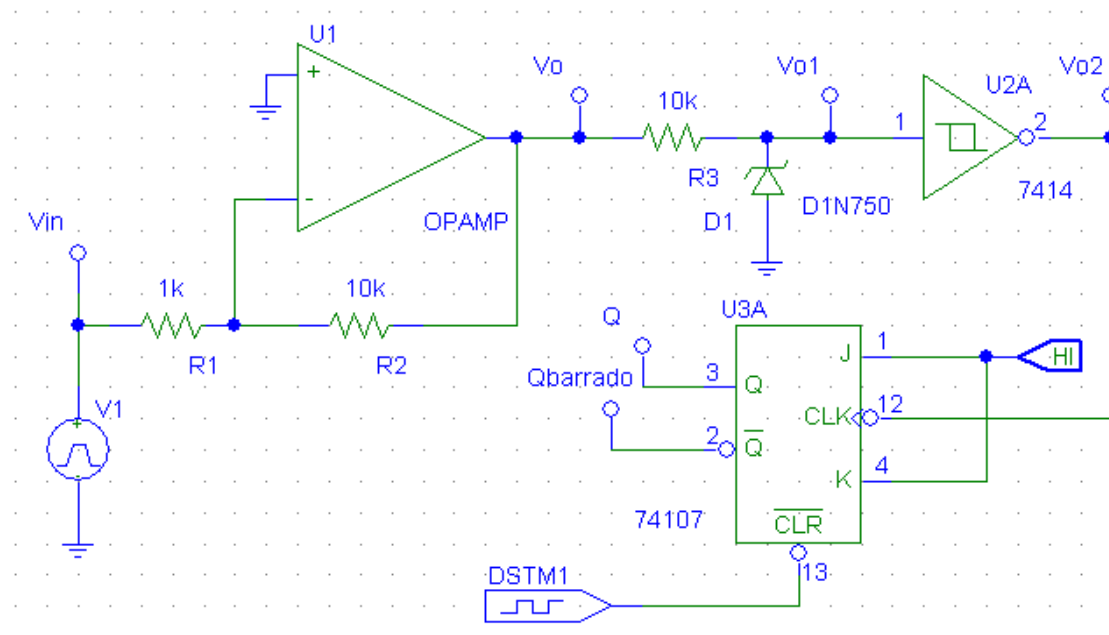


Selecione a tensão V(Vsinal) e confirme :



6.2 Utilizando ao mesmo tempo componentes analógicos e digitais

Vamos desenhar o circuito abaixo de um amplificador operacional que proporciona o clock de um flip-flop J-K :

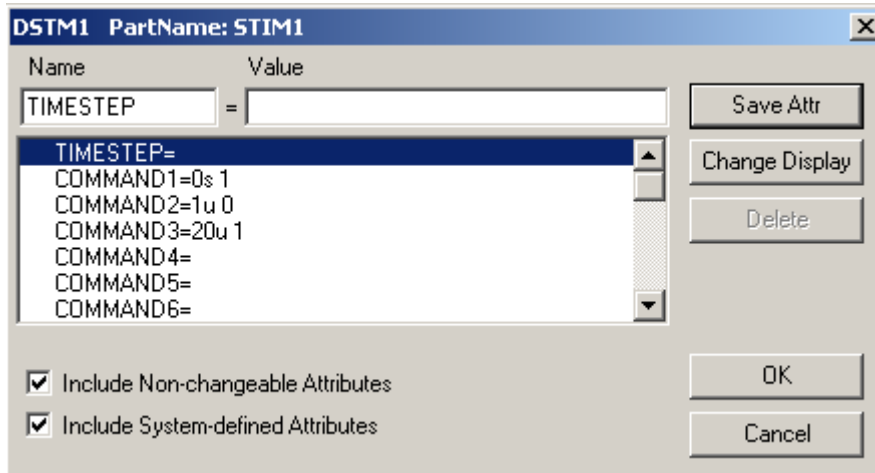


Componentes (VPULSE ; BUBBLE ; EGND ; STIM1 ; OPAMP , R , D1N750 ; 7414 ; 74107 ; HI)

Todos os circuitos seqüenciais lógicos que possuem a função clear devem ter seus estados lógicos iniciais definidos antes de simularmos o circuito .

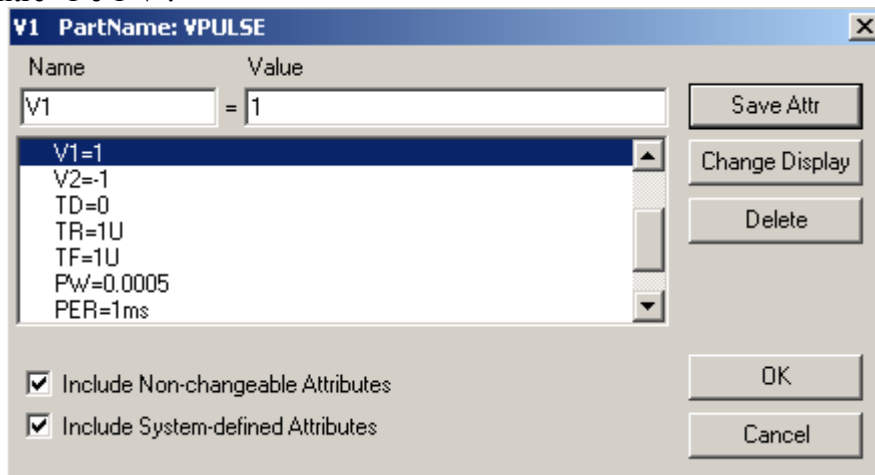
Se não definirmos o estado inicial dos circuitos seqüenciais lógicos o PSpice não saberá qual estado inicial deve ser simulado , como o estado inicial é indefinido ele não poderá simular os estados seguintes .

O sinal digital está configurado da seguinte maneira :

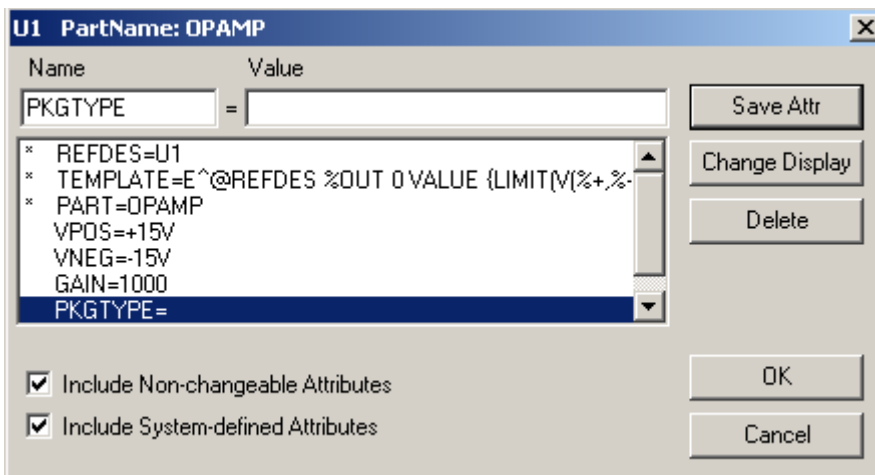


O clear do flip-flop terá o estado inicial nulo no tempo definido entre 0 e 20 us , permanecendo em nível lógico 1 após este tempo .

A tensão pulsada VPULSE será definida como uma onda quadrada de 1kHz com tensões entre -1 e 1 V :



O amplificador operacional tem um ganho definido pelos resistores de 10 vezes e produz uma tensão quadrada de +- 10V em 1kHz no bubble Vo .

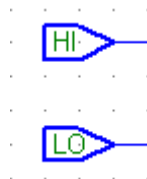


A forma de onda será ceifada por um diodo zener que limita a tensão no bubble Vo1 .

Esta tensão é compatível com o nível TTL do 7414 . A saída do Schimit-Trigger deve ser uma onda quadrada de 0 à 5 V com frequência de 1 kHz (Vo2) .

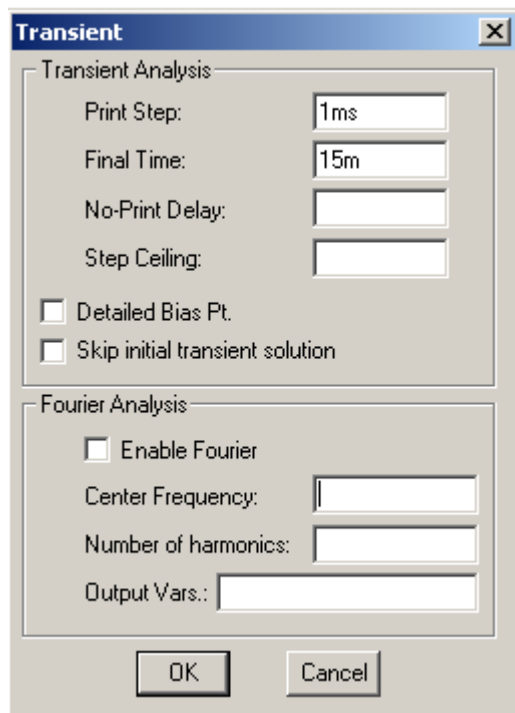
O flip-flop está funcionando como um divisor por 2 (as entradas (J=K=1) são definidas por um componente chamado **HI** que insere um nível lógico alto nas entradas) , assim as saídas Q e Qbarrado devem estar com frequência de 500 Hz e defasadas de 180° .

Se quiséssemos um nível lógico baixo podemos utilizar o componente **LO** .



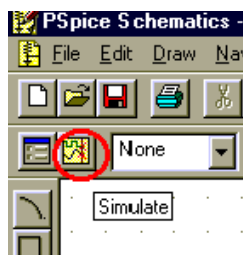
Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Transient** .

A seguinte tela se abrirá :

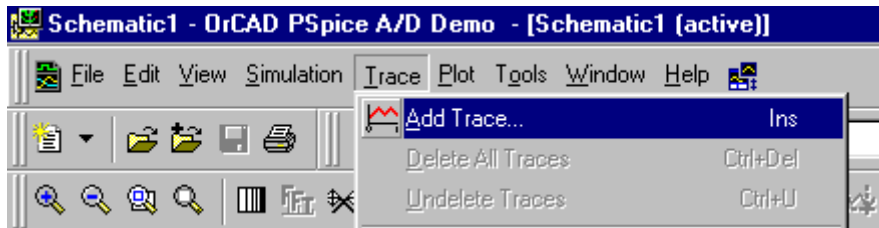


Vamos definir o passo de 1ms
Tempo final de 15 ms

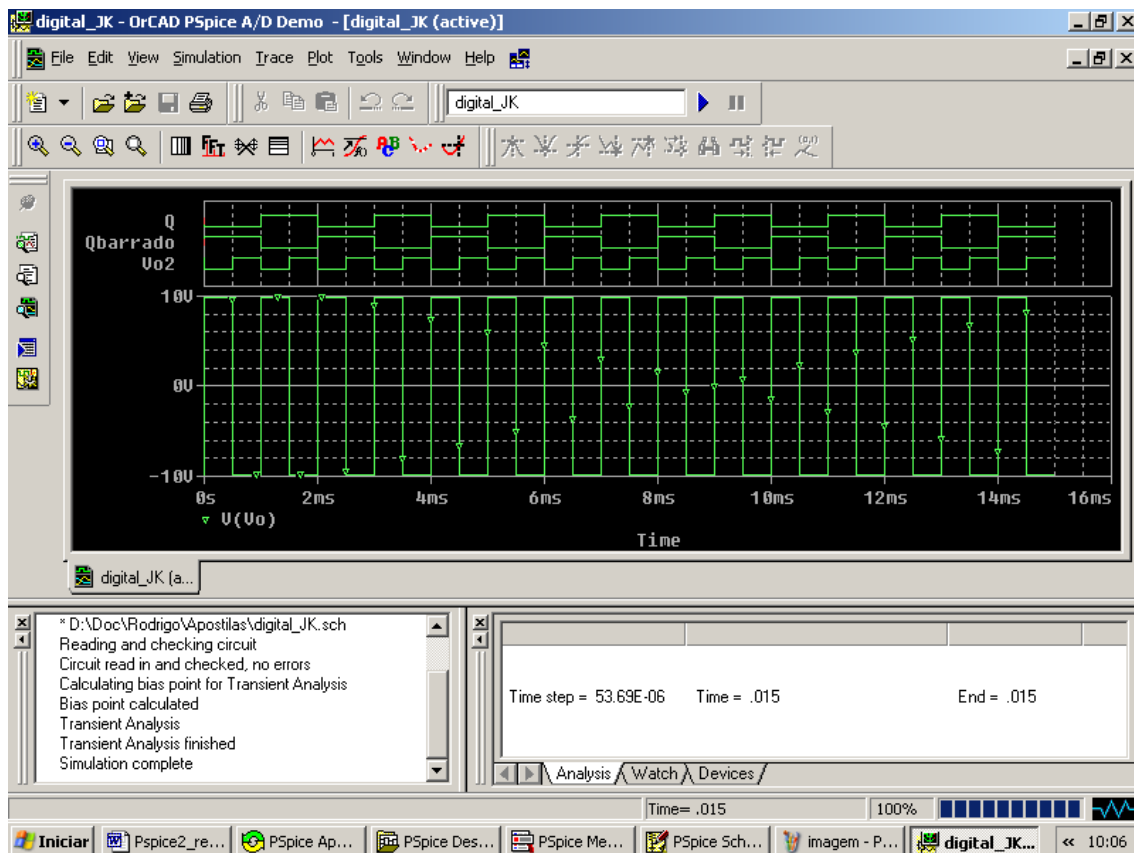
Feche a tela e simule .
Pressione o botão **Simulate** .



A tela do Probe (Gráfica) se abrirá , selecione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão $V(V_o)$, V_o2 , Q e $Q_{barrado}$ e confirme :



Os sinais digitais são dispostos em um gráfico separado dos sinais analógicos , mas ambos dividem a mesma escala de tempos .

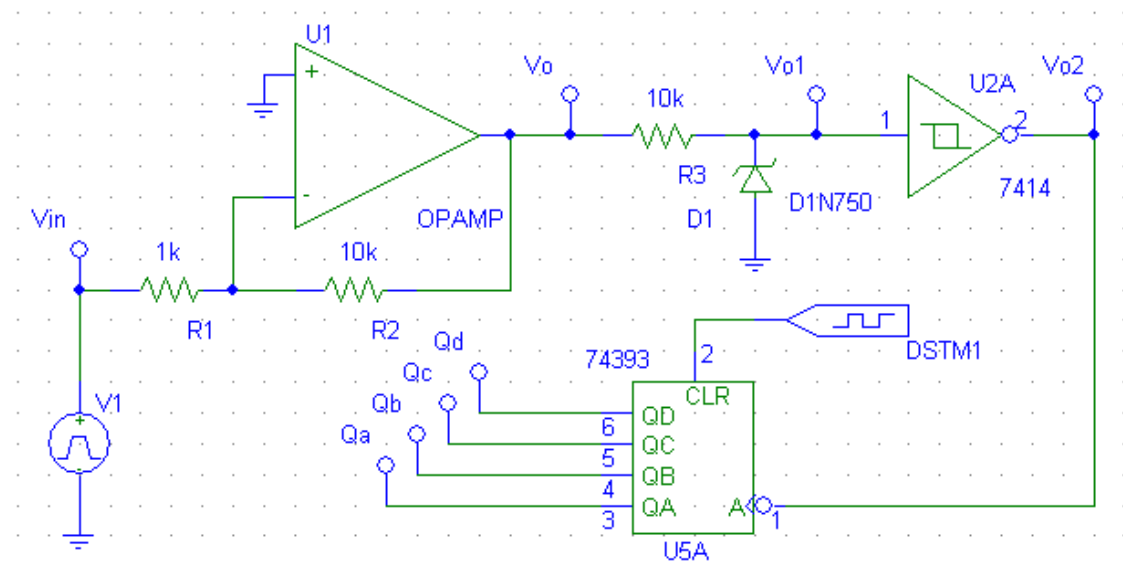
6.2.1 Contador

Vamos simular o circuito de um contador :

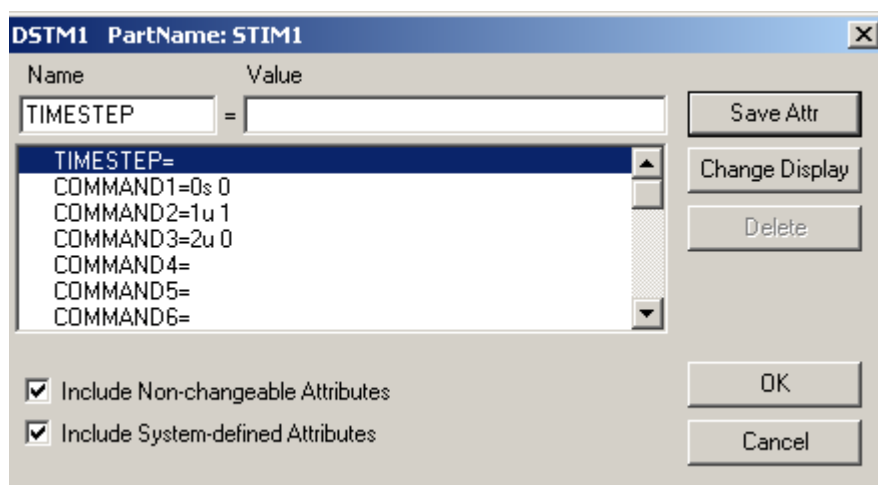
O 74393 é um contador binário de 0 à 15 :

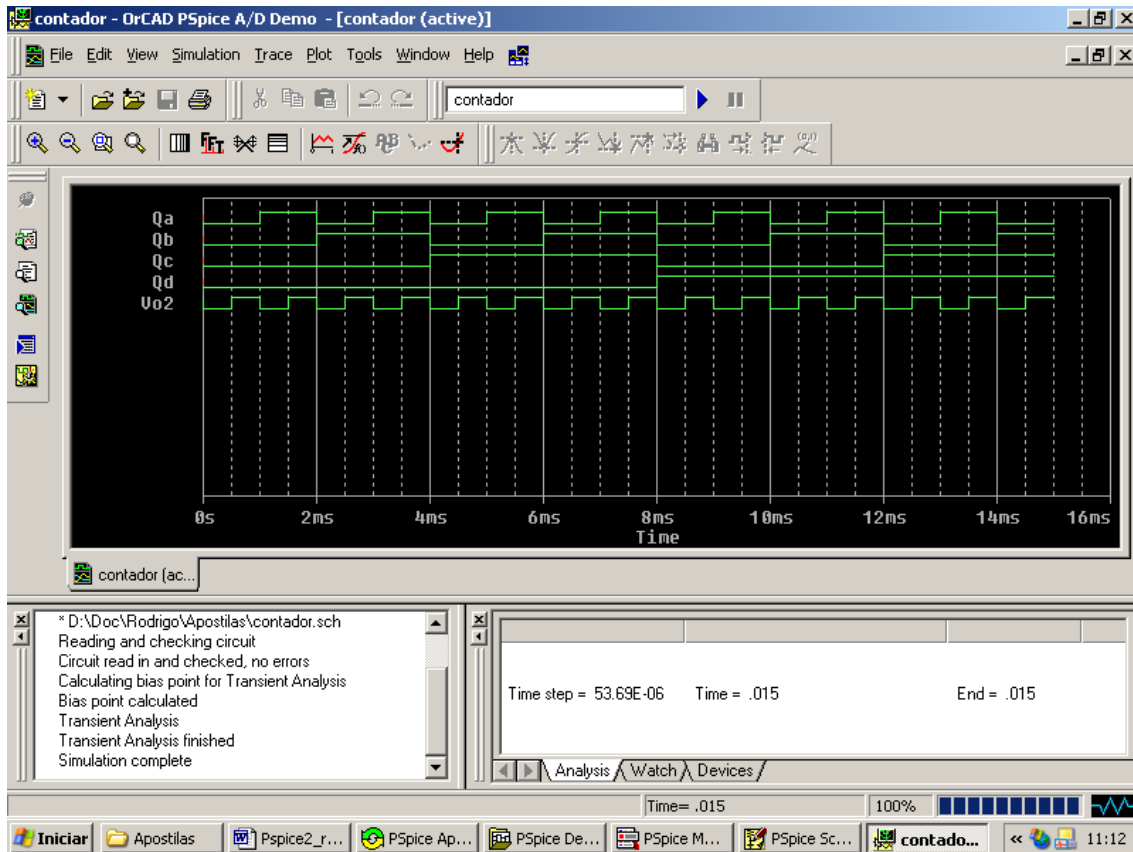
CLR CLK | Qd Qc Qb Qa

1 X | 0 0 0 0
0 POS | Count
0 POS | Count



As configurações do operacional , do VPULSE e da análise transitória seguem os mesmos valores do item anterior 6.2 , sendo que a única mudança foi no sinal digital STIM :





Observe que nos esquemas , não aparecem os pinos de alimentação das portas lógicas , pois o PSpice providencia um circuito para sua alimentação mas não o mostra afim de não tumultuar a visualização dos circuitos na tela .

Em muitos casos temos pinos de componentes que não serão utilizados , o PSpice necessita que todos os pinos estejam conectados , assim , para pinos que não serão utilizados , basta conectá-los ao componente NC (not connected) .

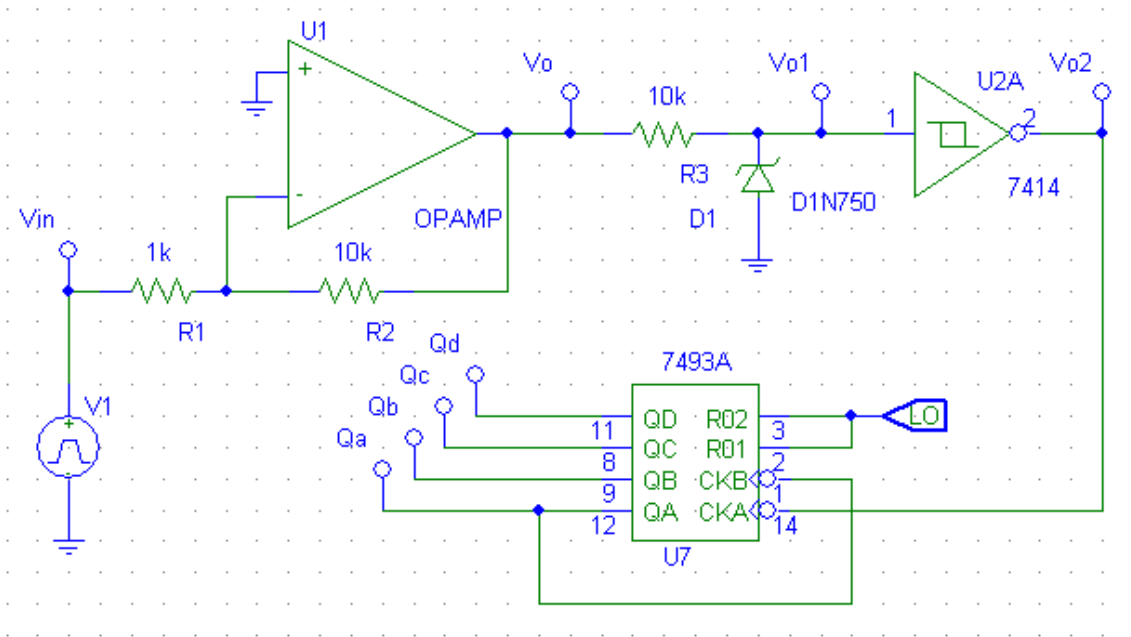
Vamos fazer um outro exemplo :

Contador Binário com o 7393 :

RO1 RO2 | Qd Qc Qb Qa

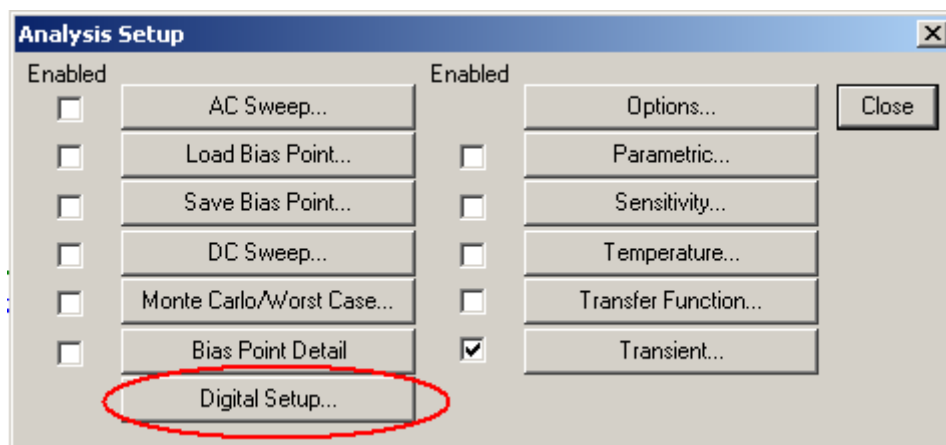
1	1		0	0	0	0
0	X		Count			
X	0		Count			

As configurações do operacional , do VPULSE e da análise transitória seguem os mesmos valores do item anterior 6.2.1 .

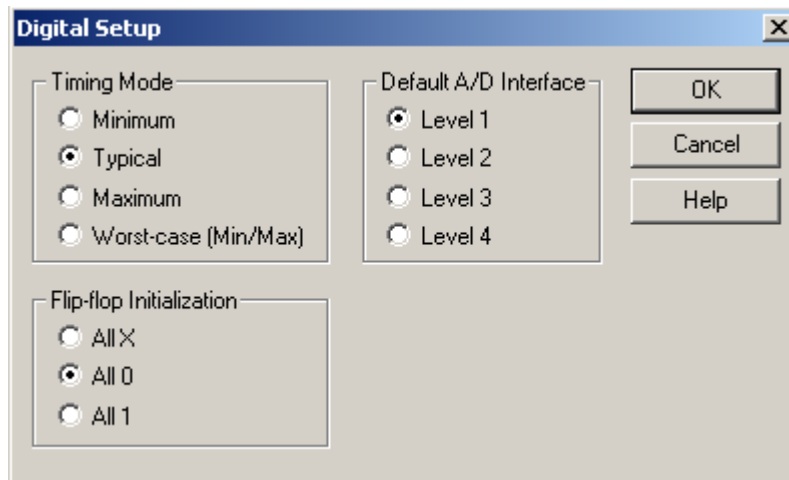


Observe que este componente (7493) não possui Clear ou Preset , mas temos que definir qual o estado inicial dos seus flip-flops internos .

Vamos agora ao menu **Analysis > Setup** , pressione o botão **Digital Setup** :

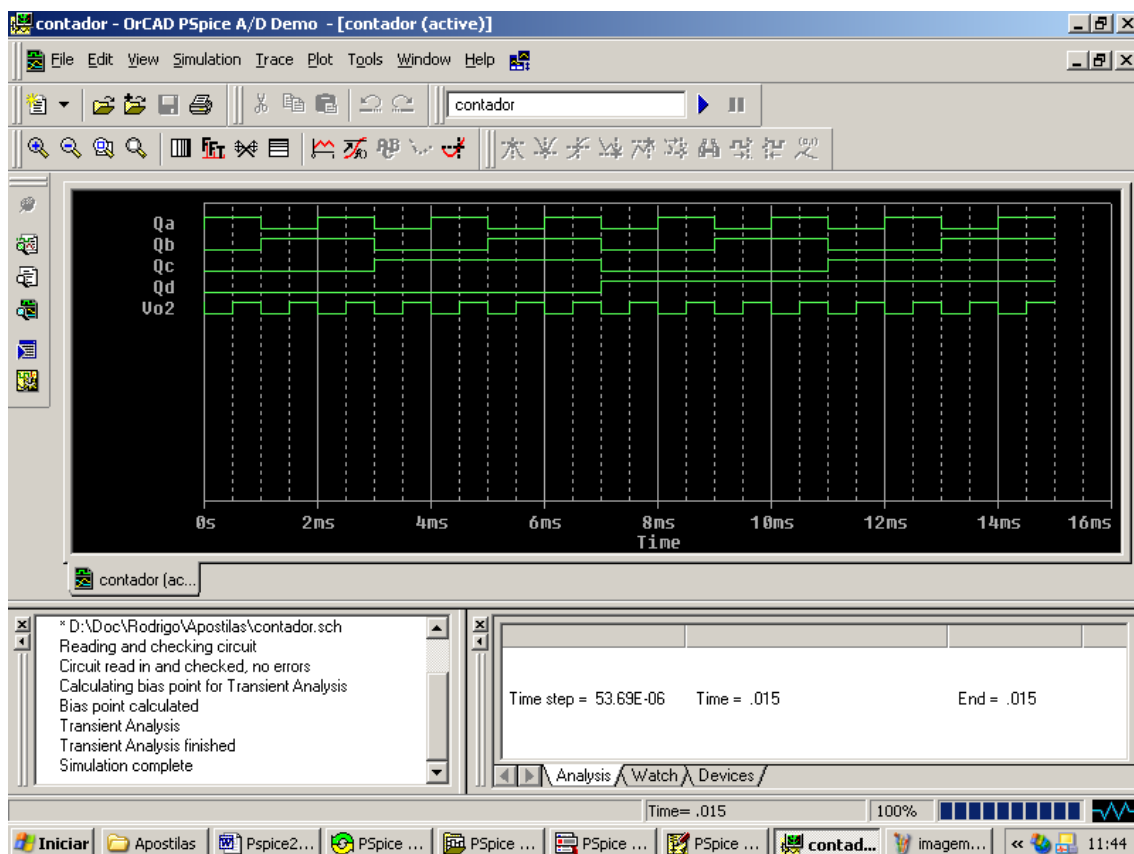


A seguinte tela se abrirá :



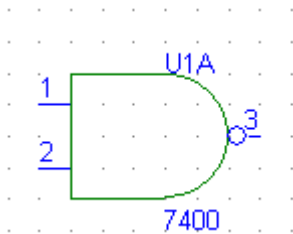
Nela podemos definir qual o estado inicial dos flip-flops ([All 0] Todos 0 ; [All 1] Todos 1 ; [All X] Indefinido) .

Depois é só simular normalmente assim como nos casos anteriores .



6.3 Observações

Quando inserirmos um componente digital temos que tomar um certo cuidado . Vamos exemplificar inserindo um componente 7400 :



Ao inserirmos novamente o mesmo componente o PSpice mantém a mesma pinagem mudando a numeração como se fosse um novo componente :

como queremos que seja utilizado ainda o mesmo circuito integrado visto que o mesmo possui 4 portas lógicas internas vamos renomear a porta lógica dando um duplo clique sobre sua referência **U1A (figura1)** :

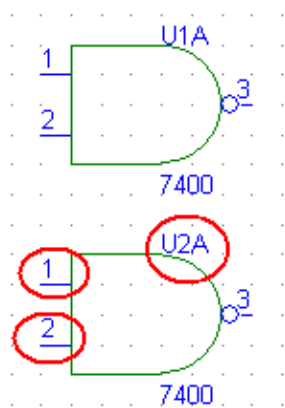


figura 1

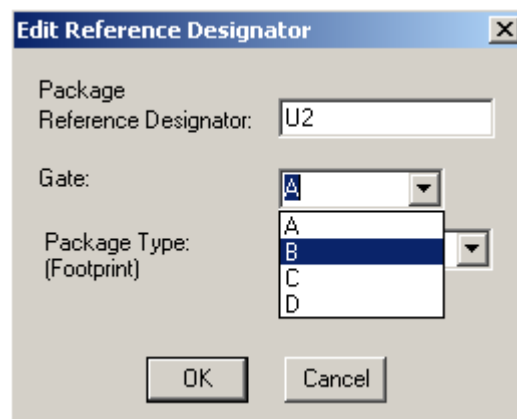


figura 2

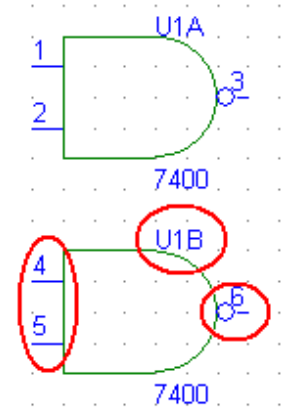


figura 3

Agora basta mantermos a mesma referência mudando U2 para U1 e alterando o Gate (pinos) para B (figura 2) , assim teremos a numeração do segundo conjunto de pinos do CI (figura 3) e assim por diante se quisermos outras portas lógicas basta alterar para C e D .

7. Monte Carlo Analyses (Análise do Pior Caso)

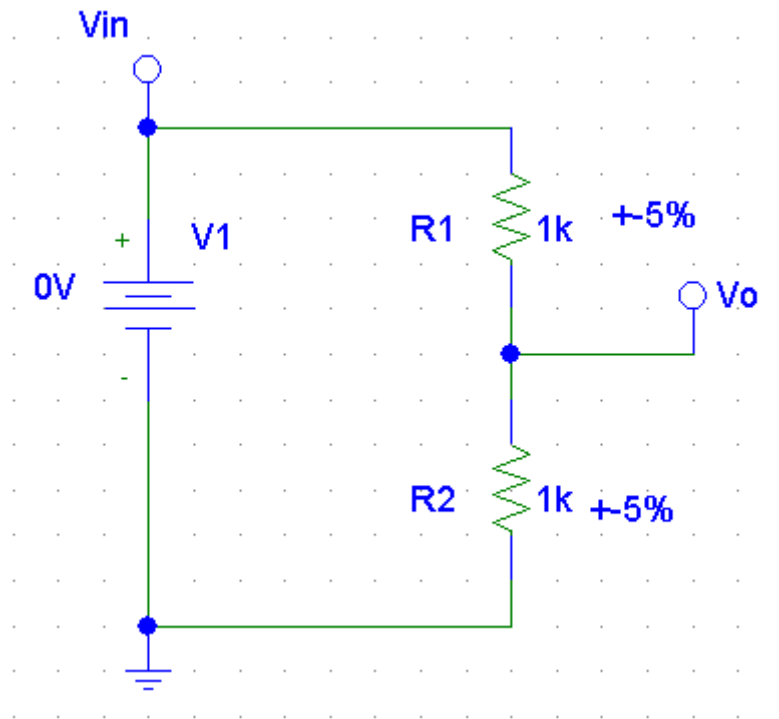
As análises Monte Carlo são utilizadas para observar como as tolerâncias dos componentes podem afetar o desempenho do circuito . A análise do pior caso é utilizada para encontrar os valores máximos e mínimos de um parâmetro dada as tolerâncias dos componentes . A análise do pior caso demonstra estatisticamente qual a probabilidade de uma dada situação .

A análise somente pode ser executada quando temos fontes cujos parâmetros são variáveis em amplitude ou frequência (**DC Sweep / AC Sweep / Transient**) .

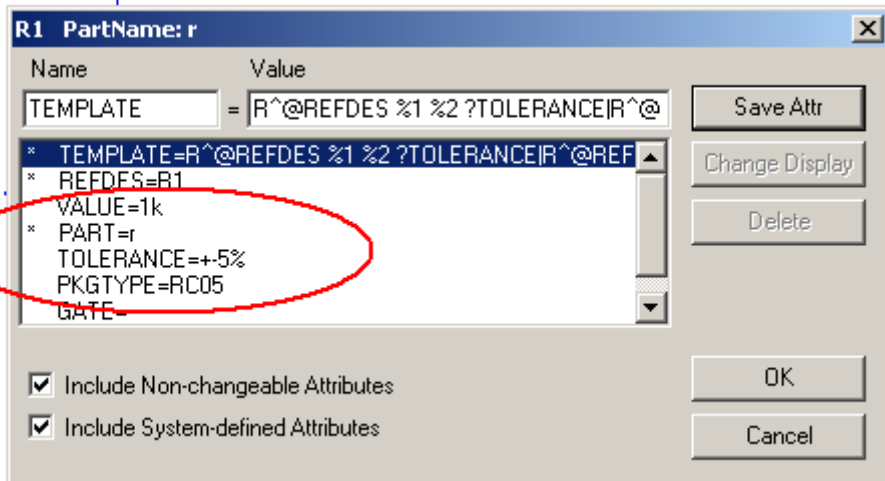
7.1 Análise do Pior no Divisor de Tensão

Vamos utilizar como exemplo um divisor de tensão como o desenho abaixo :

Componentes (VDC , BUBBLE , R , EGND)



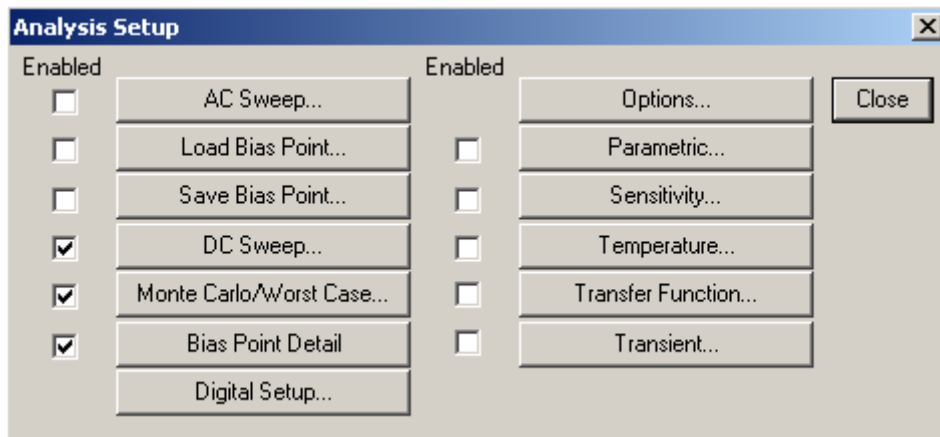
Para definirmos a tolerância absoluta dos resistores , basta dar um duplo clique sobre cada um deles . A seguinte tela se abrirá :



No parâmetro tolerância , definimos a percentagem de variação do valor total do resistor . Clique OK para sair .

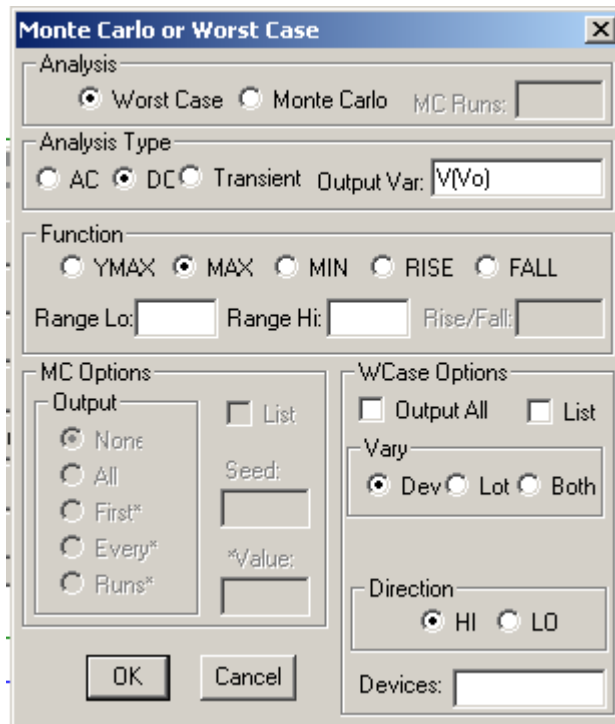
Muitos dos componentes do PSpice já possui o campo TOLERANCE para ser preenchido .

No menu **Analyses > Setup** definimos as condições da variação e qual variável será análise no menu **Monte Carlo/Worst Case** :

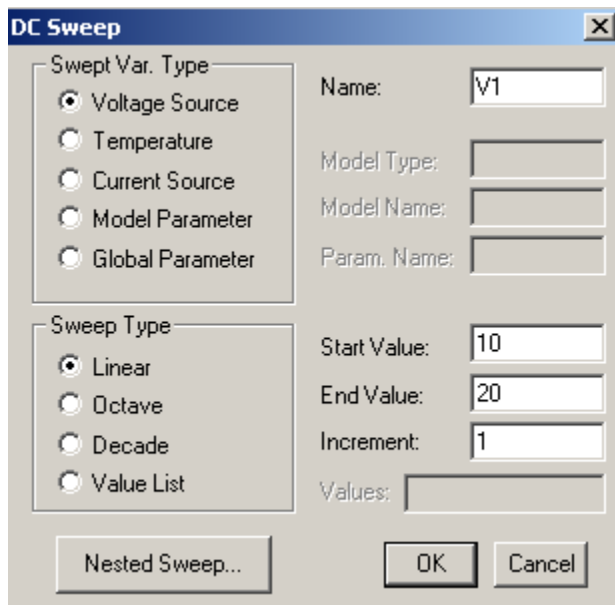


Nós queremos determinar qual o pior caso para o ganho máximo , desde que o ganho é dado por V_o/V_{in} e V_{in} varia de 10 V à 20 V com incremento de 1 V de amplitude , a amplitude do ganho é exatamente o valor de V_o/V_{in} .

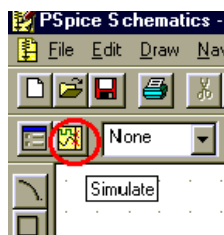
A análise será do pior caso (**Worst Case**) . A análise será feita em DC porque queremos determinar qual o ganho em DC do circuito . A variável de saída (output var) que queremos monitorar é a tensão $V(V_o)$. Como queremos à máxima variação escolhemos **MAX** .



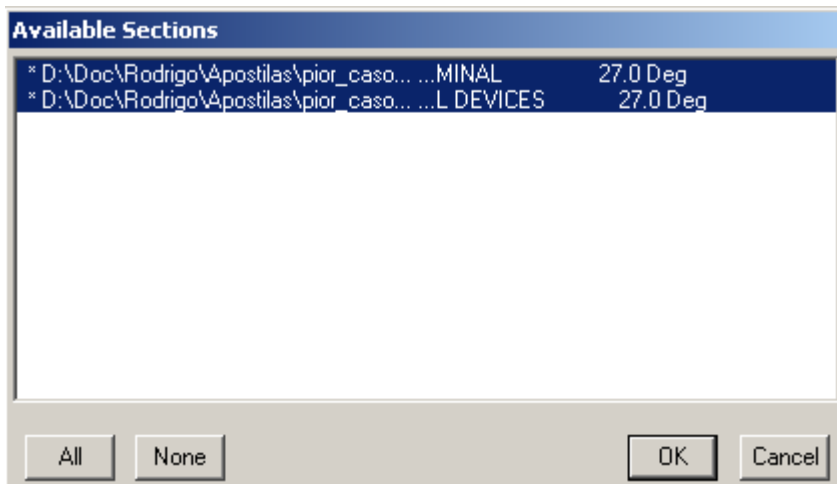
Vamos definir a variação da fonte VDC :



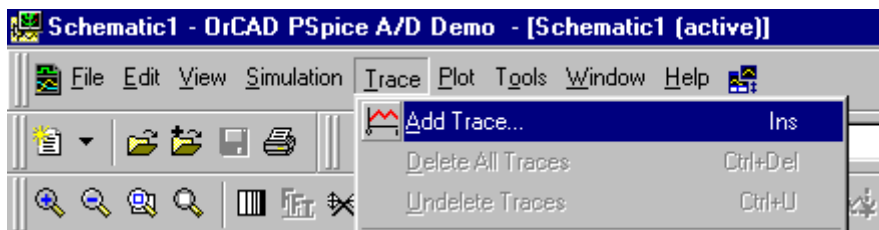
Feche a tela e simule .
 Pressione o botão **Simulate** .



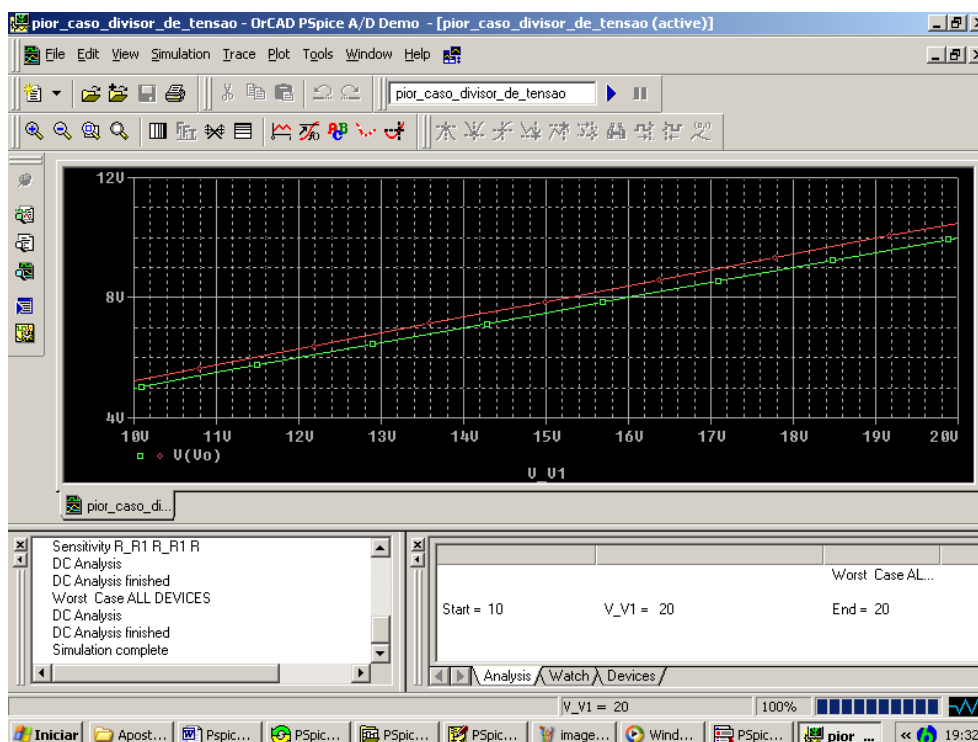
A tela do Probe (Gráfica) se abrirá , onde podemos escolher qual as características das variações queremos plotar (nominal [MINAL] e pior caso [L DEVICES]), no nosso caso são todas (All) . Clique ok para sair .



seleccione no Menu **Trace > Add Trace**

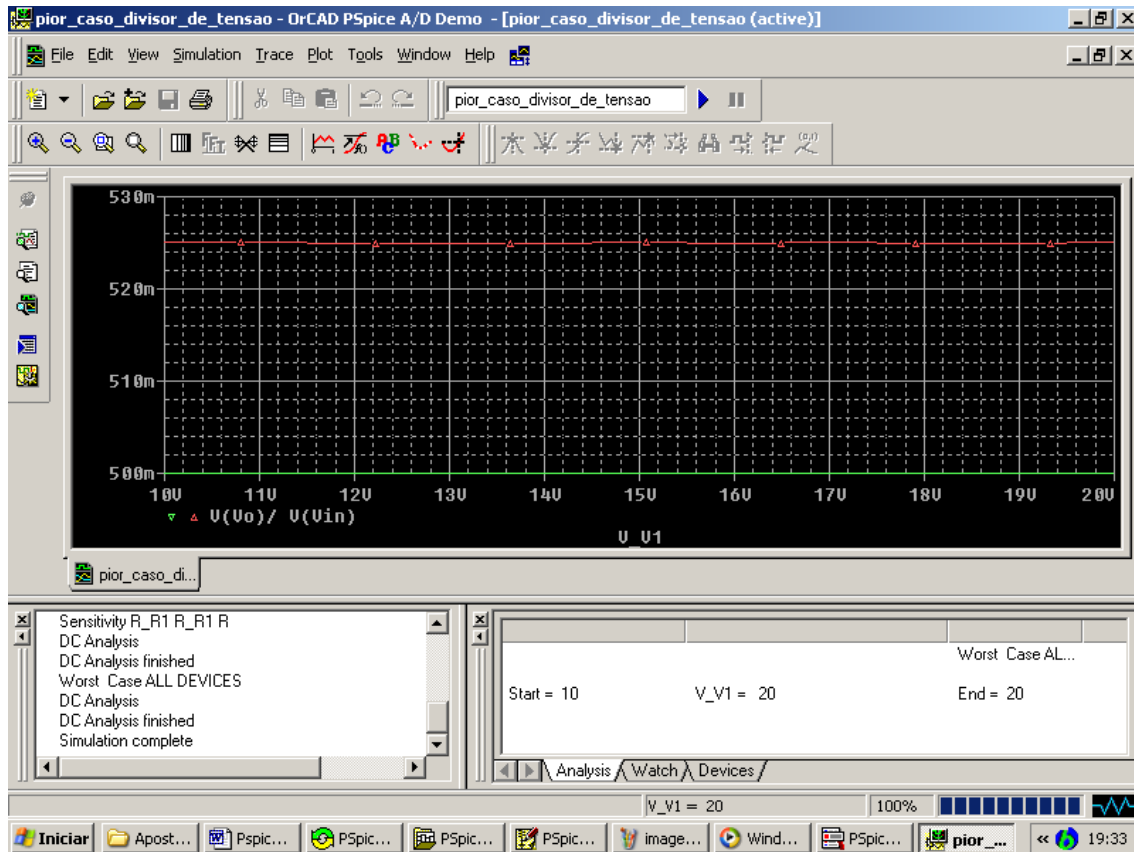


Selecione a tensão $V(V_o)$ e confirme :



Temos o gráfico da tensão V_o com os valores nominais dos resistores e também no pior caso de máxima variação .

Para obtermos o gráfico da variação do ganho , no menu **Trace > Add Trace** defina a equação $V(V_o)/V(V_{in})$ e teremos o gráfico do ganho nominal e máximo do circuito :



Vamos calcular manualmente o ganho e verificar à solução simulada :

$$V_o/V_{in} = R_2/(R_1+R_2)$$

Sendo $R_2= 1000 \Omega$ e $R_1=1000 \Omega$ - O Ganho Nominal é : $V_o/V_{in} = 0.5$
 Sendo $R_2= 1050 \Omega$ e $R_1=950 \Omega$ - O Ganho Máximo do pior caso é : $V_o/V_{in} = 0.525$
 Sendo $R_2= 950 \Omega$ e $R_1=1050 \Omega$ - O Ganho Mínimo do pior caso é : $V_o/V_{in} = 0.475$

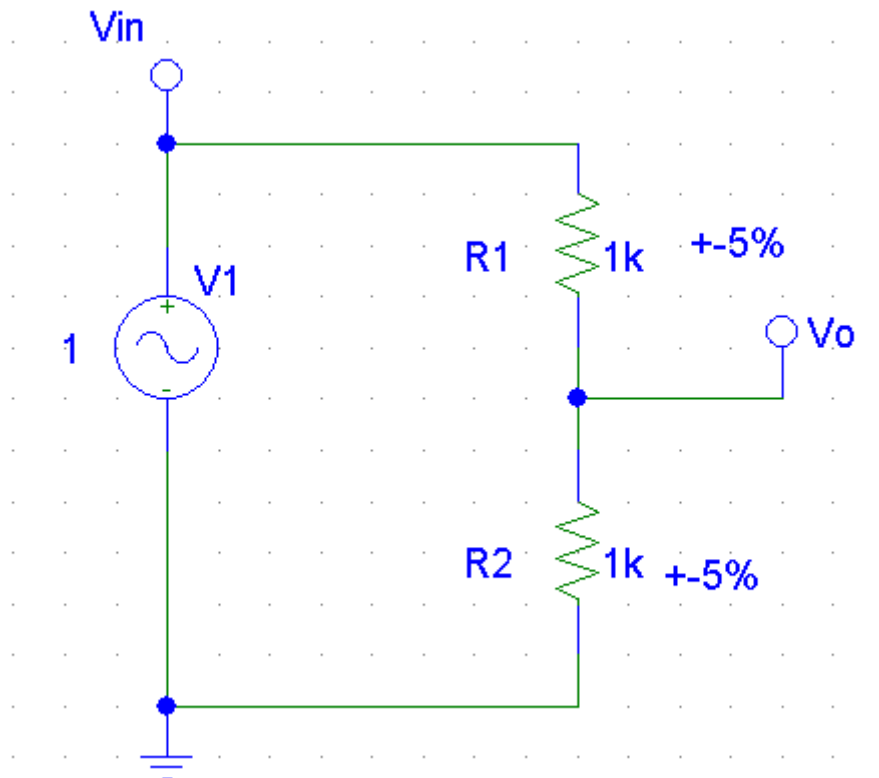
Vemos que o resultado simulado correspondeu ao esperado .

7.2 Análise Monte Carlo do Divisor de Tensão

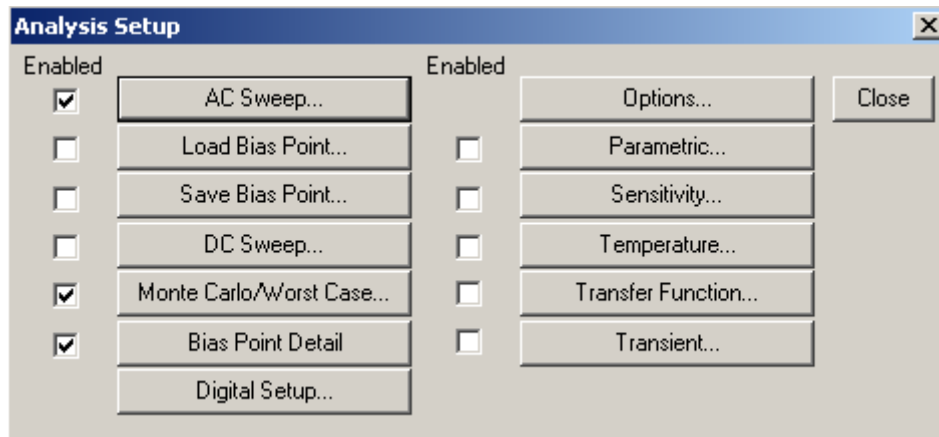
A análise Monte Carlo é utilizada para responder à questão : Que percentagem do meu circuito atingirá ou não minhas especificações ? . Analisando pelo pior caso podemos verificar quais os valores máximos e mínimos do meu parâmetro analisado , vemos assim se o circuito como um todo atende nossa especificação . Se isto não ocorrer podemos utilizar a análise Monte Carlo para estimar que percentagem do circuito será aceitável .

Um exemplo é o ganho do divisor de tensão , no caso anterior vimos que o ganho ficou entre 0.475 e 0.525 , mas se nossa especificação mínima fosse 0.49 , que percentagem do circuito atenderia nossa especificação . Isso é o descobriremos .

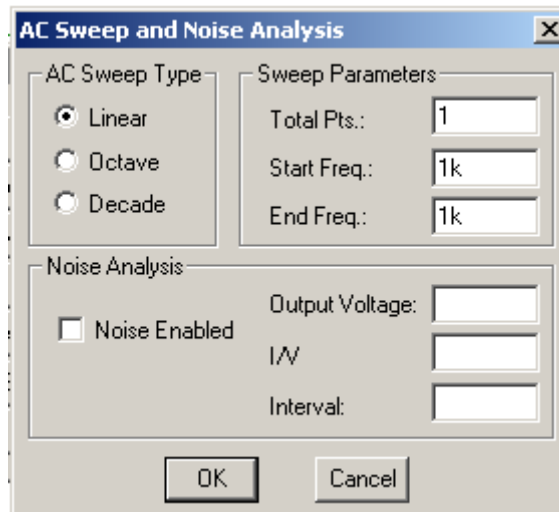
Vamos utilizar o mesmo circuito anterior modificando a fonte DC por uma AC (VAC) :



No menu **Analyses > Setup** definimos as condições da variação e qual variável será análise no menu **Monte Carlo/Worst Case** :



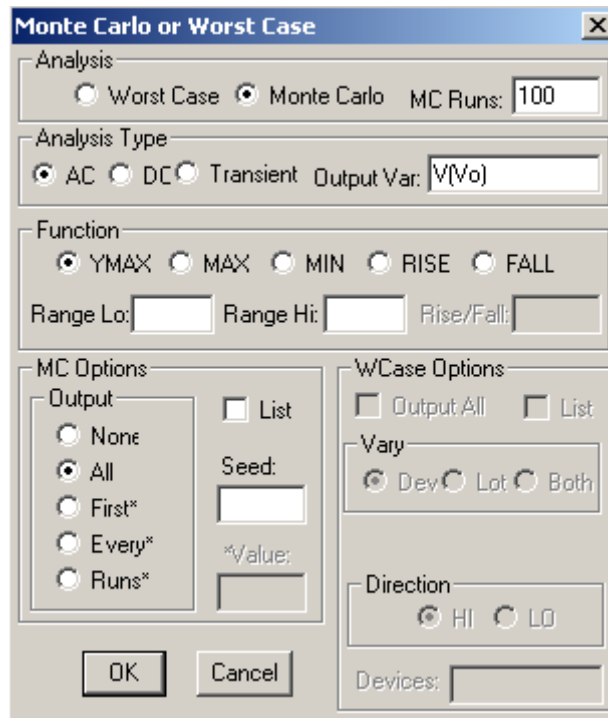
Vamos definir a variação da fonte VAC em 1 V numa frequência fixa em 1 kHz :



O ganho não muda em nada , o fato de utilizarmos uma AC é que podemos fixar a amplitude já que queremos saber a variação do ganho .

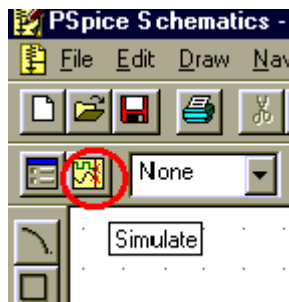
A análise será de Monte Carlo . O número de vezes que o análise será efetuada será de 100 (**MC Runs 100**) . Para cada vez , cada parte que possui uma tolerância terá um valor aleatório escolhido dentro de sua faixa de tolerância . A análise será feita em **DC** porque queremos determinar qual o ganho em DC do circuito . A variável de saída (output var) que queremos monitorar é a tensão **V(Vo)** . Vamos escolher **YMAX** pois queremos a resposta da saída ordenada do maior para à menor diferença do valor nominal . YMAX define a função :

$$f = | V(Vo) - 0.5 | \quad \text{onde } 0.5 \text{ é o valor nominal do ganho}$$

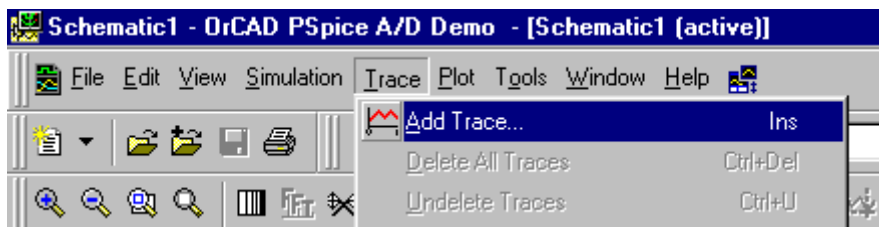


Quanto à **MC Outputs** vamos escolher All pois queremos os valores intermediários da saída para cada tentativa . Clique OK para sair

Pressione o botão **Simulate** .

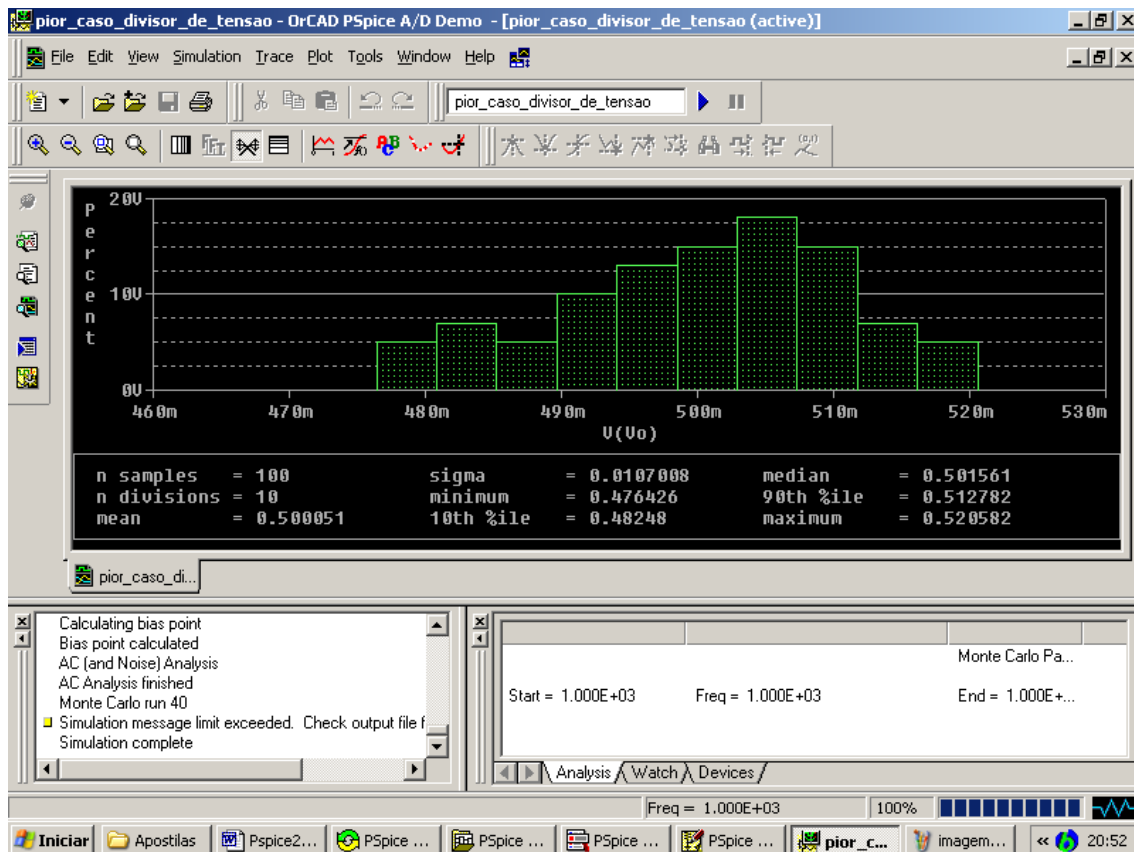


A tela do Probe (Gráfica) se abrirá , seleccione All ,seleccione no Menu **Trace > Add Trace**



Selecione a tensão V(Vo) e confirme :

e teremos o Histograma com as percentagens de amostras em função dos valores do ganho :



Os desvios são dados em relação ao valor nominal :

Nossa especificação mínima para o ganho era de 0.49 , assim como temos 40 amostras **(havíamos definido 100 amostras mas a versão estudante tem um limite máximo de 40)** basta verificar quantas delas não atendem , ou seja , estão localizadas abaixo de 0.49 . No nosso caso temos cerca de 18 % .Este número representa a quantidade de circuitos que não passarão na especificação mínima à cada 40 unidades . Quanto maior o número de amostras mais precisão teremos .

SOBRE O AUTOR : Rodrigo Cutri

Nascido em 1979 , em São Caetano do Sul , formado em Técnico em Eletroeletrônica pela E.T.E Jorge Street e em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Mauá , tendo recebido o prêmio como sendo o melhor aluno de sua turma .É Professor das disciplinas Cálculo II , Física II , Laboratório de Fundamentos de Engenharia Elétrica e Materiais Elétricos na Escola de Engenharia Mauá. Atualmente faz Mestrado na área de Eletrônica de Potência na linha de pesquisas sobre Filtros Ativos de Potência na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

SOBRE O LIVRO :

O objetivo deste livro é introduzir o aluno no uso do software PSpice , visando permitir um contato com um software de simulação de circuitos . O livro recheado de figuras e exercícios é ideal para aqueles que querem começar a trabalhar com simulações e para aqueles que querem um texto que lhes permita serem autodidatas no seu aprendizado .

CONTEÚDO :

PSpice.....	5
Aviso e Termo de Responsabilidade	6
1.Desenhando um esquema de um circuito elétrico	7
1.1 Simulando o circuito	16
2. DC SWEEP (Variando parâmetros p/ obter a Curva de Transferência).....	20
3. Teorema da Superposição e Proporcionalidade.....	32
3.1 A função de transferência (Transfer Function)	32
3.2 Medindo a resistência equivalente do circuito	35
4. AC SWEEP (Variando a frequência)	37
4.1 Gráfico em função da frequência	37
4.2 Gráfico da Análise AC na frequência de 1kHz à 10 kHz.....	41
4.3 Gráfico de Bode	45
4.4 Análise do Ganho de um Amplificador	48
4.5 Ganho do Amplificador Operacional.....	50
4.6 Variação Automática do Ganho do Amplificador Operacional	53
4.6.1 Análise Paramétrica	53
4.7 Indutância Mútua	58
5 . TRANSIENT (Análise Transitória).....	61
5.1 Circuito com capacitor com condições iniciais.....	61
5.2 Resposta Transitória do Indutor	69
5.3 Circuito Grampeador com Zener	72
5.4 Análise de Fourier na Tela Gráfica	76
5.5 Análise de Fourier com PSpice.....	82
5.6 Integrador com Amplificador Operacional Ideal	89
6. Digital Simulations (Simulação com Circuitos Digitais).....	93
6.1 Alimentação dos Sinais Digitais	93
6.1.1 Fontes de Sinais Digitais.....	93
6.1.2 Digital Clock (Clock Digital).....	101
6.2 Utilizando ao mesmo tempo componentes analógicos e digitais	104
6.2.1 Contador.....	108
6.3 Observações.....	112
7. Monte Carlo Analyses (Análise do Pior Caso).....	113
7.1 Análise do Pior no Divisor de Tensão.....	113
7.2 Análise Monte Carlo do Divisor de Tensão	118

