

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Relatório de Monitoria
SEL393 – Laboratório de Instrumentação Eletrônica I
Fabício de Almeida Brito (nº USP 8006647)

Índice geral

	Pág.
Revisão da apostila “Introdução à Simulação de Circuitos Eletrônicos Analógicos com o Software LTSpice”	1
Análise do comando .MEAS do LTSpice	44
Simulações de circuitos analógicos da disciplina SEL393 – Laboratório de Instrumentação Eletrônica I	74

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Introdução à Simulação de Circuitos Eletrônicos Analógicos com o Software LTSpice

Eng. Rodrigo Teixeira Machado
Prof. Paulo Roberto Veronese

Revisão (Novembro/2015)

Introdução a Simulação de Circuitos Eletrônicos

Simuladores de circuitos eletrônicos são ferramentas extremamente poderosas, capazes de intensificar e melhorar o trabalho de um engenheiro. Utilizando-se as análises adequadas, uma simulação de um circuito eletrônico pode trazer infinitamente mais informações sobre o seu funcionamento do que cálculos manuais além de agilizar significativamente o processo de desempenho do circuito.

No mundo moderno da engenharia cada vez é mais importante que um produto seja desenvolvido rapidamente e sem falhas e neste ponto o uso de simuladores aliados a um engenheiro competente fazem toda a diferença. No passado os circuitos deveriam ser testados e otimizados com componentes reais após longos cálculos. Utilizando-se bons modelos e simulações bem-feitas há uma grande probabilidade que um protótipo desenvolvido em software funcionará quando implementado com os componentes reais.

Neste curso introdutório à simulação de circuitos eletrônicos analógicos será utilizado o simulador LTSpice IV desenvolvido pela Linear Technology e distribuído gratuitamente em seu site <<http://www.linear.com/>>. Esse software está disponível nos computadores dos laboratórios de ensino do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação (SEL) da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Recomenda-se que os alunos instalem a ferramenta em seus computadores pessoais.

Além do simulador e sua biblioteca padrão será utilizada a biblioteca compilada pelo Prof. Paulo Roberto Veronese que ministra os cursos de teoria de circuitos eletrônicos no SEL. Essa biblioteca expande significativamente os modelos disponíveis para simulação contendo a maioria dos componentes que serão utilizados nos experimentos deste material. Essa biblioteca foi atualizada nos computadores dos laboratórios de ensino do SEL. É recomendável que os alunos adquiram atualizações da biblioteca através do sistema de disciplinas online do Departamento.

Neste curso serão desenvolvidas três práticas introdutórias que podem ser realizadas pelos alunos em casa. Elas ajudam a compreender o funcionamento básico do software LTSpice, além de fornecer exemplos do que esperar de alguns tipos de simulação. As seguintes práticas serão abordadas:

Prática 1 - Análise em Corrente Contínua

Prática 2 - Análise no Domínio da Frequência

Prática 3 - Análise no Domínio do Tempo

A primeira prática trata das análises mais simples possibilitadas pelo LTSpice: a análise .OP que envolve o cálculo do ponto de operação do circuito para sinais contínuos e a análise .DC que calcula o ponto de operação do circuito em função de uma fonte de corrente ou de tensão contínua. Esta última análise será usada extensamente no curso de dispositivos eletrônicos para se traçar as curvas dos componentes.

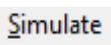
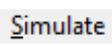
A segunda prática desenvolverá o conceito básico de varredura em frequência de circuitos com o uso do conhecido diagrama de Bode que é facilmente traçado no software. Serão analisados alguns filtros e amplificadores básicos nesta etapa, com exemplo de funcionamento e suas aplicações simples de acordo com as respostas em frequência.

A terceira e mais importante prática, que corresponde a análise no domínio do tempo tratara do funcionamento real dos circuitos quando excitados por sinais no domínio do tempo, com todas as imperfeições não lineares que correspondem aos componentes eletrônicos. Serão vistos retificadores, osciladores e amplificadores.

O objetivo deste curso introdutório é ilustrar o uso do simulador ao aluno!

Observação: Essa revisão do texto introdutório sobre a simulação de circuitos eletrônicos analógicos foi realizada em Novembro/15 pelo aluno Fabrício de Almeida Brito, graduando em engenharia elétrica da EESC-USP, sob a orientação do Prof. José Marcos Alves.

Índice

Introdução à Simulação com o LTSpice IV		Pág.
Prática 1 - Análise em Corrente Contínua		9
Circuito DC sem Parâmetro Global Programável		9
Resistência e Fonte de Tensão DC		9
New schematic (editar desenho esquemático)		9
Ctrl +R (rodar componente)		9
Ctrl +E (espelhar componente)		9
Ctrl +C/ F6 (copiar componente)		9
Del (apagar componente)		9
Component  (acesso à biblioteca de componentes)		9
Voltage (inserir fonte de tensão DC através de "Component")		9
Wire  (traçar conexões entre componentes)		9
Move  (mover conexões e componentes)		9
Drag  (esticar conexões)		10
Ground		10
Label Net		10
Simulate  (editar configuração de simulação)		10
Dc op pnt / .op (tensões e correntes de um circuito)		10
Circuito DC com Parâmetro Global Programável		10
. param (parâmetro programável)		10
SPICE directive  (inserir ".param")		10
.step param (inserir parâmetros em ".param")		11
Tools  / Color Preferences		11
Alt (medida de potência em um componente)		11
Resistência e Fonte de Corrente DC		12
Current (inserir fonte DC de corrente através de "Component")		12
Diodo e Fonte de Corrente DC		13
DC sweep / .dc (excursionar uma tensão DC)		13
Start value (valor inicial da fonte DC)		14
Stop value (valor final da fonte DC)		14
Increment (incremento da fonte DC)		14
Zener e Fonte de Corrente DC		14
d(expressão) (derivada de um parâmetro)		15
Transistor Bipolar de Junção		15
Estabilizador de Tensão		18
Prática 2 - Análise no Domínio da Frequência		20
Circuito com Fonte AC e Capacitor		20
AC analysis ou .AC  		20

Índice (Cont.)

	Pág.
Circuito com fonte AC e Indutor	22
Series Resistance	22
Filtro Passivo Passa Baixa RC	23
Filtro Passivo Passa Faixa RLC	23
Amplificadores Operacionais	24
Fontes ou Fontes DC Simplificadas (biblioteca do Spice)	24
Amplificador com JFET	27
Impedância de entrada e saída	28
Prática 3 - Análise no Domínio do Tempo	30
Geração de Sinais	30
Transient (.TRAN) Simulate Edit Simulation Cmd	30
Onda quadrada	31
Onda triangular	32
Onda triangular ascendente	32
Onda triangular descendente	32
Onda senoidal	33
Transiente em circuito RC	33
Start External DC supply voltages at 0V ou startup	34
Transiente em circuito RLC	34
Amplificador com Amp Op	35
Slew Rate	36
Oscilador de Relaxação com Amp Op	37
Espectro de Frequência	39
View FFT	39
.four	39
THD (taxa harmônica de distorção)	39
ctrl+L	39
Retificador de Potência com Filtro Capacitivo	39
Funções Arbitrárias	39
bv (fonte de função arbitrária de tensão)	41
bi (fonte de função arbitrária de corrente)	41
Sinais de Áudio	43
wavfile=. "nome do arquivo".wav chan=0 (importação de sinal de música)	43
.wave	43
.wave . "nome do arquivo a ser gerado".wav 16 44100 V(sinal) - (exportação de sinal de música)	43

Lista de Figuras

Fig.		Pág.
	Prática 1 - Análise em Corrente Contínua	
	Resistência e Fonte de Tensão DC	
1	Circuito para análise .op	9
2	Circuito para utilização do comando “.step param”	11
3	Corrente no resistor em função do valor do resistor em “análise .op”	11
4	Valor do resistor em função do valor do resistor	12
5	Potência sobre o resistor em função do resistor	12
	Resistência e Fonte de Corrente DC	12
6	Exemplo de circuito utilizando fonte de corrente ideal	13
	Diodo e Fonte de Tensão DC	13
7	Circuito para “análise .DC” com diodo comum	13
8	Corrente no diodo em função da tensão	14
	Zener e Fonte de Tensão DC	14
9	Circuito para análise .DC com diodo Zener	14
10	Corrente no diodo Zener em função de tensão	14
11	Potência no diodo Zener em função de tensão	15
12	Derivada da corrente sobre o Zener em função de tensão	15
	Transistor Bipolar de Junção	15
13	Circuito de análise .DC com um transistor bipolar de junção	16
14	Corrente na base do transistor em função de tensão	16
15	Corrente no coletor do transistor em função de tensão	16
16	Potência dissipada pelo transistor em função de tensão	17
17	Circuito para análise .DC combinada com .step param	17
18	Família de curvas do 2N2222	17
	Estabilizador de Tensão com BJT e Zener	18
19	Estabilizador de Tensão Simples	18
20	Tensão na saída do estabilizador em função da tensão na entrada	18
21	Potência sobre a carga em função da carga	19
22	Derivada da potência sobre a carga em função da carga	19
	Prática 2 - Análise no Domínio da Frequência	20
	Circuito com Fonte AC e Capacitor	20
23	Circuito para análise .AC com capacitor	21
24	Edit Simulation Command / AC Analysis	21
25	Corrente no capacitor em função da frequência	22
	Circuito com Fonte AC e Indutor	22
26	Circuito para análise .AC com indutor	22
27	Corrente no indutor em função da frequência	22
	Filtro Passivo Passa Baixa RC	23
28	Filtro Passivo Passa Baixa RC	23
29	Resposta em frequência do filtro de passa baixa	23
	Filtro Passivo Passa Faixa RLC	23
30	Filtro Passivo Passa Faixa RLC	24
31	Resposta em frequência do filtro de passa faixa	24

Lista de Figuras (Cont.)

Fig.		Pág.
	Amplificadores Operacionais	24
32	Amplificador operacional em malha aberta	25
33	Ganho de tensão em função da frequência de um op amp em malha aberta	25
34	Amplificador operacional em malha fechada com realimentação total	25
35	Ganho de tensão para realimentação total	26
36	Amplificador operacional em malha fechada com realimentação parcial	26
37	Ganho de tensão para realimentação parcial	26
38	Amplificador Integrador	27
39	Resposta em frequência do circuito Integrador	27
	Amplificador com JFET	27
40	Amplificador Fonte Comum com JFET	28
41	Resposta em frequência do amplificador com JFET	28
	Impedância de Entrada e Saída	28
42	Impedância de entrada do amplificador	28
43	Impedância vista na porta do JFET	29
44	Ilustração da técnica para medida de impedância de saída em função da frequência	29
45	Impedância de saída em função da frequência	29
	Prática 3 – Análise no Domínio do Tempo	30
	Geração de Sinais	30
46	Fonte geradora de sinais	30
47	Análise transiente	31
48	Gerador de onda quadrada	31
49	Onda quadrada	31
50	Onda triangular	32
51	Onda triangular ascendente	32
52	Onda triangular descendente	32
53	Onda senoidal	33
54	Ondas senoidais com variação na amplitude	33
	Transiente em Circuito RC	33
55	Filtro Passa baixa com entrada degrau	34
56	Resposta do filtro passa baixa ao degrau	34
	Transiente em Circuito RLC	34
57	Filtro Passa faixa com entrada degrau	35
58	Resposta do filtro passa faixa ao degrau	35
	Amplificador com Amp Op	35
59	Amplificador de ganho 5,5 V/V	35
60	Sinal de entrada após o divisor resistivo e na saída de amplificador com amp op	36
61	Sinal de saída do amplificador ceifado	36

Lista de Figuras (Cont.)

Fig.		Pág.
62	Saída limitada em derivada	37
63	Derivada do sinal de saída no tempo	37
	Oscilador de Relaxação com Amp OP	37
64	Oscilador de relaxação	38
65	Onda quadrada gerada por um oscilador de relaxação	38
66	Corrente sobre o capacitor no tempo	38
67	Potência fornecida ao circuito por uma das fontes	39
	Espectro de Frequência	39
68	Espectro de frequência da onda quadrada gerada pelo oscilador	39
	Retificador de Potência	39
69	Retificador de potência	40
70	Sinal retificado	40
71	Comparação do sinal retificado com a entrada senoidal	40
72	Cálculo do valor médio e RMS da saída do retificador	41
	Funções Arbitrárias	41
73	Fontes de tensão de função arbitrária	41
74	Polinômio de segunda ordem gerada pela função “square” em função do tempo	41
75	Logaritmo gerado pela função “log” em função do tempo	42
76	Geração de um sinal AM com fontes de função arbitrária	42
77	Sinal AM	42
	Sinais de Áudio	43
78	Leitura e gravação de um sinal de música no LTSpice	43
79	Forma de onda no nó V(x)	

Lista de Tabelas

Tabela		Pág.
	Prática 1 - Análise em Corrente Contínua	
	Resistência e Fonte de Tensão DC	9
1	Resultado da “análise .op” no circuito da figura 1	10
	Prática 2 - Análise no Domínio da Frequência	
2	Múltiplos de unidades do LTSpice	20

Prática 1 - Análise em Corrente Contínua

Os primeiros circuitos estudados nos cursos de circuitos elétricos envolvem o uso de corrente e tensões contínuas. Embora a maioria absoluta dos sistemas eletrônicos demande sinais alternados para transmitir informação ou potência, o estudo em corrente contínua é vital para o entendimento dos dispositivos semicondutores e de diversos sistemas auxiliares como fontes de tensão reguladas e fontes de corrente constante.

Circuito DC sem Parâmetro Global Programável

Resistência e Fonte de Tensão DC

O circuito mais básico estudado no início de circuitos elétricos e formado por uma fonte de tensão e um resistor, como na figura 1. Na janela principal do software clique em **“New Schematic”**. O LTSpice é um simulador gráfico, o circuito deve ser montado com os símbolos dos componentes e o software irá se encarregar de determinar as equações das malhas e nós e calcular os parâmetros necessários.

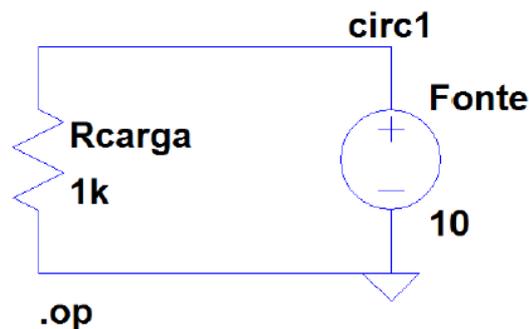


Fig. 1 – Circuito para análise .op

Na barra superior do LTSpice, à direita, existem botões para resistores, capacitores, indutores e diodos. Selecione o resistor e o insira no esquemático. Caso queira rodar o componente use o atalho do teclado **“ctrl+r”** e se precisar espelhar use **“ctrl+e”**. A **tecla F6** copia um componente enquanto a **tecla delete** apaga. Após a inserção do resistor clique sobre ele com o botão direito e em **“Resistance”** insira o valor **“1k”**. Feche esta janela. O nome do componente pode ser alterado clicando-se com o botão direito em **“R1”**. Mude para **“Rcarga”**.

Ao lado do símbolo do diodo há um botão chamado **“component”**. Este botão fornece acesso a biblioteca com todos os componentes disponíveis para o usuário. Procure pelo componente **“Voltage”** e o insira no esquemático junto do resistor. Trata-se de uma fonte programável que será utilizada em praticamente todas as simulações. Pode-se usá-la como gerador de tensão contínua, senoidal, quadrada, triangular, exponencial, FM ou programada por um conjunto PWL de pontos arbitrários. Clique sobre essa fonte com o botão direito e coloque em seu **“DC value”** o valor **10**. Clicando com o botão direito sobre o nome da fonte, mude o nome **“V1”** para **“Fonte”**.

Ao lado do ícone de imprimir está a ferramenta de traçar fio, **“Wire”**. Esta ferramenta traça fios apenas nos eixos ortogonais. Estes mesmos fios podem ter sua posição alterada pela ferramenta **“move”** ao lado do botão **“component”** ou esticados e até colocados na diagonal pela ferramenta **“drag”**, ao lado de **“move”**. Trace os fios fechando o circuito entre o resistor e a fonte.

O LTSpice gera as equações de malhas e nós a partir de um nó de referência determinado pelo usuário. Ao lado da ferramenta “Wire” está a ferramenta “Ground” que determina um ou mais nós de referência no circuito. Selecione essa ferramenta e coloque um símbolo de terra no polo negativo da fonte. Ao lado da ferramenta ground está localizada a ferramenta “Label net” que permite dar um nome arbitrário a um nó. Selecione a ferramenta e digite o nome que quiser e o insira no polo positivo da fonte. O circuito montado deve ficar como na figura 1. Se desejar, aperte a barra de espaço para centralizar o circuito em sua tela enquanto a roda do mouse pode aumentar ou diminuir o zoom do circuito que está sendo editado.

Na barra superior do software clique em “Simulate” e “Run”. Como não há nenhuma análise configurada o software automaticamente abre a janela de configuração de simulação. Caso já exista uma simulação configurada, este efeito pode ser conseguido com o botão “Edit Simulation Cmd” no menu de “Simulate”. Dentre as várias simulações disponíveis, selecione a última, “Dc op pnt” também conhecida como .op. Esta simulação, por ser a mais simples, não necessita de nenhum parâmetro. Confirme e insira a simulação no circuito como se fosse um componente. Novamente clique em “Simulate” e “Run”. O simulador irá calcular as tensões em todos os nós do circuito e as correntes em todos os componentes gerando uma tabela com os resultados. A tabela gerada deve ser semelhante a Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da análise .OP no circuito da figura 1

```

--- Operating Point ---

      V(circl):      10          voltage
      I(Rcarga):    0.01        device_current
      I(Fonte):     -0.01       device_current

```

Refaça a simulação utilizando outros valores para o resistor Rcarga e verifique os resultados correspondentes a lei de ohm.

Circuito DC com Parâmetro Global Programável

Um outro ponto bastante importante do LTSpice é o uso de parâmetros globais programáveis. Para o mesmo circuito anterior, altere o valor do resistor de “1k” para o valor “{a}”, isto é, “a” entre chaves. Este parâmetro pode ser definido pelo comando **.param**. Caso vários resistores estejam com o valor {a}, todos terão seu valor definido ao mesmo tempo pelo comando **.param**. Para inserir este comando selecione a ferramenta “SPICE directive”, a última a direita e digite “.param a 1k”. Isso faz com que todos os componentes que possuam algum parâmetro {a} sejam definidos como 1k. Inclusive é permitido que se efetuem operações aritméticas simples dentro das chaves, como “{2*a}” e “{a+a}”, muito útil para diferenciar vários componentes em função de a. Simule novamente o circuito com o resistor tendo {a} como valor e “a” definido como 1k pelo comando **.param**. O resultado deve ser o mesmo do circuito anterior. Simule também para “{2*a}” e “{a*a}” e observe a diferença.

O software pode ser configurado facilmente para realizar a mesma simulação para vários valores de um parâmetro e traçar um gráfico correspondente a essa variação. Apague o comando “.param a 1k” e o substitua por “.step param b 1k 10k 100”. O comando **.step** irá variar o valor do parâmetro b entre 1k e 10kΩ em intervalos de 100Ω. Serão automaticamente traçados os gráficos das tensões e correntes em função dessa variação. Não se esqueça de substituir “{a}” no resistor por “{b}”

O circuito deve ficar como na figura 2 e a saída gráfica da corrente no resistor está na figura 3. Para visualizar uma corrente no gráfico basta clicar sobre o componente. Para visualizar uma tensão basta clicar sobre o nó desejado. Clicando-se com o botão direito sobre o nome do traço plotado, é possível apagá-lo ou realizar algum tipo de aritmética básica com ele. Clicando-se com o botão esquerdo é possível utilizar os cursores. Vale lembrar que as cores padrão do LTSpice foram modificadas para os gráficos. Para fazer o mesmo basta clicar em **“Tools”** e **“Color Preferences”**.

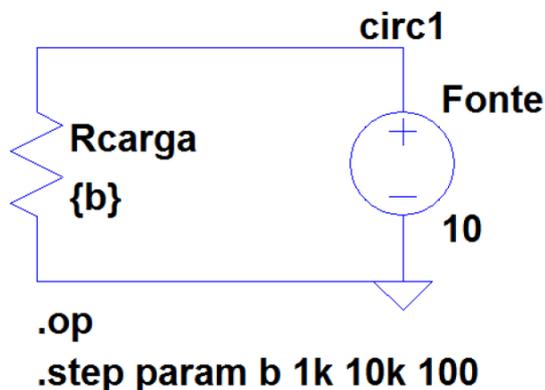


Fig. 2 - Circuito para utilização do comando “.step param”

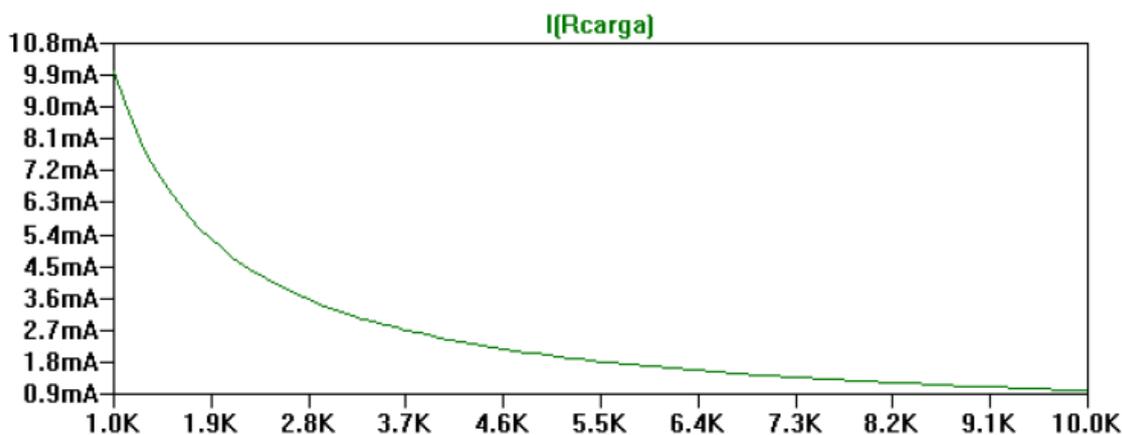


Fig. 3 - Corrente no resistor em função do valor do resistor em “análise .op”

Clicando-se com o botão direito sobre o nome do traço, neste caso $I(Rcarga)$, pode-se editar equações na janela “Expression Editor”. Por exemplo, caso deseje-se plotar o valor do resistor em função do valor do resistor, basta no editor substituir $I(Rcarga)$ por $V(circ1)/I(Rcarga)$ como na figura 4. Logicamente, o resultado é uma reta.

A potência sobre o resistor pode ser plotada multiplicando-se a tensão $V(circ1)$ por $I(Rcarga)$ no editor de equação ou selecionando-se ou clicando-se sobre o componente com a tecla **“alt”** apertada, o que fará o cursor normal mudar para um termômetro. A curva de potência sobre o resistor em função do resistor é apresentada na figura 5. Pode-se clicar **“ctrl + a”** no visualizador de formas de onda para abrir uma janela que lista todas as formas de onda disponíveis para traçar os gráficos. Essas formas de onda ficam armazenadas no software como vetores relacionados ao parâmetro b , ou aos parâmetros de frequência e tempo como veremos nas próximas práticas.

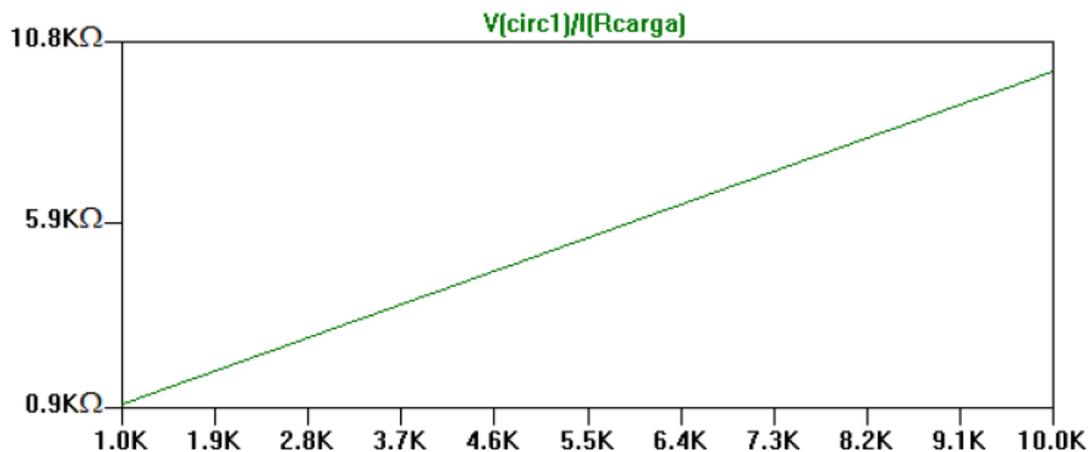


Fig. 4 - Valor do resistor em função do valor do resistor

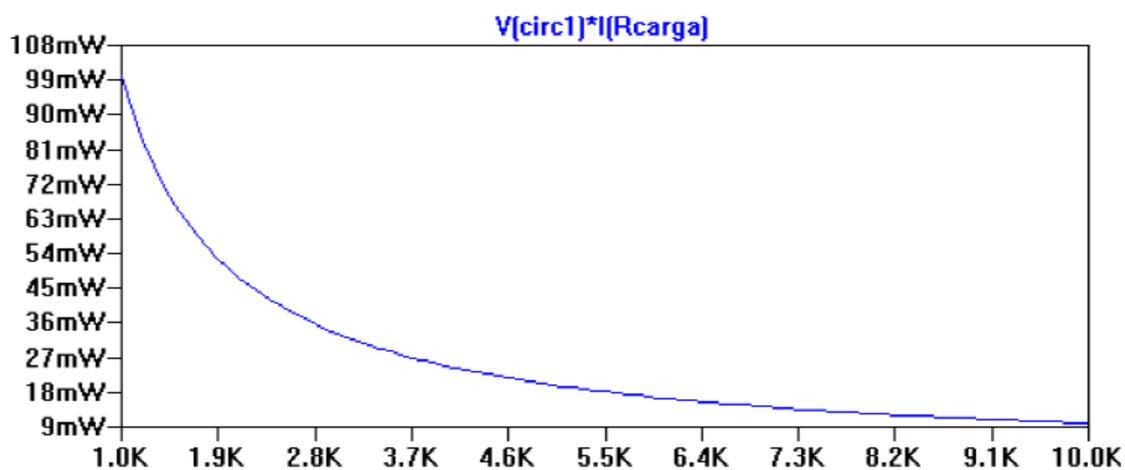


Fig. 5 - Potência sobre o resistor em função do resistor

Resistência e Fonte de Corrente DC

O estudo do circuito com uma fonte e um resistor serve para ilustrar bem as funcionalidades básicas do LTSpice. É recomendado que o usuário faça a análise .op com parâmetros definidos (geração de uma tabela) e com parâmetros variáveis (geração de um gráfico) para circuitos com fontes e resistores mais complexos, com várias malhas, assim como estudados na disciplina circuitos elétricos 1. Também é importante que se estude o componente “**Current**”, uma fonte de corrente ideal programável da mesma forma que a fonte de tensão. A figura 6 fornece um exemplo de um circuito utilizando a fonte de corrente, a análise .op deve ser realizada pelo aluno.

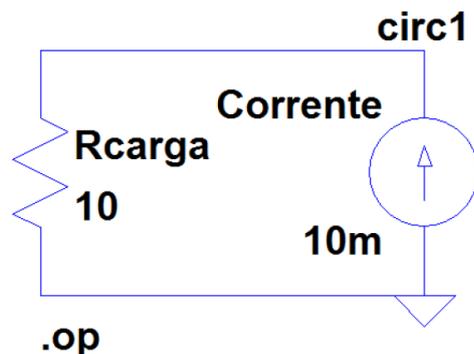


Fig. 6 - Exemplo de circuito utilizando fonte de corrente ideal

Espera-se que o aluno nesta etapa tenha se familiarizado em traçar circuitos com resistores, fontes de tensão e corrente com várias malhas e que possa avaliar as respostas para circuitos de parâmetros fixos e variáveis em “análise .op”.

Diodo e Fonte de Tensão DC

Crie um novo esquemático, conforme figura 7, inserindo a fonte de tensão e o nó de referência. Desta vez ao invés de utilizar um resistor, insira o componente “diode”, localizado junto dos resistores, capacitores e indutores ou utilizando apertando-se a letra “d”. Clicando-se sobre o diodo com o botão direito não é possível editá-lo como no caso do resistor e sim escolher um dos modelos pré-definidos na biblioteca. Selecione “pick new diode” e encontre o componente “1N4001”, um diodo de baixo custo para retificação de tensão.

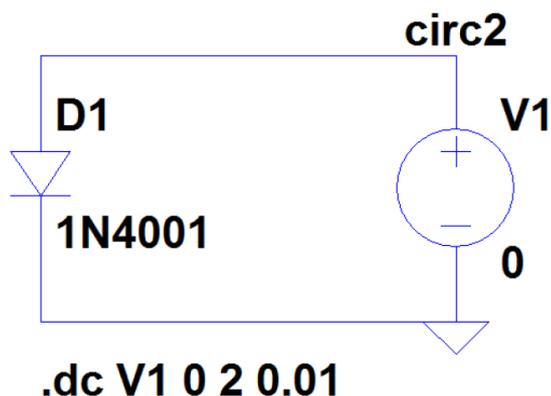


Fig. 7 - Circuito para “análise .DC” com diodo comum

A fonte ainda não foi configurada. Coloque seu valor DC em 0V e seu nome como “V1”. Desta vez usaremos uma análise diferente. Na janela onde pode-se escolher as análises escolha a análise “**DC sweep**”. Este tipo de análise irá excursionar uma fonte DC e traçar os gráficos das correntes e tensões no circuito em função da variação dessa fonte. O mesmo pode ser feito em análise .OP com o comando .step param, mas desta forma é mais intuitivo, fácil de configurar e permite análises em várias dimensões.

A análise .DC requer vários parâmetros. O primeiro é a fonte a ser excursionada, que deve ser preenchido com “V”. O segundo deve ser selecionado como linear (as outras formas de excursão também podem ser bem úteis). “**Start Value**” indica o limite inferior, use 0V, e “**Stop Value**” o limite superior, use “2V”. “**Increment**” é o passo, use 0.01. Repare como esta

última etapa é configurada de forma semelhante ao comando `.step param`. Note que a simulação `.DC` exige que seja indicado um valor para a fonte V1 no esquemático, mesmo que ele não seja usado na varredura. Ao rodar a simulação do circuito final, mostrado na figura 7, e plotando-se o gráfico de corrente no resistor em função da fonte V1, obtém-se o gráfico da figura 8.

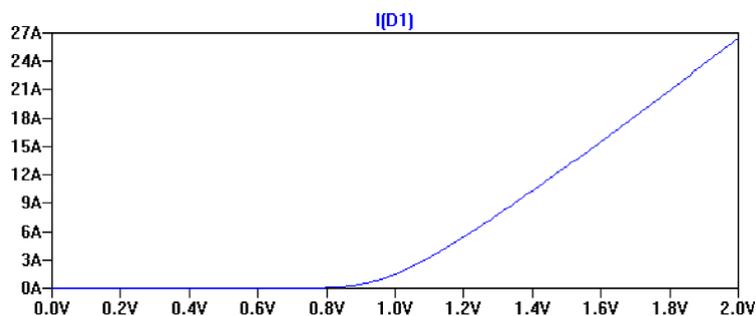


Fig. 8 - Corrente no diodo em função da tensão V1

Zener e Fonte de Corrente DC

Trocando-se o diodo “1N4001” pelo diodo Zener “1N5231” com tensão de ruptura reversa de 5,1V, como na figura 9, e realizando a análise `.DC` entre -6 e 2V, obtém-se a curva de corrente em função de V1, conforme figura 10. A potência sobre o diodo, obtida pelo mesmo método descrito na pág. 8, é mostrada na figura 11.

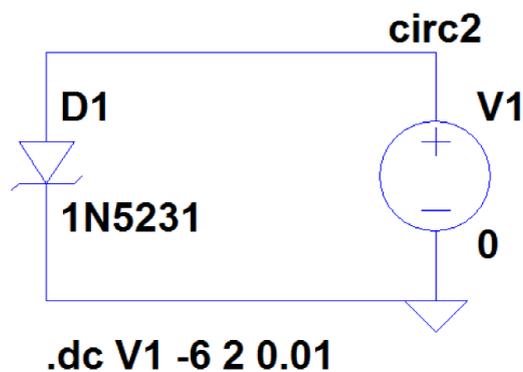


Fig. 9 - Circuito para análise `.DC` com diodo Zener

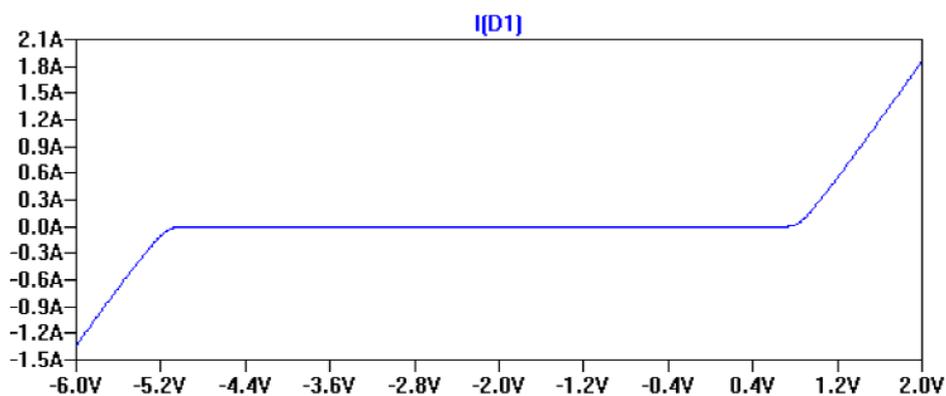


Fig. 10 - Corrente no diodo Zener em função de V1

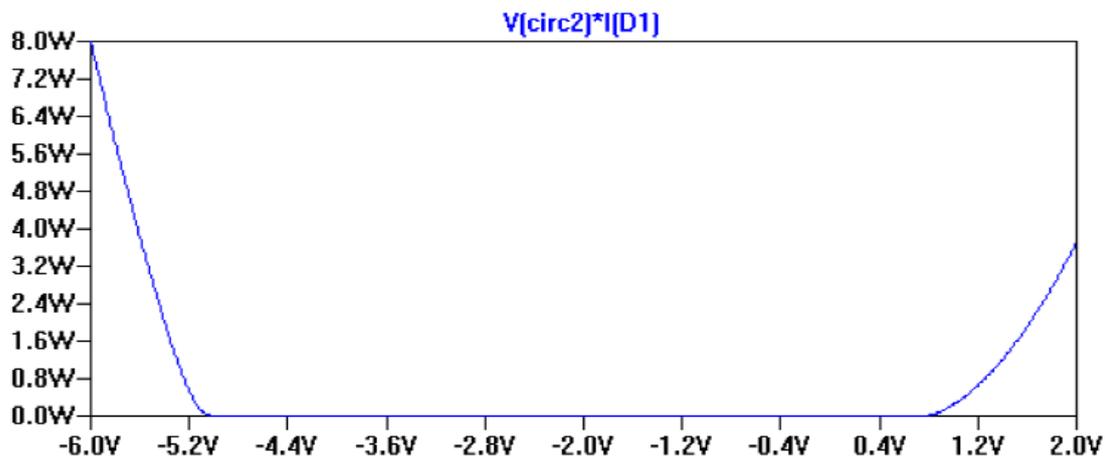


Fig. 11 - Potência no diodo Zener em função de V1

Em muitas análises será necessário conhecer a dinâmica de um sinal a partir de sua primeira derivada. Para plotar a derivada de uma curva em função de seu parâmetro, neste caso a tensão V1 (mas poderia ser derivada na frequência ou no tempo), deve-se utilizar o editor de expressões e inserir a expressão dentro de “**d(expressao)**”. No caso da corrente sobre o Zener, $I(D1)$, basta colocar $d(I(D1))$ e plotar o gráfico, como mostrado na figura 12. Observe a unidade em que essa grandeza é plotada.

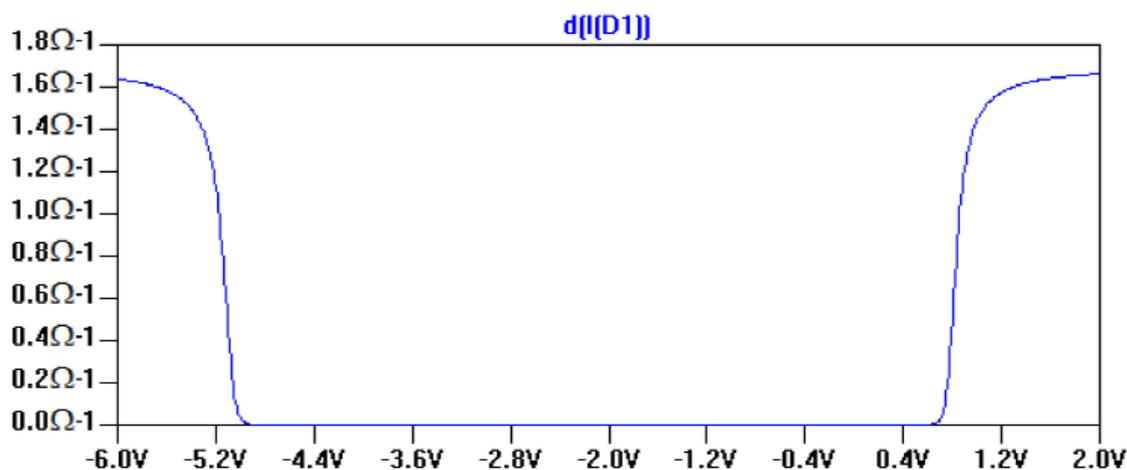


Fig. 12 - Derivada da corrente sobre o Zener em função de V1

Transistor Bipolar de Junção

O transistor bipolar de junção, assim como outros tipos de transistores, é um componente de 3 terminais com complexas relações entre as correntes e tensões em seus terminais. O circuito da figura 13 é uma montagem simples, em análise .DC, que irá plotar a corrente de coletor em função da tensão na base. A tensão de coletor é fixa em 10V pela fonte V2 e a fonte de base V1 será excursionada pela análise. Para encontrar o transistor clique em “component” e procure pelo componente npn. Assim como o diodo, ele não pode ser editado. Escolha o modelo 2N2222 na biblioteca. A varredura em V1 será feita entre 0 e 2V com o passo de 0.01 para uma boa resolução. A figura 14 mostra a corrente medida no terminal de base, que pode ser selecionada clicando-se sobre a base do npn. A figura 15 mostra a corrente de coletor, também selecionada clicando-se sobre o coletor. A figura 16 mostra a potência sobre

o transistor clicando-se sobre ele e apertando a tecla "alt". O aluno deve executar estes procedimentos e plotar as curvas correspondentes, se possível para este e outros tipos de npn escolhidos por seu critério.

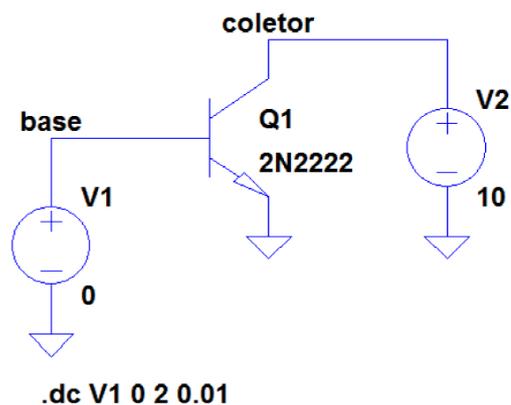


Fig. 13 - Circuito de análise .DC com um transistor bipolar de junção

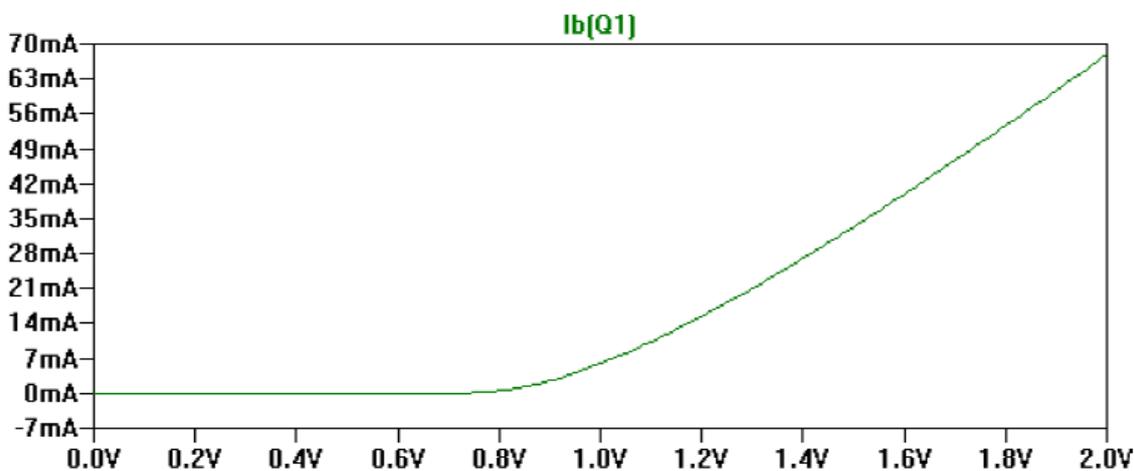


Fig. 14 - Corrente na base do transistor em função de V1

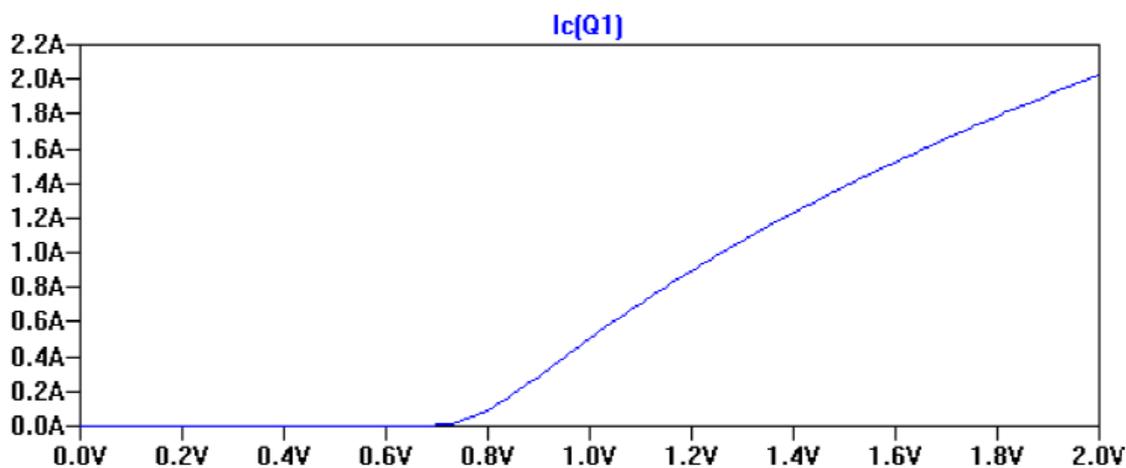


Fig. 15 - Corrente no coletor do transistor em função de V1

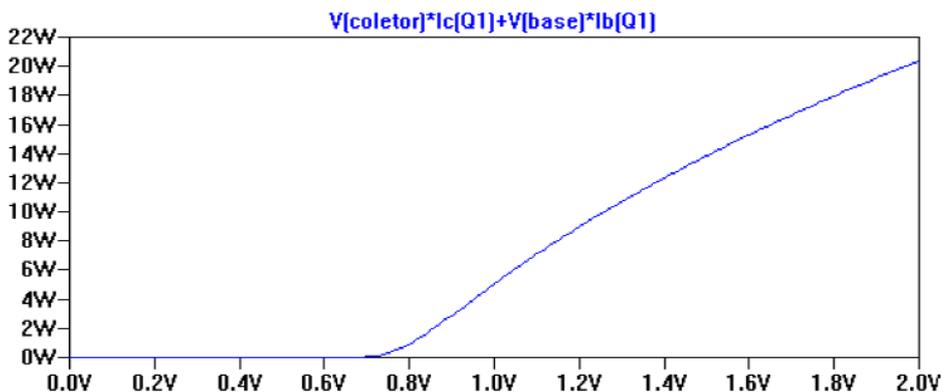


Fig. 16 - Potência dissipada pelo transistor em função de V1

Uma aplicação muito interessante da análise .DC utilizada em conjunto com o comando .step param (pg. 7) é a visualização da família de curvas de um transistor. Essas curvas são a relação da corrente de coletor em função da tensão de coletor parametrizada para vários valores de tensão na base. O circuito utilizado é o da figura 13 com algumas mudanças importantes. Desta vez a análise .DC será com a excursão de 0 à 15V da tensão de coletor (V2). O valor da fonte V1 será {v} e o comando “.step param v 0 2 0.2” deve ser utilizado na simulação. Este comando irá plotar uma curva em função de V1 para cada valor de v definido pelo .step, criando assim a família de curvas. O circuito da figura 17 ilustra essa montagem e a figura 18 ilustra o resultado dessa simulação.

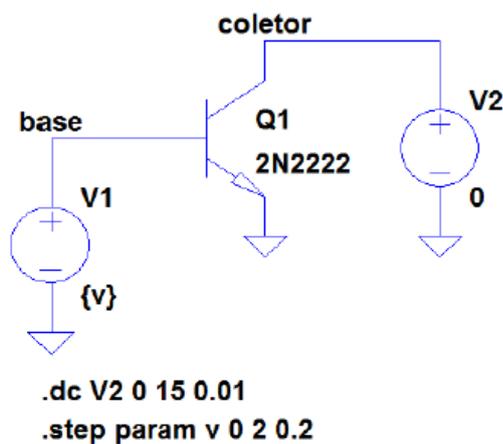


Fig. 17 – Circuito para análise .DC combinada com .step param

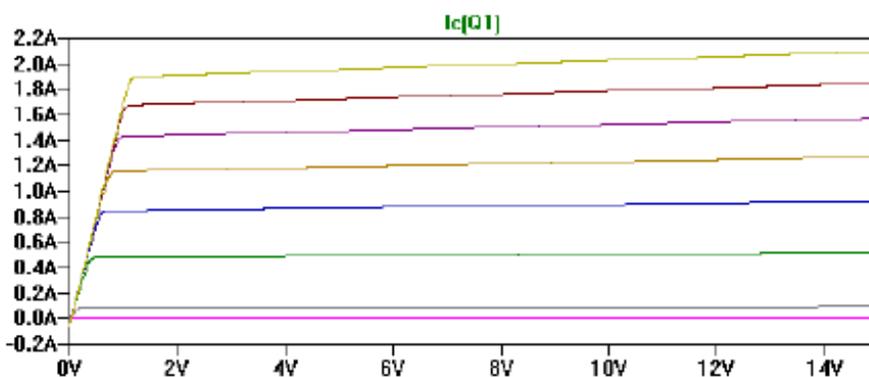


Fig. 18 – Família de curvas do 2N2222

Um circuito bastante importante para a eletrônica geral é o estabilizador de tensão, capaz de funcionar como uma fonte de tensão com valor praticamente fixo e baixa impedância de saída sendo alimentado com uma grande faixa de tensões DC. Esse circuito pode ser implementado com uma associação dos componentes vistos até agora: o resistor, o transistor bipolar, o diodo de silício e o diodo Zener. Usa-se um resistor de $1k\ \Omega$ e o modelo de transistor bipolar BD137v, presente na biblioteca "npn". Esse transistor tem maior capacidade de dissipação de potência e condução de corrente que o 2N2222. O estabilizador deve possuir uma fonte DC em sua entrada e garantir uma tensão praticamente fixa sobre a carga, para uma entrada acima de um certo valor mínimo. A figura 19 ilustra o circuito do estabilizador com a entrada V1 e uma carga resistiva qualquer Rload. A figura 20 mostra a tensão na saída do estabilizador em função da tensão na entrada.

Estabilizador de Tensão com BJT e Zener

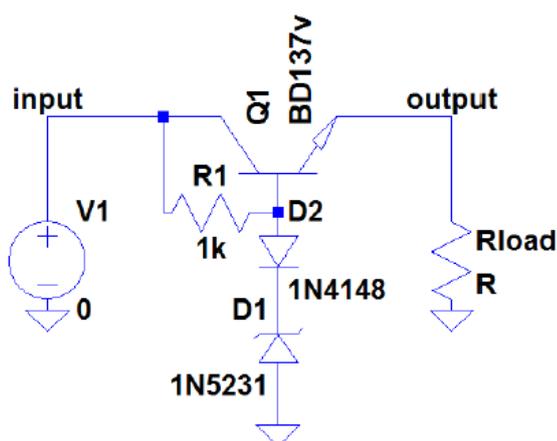


Fig. 19 - Estabilizador de Tensão Simples

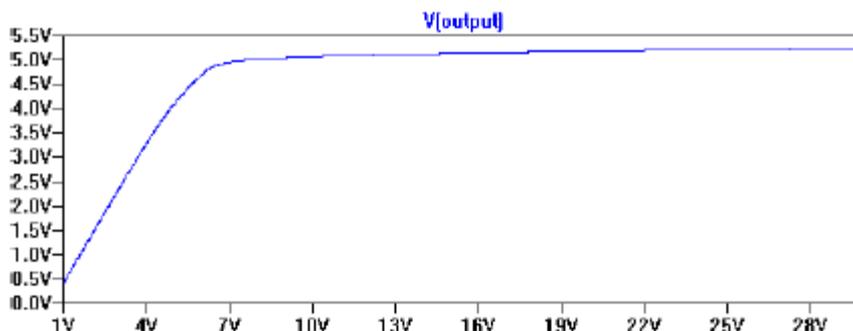


Fig. 20 - Tensão na saída do estabilizador em função da tensão na entrada

A impedância de saída deste circuito em DC pode ser determinada pelo teorema da máxima transferência de potência para uma carga. Fixando-se a entrada V1 em 15V e excursionando-se o resistor de saída entre 0.1 e $10\ \Omega$ e medindo-se a potência sobre ele em função de seu valor em análise .OP obtém-se o gráfico ilustrado na figura 21. Para variar o valor do resistor usa-se o comando .step param 0.1 10 0.1. O valor de impedância de saída do estabilizador de tensão será o ponto de máximo da curva de transferência de potência, que pode ser determinado pelo cruzamento do zero do gráfico de sua derivada, como na figura 22. Através desses gráficos e do uso dos cursores (que podem ser ativados clicando-se sobre o nome da forma de onda com o botão esquerdo do mouse) obtém-se a impedância de saída como aproximadamente $7.2\ \Omega$.

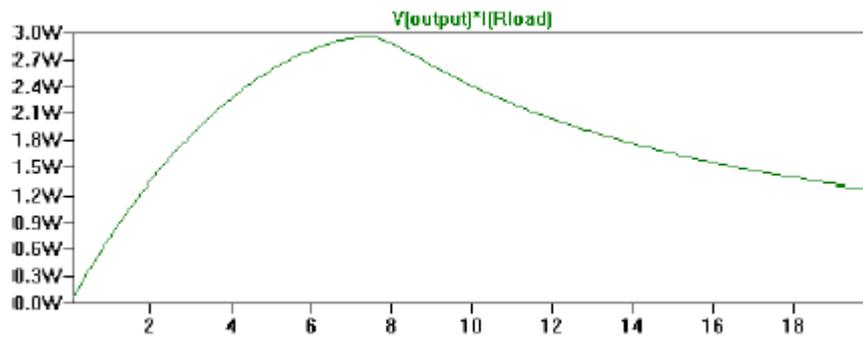


Fig. 21 - Potência sobre a carga em função da carga

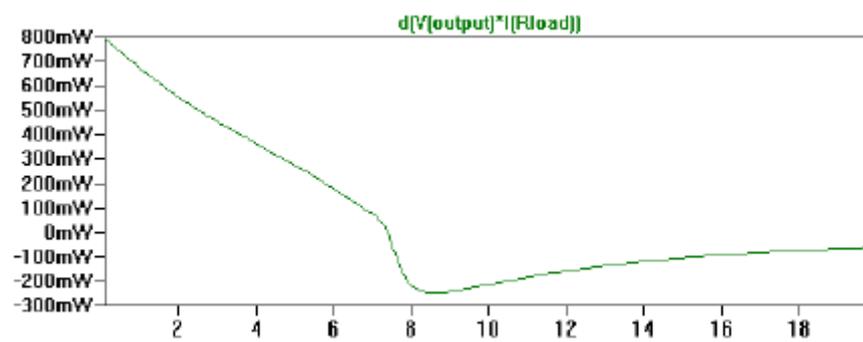


Fig. 22 - Derivada da potência sobre a carga em função da carga

Prática 2 - Análise no Domínio da Frequência

Uma grande parte dos estudos realizados em circuitos eletrônicos tem como objetivo determinar como é a resposta em frequência linear de um sistema qualquer. Isso é usado para projetar desde amplificadores de áudio e transmissores de rádio até malhas de controle. O simulador LTSpice é um excelente software para linearizar circuitos eletrônicos e traçar suas respostas em frequência para pequenos sinais.

Para os novos tipos de análises utilizados nesta análise serão explorados os capacitores e indutores discretos além das reatâncias parasitas que aparecem tipicamente em dispositivos semicondutores e afetam sua performance à medida que se aumenta a sua frequência de operação.

Capacitores e indutores podem ser encontrados facilmente entre o resistor e o diodo usados nas práticas anteriores ou simplesmente apertando “c” para o capacitor e “l” para o indutor. Seus valores nominais em Farad e Henry podem ser editados novamente clicando-se com o botão direito sobre eles e alterando o primeiro campo para o valor desejado. Na primeira prática utilizamos 1k para o valor do resistor R1, porém vários múltiplos importantes devem ser conhecidos para se escrever as unidades corretamente. A tabela 1 ilustra como podem ser escritas os múltiplos de unidades do LTSpice. Por exemplo, 1 microfarad pode ser escrito como 1u no campo de unidade do capacitor e 22 kilohms pode ser escrito como 22k no campo de unidade do resistor.

Tabela 2

Múltiplos e Submúltiplos no LTSpice		
Nome do múltiplo	Escrita no Spice	Valor Matemático
Fento	Xf	10^{-15}
Pico	Xp	10^{-12}
Nano	Xn	10^{-9}
Micro	Xu	10^{-6}
Mili	Xm	10^{-3}
Kilo	Xk	10^3
Mega	Xmega	10^6
Giga	Xgiga	10^9

Circuito com Fonte AC e Capacitor

O circuito da figura 23 é implementado utilizando o componente “voltage” como V1, o nó de referência em seu polo negativo, um nome para o nó “circ4” e um capacitor de valor 10uF. A intenção de análise neste circuito é medir a corrente sobre um capacitor para 1V na fonte V1. Se esse valor for medido em corrente contínua ele será sempre 0 A, pois o capacitor é um circuito aberto em DC. Em corrente alternada fluirá corrente sobre o capacitor, o que será visualizado em seguida. Na janela de seleção de análises selecione a “AC analysis”, conforme Fig. 24, também conhecida como .AC. Essa análise irá fazer uma varredura da resposta do circuito para todas as frequências e traçar os gráficos de corrente e tensão para o circuito. Em seus parâmetros estão o tipo de varredura, os pontos da varredura, a frequência de início e de parada. Use a análise por década, com 1000 pontos por década, com início em 1Hz e parada em 100kHz.

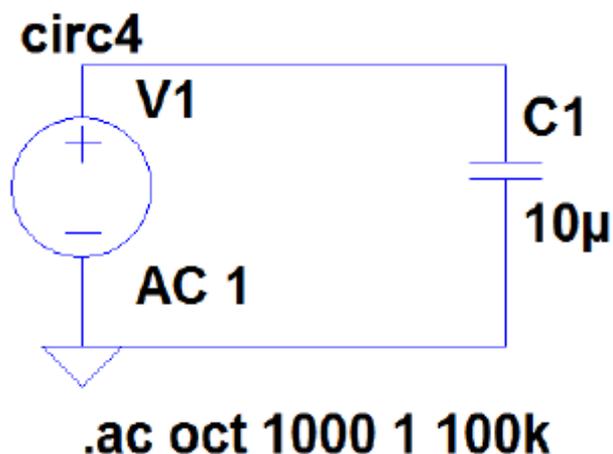


Fig. 23 - Circuito para análise .AC com capacitor

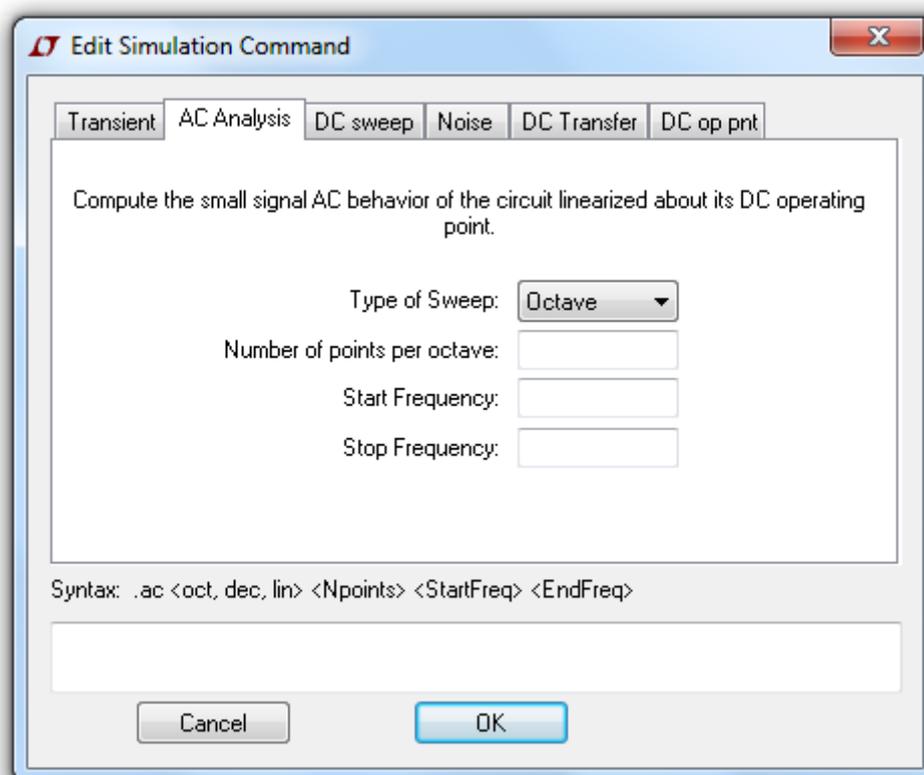


Fig. 24 – AC Analysis

Para realização desta análise basta configurar uma fonte de varredura em frequência. Clicando com o botão direito no componente “voltage” e em opções avançadas, do lado direito haverá um campo denominado “Small signal .AC analysis” com entrada para amplitude e fase. Preencha amplitude com 1V e deixe o campo de fase em branco. O circuito finalizado deve ficar como na figura 24

Rodando a simulação e plotando-se a corrente sobre o capacitor em função da frequência obtém o gráfico da figura 25. O gráfico está com o eixo das abscissas em escala logarítmica, com a amplitude também logarítmica e a fase linear. Caso deseje alterar para escala linear basta clicar com o botão direito no eixo desejado e fazer a alteração na janela.

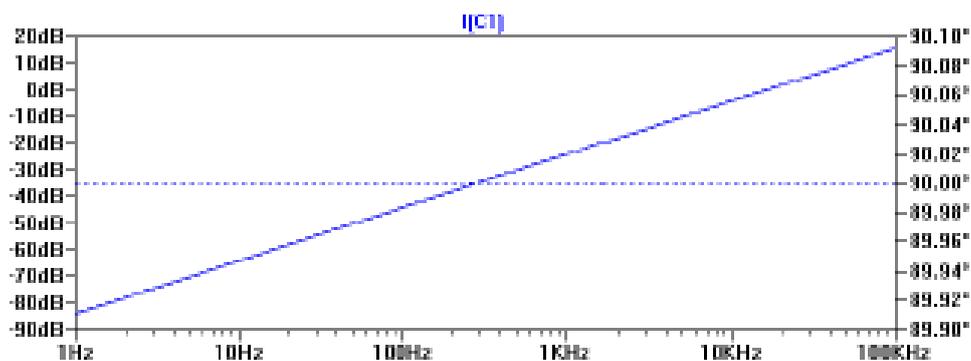


Fig. 25 – Corrente no capacitor em função da frequência

Circuito com Fonte AC e Indutor

Substituindo-se o capacitor de 10 μ F por um indutor de 1mH, como na figura 26, e realizando a mesma análise de varredura em frequência da fonte V1, obtém-se o gráfico da figura 26. Verifica-se que a fase da corrente no indutor não é constante devido a uma pequena impedância série que este apresenta, configurada por padrão pelo simulador. Ela pode ser editada, se desejado, clicando-se com o botão direito sobre o indutor e alterando o campo de “Series Resistance”.

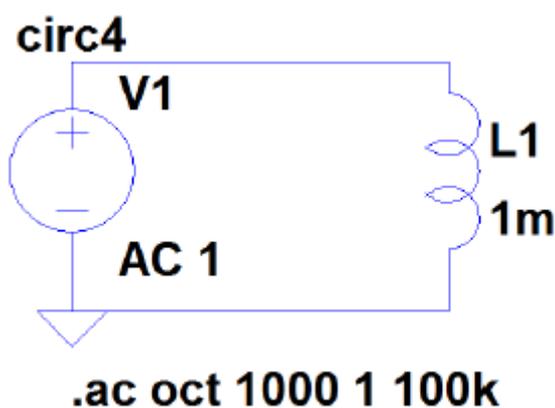


Fig. 26 – Circuito para análise .AC para o indutor

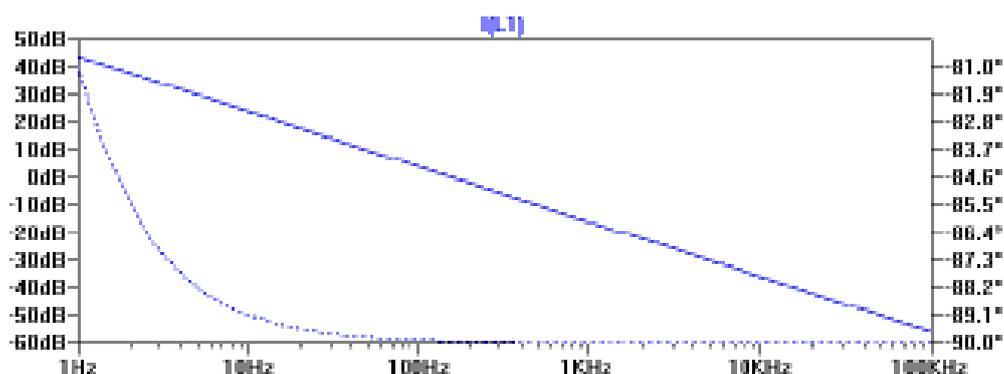


Fig. 27 – Corrente no indutor em função da frequência

Filtro Passivo Passa Baixa RC

Filtros passivos elementares podem ser simulados com facilidade em análise .AC utilizando os componentes discutidos anteriormente. A figura 28 ilustra um filtro de passa baixa implementado com a fonte V1 configurada em AC 1, um resistor de 1k e um capacitor de 1u, com o nó entre os dois componentes passivos denominado "PB". A análise .AC é a medição da tensão no PB e fornece a resposta em frequência da figura 29.

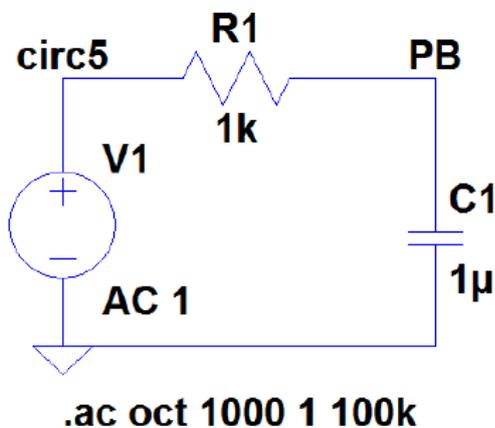


Fig. 28 – Filtro de passa baixa

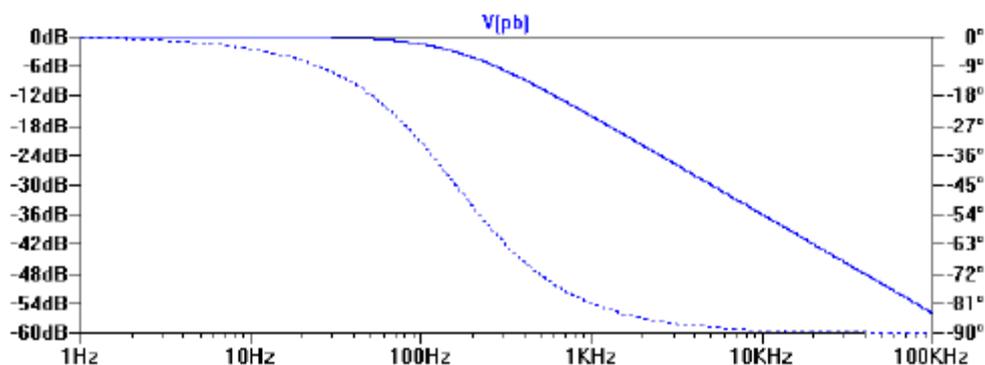


Fig. 29 – Resposta em frequência do filtro de passa baixa

Filtro Passivo Passa Faixa RLC

Adicionando-se um indutor de 1mH em paralelo com o capacitor é possível se obter um filtro passa faixa, como indicado na figura 30. Com a análise .AC plota-se a resposta em frequência do filtro, como na figura 31.

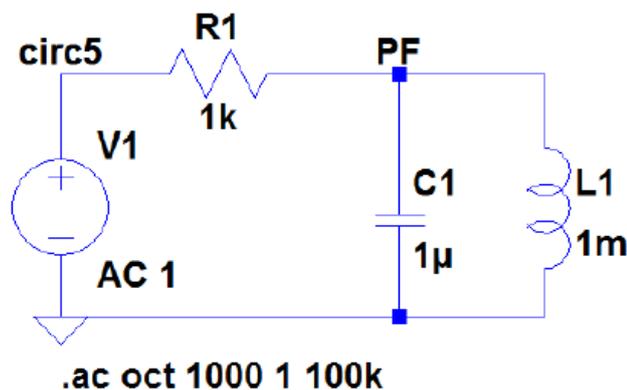


Fig. 30 – Filtro passa faixa RLC

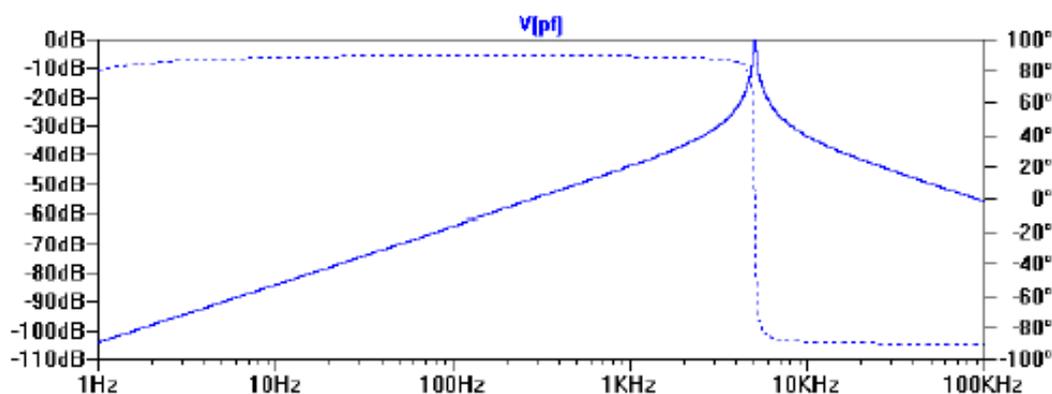


Fig. 31 – Resposta em frequência do filtro de passa faixa

Amplificadores Operacionais

O LTSpice possui uma vasta biblioteca de amplificadores operacionais, contando com vários modelos fornecidos pela própria Linear Technology assim como os adicionados pela biblioteca do Professor Veronese do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da EESC-USP. Cada amplificador operacional deve ser encontrado como sua entidade específica, por seu nome. Crie um novo esquemático e em *Component* procure pelo amp op LT1022 fabricado pela Linear Technology. Este componente tem 5 terminais, sendo dois de alimentação simétrica. Pode-se utilizar duas fontes “voltage” simetricamente dispostas em relação ao nó de referência. Uma maneira mais simples é utilizar as **fontes simplificadas** da pasta “**Fontes**” da biblioteca dentro dos componentes. Adquirir uma fonte de +15V e outra de -15V e as coloque nos terminais correspondentes do amp op. Essas fontes irão gerar tensões de +15 e -15V com relação ao nó de referência do circuito, alimentando satisfatoriamente o operacional.

Na entrada não inversora coloque o componente “voltage” com a correta distinção AC 1 para varredura em frequência como V1. Coloque o polo negativo dessa fonte no nó de referência. Coloque também a entrada inversora do amp op no nó de referência. Da saída do amplificador puxe um fio e nomeie o nó como “output” assim como o polo positivo da fonte V1 como “input”. Use a mesma análise .AC programada para os casos anteriores. O circuito está ilustrado na figura 32. A figura 33 ilustra a resposta em frequência desse amplificador para V1 em seu nó output.

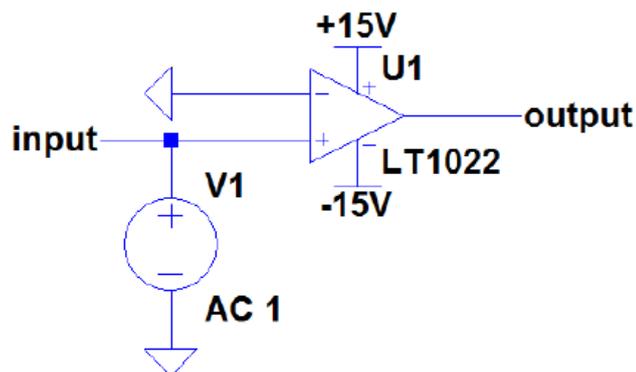


Fig. 32 – Amplificador Operacional em malha aberta

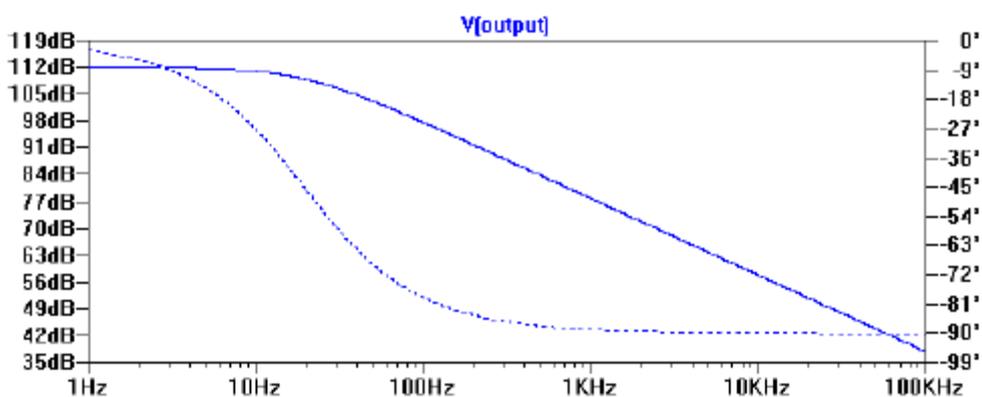


Fig. 33 – Ganho de Tensão em função da frequência de um op amp em malha aberta

Na figura 34 observa-se que o amplificador LT1022 possui enorme ganho de tensão para frequências baixas e este cai para frequências maiores que 10Hz. Efetuando-se a realimentação total ou unitária pode-se reduzir o ganho para o unitário e aumentar bastante a banda do amplificador e outros fatores como linearidade, impedância de entrada que serão estudados em cursos futuros. Para fazer essa realimentação basta ligar a entrada inversora na saída.

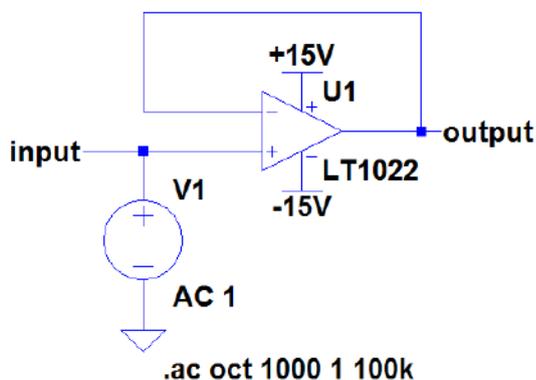


Fig. 34 – Amplificador operacional em malha fechada com realimentação total

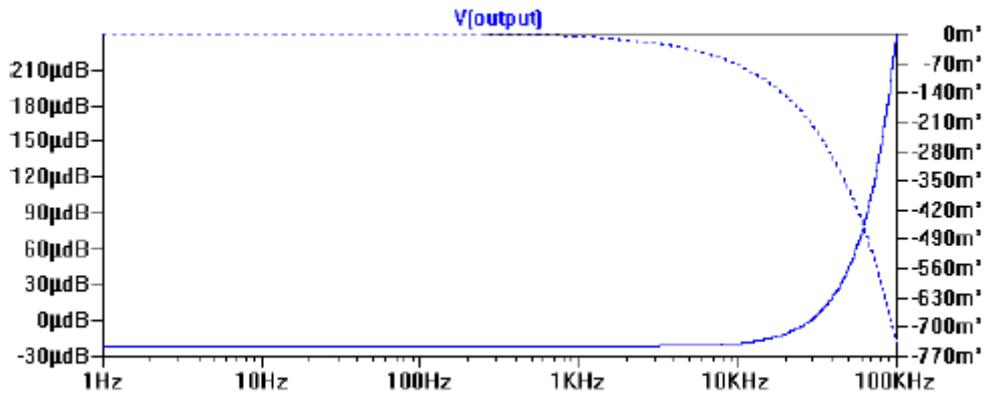


Fig. 35 – Ganho de Tensão para realimentação total

Valores intermediários de realimentação podem ser obtidos com um divisor resistivo nessa malha de realimentação. O circuito pode ser visto na figura 36. A figura 37 ilustra o ganho de tensão para um divisor resistivo, com um resistor de $10\text{k}\Omega$ entre a entrada inversora e a saída e um resistor de $1\text{k}\Omega$ entre a entrada inversora e o nó de referência.

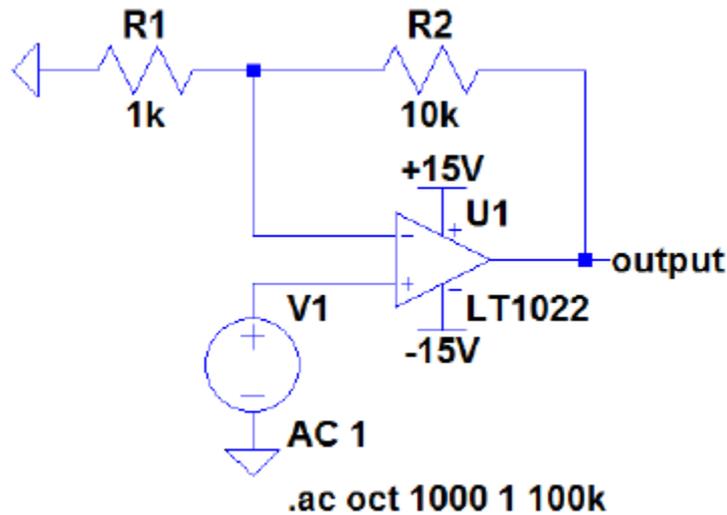


Fig. 36 – Amplificador operacional em malha fechada com realimentação parcial

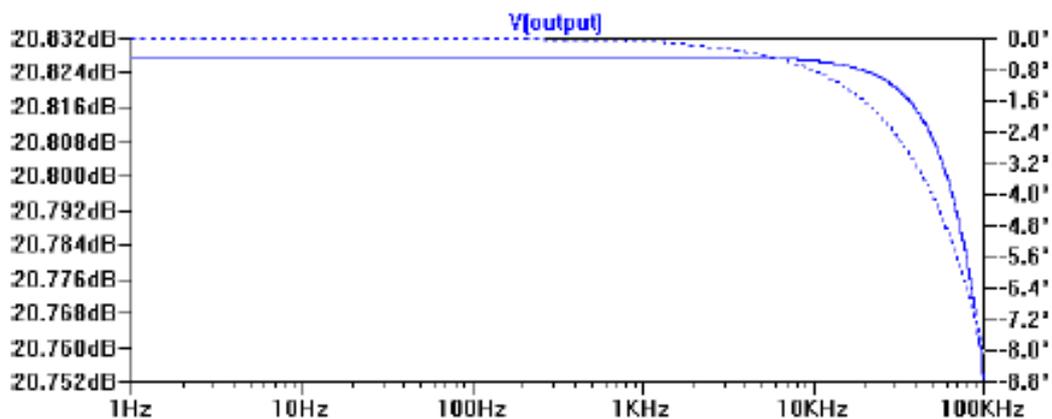


Fig. 37 – Ganho de tensão para realimentação parcial

Com a entrada não inversora no nó de referência, um capacitor de $1\mu\text{F}$ na malha de realimentação entre a entrada inversora e a saída, um resistor de $1\text{k}\Omega$ entre a fonte V1 e a entrada inversora é possível se construir um integrador. O circuito citado pode ser visto na figura 38 e a sua resposta em frequência na figura 39.

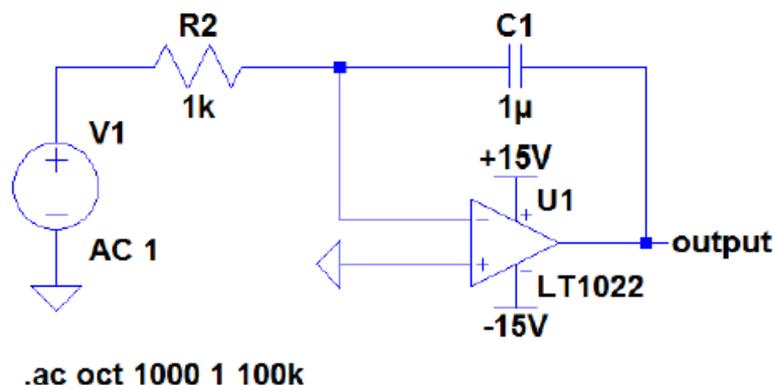


Fig. 38 – Amplificador Integrador

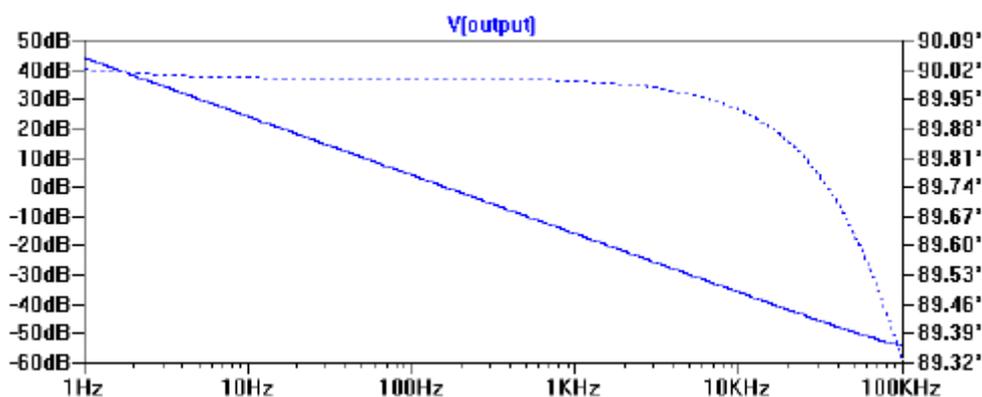


Fig. 39 – Resposta em frequência do circuito Integrador

Amplificador com JFET

Pode-se obter um jfet (transistor de efeito de campo de junção) no LTSpice procurando-se pelo componente njf em “componentes”. A figura 40 ilustra um amplificador de tensão básico montado com o componente BF245A, que pode ser encontrado dentro do componente geral njf. Esse componente é bastante recomendado para ampliações em altas frequências que requerem ganhos não tão altos. Realizando a análise .AC de 100Hz até 100MHz e traçando-se a curva de tensão na saída, obtém-se a resposta em frequência da figura 41.

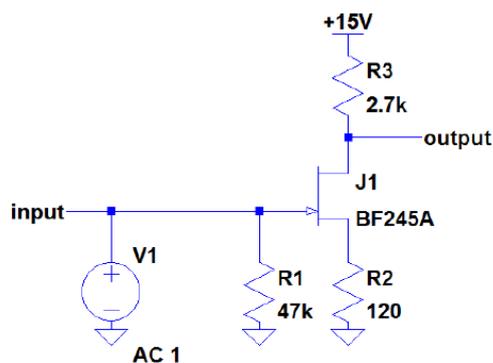


Fig. 40 – Amplificador Fonte Comum com JFET

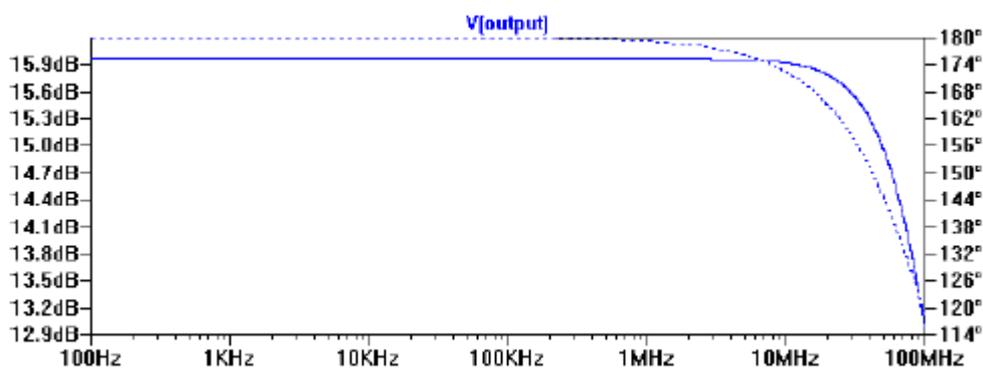


Fig. 41 – Resposta em frequência do amplificador com JFET

Impedância de Entrada e Saída

Muitas vezes é de extrema importância conhecer as impedâncias de entrada e de saída dos amplificadores. No circuito da Fig. 40 a impedância de entrada do circuito em função da frequência pode ser traçada simplesmente pela razão entre a tensão de entrada e a corrente que atravessa a fonte de entrada. Esse gráfico é apresentado na figura 42. Caso deseje-se verificar a impedância de entrada do JFET, ignorando o resistor de $47\text{k}\Omega$, pode determinar a razão entre a tensão de entrada pela corrente na porta do JFET, como na figura 43. O primeiro gráfico e traçado em escala linear e o segundo em escala logarítmica.

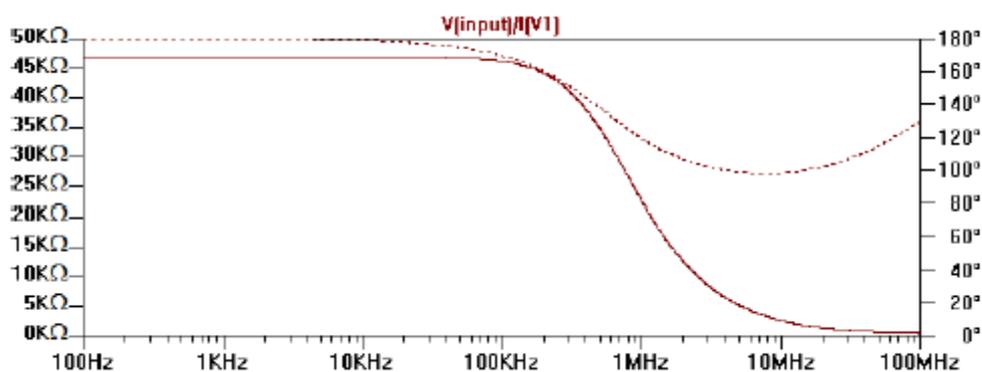


Fig. 42 – Impedância de entrada do amplificador JFET

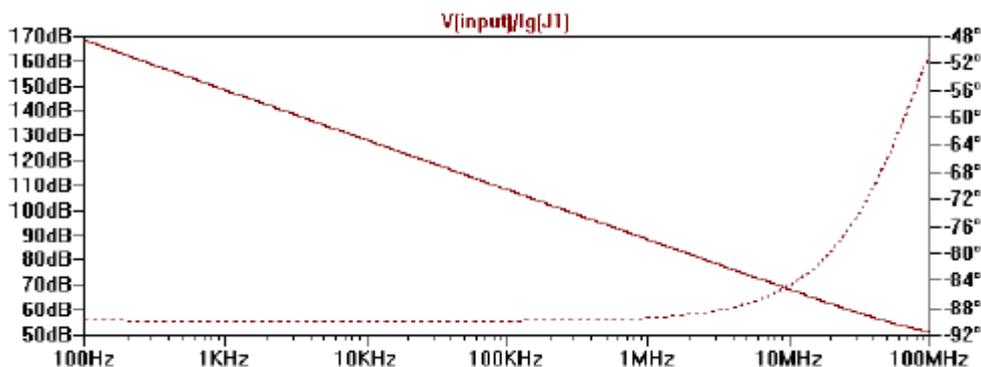


Fig. 43 – Impedância vista na porta do JFET

A impedância de saída de um amplificador demanda uma técnica um pouco mais elaborada. Pelo equivalente de Thevenin, a impedância de saída de um circuito é a sua tensão em vazio dividida pela corrente de curto circuito. Para se obter as duas informações simultaneamente é necessário copiar o circuito, como na figura 44, fazendo a saída do circuito original em aberto e a do novo em curto circuito. Para o curto não influenciar na polarização do amplificador é utilizado um capacitor de altíssimo valor, 1F, que irá isolar DC e não fará diferença para as frequências que estamos trabalhando. A impedância é obtida pela tensão em vazio no nó “output” do circuito da esquerda dividida pela corrente no capacitor C1 de 1F. Verifique que a entrada “input” é a mesma nos dois circuitos. A figura 45 ilustra a impedância de saída do amplificador em função da frequência.

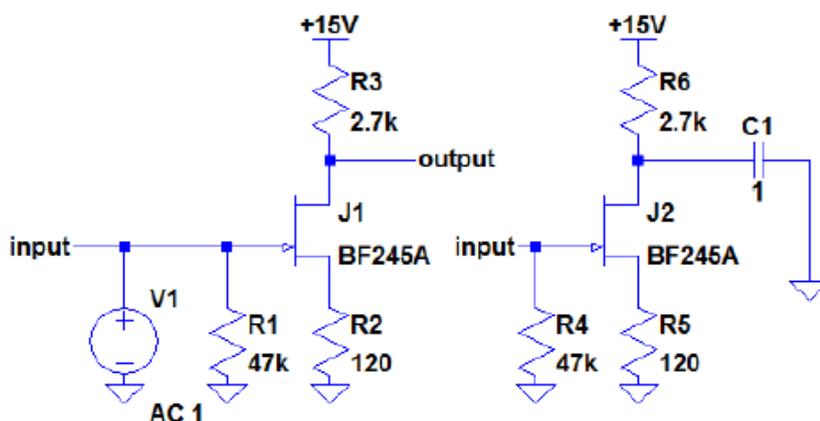


Fig. 44 – Impedância vista na porta do JFET

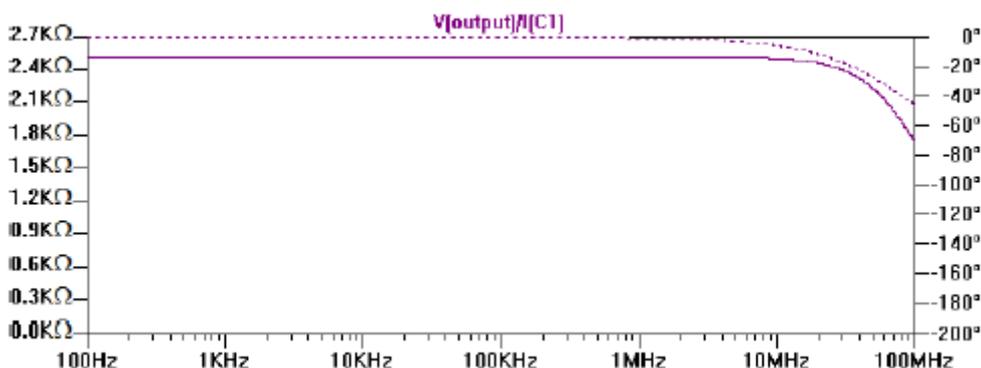


Fig. 45 – Impedância de saída em função da frequência

Prática 3 - Análise no Domínio do Tempo

Após o estudo básico em corrente contínua e em corrente alternada, estudaremos o funcionamento dos circuitos eletrônicos como eles são no tempo. A descrição matemática precisa do comportamento da maioria dos circuitos aqui descritos é extremamente complexa raramente feita para cálculos manuais. É praticamente mandatório o uso de um simulador computacional para se visualizar detalhadamente como os dispositivos eletrônicos operam de verdade no tempo.

Geração de Sinais

A geração de sinais variantes no tempo será estudada primeiramente. Implemente um circuito com o componente "voltage" em um esquemático com seu polo negativo no nó de referência e seu polo positivo em vazio, apenas nomeado por "sinal", como na figura 46.

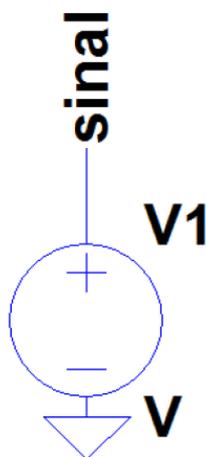


Fig. 46 – Fonte geradora de sinais

Clique com o botão direito na fonte V1 e vá em opções avançadas. No lado esquerdo existem várias opções de sinal que podem ser gerados com este tipo de fonte. "None" corresponde a um nível DC normal como usamos na primeira prática. Pulse permite a programação completa de ondas quadradas, triangulares, rampas, pulsos. Selecione a opção pulse. Esta configuração tem um número razoável de parâmetros que permitem grande versatilidade, são eles: tensão em OFF, tensão em ON, atraso até o início dos ciclos, tempo de subida, tempo de descida, tempo ligado e tempo total. Programe uma onda quadrada utilizando como tensão em OFF 0V, tensão 5V em ON, tempo de subida, descida e atraso em 1ps, tempo ligado de 1m e tempo total 2m. Ao lado da fonte V1 deve aparecer o seguinte texto PULSE(0 5 1p 1p 1p 1m 2m).

Para efetuar a análise no tempo basta ir na janela de configuração de simulação e selecionar a análise "**Transient**" também conhecida como análise **.TRAN**, conforme figura 47. Os parâmetros são três: tempo de parada de simulação, tempo de início de armazenamento dos dados e passo máximo. Tempo de início e passo máximo devem ser configurados em casos de circuitos com transientes bruscos ao serem ligados ou que atinjam estados estacionários com mudanças repentinas. Para este caso basta preencher o tempo de parada como 30m e confirmar. O circuito final deve ficar como o da figura 48. Rodando-se a simulação, obtém a tensão no nó "sinal" ilustrado na figura 49. Vale notar que o eixo vertical foi alterado para ir de 0 a 7V.

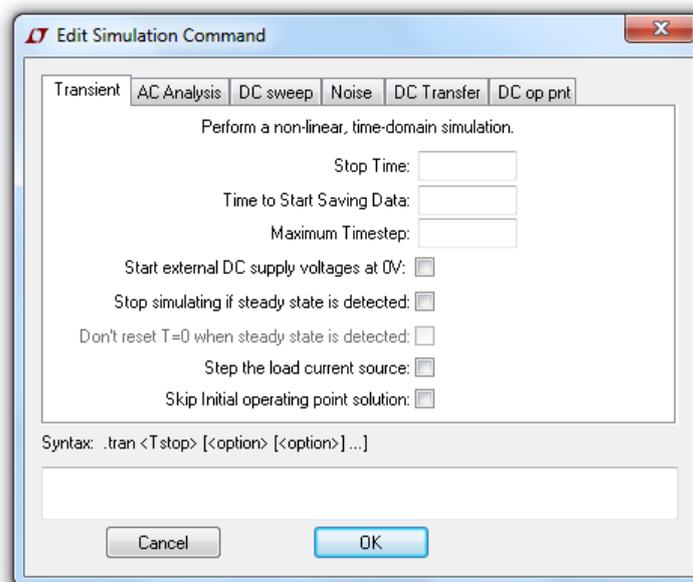


Fig. 47 – Análise transiente

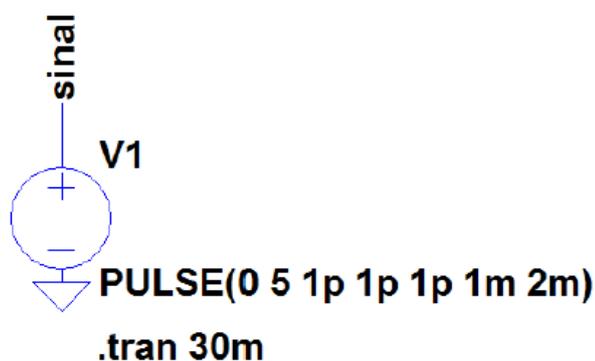


Fig. 48 – Gerador de onda quadrada

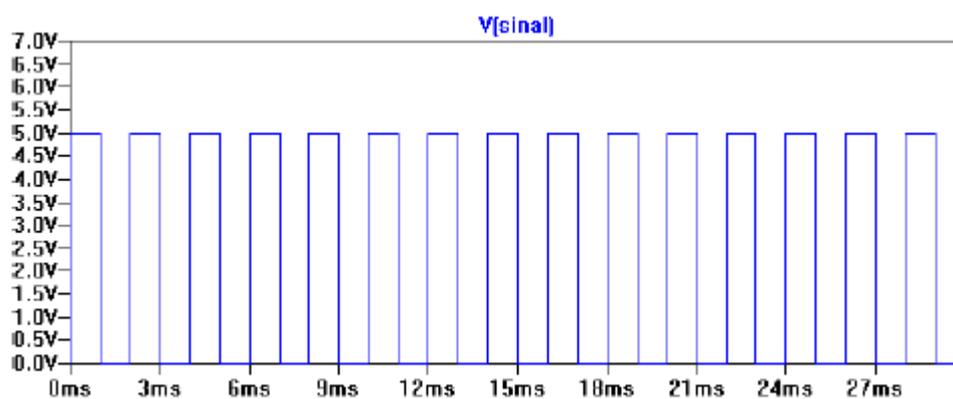


Fig. 49 – Onda quadrada

Outros tipos de onda podem ser gerados ainda na função pulse, como a onda triangular, onde o tempo de subida e descida correspondem a maior parte do período total e

o tempo ligado é desprezível. Pode ser gerada por `PULSE(0 5 1p 1m 1m 1p 2m)` e é ilustrada na figura 50. Uma rampa ascendente pode ser gerada fazendo o tempo de subida ser igual ao tempo total e uma descendente com o tempo de descida igual ao tempo total. `PULSE(0 5 1p 2m 1p 1p 2m)` irá gerar a rampa ascendente ilustrada na figura 51 e `PULSE(0 5 1p 1p 2m 1p 2m)` irá gerar a rampa descendente ilustrada na figura 52. Esses parâmetros podem ser alterados para gerar qualquer tipo de onda com subidas e descidas retas.

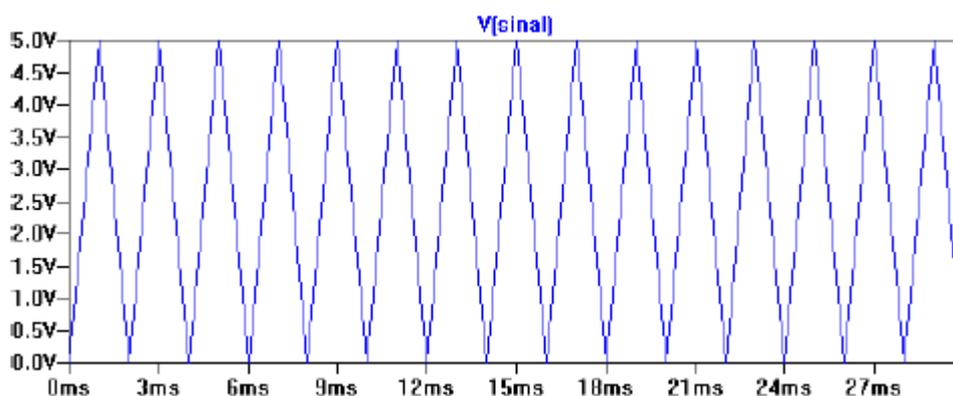


Fig. 50 – Onda triangular

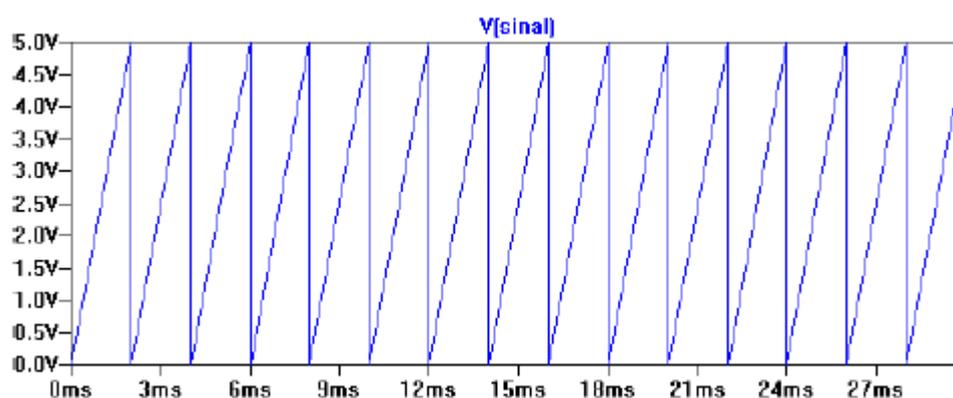


Fig. 51 – Onda triangular ascendente

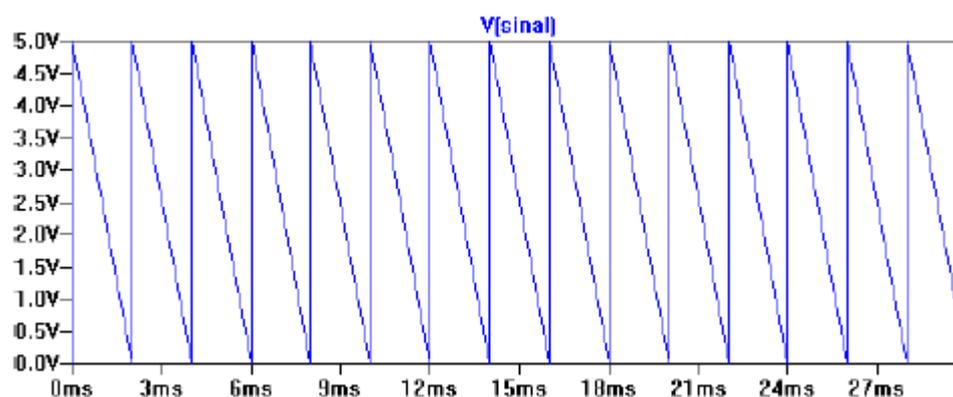


Fig. 52 – Onda triangular descendente

Logo abaixo da opção “pulse” se encontra a opção “sine” que permite configurar uma onda senoidal pura. Os parâmetros são os seguintes: nível médio, amplitude, frequência,

atraso, amortecimento exponencial e fase. Os três últimos podem ser ignorados para a maioria das aplicações normais, exceto se for importante se obter dois sinais de fase diferente ou algo semelhante. Para esta aplicação configure o nível médio como 0V, amplitude em 1V e frequência 200Hz. Ao lado da fonte deverá estar escrito SINE(0 1 200). Realizando a análise .TRAN nos mesmos 30ms obtém-se a forma de onda da figura 53.

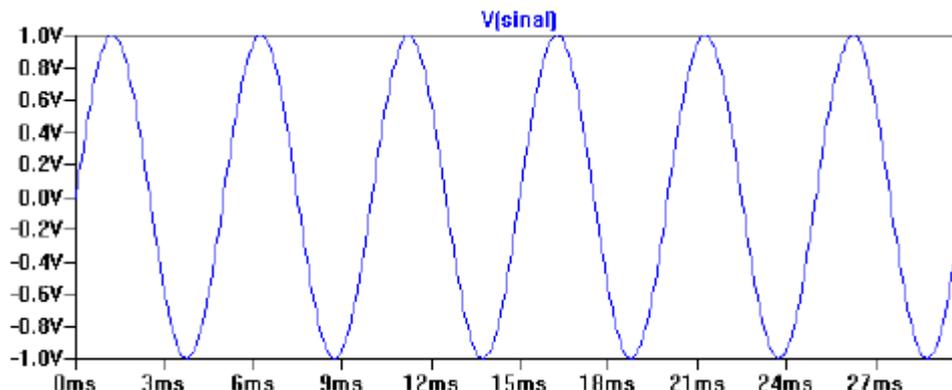


Fig. 53 – Onda senoidal

Uma aplicação interessante do comando .step param e a variação da amplitude de sinais no domínio do tempo. Na configuração da senóide altere o campo de amplitude para {a} e acrescente na simulação o comando .step param a 1 5 1. Serão feitas 5 simulações distintas variando a amplitude deste sinal entre 1 e 5 volts, com passo de 1V. Essas 5 simulações poderão ser traçadas juntas no mesmo gráfico, como ilustrado na figura 54.

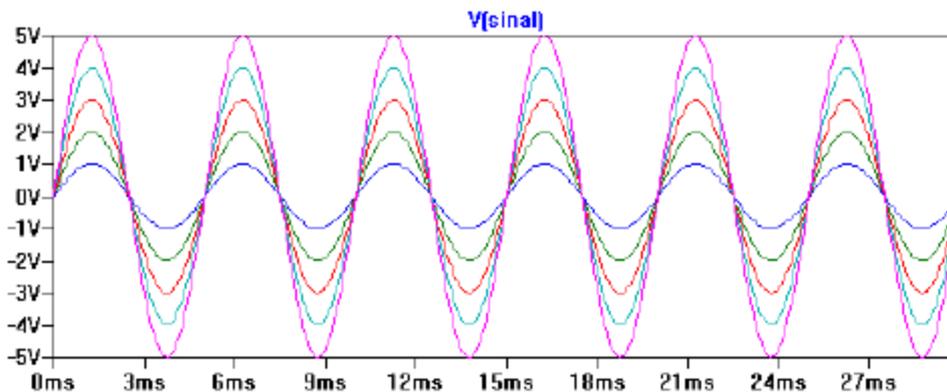


Fig. 54 – Ondas senoidais com variação na amplitude

Transiente em Circuito RC

Amplamente estudados nas disciplinas de circuitos elétricos, os transientes em sistemas lineares são de vital importância com aplicações imediatas em controle e telecomunicações. Os filtros passa baixa e passa faixa foram investigados anteriormente em análise de resposta em frequência, o que corresponde a um regime estacionário para cada frequência. Neste caso, iremos aplicar um degrau nesses filtros e visualizar suas respostas. Deve-se implementar o circuito da figura 55 utilizando uma fonte de tensão DC com 10V de amplitude, um resistor de $1k\Omega$ e um capacitor de $1\mu F$. Na configuração da análise .TRAN, altere o tempo de simulação para 20ms e clique na caixa da primeira opção **“Start External DC supply voltages at 0V”**, conhecido por **“startup”**. Isso irá fazer com que as fontes DC sejam

iniciadas em 0V e rapidamente subirão para o seu valor nominal, gerando o degrau desejado. Nomeie o nó de saída como “transiente”. A figura 56 corresponde a resposta superamortecida na saída do filtro.

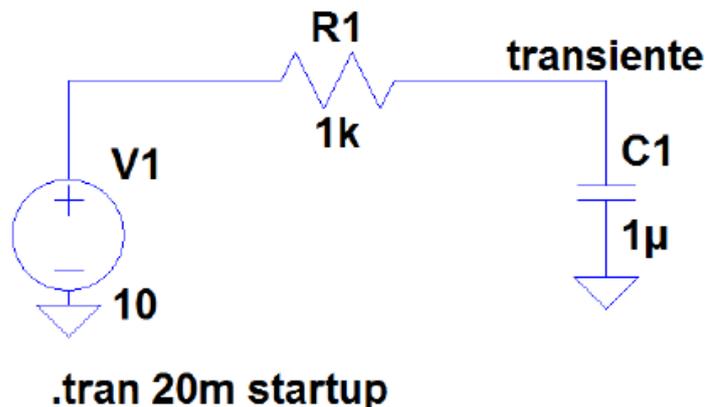


Fig. 55 – Filtro Passa baixa com entrada degrau

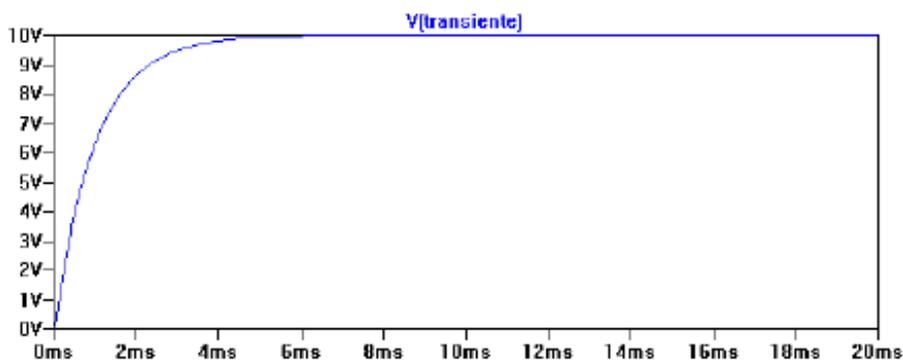


Fig. 56 – Resposta do filtro passa baixa ao degrau

Transiente em Circuito RLC

Alterando o valor do resistor para $10\ \Omega$, o capacitor para $100\ \mu\text{F}$ e inserindo um indutor de $330\ \mu\text{H}$ em paralelo com o capacitor, pode-se implementar o filtro passa faixa como na figura 57. Com a mesma simulação, para o mesmo degrau de 10V, pode-se verificar a saída no nó “transiente”, um sinal sub-amortecido, ilustrado na figura 58.

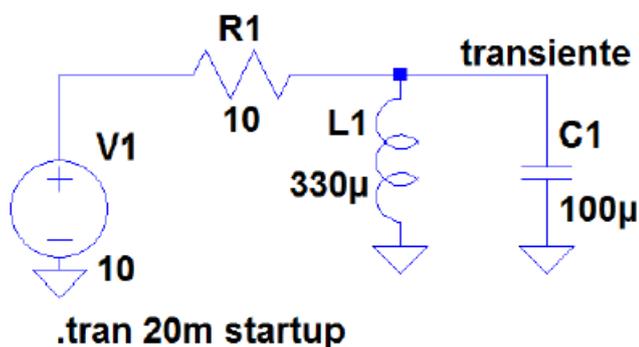


Fig. 57 – Filtro Passa faixa com entrada degrau

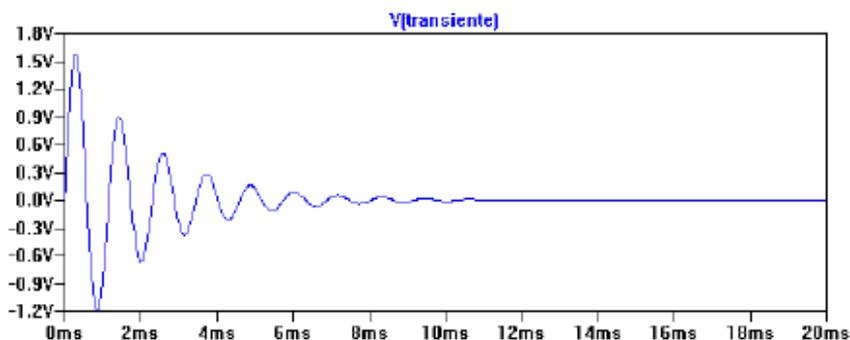


Fig. 58 – Resposta do filtro passa faixa ao degrau

Amplificador com Amp Op

Em prática anterior foi estudado como o amplificador operacional se comporta em frequência. Implemente o circuito com realimentação parcial com um divisor resistivo (composto por dois resistores de $1k\ \Omega$) entrada não inversora e um sinal senoidal na entrada de 200Hz e 1V. A intenção deste circuito é dividir o sinal por dois e multiplicá-lo por 11 no amplificador, obtendo-se um ganho de 5,5 V/V na banda de frequência do operacional.

A montagem é ilustrada na figura 59, com análise .TRAN até 10ms e nós nomeados “output”, “input” e “divisor”. **Quando um circuito é simulado sem o .startup, o simulador irá calcular suas tensões DC em todos os nós e só então irá iniciar a simulação transiente**, um conhecimento vital para simulação de amplificadores e osciladores. O startup não se aplica as fontes simplificadas +15 e -15V utilizadas aqui. Os sinais sobrepostos nos 3 nós estão ilustrados na figura 60.

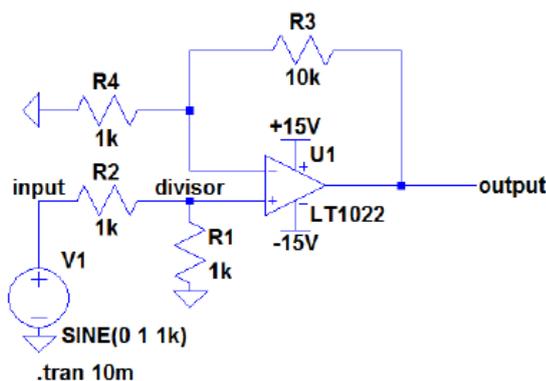


Fig. 59 – Amplificador de ganho 5,5 V/V

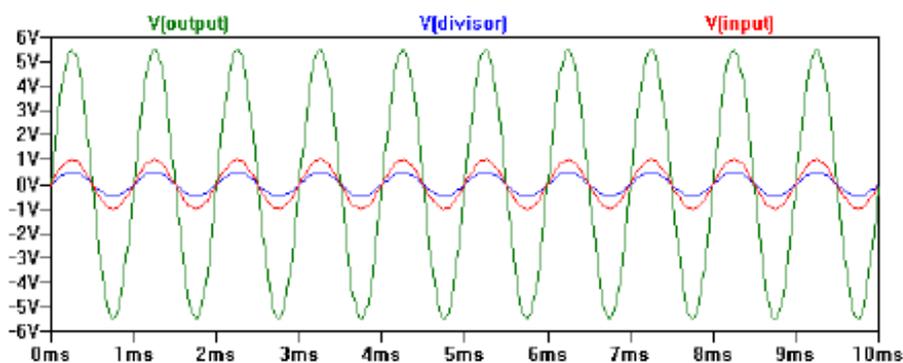


Fig. 60 – Sinal de entrada após o divisor resistivo e após o amplificador

Alterando a amplitude da senóide de entrada para 3V o amplificador não irá conseguir gerar a tensão amplificada em sua saída e seus picos serão cortados, isto é, o amplificador irá ceifar o sinal. Esse fenômeno não pode ser previsto pela análise em frequência e é de extrema importância para estudar o funcionamento de amplificadores operando a tensões próximas das suas tensões de alimentação. A Figura 61 ilustra o sinal de saída para a entrada com 3V de amplitude.

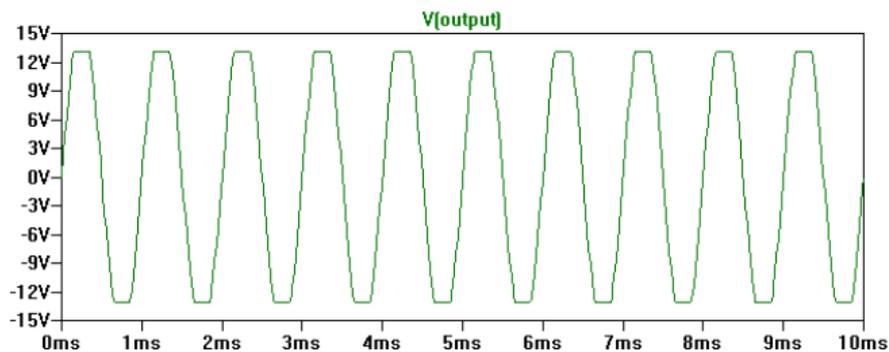


Fig. 61 – Sinal de saída do amplificador ceifado

Outro conceito importante em amplificadores é a limitação de derivada em sua saída. O amplificador possui uma derivada máxima em relação ao tempo e ela não pode ser superada. Substitua a entrada por uma onda quadrada de PULSE(-3 3 1p 1p 1u 2u), que corresponde a uma frequência de 500kHz, relativamente baixa. Faça a simulação .TRAN até 30us. A saída do amplificador será limitada em derivada se assemelhando a uma onda triangular. A figura 62 compara a entrada com a saída e a figura 63 é a derivada no tempo do sinal de saída, traçada usando o comando d(V(output)) no editor de expressão. A máxima derivada que um amplificador operacional pode ter em sua saída é um de seus mais importantes parâmetros, conhecido como “Slew Rate”, tabelado como 21MV/s para o modelo LT1022.

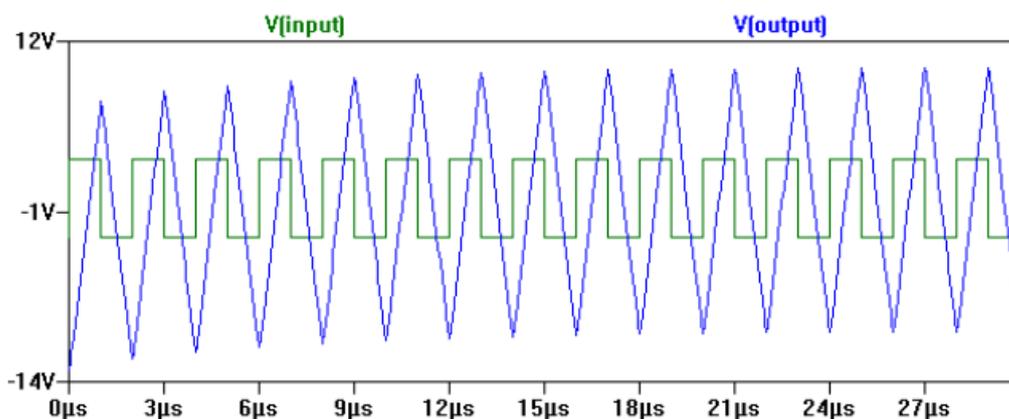


Fig. 62 – Saída limitada em derivada

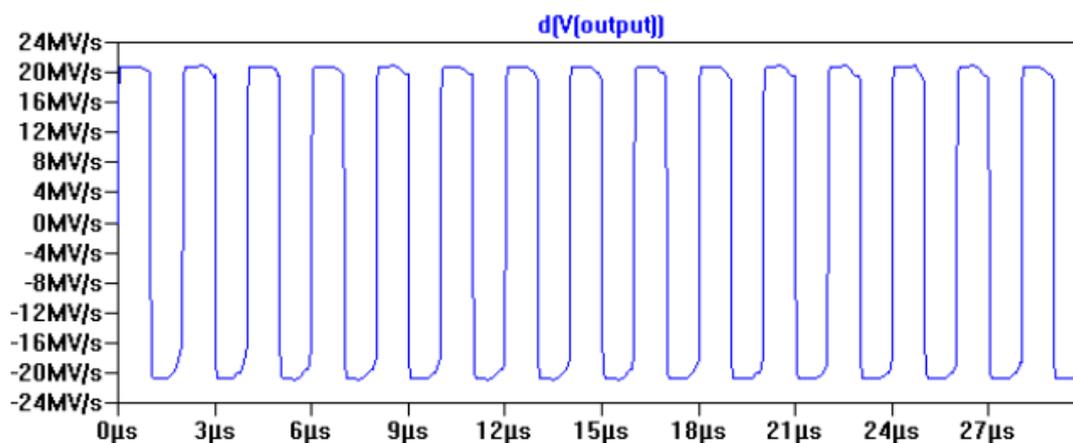


Fig. 63 – Derivada do sinal de saída no tempo

Oscilador de Relaxação com Amp. Op.

Circuitos osciladores são circuitos eletrônicos capazes de gerar sinais alternados sendo alimentados apenas com fontes contínuas. Pode-se montar um circuito capaz de gerar uma onda quadrada utilizando um amplificador operacional, no caso o próprio LT1022, três resistores de $1\text{k}\Omega$ e um capacitor de $1\mu\text{F}$. O circuito precisa operar com fonte simétrica em relação ao nó de referência. Poderíamos utilizar as mesmas fontes $+15$ e -15V da pasta de fontes simplificadas, mas como citado anteriormente, essas fontes não são afetadas por startup. Osciladores de modo geral precisam do degrau na alimentação para serem iniciados, caso contrário o simulador iria calcular o ponto de operação estável, o que garantiria que o circuito não oscilasse. Use um arranjo com duas fontes “voltage” de 15V DC , sendo o centro no nó de referência e os terminais em nós nomeados $+15$ e -15 , sendo os mesmos nomes colocados nas alimentações do operacional. O circuito final, com todos os componentes e a análise .TRAN para 20ms com startup, é ilustrado na figura 64

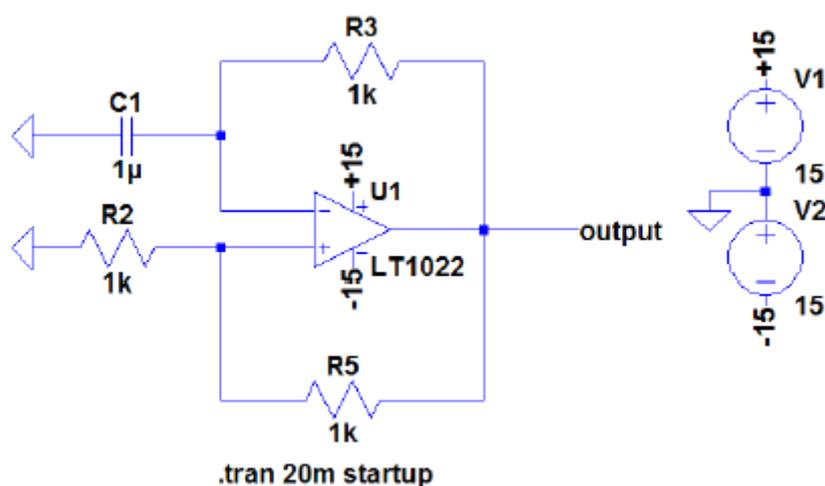


Fig. 64 – Oscilador de relaxação

A figura 65 ilustra a forma de onda na saída do circuito. A figura 66 ilustra a forma de onda da corrente no capacitor e a figura 67 ilustra a potência no tempo fornecida pela fonte V1 ao circuito (traçada ao clicar na fonte segurando-se alt).

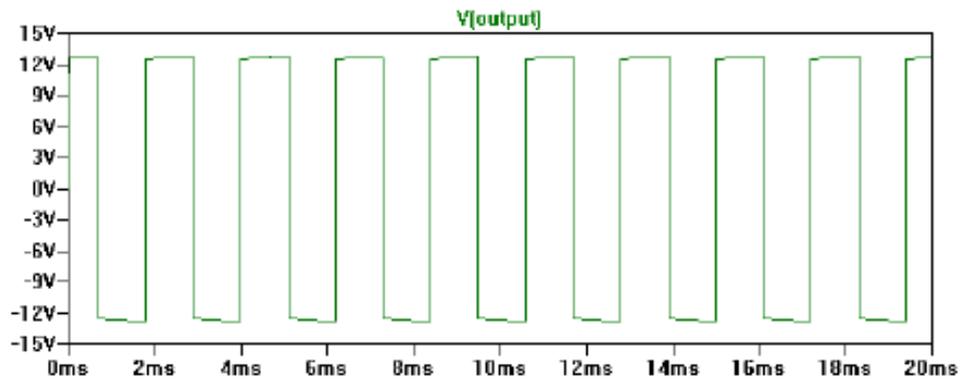


Fig. 65 – Onda quadrada gerada pelo oscilador

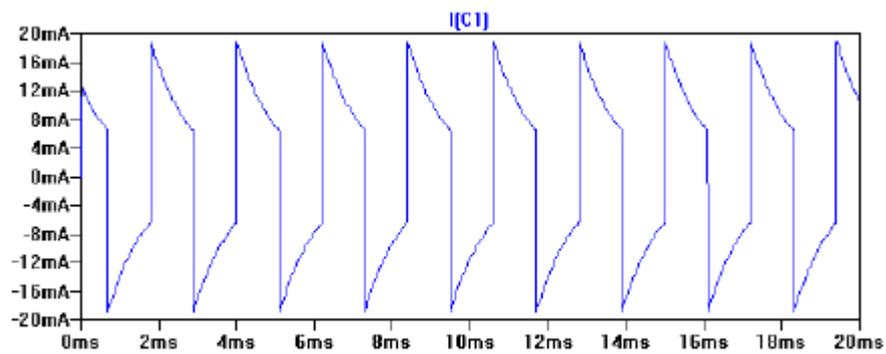


Fig. 66 – Corrente sobre o capacitor no tempo

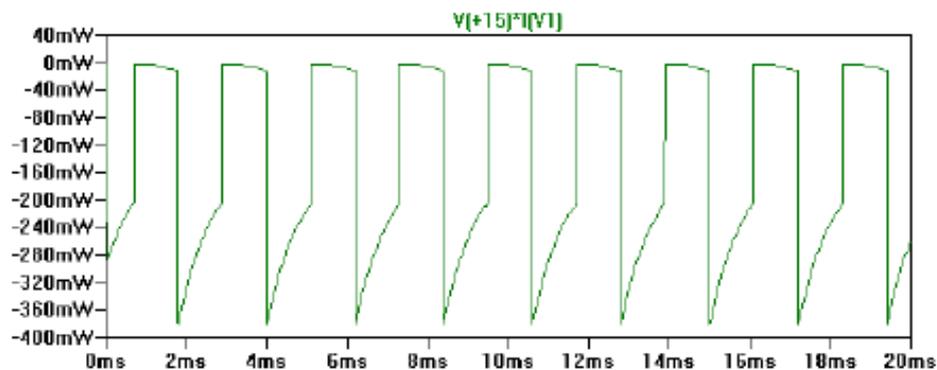


Fig. 67 – Potência fornecida ao circuito por uma das fontes

Espectro de Frequência

Pode-se plotar o espectro de frequências de um sinal no tempo (FFT) com a janela de formas de onda aberta e clicando-se no menu “View” e “FFT”. Para a maior parte dos casos será suficiente selecionar o sinal desejado na lista e plotar com as opções padrão. A figura 68 ilustra a FFT do sinal na saída do oscilador. Uma outra opção mais simples e bastante usual de análise de espectro de frequências é o uso do comando **.four**. Este comando irá analisar para um ou mais nós a amplitude de uma determinada frequência e de seus primeiros harmônicos. O comando também irá calcular diretamente a **THD**, taxa harmônica de distorção, que é estudada em detalhes na disciplina laboratório de circuitos eletrônicos 2 e que, resumidamente, mede a razão entre a fundamental e suas harmônicas. O comando pode ser programado da forma: **.four** “frequência” V(nó). Os resultados de sua análise se encontrarão no registro erros do software que pode ser acessado pressionando-se “**ctrl+L**”.

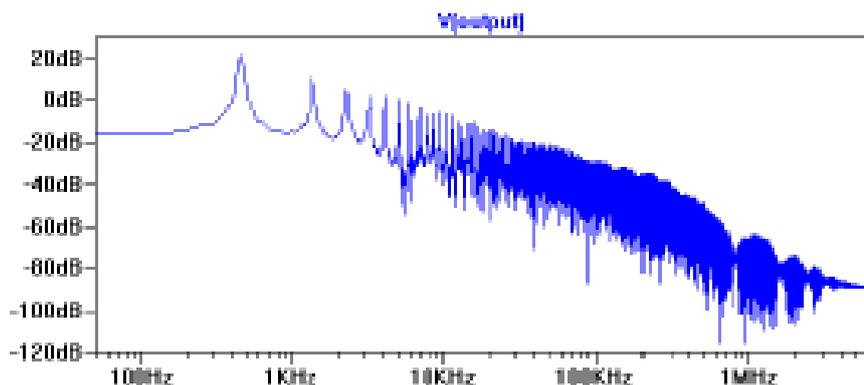


Fig. 68 – Espectro de frequência da onda quadrada gerada pelo oscilador

Retificador de Potência com Filtro Capacitivo

Retificadores de potência são circuitos capazes de transformar um sinal senoidal em um nível DC associado a um sinal de alternado menor amplitude. Esse nível DC, após filtrado e estabilizado, pode ser utilizado para alimentar um circuito que requer uma alimentação DC. Uma versão ilustrativa bem rudimentar dessa topologia pode ser construída utilizando-se uma excitação senoidal de 60Hz e 30V de amplitude, um diodo 1N4001, um capacitor de 100u como filtro e um resistor de 560 Ω como carga. O circuito é ilustrado na figura 60 para uma análise .TRAN de 100ms. O nó de entrada é nomeado AC e o de saída DC.

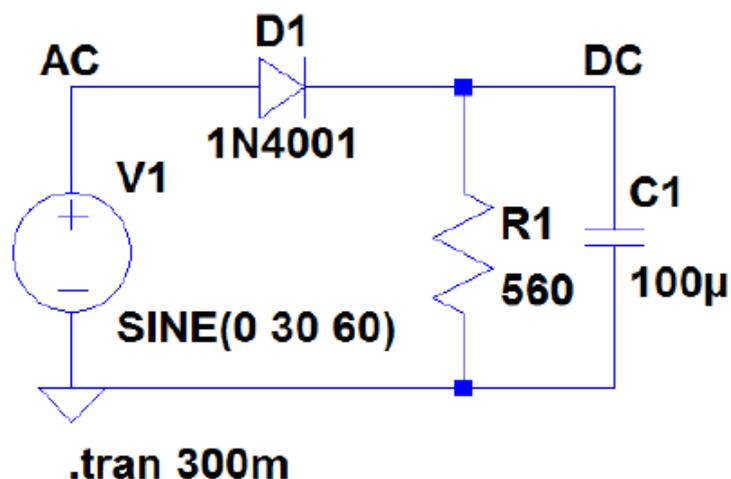


Fig. 69 – Retificador de potência

A figura 70 ilustra a forma de onda na saída DC do circuito e a figura 71 a saída comparada com a entrada. O LTSpice pode integrar um sinal e calcular seu nível médio e RMS. Basta clicar sobre o nome do sinal V(DC) ao se apertar “ctrl” e uma pequena janela trazendo os resultados irá aparecer, como na figura 72.

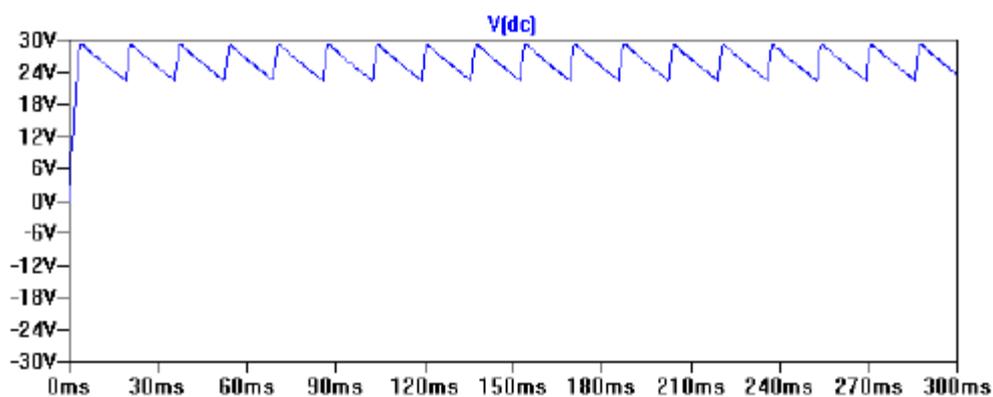


Fig. 70 – Sinal retificado

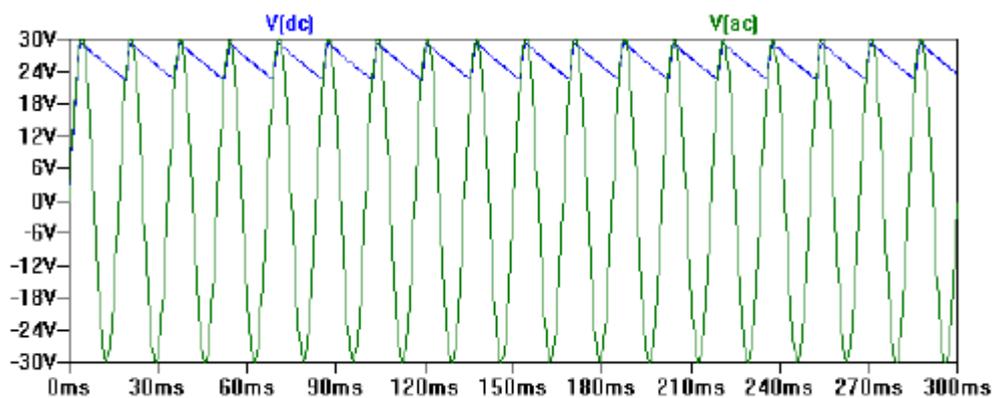


Fig. 71 – Comparação do sinal retificado com a entrada senoidal

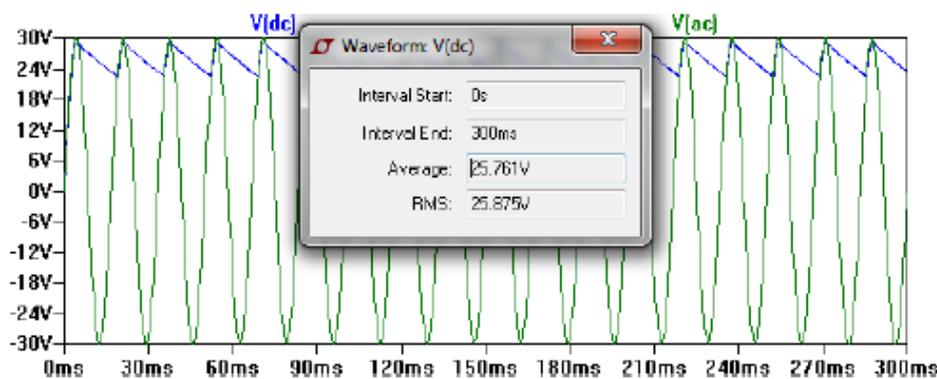


Fig. 72 – Cálculo do valor médio e RMS da saída do retificador

Funções Arbitrárias

Um componente muito especial existente no LTSpice é a fonte de função arbitrária de tensão “**bv**” e de corrente “**bi**”. Essa fonte, ilustrada na figura 73 possui uma enorme lista de funções que podem ser utilizadas tanto outras fontes normais ou arbitrárias como parâmetro ou um vetor de tempo. Entre as principais funções estão: derivação, integração, geração de números aleatórios e ruído, exponencial, logaritmo, potência, raiz quadrada, multiplicação, divisão, funções de comparação e lógica, entre inúmeras outras. A figura 73 mostra essa fonte sendo utilizada para o cálculo da segunda potência e do logaritmo do vetor “time” em análise .TRAN. A simulação é iniciada a partir de 0.1s para evitar a singularidade da função logaritmo. Os resultados são ilustrados nas figuras 74 e 75.

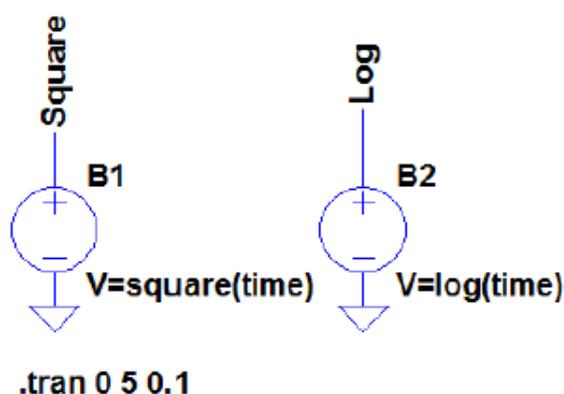


Fig. 73 – Fontes de tensão de função arbitrária

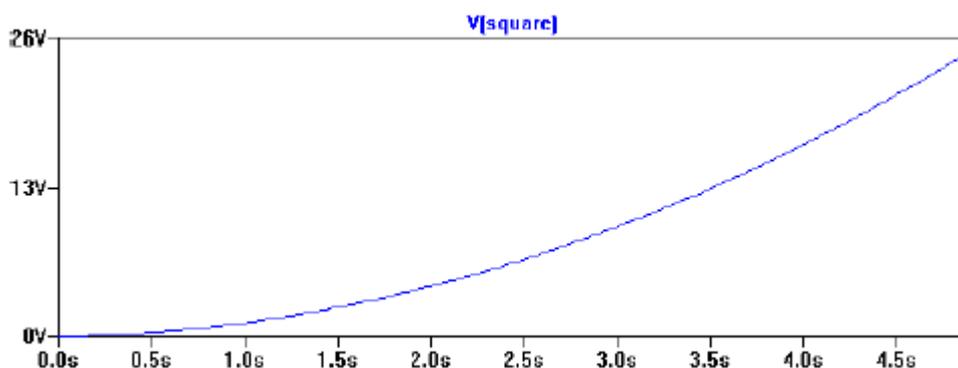


Fig. 74 - Polinômio de segunda ordem gerada pela função “square” em função do tempo

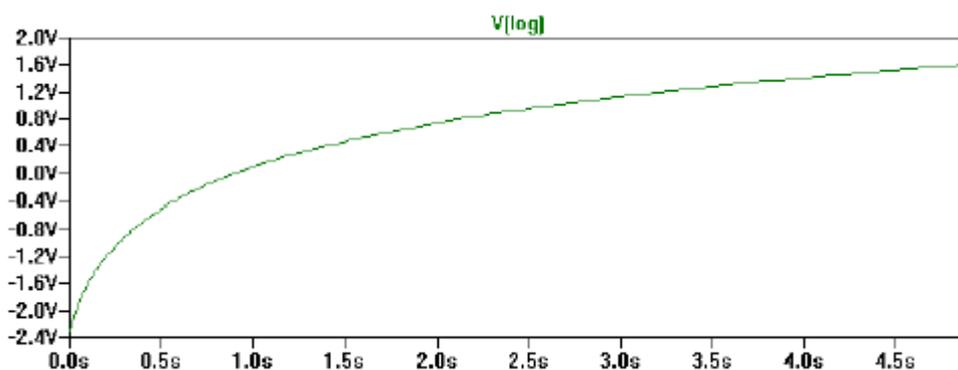


Fig. 75 - Logaritmo gerado pela função "log" em função do tempo

A figura 76 ilustra essa fonte arbitrária sendo usada em função de duas fontes normais que geram sinais senoidais. O resultado ilustrado na figura 77 corresponde a uma modulação em amplitude com V1 como portadora e V2 como modulante. Novamente, vale lembrar que a lista completa de funções se encontra no documento de ajuda sobre a fonte BV, que inclui entre várias outras coisas, funções de transferência definidas no domínio S da transformada de Laplace, muito úteis para simulação de filtros ideais.

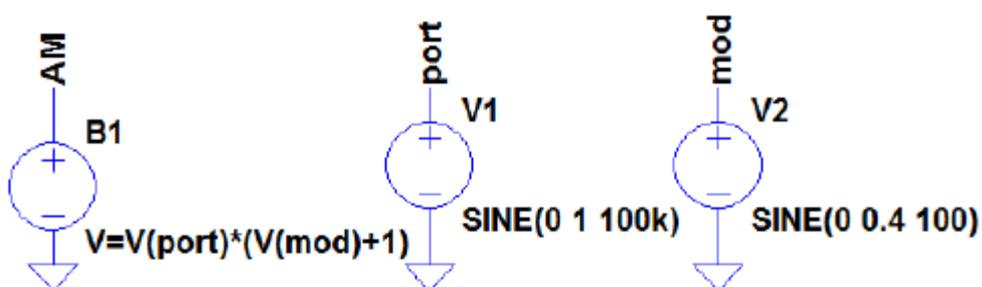


Fig. 76 - Geração de um sinal AM com fontes de função arbitrária

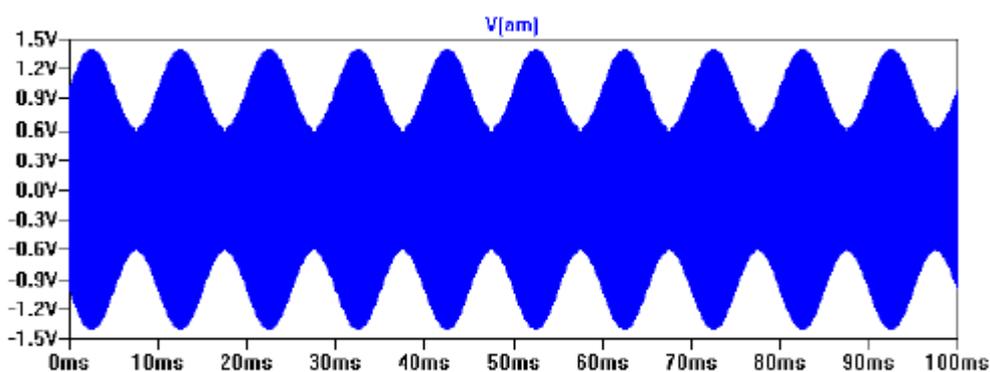


Fig. 77 - Sinal AM

Sinais de Áudio

Um sinal musical pode ser incluído numa simulação facilmente, isto é, basta estar presente na mesma pasta que o arquivo de simulação do LTSpice (extensão .asc) um arquivo com a música (extensão .wav). Para a música na simulação uma fonte de tensão normal, “voltage” deve ser definida da seguinte forma: **wavefile=.\”nome do arquivo”.wav chan=0**. O arquivo será lido e a máxima amplitude do canal dentro do simulador corresponderá a 1V e a mínima a -1V, portanto é recomendado o uso de fontes arbitrárias para nivelar o sinal para a amplitude desejada.

O LTSpice é capaz de exportar sinais de áudio em .wav a partir do comando **.wave**. Esse comando deve ser programado da seguinte forma: **.wave .\”nome do arquivo a ser gerado”.wav 16 44100 V(sinal)**, onde 16 representa o número de bits de quantização do arquivo e 44100 a taxa de amostragem. Após uma simulação .TRAN, o comando .wave lerá um nó de tensão escolhido no circuito, aqui ilustrado por V(sinal), mas poderá ser qualquer outro nome, irá calcular o valor máximo de tensão desse nó, normalizar o resto do sinal por esse valor e gerar o arquivo .wav com o nome escolhido na mesma pasta do arquivo de simulação. As figuras 78 e 79 ilustram a leitura dos 9 primeiros segundos da música “Master of Puppets” do Metallica salvo no arquivo “master.wav” e a sua gravação igual no arquivo “puppets.wav”. A musica pode ser processada da forma que for desejada no simulador tendo como alvo, por exemplo, um amplificador valvulado.

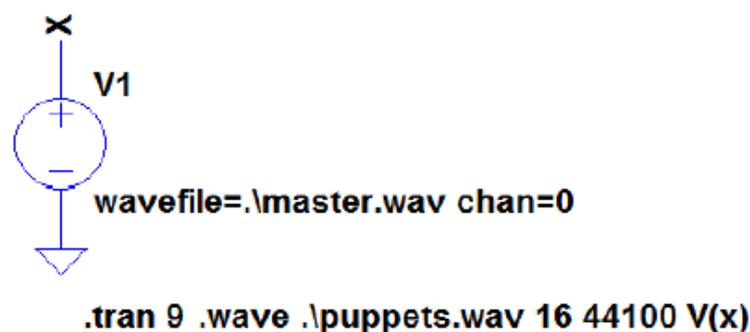


Fig. 78 - Leitura e gravação de um sinal de música no LTSpice

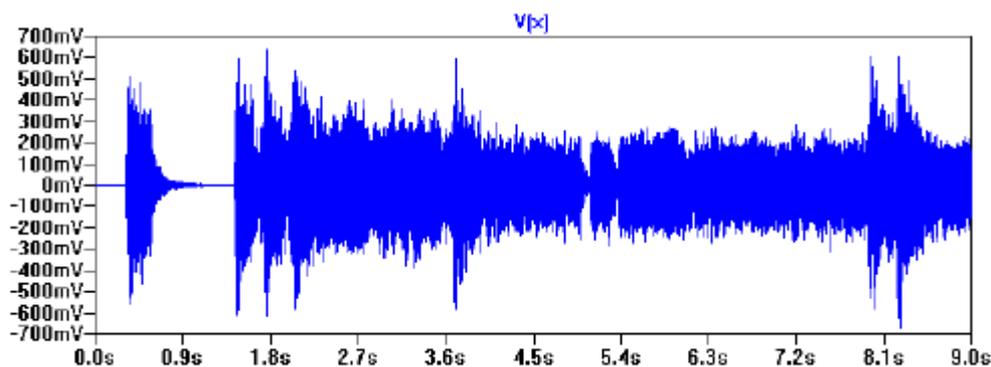


Fig. 79 - Forma de onda no nó V(x)

A análise no tempo encerra as práticas introdutórias sobre o simulador LTSpice. O aluno que realizar os procedimentos descritos ao longo dessas três praticas estará apto para realizar todas as simulações que acompanham as práticas ao longo dos quatro cursos de eletrônica analógica e aproveitar ao máximo o conhecimento ministrado.

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Análise do comando .MEAS do LTSpice

Eng. Fabrício de Almeida Brito
Prof. José Marcos Alves

Novembro/ 2015

Índice

Análise do comando .MEAS		Pag.
1. Introdução		48
2. Tipos básicos de declaração		49
2.1. Medidas em apenas um ponto		49
2.2. Medidas em um intervalo		50
3. Exemplos de aplicação		52
3.1. Medidas em apenas um ponto		52
3.1.1. Medição num instante específico		53
3.1.2. Obtenção do instante no qual uma condição é satisfeita		56
3.1.3. Medição dependente do atendimento de uma condição		58
3.1.4. Cálculo de expressões envolvendo variáveis da simulação		60
3.2. Medidas em um intervalo		62
3.2.1. Medição computada sobre todo o intervalo de dados		63
3.2.2. Medição sobre intervalos diretamente declarados		64
3.2.3. Medição com intervalo definido pelo atendimento de condições		67
3.2.4. Obtenção do intervalo entre o atendimento de condições		72

Lista de Figuras

Fig.		Pág.
	3.1. Medidas em apenas um ponto	
1	Análise no domínio do tempo para um circuito RC	52
	3.1.1. Medição num instante específico	
2	Obtenção gráfica, por meio do uso de cursores, do valor de $V(\text{out})$, no instante $20 \mu\text{s}$.	53
3	Resultado do comando ".meas" na determinação de $V(\text{out})$ em $20 \mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).	53
4	Obtenção gráfica, por meio do uso de cursores, do valor de $I(r) * V(\text{in}, \text{out})$ no instante $20 \mu\text{s}$.	54
5	Resultado do comando ".meas" na determinação de $I(r) * V(\text{in}, \text{out})$ em $20 \mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).	54
6	Obtenção gráfica do valor da derivada de $V(\text{out})$ no instante $20 \mu\text{s}$.	55
7	Resultado do comando ".meas" na determinação da derivada de $V(\text{out})$ em $20 \mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).	55
	3.1.2. Obtenção do instante no qual uma condição é satisfeita	
8	Obtenção gráfica dos instantes de tempo em que $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.	57
9	Resultado do comando ".meas" na determinação dos instantes de atendimento de $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).	57
	3.1.3. Medição dependente do atendimento de uma condição	
10	Obtenção gráfica do valor de $I(R)$ quando $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.	58
11	Resultado do comando ".meas" na determinação de $I(R)$ quando $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).	58
12	Obtenção gráfica do valor de $I(R) * V(\text{in}, \text{out})$ quando $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.	59
13	Resultado do comando ".meas" na determinação de $I(R) * V(\text{in}, \text{out})$ no último atendimento de $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	59
	3.1.4. Cálculo de expressões envolvendo variáveis da simulação	
14	Observação dos resultados res4 e res5, determinados pelo atendimento da condição $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.	60
15	Resultado do comando ".meas" na determinação de $3 * \text{res4} / \text{res5}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	60
16	Observação do resultado res6, determinado pelo segundo atendimento da condição $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.	61
17	Resultado do comando ".meas" na determinação de $\log_{10} \text{res6} $. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	61
	3.2. Medidas em um intervalo	
18	Filtro passa banda com frequência central de passagem em 1 kHz.	62
	3.2.1. Medição computada sobre todo o intervalo de dados	
19	Obtenção gráfica do máximo e do mínimo da magnitude de $V(\text{out})$.	63
20	Resultado do comando ".meas" na determinação do máximo e do mínimo da magnitude de $V(\text{out})$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	64

Lista de Figuras (cont.)

Fig.		Pág.
	3.2. Medidas em um intervalo	
	3.2.2. Medição sobre intervalos diretamente declarados	
21	Obtenção gráfica do máximo e do mínimo da magnitude de V(out) no intervalo de 100 Hz a 1 kHz.	65
22	Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo e do mínimo da magnitude de V(out) no intervalo de 100 Hz a 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	65
23	Obtenção gráfica do máximo da magnitude de V(out) no intervalo de 1 Hz a 1 kHz.	66
24	Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(out) no intervalo de 1 Hz a 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	66
	3.2.3. Medição com intervalo definido pelo atendimento de condições	
25	Obtenção gráfica do mínimo da magnitude de V(out) no intervalo definido pelo primeiro atendimento das condições V(out) = 0,5 e V(out) = 2,0.	68
26	Resultado do comando “.meas” na determinação do mínimo da magnitude de V(out) no intervalo definido pelo primeiro atendimento das condições V(out) = 0,5 e V(out) = 2,0. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	68
27	Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(a), limitando a busca ao intervalo definido pelas passagens de V(out) pelo valor 0,5.	69
28	Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(a), limitando a busca ao intervalo definido pelas passagens de V(out) pelo valor 0,5. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	69
29	Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagens de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 MHz.	70
30	Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 MHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	70
31	Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(out), limitando a busca no intervalo definido pela primeira passagens de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 kHz.	71
32	Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	71
	3.2.4. Obtenção do intervalo entre o atendimento de condições	
33	Obtenção gráfica do intervalo de frequências limitado entre os atendimentos de V(out) = MAX(V(out))/ $\sqrt{2}$.	73
34	Resultado do comando “.meas” na determinação do intervalo limitado entre os atendimentos de V(out) = MAX(V(out))/ $\sqrt{2}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).	73

1. Introdução

O comando “.meas” permite ao usuário realizar medições sobre o conjunto de dados de uma simulação, permitindo medidas como:

- Tempo de subida e de descida;
- Cálculo da média, do valor eficaz, do máximo, do mínimo e do valor pico-a-pico de um sinal;
- Medidas do tipo: Encontre o valor de X quando ocorrer Y;
- Cálculo da derivada ou da integral de um sinal;

Sua inserção é efetuada através da ferramenta “**SPICE directive**”, a qual pode ser acessada através da barra de ferramentas (último botão à direita), ou através do atalho no teclado “**s**”.

Os resultados do comando podem ser visualizados, apenas após o término da simulação, no arquivo “SPICE Error Log”, o qual pode ser acessado na barra de ferramentas em “View >>> SPICE Error Log” ou pelo atalho no teclado “**Ctrl + L**”.

2. Tipos básicos de declaração

Existem dois tipos básicos de declarações para a diretiva “.meas”: aquelas que se referem a apenas um ponto e aquelas que se referem a uma faixa de valores ao longo do eixo das abscissas (Eixo horizontal, por exemplo: eixo do tempo numa simulação “.tran”).

2.1. Medidas em apenas um ponto

A primeira versão, aquela que aponta para apenas um ponto, é usada para imprimir o valor de uma expressão em um ponto específico ou quando uma condição for atingida. A sintaxe para esse tipo de medição pode ser observada a seguir:

```
.MEAS [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <NOME_VARIÁVEL>
+ [<FIND|DERIV|PARAM> <EXPR>]
+ [WHEN <EXPR> | AT = <EXPR>]
+ [TD = <VAL>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT>|LAST]]1
```

O primeiro parâmetro, [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE], especifica o tipo de simulação na qual a medição será efetuada. Tal informação é opcional e, caso omitida, o comando será executado para todos os tipos de simulação.

Em seguida, define-se o nome da variável (<nome_variável>) que receberá o resultado da medição. O nome da variável não pode ser omitido, nem repetido e pode ser utilizado na construção de uma expressão em outro comando “.meas” de forma a se recuperar um resultado salvo.

O parâmetro [<FIND|DERIV|PARAM> <expr>] define a expressão (<expr>) a ser utilizada, porém, com três diferentes abordagens. As duas primeiras são utilizadas para se retirar dados diretamente da simulação, com a diferença de que “find” apenas obtém o resultado da expressão, enquanto que “deriv” obtém o resultado da derivada da expressão. A última abordagem, “param”, é utilizada para retornar o resultado de expressões contendo apenas variáveis da simulação.

[WHEN <expr> | AT = <expr>] especifica o momento de atendimento de uma medição. Utiliza-se “at” para definir um ponto no eixo das abscissas no qual se deseja a medição. Por exemplo, no caso de uma simulação “.tran”, pode-se definir o instante de tempo exato no qual se deseja uma medição.

¹ Spice directives aceitam comandos multilinhas; para isso, deve-se inserir, no início das linhas adicionais, o símbolo +.

Utiliza-se “**when**” para especificar uma condição que, quando atendida, realizará uma medição. A condição especificada pode, durante a execução da simulação, ser atendida mais de uma vez. O padrão do LTspice é a execução da medição no primeiro atendimento da condição, no entanto, utilizando [**<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<count>|LAST]**] pode-se alterar para outros momentos de atendimento da condição.

“**Rise**” é utilizado quando se deseja uma medição na parte crescente de um sinal ou expressão, “**fall**” para quando se deseja na parte decrescente e “**cross**” para um momento qualquer de atendimento da condição. Esses comandos devem ser seguidos de “**first**”, de “**last**” ou de um número inteiro positivo identificando o momento de atendimento da condição.

Por último, pode-se ainda acrescentar [**TD = <val>**], o qual representa um atraso, a partir do início da simulação, para que a medição seja efetuada.

2.2. Medidas em um intervalo

A segunda versão para o comando “**.meas**” refere-se a uma medição sobre um intervalo no eixo das abscissas. A sintaxe para esse caso é:

```
.MEAS [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <NOME_VARIÁVEL>
+ [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG>] <EXPR>
+ [FROM <VAL1>]
+ [TRIG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL3>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT1>|LAST]]
+ [TO <VAL2>]
+ [TARG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL4>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT2>|LAST]]
```

A primeira parte do comando, [**AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE**] <nome_variável>, especifica o tipo de simulação na qual a medição será efetuada e o nome da variável que receberá o resultado de tal medição.

Então, especifica-se o tipo de operação e a expressão de análise: [**<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG>**] <expr>].

Os tipos de operação são divididos em:

- **AVG**: Computa o valor médio da expressão (<expr>);
- **MAX**: Determina o valor máximo de <expr>;
- **MIN**: Determina o valor mínimo de <expr>;
- **PP**: Determina o valor pico a pico de <expr>;

- RMS: Computa o valor eficaz de **<expr>**;
- INTEG: Computa a integral da expressão (**<expr>**);

O padrão do LTspice é realizar suas medições sobre o intervalo completo de simulação, no entanto, pode-se limitar tais medidas a um intervalo menor, por meio da determinação direta de seu início ou término ou por meio da declaração de condições que, quando atendidas, especificam o intervalo de medições.

Caso haja a necessidade, pode-se modificar apenas uma das extremidades do intervalo de medidas. Nesses casos, a extremidade não declarada é mantida tal como no padrão do programa, ou seja, igual a um dos limites do intervalo de simulação.

O primeiro método para a definição do intervalo de medidas é a declaração direta de seu início e término, os quais são realizados por meio de: **FROM <val1> TO <val2>**, sendo **<val1>** o início e **<val2>** o fim de tal intervalo.

O segundo método utiliza-se do atendimento de condições para estabelecer o intervalo de medidas. Esse método utiliza a seguinte sintaxe:

```
+ [TRIG <EXPR_ESQ> [ [VAL]=<EXPR_DIR> ]
+      [TD=<VAL3>]
+      [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT1>|LAST] ]
+ [TARG <EXPR_ESQ> [ [VAL]=<EXPR_DIR> ]
+      [TD=<VAL4>]
+      [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT2>|LAST] ]
```

A condição descrita após **TRIG** marca, com seu atendimento, o início do intervalo de medições e a descrita após **TARG** marca o fim de tal intervalo.

Tais condições podem ser construídas de duas formas: com sua igualdade na própria expressão, como por exemplo, **TRIG V(out) = 0.5**, ou por meio da separação dos termos da igualdade e da utilização de **[VAL]=<expr_dir>**, como por exemplo: **TRIG V(out) VAL = 0.5**.

O padrão do LTspice para o atendimento da condição descrita é para o primeiro momento no qual ela se tornar verdadeira, no entanto, pode-se alterar tal momento de atendimento utilizando: **[<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<count>|LAST]]**.

“**Rise**” especifica que a condição somente se torna verdadeira nos momentos que o sinal ou a expressão de análise for crescente, “**fall**” nos momentos que a expressão de análise for decrescente e “**cross**” para qualquer momento de atendimento da condição. Esses comandos devem ser seguidos de “**first**”, “**last**” ou um número inteiro positivo, os quais identificam o momento desejado de atendimento da condição. Pode-se ainda acrescentar ao comando **[TD = <val>]**, o qual representa um atraso, a partir do início da simulação, no qual a condição definida não é atendida.

3. Exemplos de aplicação

Os exemplos abordados nesse documento buscam explorar todas as possíveis declarações do comando `“.meas”`, em medições pontuais e em medições num intervalo de valores do eixo das abscissas.

3.1. Medidas em apenas um ponto

A Figura 1, apresentada abaixo, apresenta um circuito constituído de uma fonte, um resistor de 1 k Ω e um capacitor de 10 nF. A fonte utilizada gera uma onda quadrada de 0 a 1 V com período igual a 200 μ s e tempo ativo de 100 μ s e a simulação realizada foi no domínio do tempo, de 0 a 200 μ s, a um passo de 1 ns.

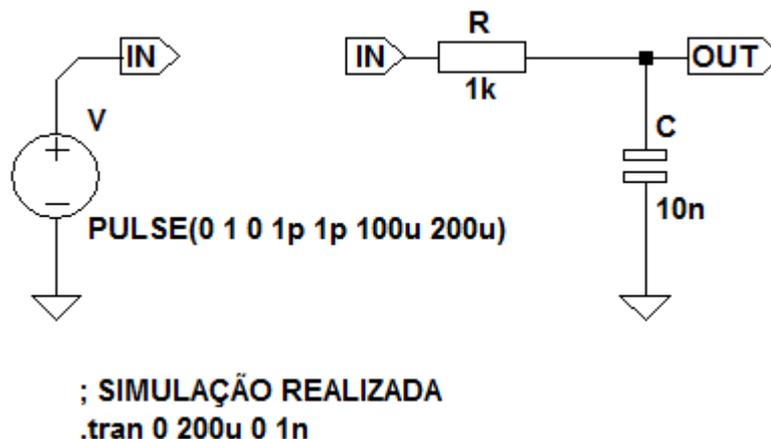


Figura 1: Análise no domínio do tempo para um circuito RC

As medidas pontuais possíveis são divididas em quatro categorias: Medição num instante específico; Obtenção do instante no qual uma condição é satisfeita; Medição dependente do atendimento de uma condição; e Cálculo de expressões envolvendo variáveis da simulação.²

² As categorias citadas são também válidas para outros tipos de simulação, tais como: simulações do ponto de operação (OP) e simulações no domínio da frequência (AC).

3.1.1. Medição num instante específico

Obtém o resultado de uma expressão ou de sua derivada em um instante de tempo específico, inserido no comando. A sintaxe do comando é:

```
.MEAS TRAN <NOME_VARIÁVEL> [FIND|DERIV] <EXPR> AT=<EXPR>
```

Exemplos:

```
.meas tran res1 find v(out) at=20u
```

Retorna, na variável res1, o valor de V(out) no instante de tempo $t = 20\mu\text{s}$.

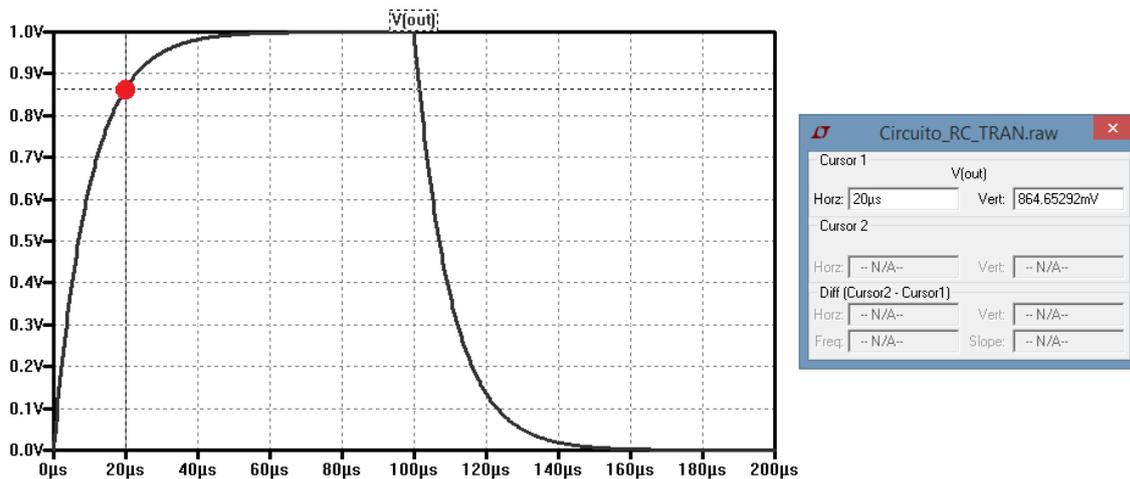


Figura 2: Obtenção gráfica, por meio do uso de cursores, do valor de V(out), no instante $20\mu\text{s}$.

```
SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log

--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

.OP point found by inspection.
res1: v(out)=0.864653 at 2e-005
```

Figura 3: Resultado do comando “.meas” na determinação de V(out) em $20\mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).

`.meas tran res2 find I(r)*V(in,out) at =20u`

Retorna, na variável res2, o valor da expressão $I(r) * V(\text{in},\text{out})$ no instante de tempo $t = 20 \mu\text{s}$.

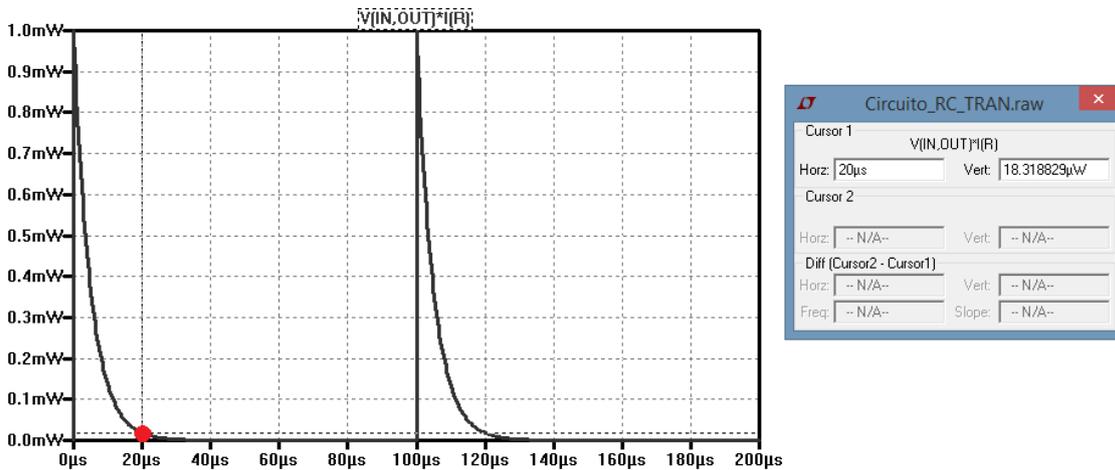


Figura 4: Obtenção gráfica, por meio do uso de cursores, do valor de $I(r) * V(\text{in},\text{out})$ no instante $20 \mu\text{s}$.

```

--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabricao\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

.OP point found by inspection.
res2: i(r)*v(in,out)=1.83188e-005 at 2e-005

```

Figura 5: Resultado do comando “.meas” na determinação de $I(r) * V(\text{in}, \text{out})$ em $20 \mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).

`.meas tran res3 deriv V(out) at=20u`

Retorna, na variável res3, o valor da derivada de V(out) no instante de tempo $t = 20\mu\text{s}$.

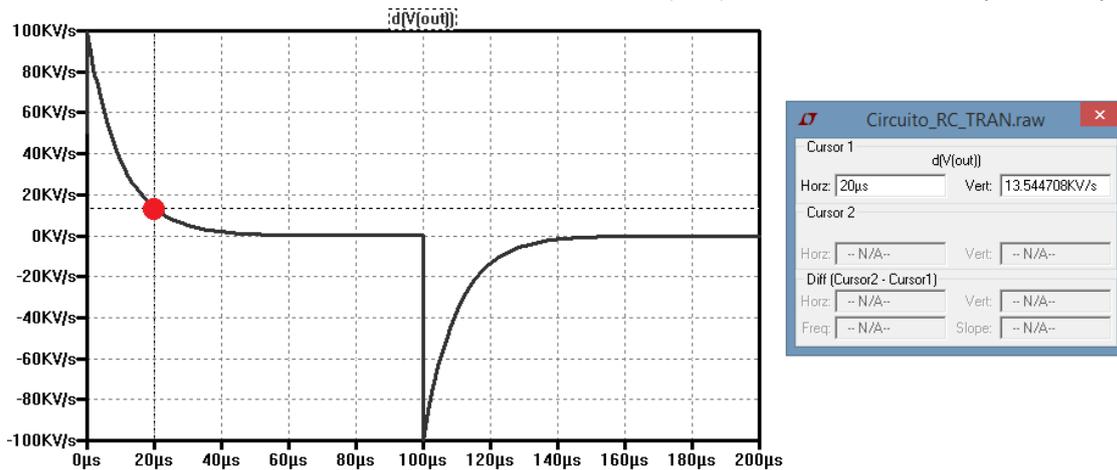


Figura 6: Obtenção gráfica do valor da derivada de V(out) no instante $20\mu\text{s}$.

A janela "SPICE Error Log" exibe o seguinte conteúdo:

```

--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 10n
.end

.OP point found by inspection.
res3: D(v(out))=13544.7 at 2e-005
  
```

Figura 7: Resultado do comando ".meas" na determinação da derivada de V(out) em $20\mu\text{s}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).

3.1.2. Obtenção do instante no qual uma condição é satisfeita

Obtém o instante de tempo quando a condição estabelecida for atendida. Dependendo da declaração do comando, pode-se obter os diferentes momentos no qual a condição foi atendida. A sintaxe é:

```
.MEAS TRAN <NOME_VARIÁVEL> WHEN <EXPR>
+ [TD=<VAL>]
+ [<RISE | FALL | CROSS>= [<COUNT> | LAST ]
```

Exemplos: Todos os comandos descritos a seguir referem-se a uma mesma condição que, no intervalo de 0 a 200 μ s, é atendida mais de uma vez. Os resultados observados estão contidos nas Figuras 8 e 9.

```
.meas tran res4 when V(out)=0.5
```

Retorna, na variável res4, o tempo do primeiro momento em que $V(\text{out}) = 0,5$ for verdadeiro.

```
.meas tran res5 when V(out)=0.5 td=100u
```

Retorna, na variável res5, o tempo do primeiro atendimento da condição $V(\text{out}) = 0,5$, porém depois de um atraso de 100 μ s, isto é, o comando fica ativo apenas no intervalo de 100 a 200 μ s.

```
.meas tran res6 when V(out)=0.5 cross=2
```

Retorna, na variável res6, o instante de tempo do segundo atendimento da condição.

```
.meas tran res7 when V(out)=0.5 cross=last
```

Retorna, na variável res7, o tempo do último atendimento da condição.

```
.meas tran res8 when V(out)=0.5 rise=first
```

Retorna, na variável res8, o tempo do primeiro momento em que as duas condições forem verdadeiras: $V(\text{out}) = 0,5$ e sinal $V(\text{out})$ crescente.

```
.meas tran res9 when V(out)=0.5 fall=last
```

Retorna, na variável res9, o tempo do último momento em que as duas condições forem verdadeiras: $V(\text{out}) = 0,5$ e sinal $V(\text{out})$ decrescente.

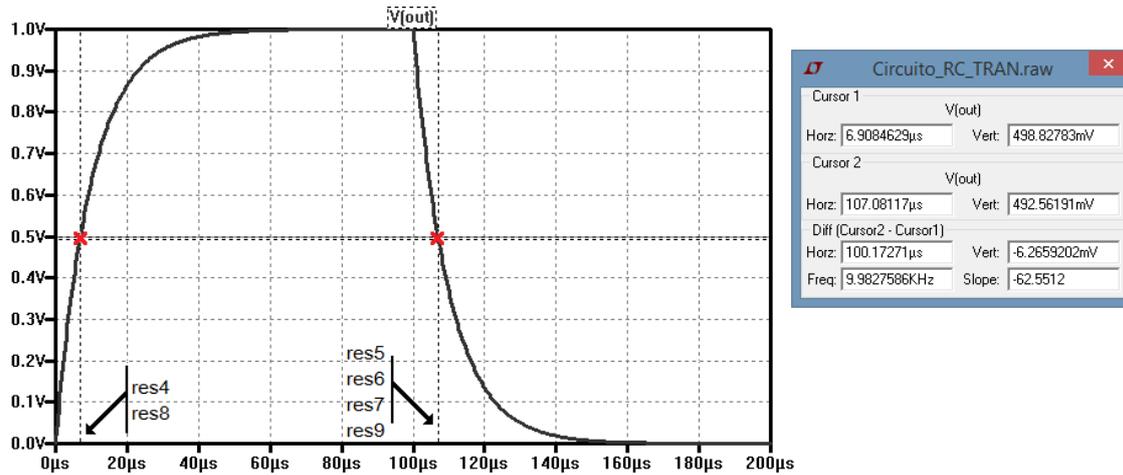


Figura 8: Obtenção gráfica dos instantes de tempo em que $V(\text{out}) = 0,5V$.

```

SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log

* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 10n
.end

.OP point found by inspection.

res4: v(out)=0.5 AT 6.93253e-006
res5: v(out)=0.5 AT 0.000106929
res6: v(out)=0.5 AT 0.000106929
res7: v(out)=0.5 AT 0.000106929
res8: v(out)=0.5 AT 6.93253e-006
res9: v(out)=0.5 AT 0.000106929

```

Figura 9: Resultado do comando “.meas” na determinação dos instantes de atendimento de $V(\text{out}) = 0,5V$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).

3.1.3. Medição dependente do atendimento de uma condição

Obtém o resultado de uma expressão ou de sua derivada no instante que a condição estabelecida for atendida. Dependendo da declaração do comando, pode-se obter diferentes resultados, os quais refletem nos diferentes momentos no qual a condição foi atendida. A sintaxe para esse caso é:

```
.MEAS TRAN <NOME_VARIÁVEL> FIND <EXPR> WHEN <EXPR>
+ [TD=<VAL>]
+ [<RISE | FALL | CROSS>= [<COUNT> | LAST ]
```

Exemplos:

```
.meas tran res10 find I(r) when V(out)=0.5
```

Retorna, na variável res10, o valor de $I(r)$ quando a condição $V(out) = 0,5$ for satisfeita pela primeira vez.

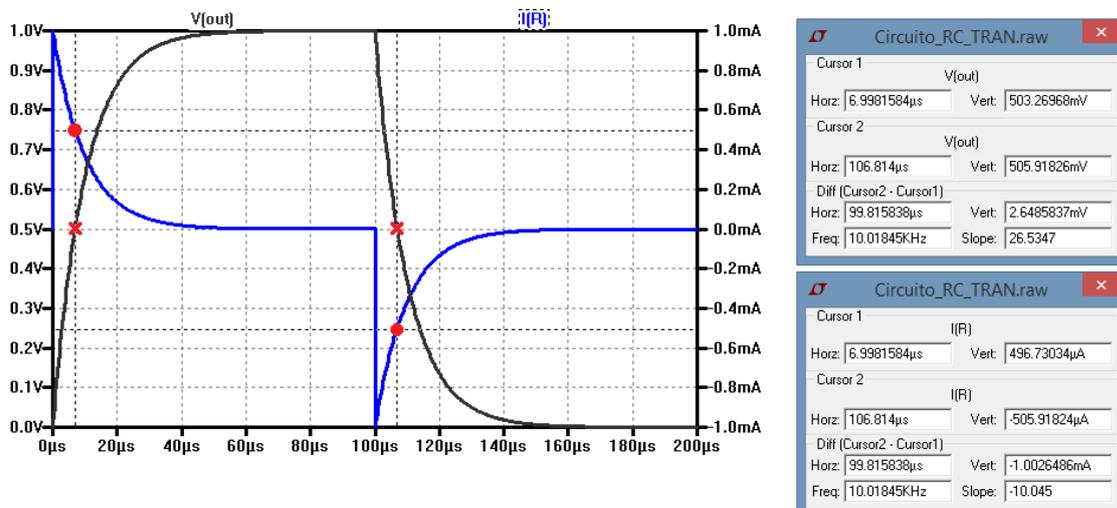


Figura 10: Obtenção gráfica do valor de $I(R)$ quando $V(out) = 0,5V$.

```
SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log
--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

.OP point found by inspection.
res10: i(r)=0.0005 at 6.93213e-006
```

Figura 11: Resultado do comando “.meas” na determinação de $I(R)$ quando $V(out) = 0,5V$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl + L).

```
.meas tran res11 find I(r)*V(in,out)
+ when v(out)=0.5 cross=last
```

Retorna, na variável res11, o valor da expressão $I(r) * V(\text{in}, \text{out})$ quando a condição $V(\text{out}) = 0,5$ for satisfeita pela última vez.

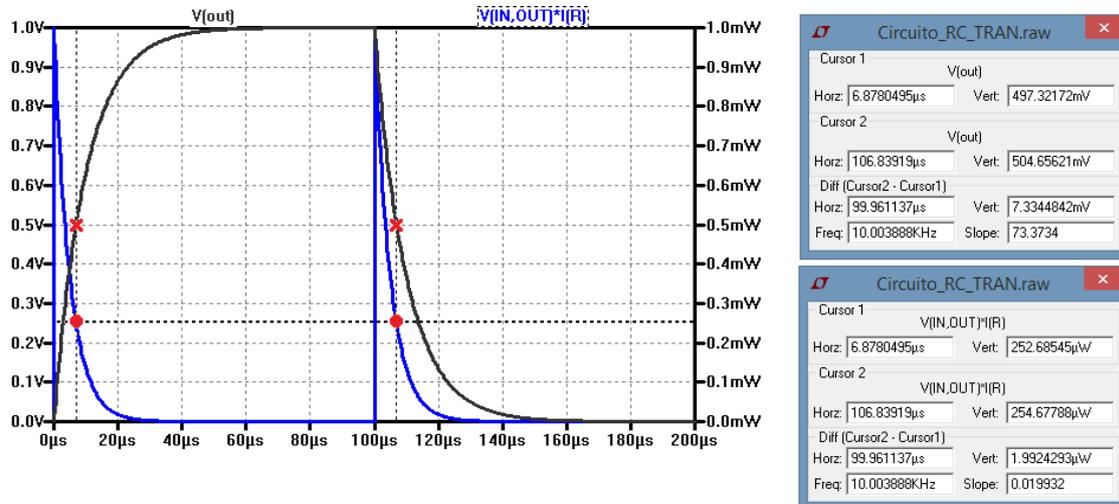


Figura 12: Obtenção gráfica do valor de $I(R) * V(\text{in}, \text{out})$ quando $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.

```
SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log
--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

.OP point found by inspection.
res11: i(r)*v(in,out)=0.00025 at 0.000106932
```

Figura 13: Resultado do comando “.meas” na determinação de $I(R) * V(\text{in}, \text{out})$ no último atendimento de $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

3.1.4. Cálculo de expressões envolvendo variáveis da simulação

Esse tipo de declaração do comando “.meas” obtém o resultado de uma expressão construída apenas com variáveis da simulação. Sendo assim, não se obtém novos dados, apenas manipula-se os existentes. A sintaxe é:

.MEAS [TRAN] <NOME_VARIÁVEL> PARAM <EXPR>

Exemplos:

.meas tran res12 param 3*res4/res5

Retorna, na variável res12, o valor da expressão $3 * \text{res4} / \text{res5}$ apenas se uma simulação “.tran” tiver sido realizada.

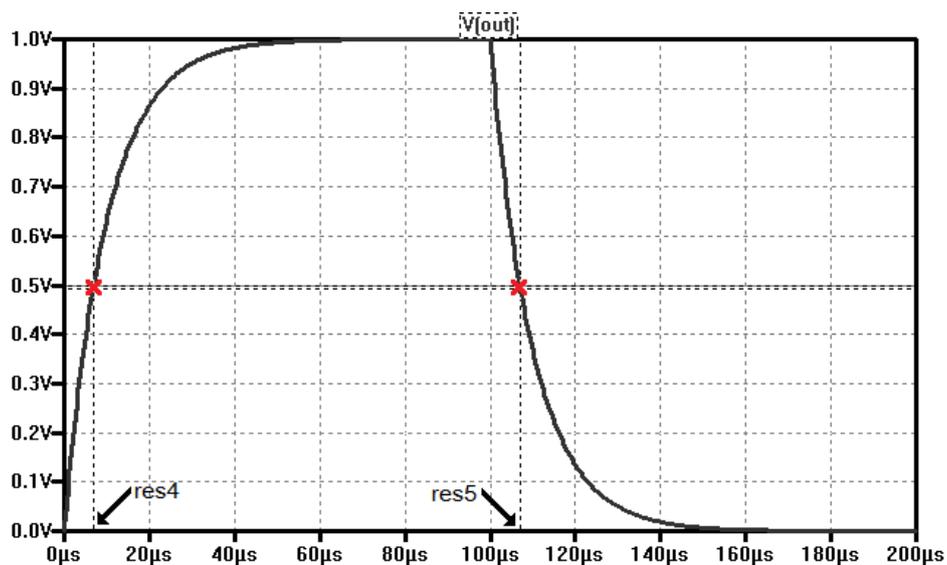


Figura 14: Os resultados res4 e res5 são instantes de tempo determinados pelo atendimento da condição $V(\text{out}) = 0,5\text{V}$.

```

SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log
--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

.OP point found by inspection.

res4: v(out)=0.5 AT 6.93213e-006
res5: v(out)=0.5 AT 0.000106932
res12: 3*res4/res5=0.194482
  
```

Figura 15: Resultado do comando “.meas” na determinação de $3 * \text{res4} / \text{res5}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

`.meas res13 param log10(abs(res6))`

Retorna, na variável res13, o valor da expressão $\log_{10} |res6|$, não importando o tipo de simulação realizada.

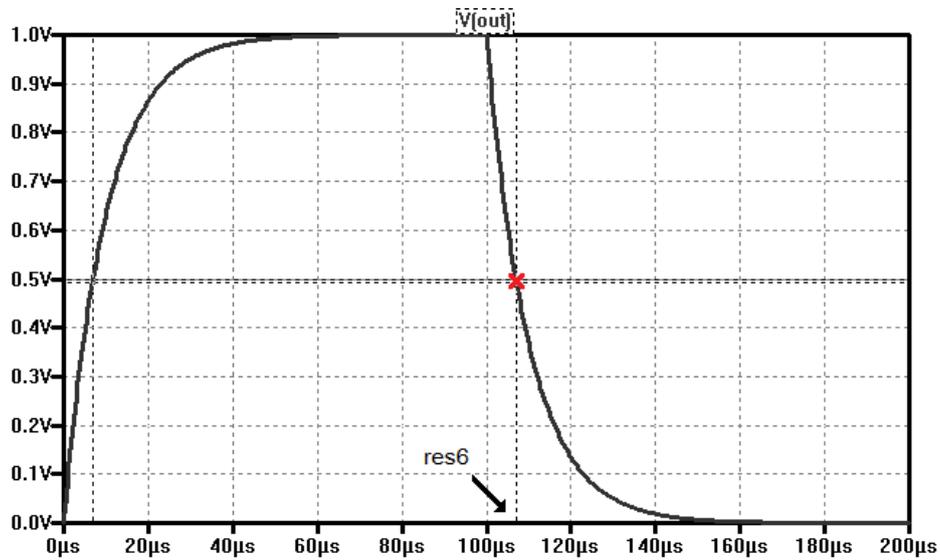


Figura 16: O resultado res6 representa o instante de tempo determinado pelo atendimento da condição $V(out) = 0,5V$.

```

SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.log
--- Expanded Netlist ---
* C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_TRAN.asc
v in 0 pulse(0 1 0 1p 1p 100u 200u) rser=0
c out 0 10n
r in out 1k
.tran 0 200u 0 1n
.end

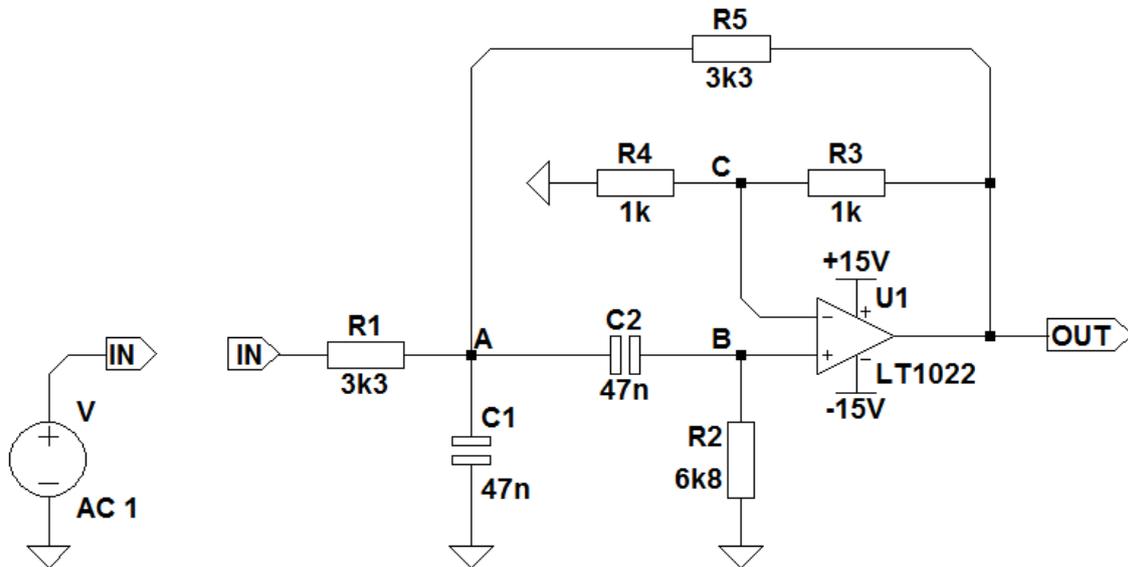
.OP point found by inspection.

res6: v(out)=0.5 AT 0.000106932
res13: log10(abs(res6))=-3.97089
  
```

Figura 17: Resultado do comando “.meas” na determinação de $\log_{10}|res6|$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

3.2. Medidas em um intervalo

A Figura 17 apresenta um filtro passa banda ativo, projetado para um ganho de 2V/V (6,02 dB) na frequência 1 kHz, sua frequência central de passagem. A simulação realizada foi no domínio da frequência, de 1Hz a 1 MHz, com 1000 pontos por década.



; SIMULAÇÃO REALIZADA
.ac dec 1000 1 1meg

Figura 18: Filtro passa banda com frequência central de passagem em 1 kHz.

As medidas possíveis são divididas em quatro categorias: Medição computada sobre todo o intervalo de dados; Medição sobre intervalos diretamente declarados; Medição com intervalo definido pelo atendimento de condições; e Obtenção do intervalo entre o atendimento de condições.³

³ As categorias citadas são também válidas para outros tipos de simulação, tais como: simulações do ponto de operação (OP) e simulações no domínio do tempo (TRAN).

3.2.1. Medição computada sobre todo o intervalo de dados

Obtém a média, o máximo, o mínimo, o valor pico-a-pico, o valor eficaz ou a integral de uma expressão computados sobre todo o intervalo de simulação. A sintaxe para esse caso é:

```
.MEAS AC <NOME_VARIÁVEL>  
+ [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <EXPR>]
```

Exemplos:

Os comandos descritos a seguir referem-se à uma mesma expressão de análise, diferindo apenas no fato de um computar o máximo e o outro computar o mínimo da expressão. Sendo assim, seus resultados foram agrupados e podem ser observados nas Figuras 19 e 20.

```
.meas ac res1 max mag (V(out) )
```

Retorna, na variável res1, o valor máximo do sinal $\text{mag}(V(\text{out}))^4$ no intervalo completo de simulação.

```
.meas ac res2 min mag (V(out) )
```

Retorna, na variável res2, o valor mínimo do sinal $\text{mag}(V(\text{out}))^4$ no intervalo completo de simulação.

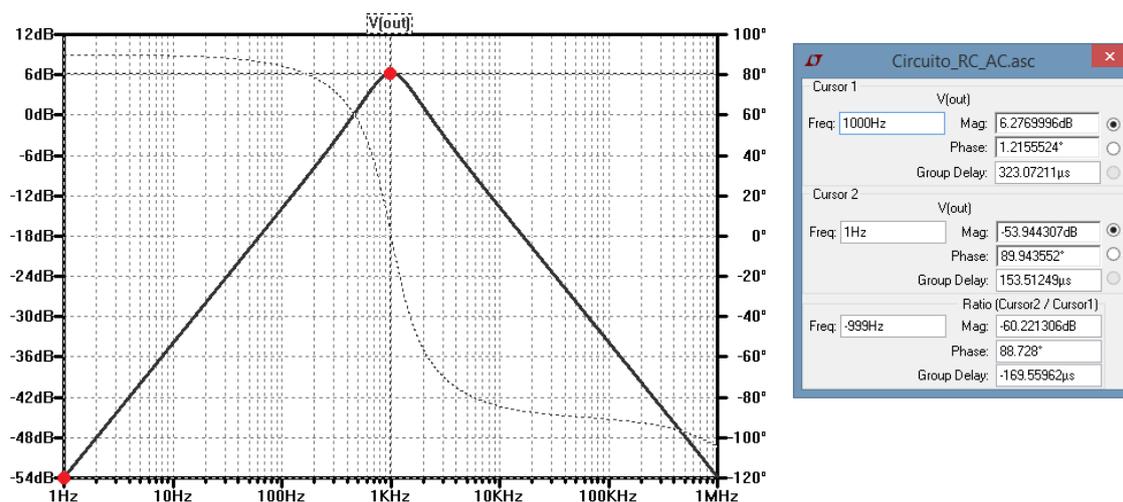
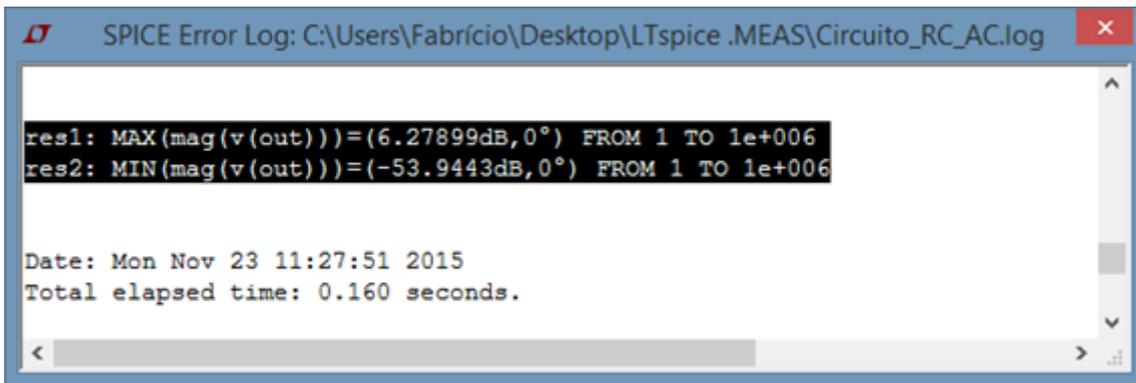


Figura 19: Obtenção gráfica do máximo e do mínimo da magnitude de V(out).

⁴ Computa a magnitude do sinal V(out)



```

SPICE Error Log: C:\Users\Fabrcio\Desktop\LTspice .MEAS\Circuito_RC_AC.log
res1: MAX(mag(v(out)))=(6.27899dB,0°) FROM 1 TO 1e+006
res2: MIN(mag(v(out)))=(-53.9443dB,0°) FROM 1 TO 1e+006

Date: Mon Nov 23 11:27:51 2015
Total elapsed time: 0.160 seconds.

```

Figura 20: Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo e do mínimo da magnitude de V(out). Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

3.2.2. Medição sobre intervalos diretamente declarados

Computa a média, o máximo, o mínimo, o valor pico-a-pico, o valor eficaz ou a integral de uma expressão sobre um intervalo de análise definido diretamente na declaração do comando “.meas”.

Nesse tipo de declaração, pode-se alterar as duas extremidades do intervalo de análise ou apenas uma. Nos casos de se modificar apenas uma das extremidades, a extremidade não declarada é mantida tal como no padrão do programa, ou seja, igual a um dos limites do intervalo de simulação. A sintaxe é:

```

.MEAS AC <NOME_VARIÁVEL>
+ [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <EXPR>]
+ [FROM <VAL1>]
+ [TO <VAL2>]

```

Exemplos:

Os dois comandos seguintes referem-se à uma mesma expressão de análise. Sendo assim, seus resultados foram agrupados e podem ser observados nas Figuras 21 e 22.

```
.meas ac res3 min mag(V(out)) from 100 to 1k
```

Retorna, na variável res3, o valor mínimo da magnitude de V(out) no intervalo de 100Hz a 1 kHz.

```
.meas ac res4 max mag(V(out)) from 100 to 1k
```

Retorna, na variável res4, o valor máximo da magnitude de V(out) no intervalo de 100Hz a 1 kHz.

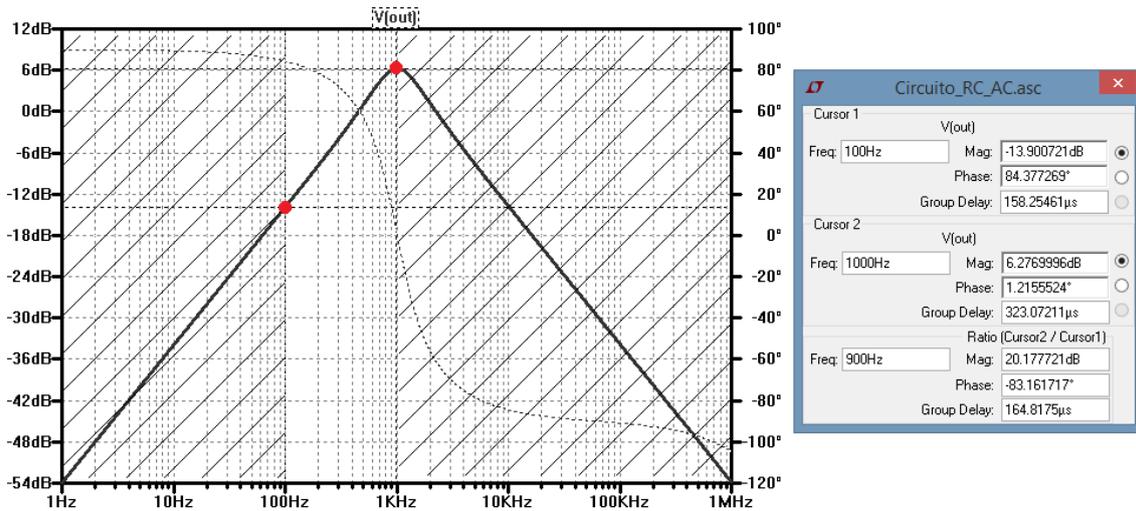


Figura 21: Obtenção gráfica do máximo e do mínimo da magnitude de $V(out)$ no intervalo de 100 Hz a 1 kHz.

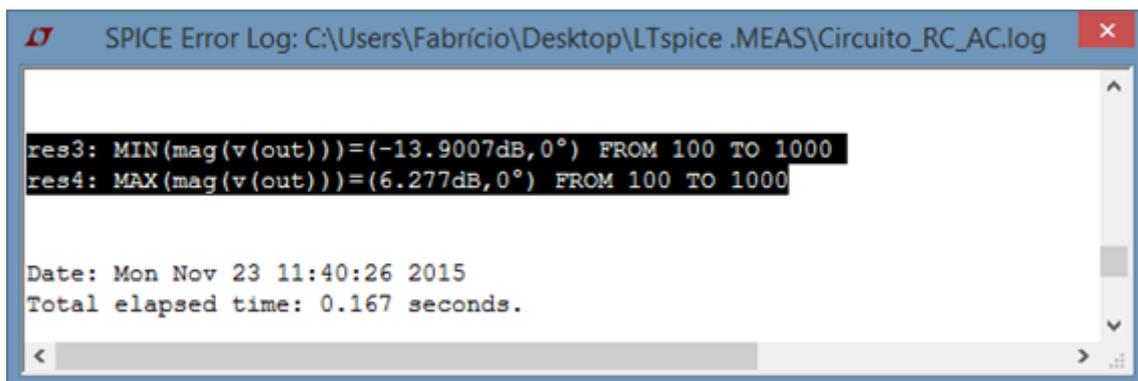


Figura 22: Resultado do comando ".meas" na determinação do máximo e do mínimo da magnitude de $V(out)$ no intervalo de 100 Hz a 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

`.meas ac res5 max mag(V(out)) to 1k`

Retorna, na variável res5, o valor máximo da magnitude de V(out) no intervalo terminado em 1 kHz. Como a simulação realizada é de 1 Hz a 1 MHz, o intervalo de análise da expressão mag(V(out)) é de 1 Hz a 1 kHz.

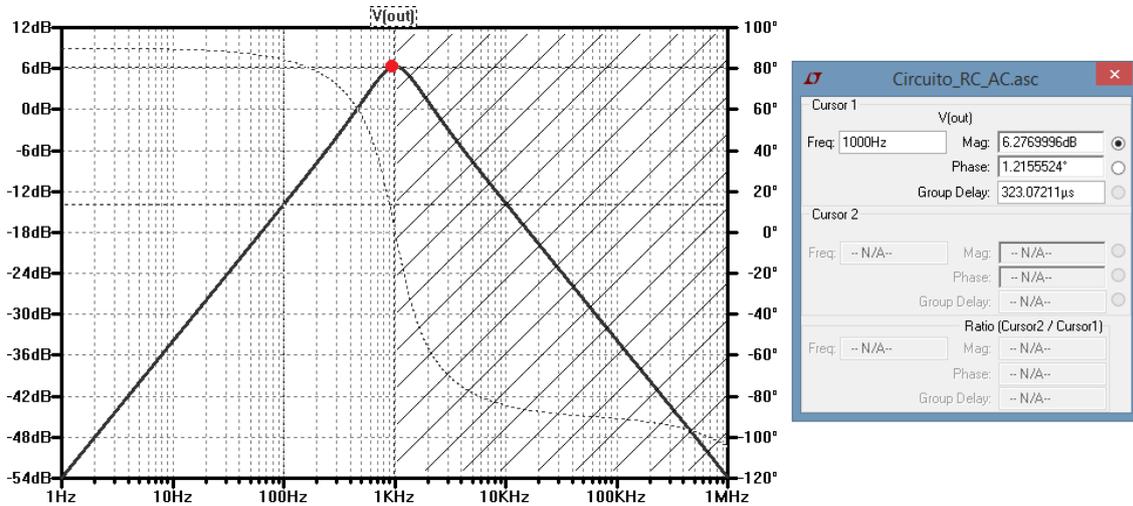


Figura 23: Obtenção gráfica do máximo da magnitude de V(out) no intervalo de 1 Hz a 1 kHz.

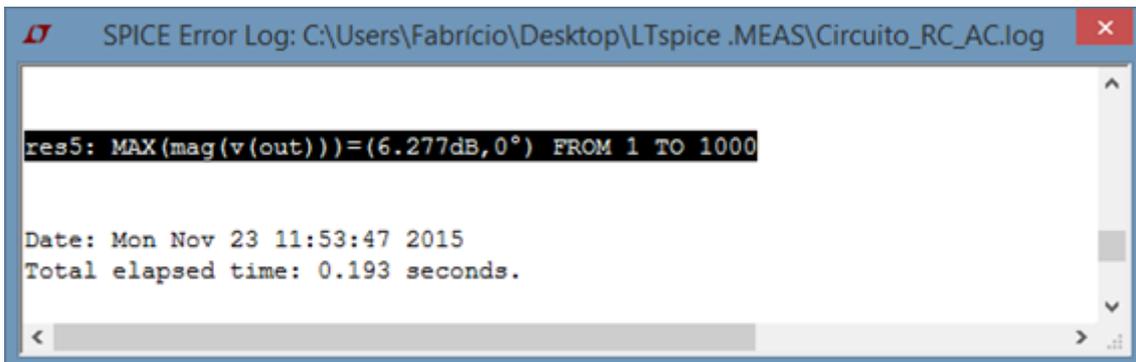


Figura 24: Resultado do comando“.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(out) no intervalo de 1 Hz a 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

3.2.3. Medição com intervalo definido pelo atendimento de condições

Computa a média, o máximo, o mínimo, o valor pico-a-pico, o valor eficaz ou a integral de uma expressão sobre um intervalo de análise definido pelo atendimento de condições.

Nesse tipo de declaração, pode-se definir condições de atendimento para as duas extremidades do intervalo de análise ou apenas uma extremidade. Nos casos de se modificar apenas uma das extremidades, a extremidade não declarada é mantida tal como no padrão do programa, ou seja, igual a um dos limites do intervalo de simulação.

Além disso, a definição do intervalo de análise pode ser construída com a combinação de uma declaração direta e uma declaração por meio do atendimento de condições.

A sintaxe do comando é:

```
.MEAS AC <NOME_VARIÁVEL>
+ [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <EXPR>]
+ [FROM <VAL1>]
+ [TRIG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL3>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT1>|LAST]]
+ [TO <VAL2>]
+ [TARG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL4>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT2>|LAST]]
```

Exemplos:

```
.meas ac res6 min mag(V(out))
+ trig mag(V(out)) val=0.5
+ targ mag(V(out)) val=2
```

Computa o mínimo da magnitude do sinal V(out) utilizando o intervalo definido entre o primeiro momento que a magnitude assume 0,5 e o primeiro momento que a magnitude assume 2.

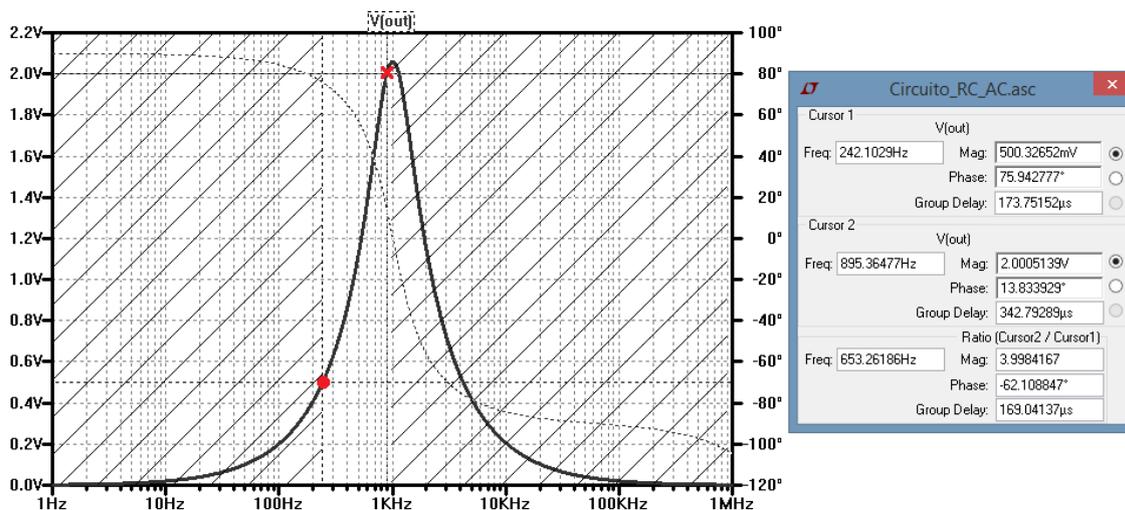


Figura 25: Obtenção gráfica do mínimo da magnitude de $V(out)$ no intervalo definido pelas condições $V(out) = 0,5$ e $V(out) = 2,0$.

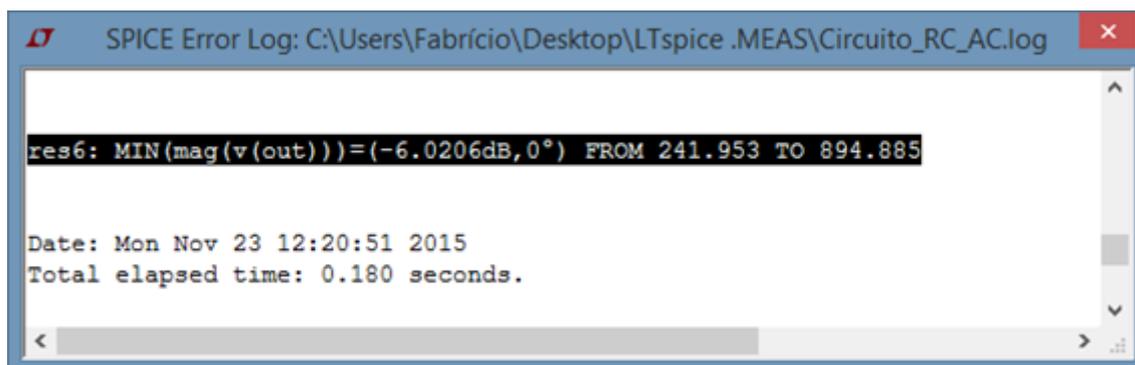


Figura 26: Resultado do comando “.meas” na determinação do mínimo da magnitude de $V(out)$ no intervalo definido pelo primeiro atendimento das condições $V(out) = 0,5$ e $V(out) = 2,0$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

```
.meas ac res7 max mag (V (a) )
+ trig mag(V(out)) val=0.5 cross=first
+ targ mag(V(out)) val=0.5 cross=last
```

Computa o máximo da magnitude do sinal V(a) utilizando o intervalo definido entre os momentos que a magnitude de V(out) assume 0,5, isto é, entre o primeiro e o último momento que V(out) = 0,5.

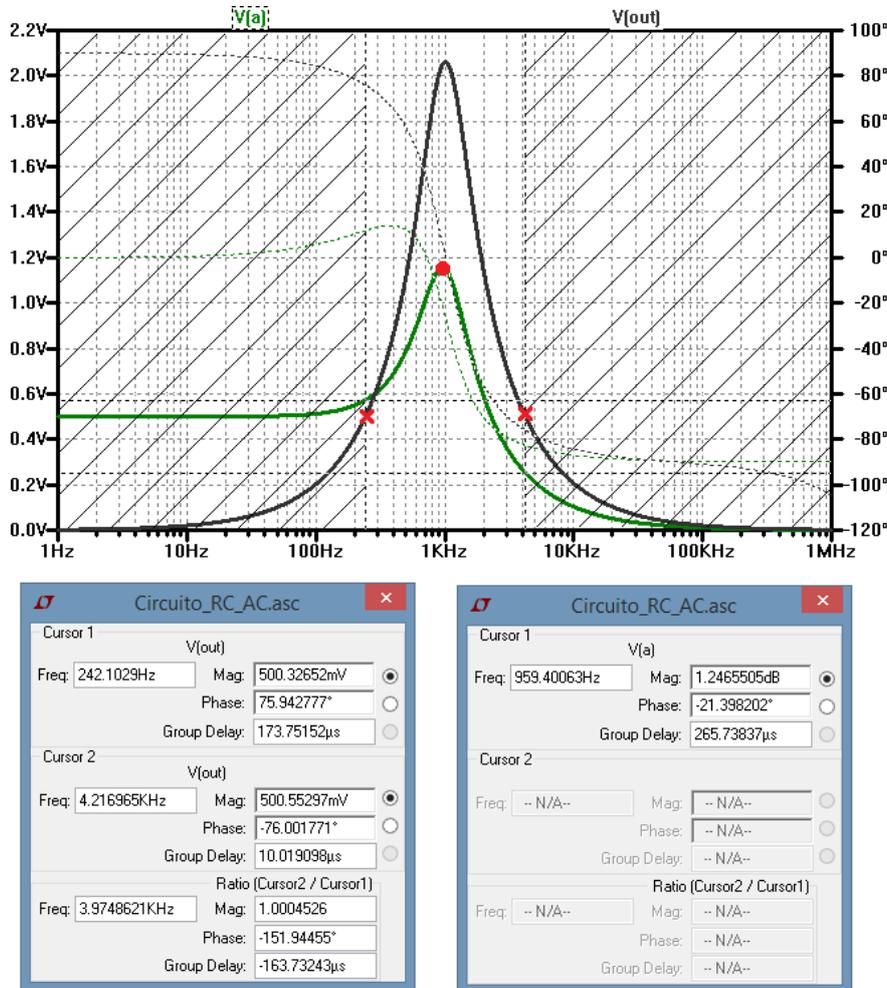


Figura 27: Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(a), limitando a busca ao intervalo definido pelas passagens de V(out) pelo valor 0,5.

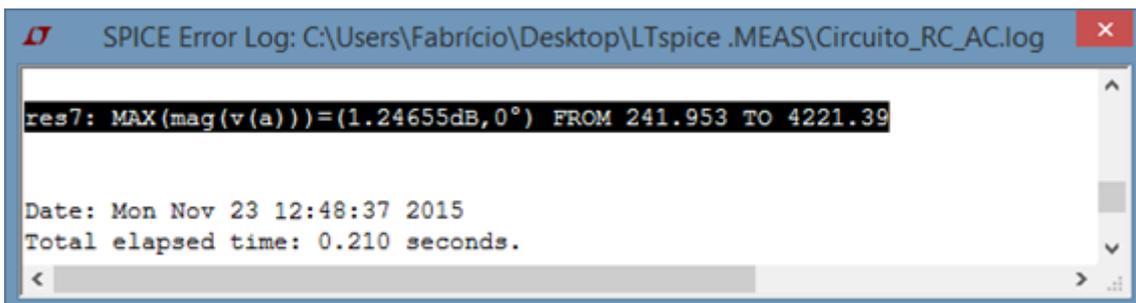


Figura 28: Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(a), limitando a busca ao intervalo definido pelas passagens de V(out) pelo valor 0,5. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

```
.meas ac res8 max mag(V(out))
+ trig mag(V(out)) val=0.5
```

Computa o máximo da magnitude do sinal V(out) utilizando o intervalo definido entre o primeiro momento que a magnitude de V(out) assume 0,5 e o limite superior da simulação, isto é, o intervalo de análise vai até 1 MHz.

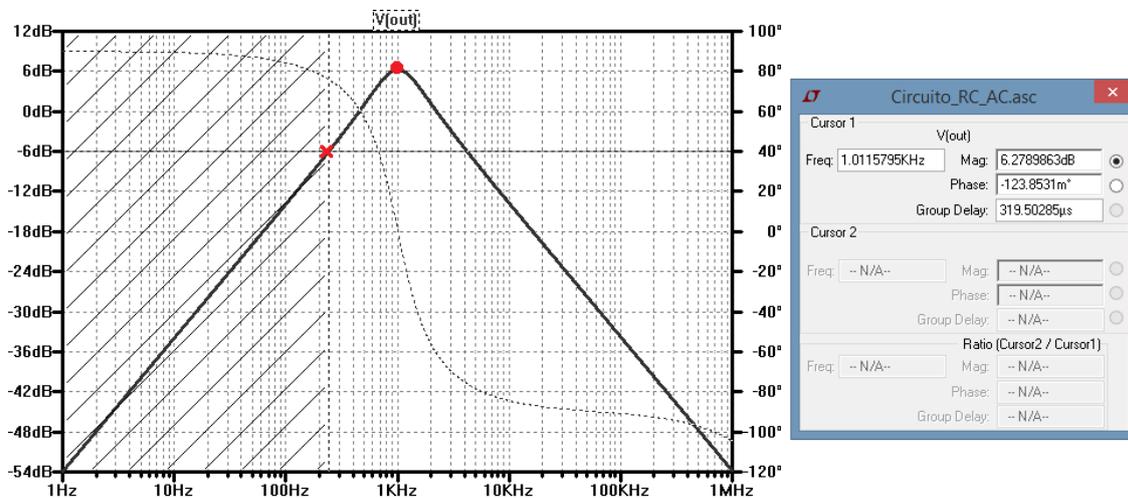


Figura 29: Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 MHz.

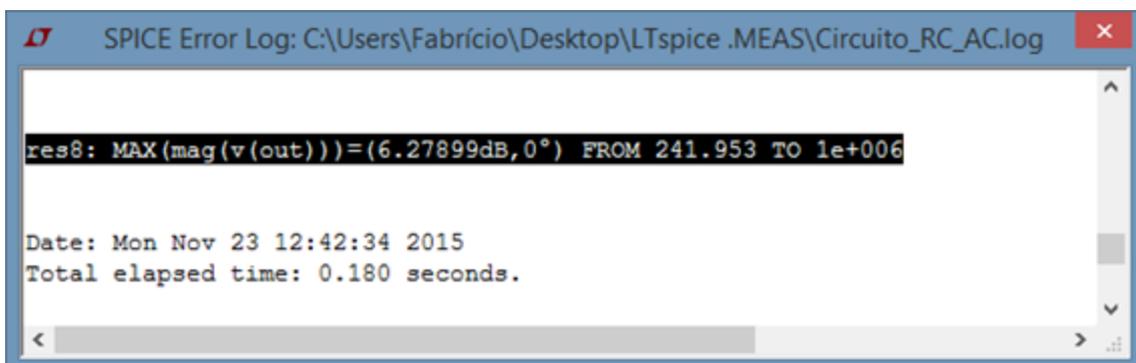


Figura 30: Resultado do comando “.meas” na determinação do máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 MHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

```
.meas ac res8 max mag(V(out))
+ trig mag(V(out)) val=0.5
+ to 1k
```

Computa o máximo da magnitude do sinal V(out) utilizando o intervalo definido entre o primeiro momento que a magnitude de V(out) assume 0,5 e a frequência 1 kHz.

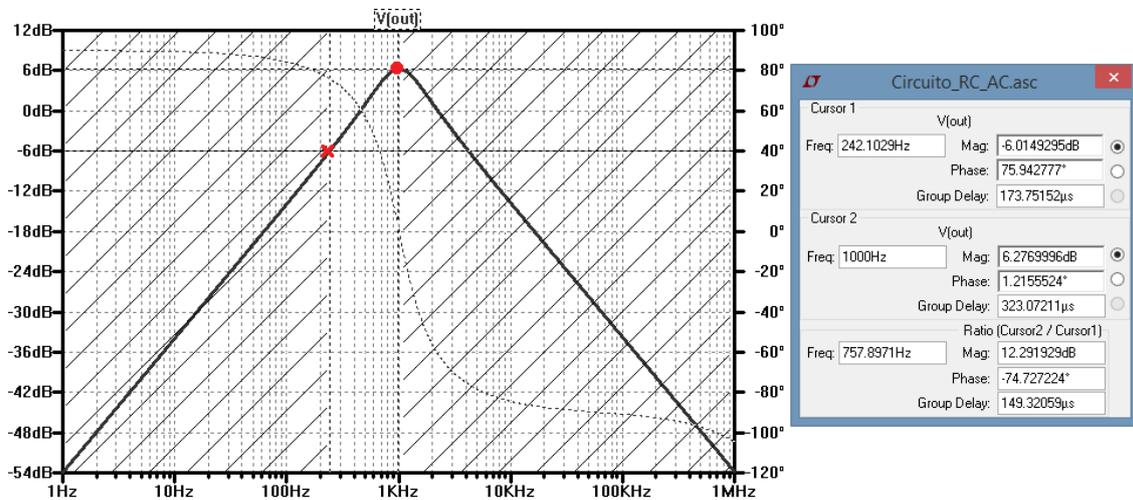


Figura 31: Obtenção gráfica do valor máximo da magnitude de V(out), limitando a busca no intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 kHz.

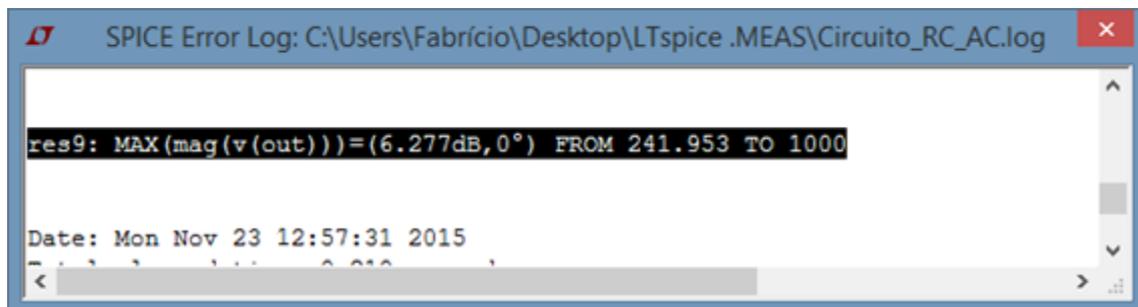


Figura 32: Resultado do comando ".meas" na determinação do máximo da magnitude de V(out), limitando a busca ao intervalo definido pela primeira passagem de V(out) pelo valor 0,5 e a frequência de 1 kHz. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

3.2.4. Obtenção do intervalo entre o atendimento de

Esse tipo de declaração retorna o intervalo entre o atendimento de condições. No entanto, pode-se definir apenas uma condição ou duas, dependendo de como se desejar a construção do intervalo.

Nos casos de se modificar apenas uma das extremidades, a extremidade não declarada é mantida tal como no padrão do programa, ou seja, igual a um dos limites do intervalo de simulação.

Além disso, a definição do intervalo pode ser construída com a combinação de uma declaração direta e uma declaração por meio do atendimento de condições.

A sintaxe para esse caso é:

```
.MEAS AC <NOME_VARIÁVEL>
+ [FROM <VAL1>]
+ [TRIG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL3>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT1>|LAST]]
+ [TO <VAL2>]
+ [TARG <EXPR_ESQ> [[VAL]=]<EXPR_DIR>]
+ [TD=<VAL4>]
+ [<RISE|FALL|CROSS> = [FIRST|<COUNT2>|LAST]]
```

Exemplo:

```
.meas ac Acorte max mag(v(out))/sqrt(2)
.meas ac res10
+ trig mag(V(out)) val=Acorte cross=first
+ targ mag(V(out))=Acorte cross=last5
```

Realiza duas medições sobre o sinal: magnitude de V(out). A primeira, determina o valor da magnitude na sua frequência de corte, calculado tomando o valor máximo da magnitude de V(out) e dividindo por $\sqrt{2}$. A segunda medição determina o intervalo entre os momentos em que a magnitude de V(out) assume o valor Acorte, sendo assim, por definição, a variável res10 pode ser entendida como sendo a largura de banda calculada para o filtro em estudo, afinal, $BW = Fca - Fcb$, sendo Fca a frequência de corte superior e Fcb a frequência de corte inferior.

⁵ Observar que a declaração da expressão de análise pode ser realizada de duas maneiras: uma por meio da separação do sinal de análise e o valor que ele deve assumir (**mag(V(out)) val = Acorte**) e outra por meio da declaração direta da expressão (**mag(V(out)) = Acorte**).

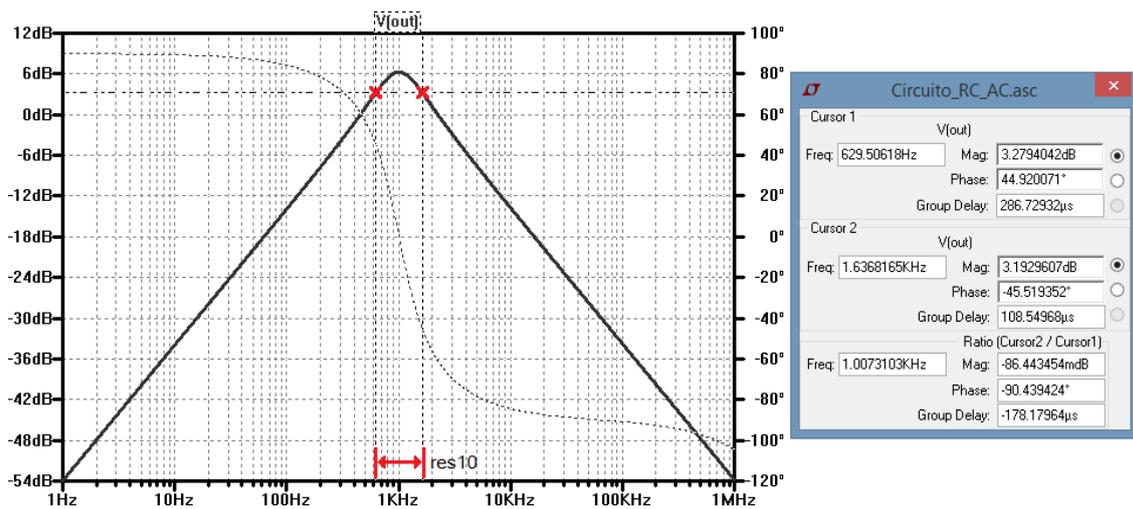


Figura 33: Obtenção gráfica do intervalo de frequências limitado entre os atendimentos de $V(\text{out}) = \text{MAX}(V(\text{out})) / \sqrt{2}$.

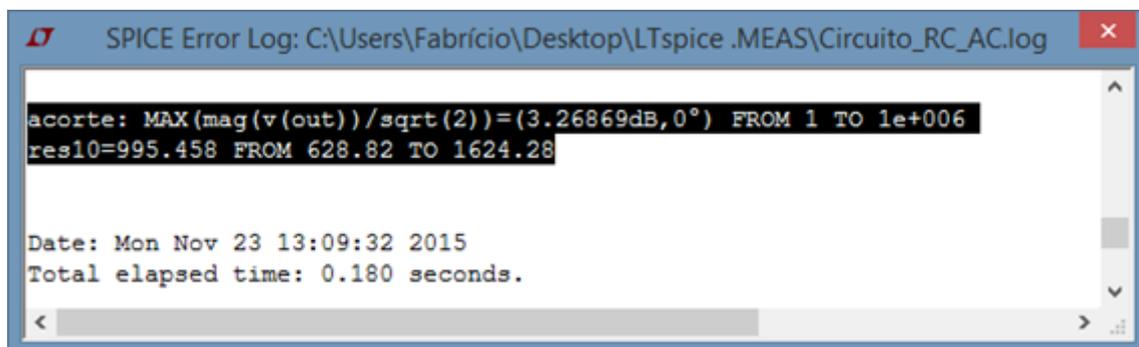


Figura 34: Resultado do comando ".meas" na determinação do intervalo limitado entre os atendimentos de $V(\text{out}) = \text{MAX}(V(\text{out})) / \sqrt{2}$. Obtido em Spice Error Log (Ctrl+L).

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

**Simulações de circuitos analógicos da
disciplina SEL393 – Laboratório de
Instrumentação Eletrônica I**

Prof. José Marcos Alves
Eng. Fabrício de Almeida Brito

Novembro/ 2015

Índice

Simulações de circuitos analógicos da disciplina SEL393 – Laboratório de Instrumentação Eletrônica I		Pag.
Laboratório 1 – Amplificadores básicos e diferenciais		76
1.1. Resposta em frequência de amplificadores operacionais (amp op)		76
Análise do offset de tensão em malha fechada		76
1.2. Ganho em malha aberta (A _{vol}), Frequência de transição (FT), Polo dominante (PD) e Margem de fase (MF)		79
1.3. Slew Rate (SR)		79
1.4. Amplificador diferencial e Amplificador de instrumentação		80
Laboratório 2 – Retificadores com Amp. Op.		83
2.1. Influência do operacional no retificador de meia onda		83
Laboratório 3 – Condicionamento de sinal		85
3.1. Análise de pior caso		85
Laboratório 5 - Filtros Ativos		87
5.1. Filtro passa baixa de primeira ordem		87
5.2. Filtro passa baixa - Multiple Feedback Topology		88
5.3. Filtro passa baixa - Sallen-Key		89
Laboratório 6 – Geradores de onda quadrada e triangular		
6.1. Gerador de onda quadrada		91
6.2. Gerador de onda quadrada e triangular		92

Laboratório 1 – Amplificadores básicos e diferenciais

1.1. Resposta em frequência de amplificadores operacionais (amp op)

A análise em frequência de um amplificador operacional requer um funcionamento em malha aberta. No entanto, nessa configuração, a polarização dos circuitos internos do operacional fica deteriorada e o dispositivo não fornece o comportamento esperado.

Análise do offset de tensão em malha fechada

Idealmente, um amp. op. funcionando como seguidor de tensão, com sinal de entrada nulo, deveria apresentar tensão de saída também nula, no entanto, devido às imperfeições de fabricação do componente, nem sempre se tem tensão de saída nula. A esse valor de tensão define-se o conceito de offset de tensão em malha fechada.

A Figura abaixo exemplifica tal offset de tensão com o amp. op. LF351. O dispositivo foi alimentado com + 15V e – 15V.

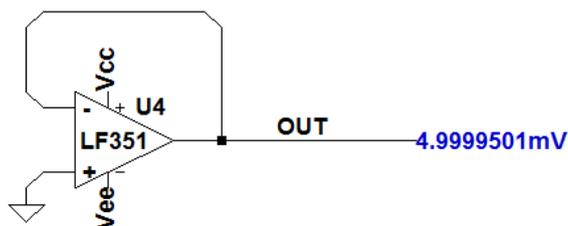


Figura 1: LF351 – Offset de tensão em malha fechada

Tal offset de tensão pode ser facilmente corrigido por meio da adição de uma fonte de tensão na entrada do operacional, tal como pode ser observado na Figura 2. O valor inserido na fonte é, para a polaridade observada na figura, igual ao valor do offset de tensão.

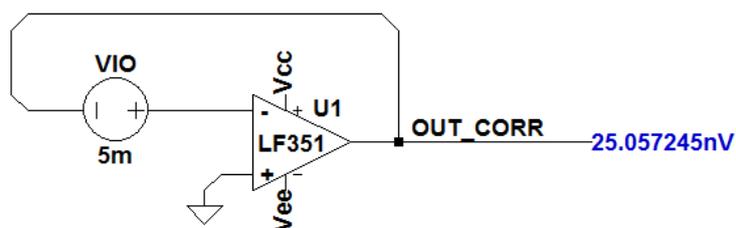


Figura 2: Correção do offset de tensão

O estudo do offset em malha fechada pode ser utilizado na correção do offset em malha aberta. O princípio de utilização está na imitação da realimentação apresentada pelo circuito seguidor de tensão na Figura 1. Nesse circuito, saída e entrada inversora

estão conectadas, logo, apresentam o mesmo valor de tensão em relação ao nó de referência; sendo assim, caso essa conexão seja desfeita e uma fonte de tensão, com valor igual ao do offset em malha fechada, for adicionada, os circuitos internos do operacional manterão seu ponto de operação e funcionarão corretamente.

A Figura 3 apresenta a comparação do funcionamento do operacional LF351 em malha aberta com e sem a fonte de correção do offset.

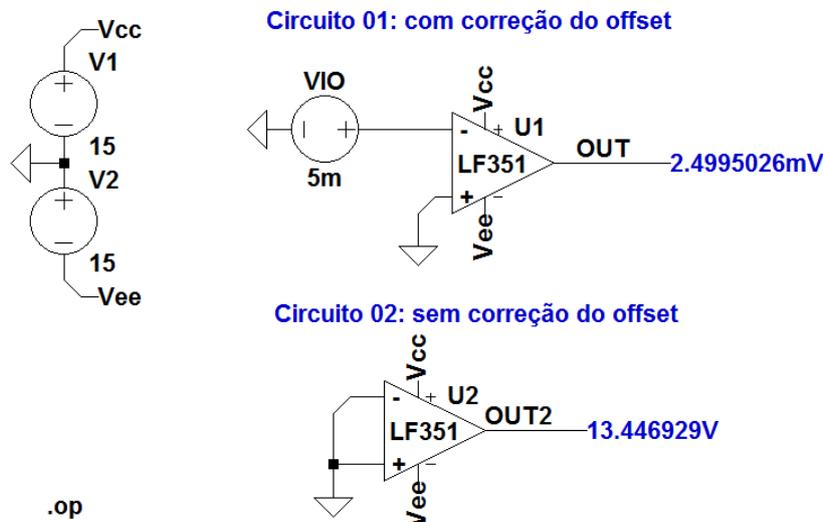


Figura 3: Comparação de resultados entre o circuito com e o circuito sem a correção do offset de tensão de saída

Como é possível observar na Figura 3, o circuito sem a correção do offset teve sua saída levada à saturação positiva do operacional (aproximadamente 13,5V), enquanto que o outro circuito manteve sua polarização.

A grande diferença entre a utilização ou não da fonte de correção do offset é observada na resposta em frequência apresentada pelos circuitos. A Figura 4 apresenta os circuitos de análise da resposta em frequência para o LF351, com e sem a utilização da correção de offset. A simulação realizada foi: .ac dec 1001 1 100meg. A Figura 5 apresenta a resposta dos circuitos da Figura 4.

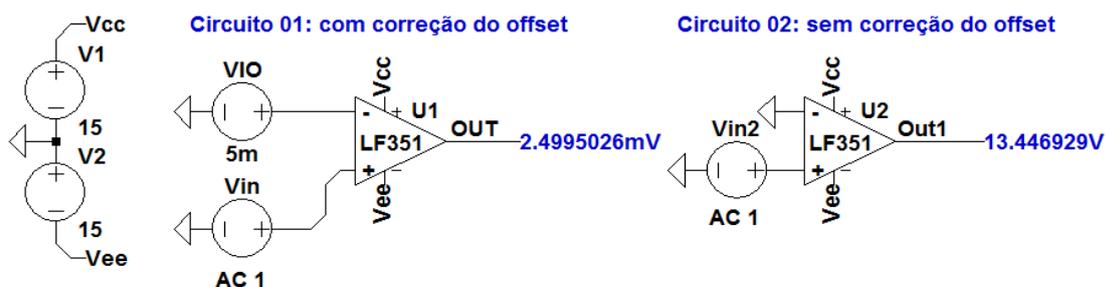


Figura 4: Comparação da resposta em frequência para os circuitos com e sem correção do offset

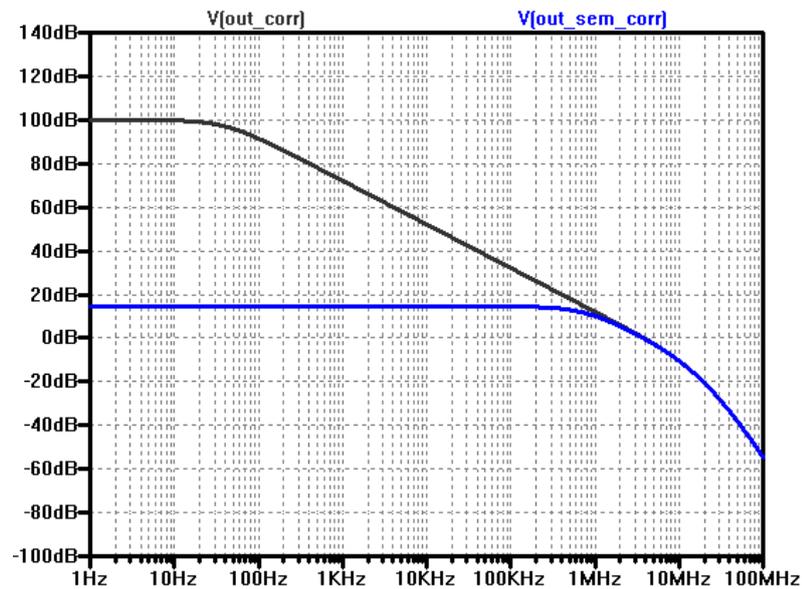


Figura 5: Comparação da resposta em frequências dos circuitos da Figura 4

Dos resultados da Figura 5, vê-se a necessidade da utilização da fonte de correção do offset nas simulações em malha aberta.

Os procedimentos de análise da resposta em frequência do operacional LF351, também foram utilizados na análise de: LM741, LM318, TL081 e LT1022.

Os arquivos do LTspice para tais análises apresentam, basicamente, a mesma estrutura, tal como apresentada na Figura 6 abaixo.

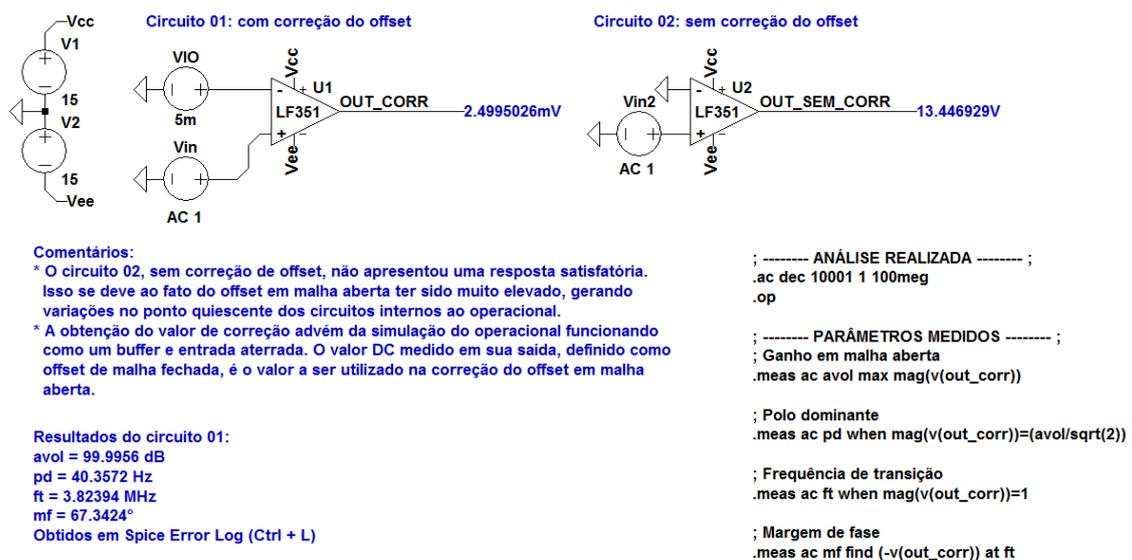


Figura 6: Estrutura do arquivo do LTspice para análise em frequência dos operacionais.

1.2. Ganho em malha aberta (Avol), Frequência de transição (FT), Polo dominante (PD) e Margem de fase (MF)

Esses dados foram extraídos do circuito utilizando os seguintes comandos:

```
; ----- PARÂMETROS MEDIDOS ----- ;
; Ganho em malha aberta
.meas ac avol max mag(v(out_corr))
; Polo dominante
.meas ac pd when mag(v(out_corr))=(avol/sqrt(2))
; Frequência de transição
.meas ac ft when mag(v(out_corr))=1
; Margem de fase
.meas ac mf find (-v(out_corr)) at ft
```

Tais comandos foram inseridos na simulação por meio da ferramenta “Spice directive”, acessível na barra de ferramentas, último botão à direita. Seus resultados ficam disponíveis após o término da simulação no arquivo “Spice Error Log”, cujo acesso pode ser realizado na barra de ferramentas, View >>> Spice Error Log, ou pelo atalho do teclado Ctrl + L.

Os resultados retornados pelo programa foram adicionados, na forma de comentários, no arquivo de simulação dos amplificadores operacionais.

1.3. Slew Rate (SR)

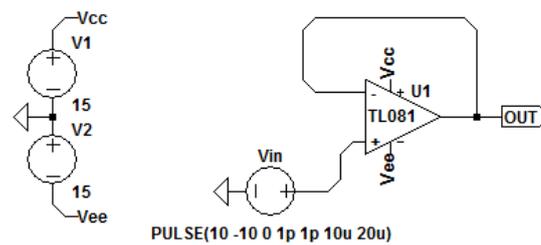
O método mais rápido para a obtenção do slew rate de um operacional é com a aplicação de uma onda quadrada na sua entrada não inversora, com o circuito configurado como seguidor de tensão. Então, analisa-se a saída do circuito e mede-se o intervalo de tempo para o sinal variar de 90% de seu valor mínimo à 90% de seu valor máximo. O slew rate é então calculado, para as duas transições do sinal (subida e descida), por meio da expressão: $SR = 0,9 * (V_{max} - V_{min}) / (\Delta t * 10^6) [V/\mu s]$.

Os comandos de medida executados nessa simulação foram:

```
; MEDIDAS DE SR+ E SR-
.meas tran vmax max v(out)
.meas tran vmin min v(out)
.meas tran t12
+ trig when v(out)=0.9*vmin rise=0
+ targ when v(out)=0.9*vmax rise=0
.meas tran t34
+ trig when v(out)=0.9*vmax fall=1
+ targ when v(out)=0.9*vmin fall=1
```

```
.meas sr+(v/us) param 0.9*(vmax-vmin)/(1meg*t12)
.meas sr-(v/us) param 0.9*(vmax-vmin)/(1meg*t34)
```

Os arquivos do LTspice para tais análises apresentam, basicamente, a mesma estrutura, tal como apresentada na Figura 7 a seguir.



Comentários:

- * O método mais rápido para a obtenção do slew rate de um operacional é com a aplicação de uma onda quadrada na sua entrada não inversora, com o circuito configurado como seguidor de tensão.
- * Mede-se os tempos do sinal de saída variar de 10% a 90%.
- * Recomenda-se a utilização de uma onda quadrada de variação de -3/4 a 3/4 do do valor da alimentação do operacional.

; ANÁLISE REALIZADA

```
.tran 0 40u 0 10n
```

; MEDIDAS DE SR+ E SR-

```
.meas tran vmax max v(out)
.meas tran vmin min v(out)
.meas tran t12
+ trig when v(out)=0.9*vmin rise=0
+ targ when v(out)=0.9*vmax rise=0
.meas tran t34
+ trig when v(out)=0.9*vmax fall=1
+ targ when v(out)=0.9*vmin fall=1
.meas sr+(v/us) param 0.9*(vmax-vmin)/(1meg*t12)
.meas sr-(v/us) param 0.9*(vmax-vmin)/(1meg*t34)
```

Resultados obtidos:

```
SR+ = 13.0102 V/us
SR- = 13.6313 V/us
```

Figura 7: Estrutura do arquivo do LTspice para a análise do slew rate dos operacionais.

1.4. Amplificador diferencial e Amplificador de instrumentação

A comparação entre os amplificadores diferenciais e os amplificadores de instrumentação podem ser observadas sobre o ponto de vista do “Common Mode Rejection Ratio” ou CMRR, que, em linhas gerais, representa o quanto o circuito amplifica sinais diferenciais em comparação com sinais em modo comum, isto é, sinais que atingem igualmente as entradas dos amplificadores.

Utilizaram-se três circuitos de análise: um amplificador diferencial básico (Figura 8), um amplificador de instrumentação construído com LM741 (Figura 9) e um amplificador de instrumentação INA118 (Figura 10).

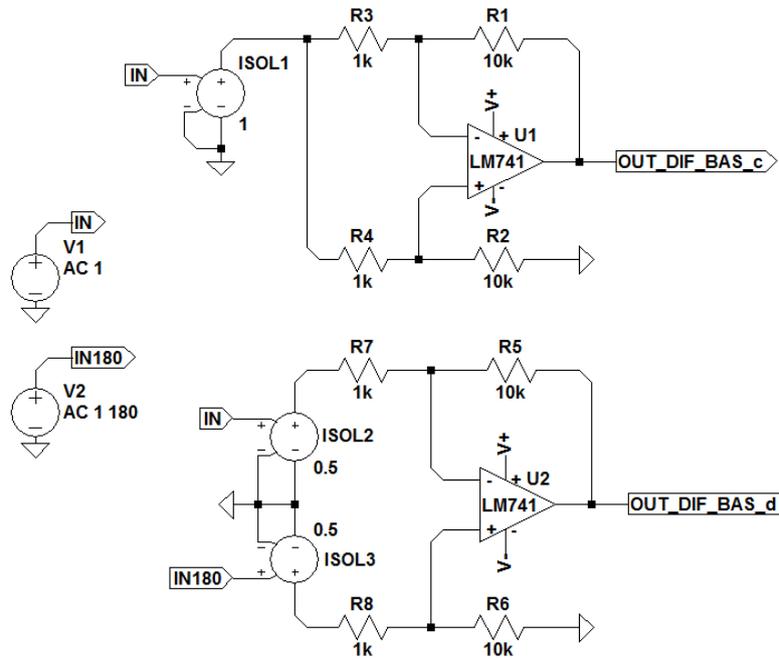


Figura 8: Amplificador diferencial construído com LM741. Ganho configurado para 10V/V.

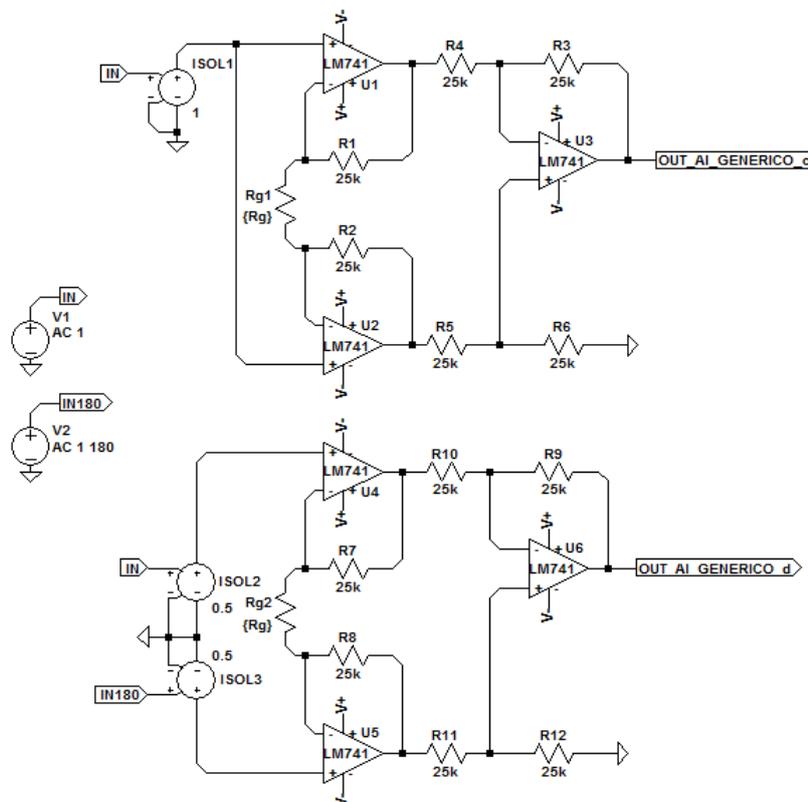


Figura 9: Amplificador de instrumentação construído com LM741. Ganho configurado para 10V/V.

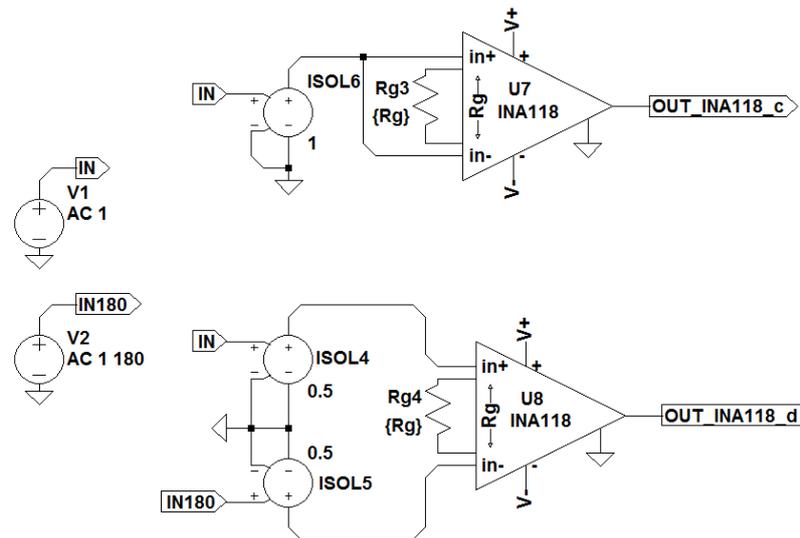


Figura 10: Amplificador de instrumentação INA118. Ganho configurado para 10V/V.

Das configurações apresentadas, o CMRR pode ser determinado, via simulação, por meio da divisão da resposta em frequência do circuito operando em modo diferencial pela resposta do circuito operando em modo comum. Os resultados observados estão na Figura 11.

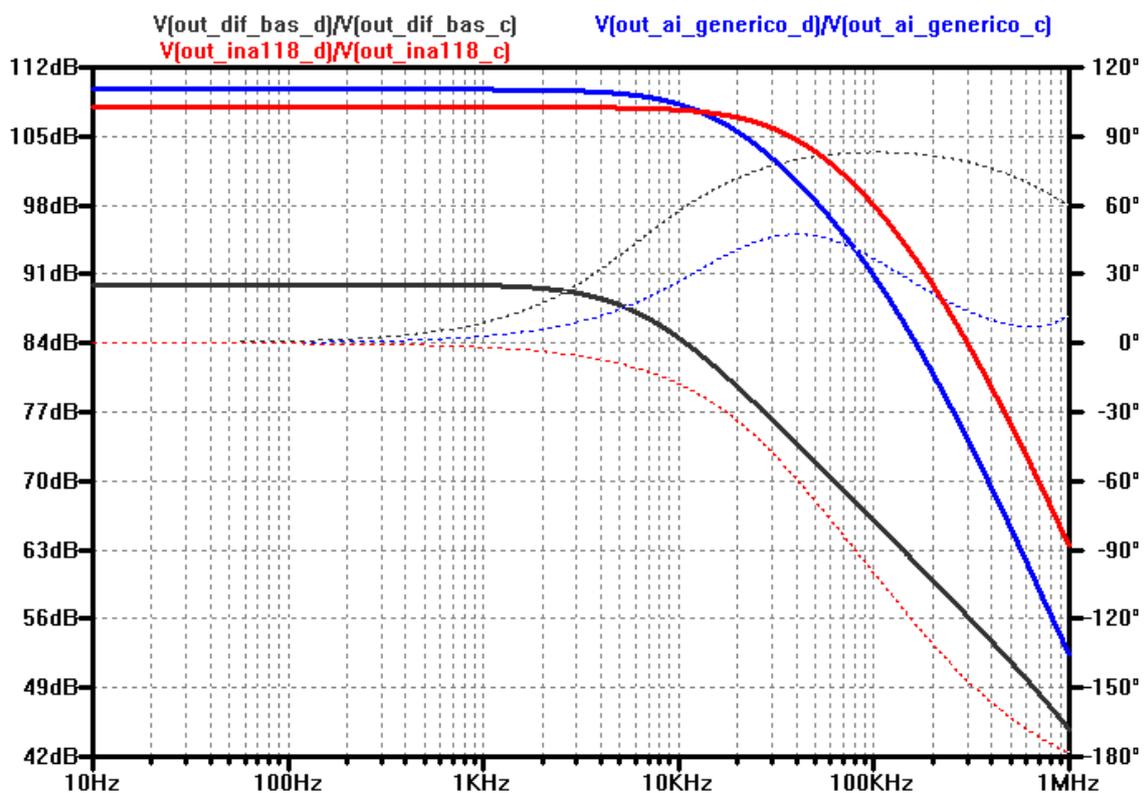


Figura 11: Comparação do CMRR das configurações apresentadas.

Laboratório 2 – Retificadores com Amp. Op.

2.1. Influência do operacional nos retificadores de meia onda

O amplificador operacional influencia a resposta de apenas um dos tipos de retificador de precisão, os retificadores de precisão de primeiro ciclo, tais como os da Figura 12.

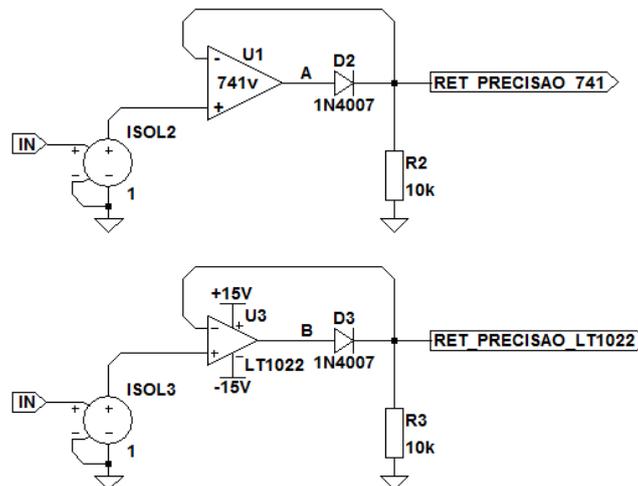


Figura 12: Retificadores de meia onda de precisão

Tal influência pode ser analisada observando-se a saída de cada um dos operacionais e a saída do retificador de precisão. Os resultados estão na Figura 13.

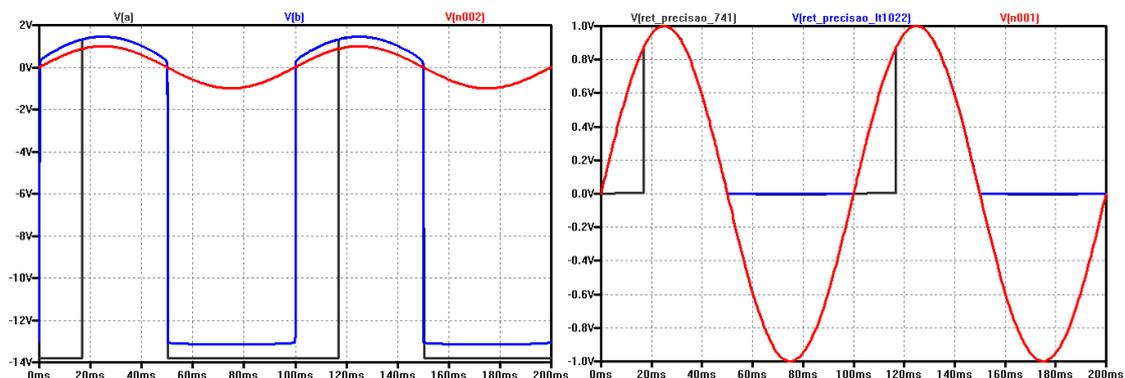


Figura 13: Observação dos sinais nos nós A, B e nas saídas dos circuitos. Resultados para um sinal de entrada senoidal de amplitude 1V e frequência 10Hz.

Observando os resultados da Figura 13, percebe-se que os operacionais ficam em suas saturações negativas durante o ciclo negativo da onda de entrada, sendo assim, são limitados pelo seu slew rate para recuperarem-se da saturação e começarem a

seguir o sinal de entrada. Isso fica bastante evidente para o LM741, que possui baixíssimo slew rate.

O que acontece para o retificador de primeiro ciclo não acontece para o retificador de segundo ciclo (Figura 14). Esses retificadores de precisão, devido a sua construção, não levam o amp. op. à saturação, logo, não existe um atraso devido ao tempo de recuperação da saturação, mesmo utilizando-se de operacionais mais lentos, como o LM741. As saídas dos circuitos de retificação podem ser observadas na Figura 15.

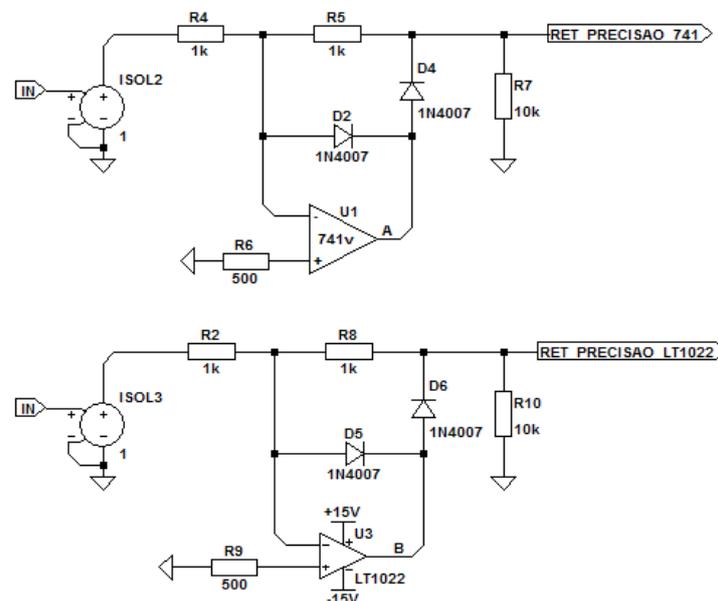


Figura 14: Retificador de precisão de segundo ciclo

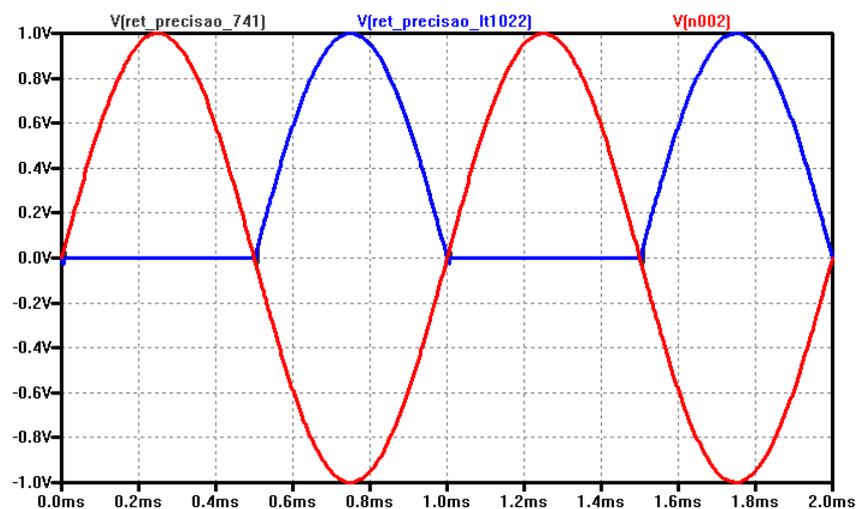
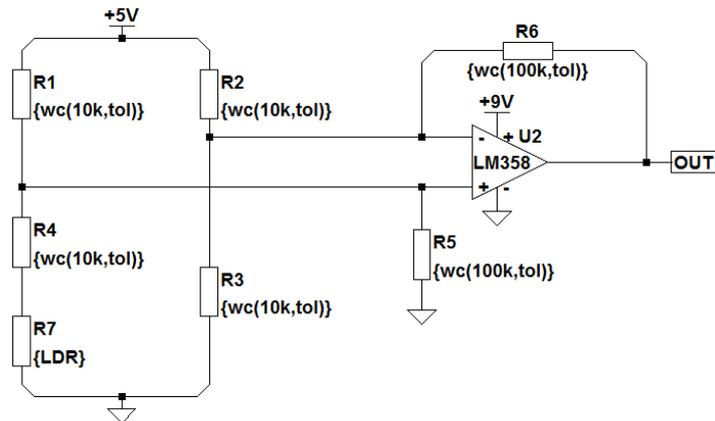


Figura 15: Sinais de saída dos retificadores da Figura 14. Sinal de entrada senoidal de amplitude 1V e frequência 1 kHz.

Laboratório 3 – Condicionamento de sinal

3.1. Análise de pior caso



```

; ----- SIMULACAO DE PIOR CASO ----- ;
.função wc(n,t) if(run == 1, n, if(flat(1) > 0, n*(1+t), n*(1-t)))

; TOLERANCIA DOS RESISTORES:
.param tol = 0.05

; RESISTENCIA DO LDR
.param LDR = 1p

; QUANTIDADE DE SIMULACOES SUCESSIVAS
; (PARA SIMULAR NOS VALORES NOMINAIS UTILIZAR:
; '.param run = 1')
.step param run 1 20 1

; TIPO DE SIMULAÇÃO
.op

```

Figura 16: Ponte de Wheatstone. Análise do pior caso.

A simulação de pior caso baseia-se na seguinte lógica:

- Se “run” é igual a 1, ou seja, é a primeira vez de simulação do circuito, calculam-se as tensões e correntes baseando-se nos valores nominais dos componentes.
- Quando “run” for diferente de 1, isto é, nas demais simulações, os valores dos componentes são aleatoriamente escolhidos entre dois possíveis valores: “nominal * (1 + tolerância)” e “nominal * (1 - tolerância)”. Sendo assim, ao final de “n” simulações, será possível observar todas os possíveis resultados para o circuito.

No caso do circuito da Figura 16, obtém-se o seguinte resultado da Figura 17.

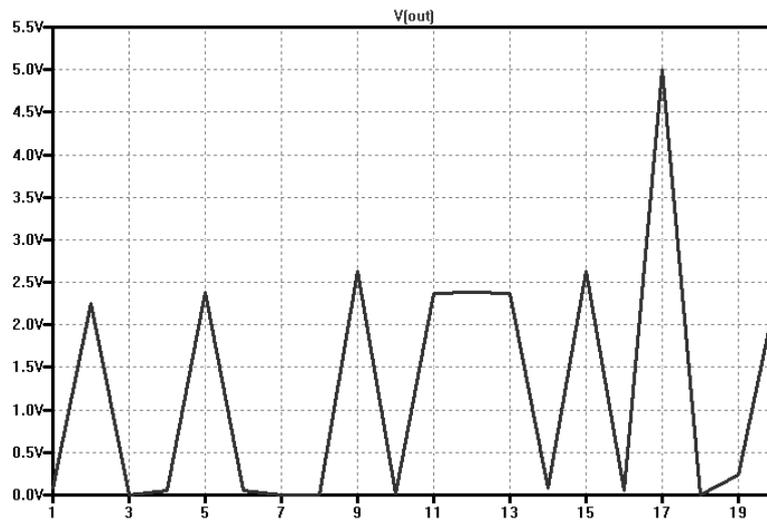


Figura 16: Resultado da simulação de pior caso.

Laboratório 5 – Filtros ativos

5.1. Filtro passa baixa de primeira ordem

Os filtros passa baixa de primeira ordem são divididos em inversor e não inversor. A configuração inversora pode ser observada na Figura 17 e a não inversora na Figura 18.

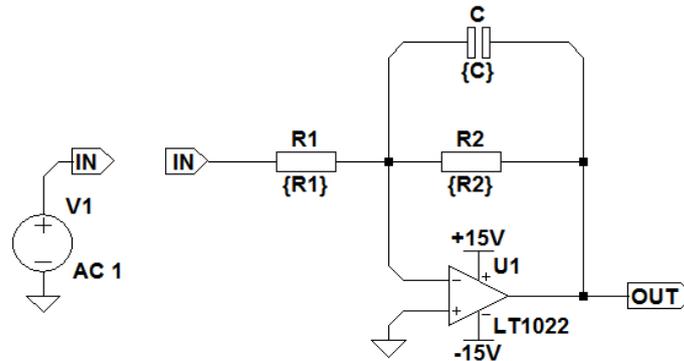


Figura 17: Filtro passa baixa de primeira ordem – configuração inversora

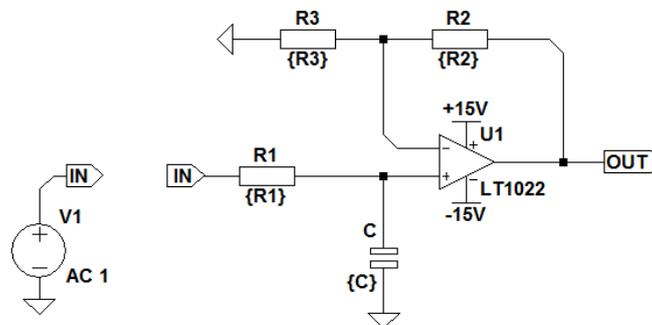


Figura 18: Filtro passa baixa de primeira ordem – configuração não inversora

Em ambos os casos, apenas um par RC determina o comportamento do filtro. Os demais componentes existem apenas para o controle de ganho.

No LTspice, optou-se por uma abordagem automática, logo, basta entrar com alguns dados do filtro e o programa calculará os demais parâmetros, retornando a resposta do filtro em frequência. Os parâmetros calculados são retornados na própria tela.

A estrutura geral do programa pode ser observada na Figura 19.

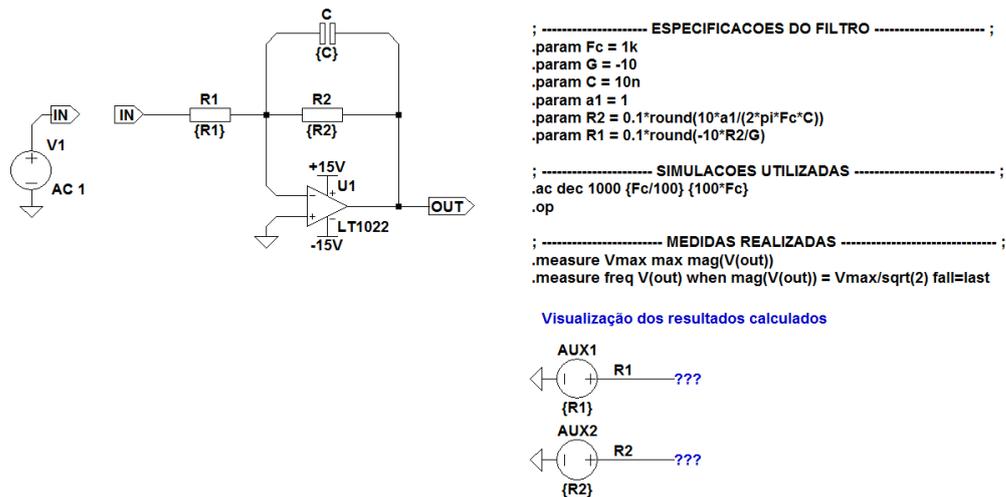


Figura 19: Estrutura do LTspice para o filtro passa baixa inversor.

5.2. Filtro passa baixa – Multiple Feedback Topology

Os filtros passa baixas na configuração Multiple Feedback Topology são filtros de segunda ordem, que podem ser projetados para uma resposta Butterworth, Bessel ou 3-dB Tschebyscheff. Seu diagrama básico pode ser observado na Figura 20.

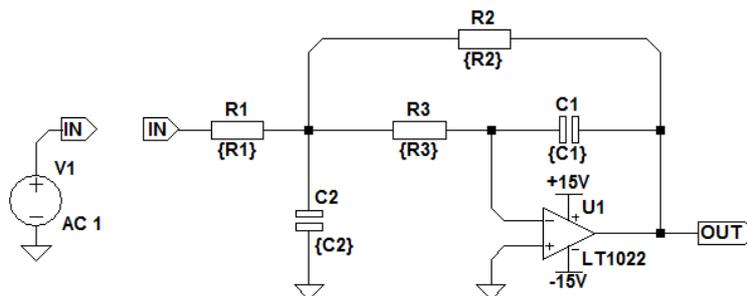


Figura 20: Filtro passa baixas na configuração Multiple Feedback Topology.

No LTspice, optou-se por uma abordagem automática, logo, basta entrar com alguns dados do filtro, especificar os valores de a_1 e de b_1 e o programa calculará os demais parâmetros, retornando a resposta do filtro em frequência.

Observar que nessa configuração deve-se fazer uma checagem do valor mínimo para o capacitor C_2 , que deve seguir: $C_2 > C_1 * 4 * b_1 * (1 - A_0)/a_1^2$, sendo A_0 igual ao ganho desejado para o circuito.

A estrutura geral do programa pode ser observada na Figura 21.

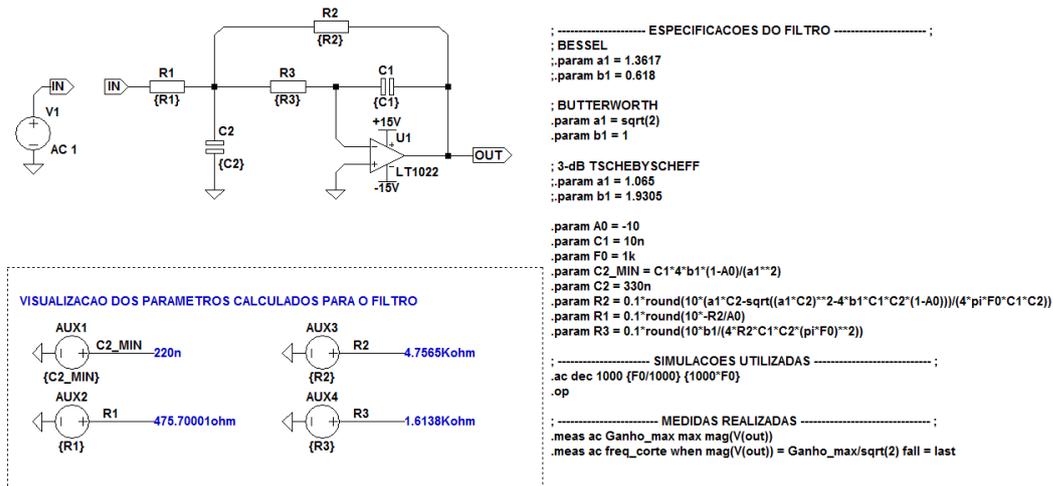


Figura 21: Estrutura do LTspice para o filtro passa baixa na configuração Multiple Feedback Topology.

5.3. Filtro passa baixa – Sallen-Key

Os filtros passa baixas na configuração Sallen-Key são filtros de segunda ordem, que podem ser projetados para uma resposta Butterworth, Bessel ou 3-dB Tschescheff. Seu diagrama básico pode ser observado na Figura 22.

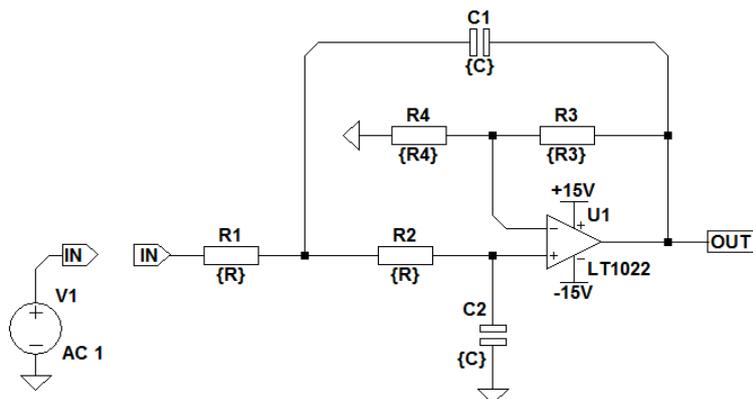


Figura 22: Filtro passa baixas na configuração Sallen-Key

No LTspice, optou-se por uma abordagem automática, logo, basta entrar com alguns dados do filtro, especificar os valores de a_1 e de b_1 e o programa calculará os demais parâmetros, retornando a resposta do filtro em frequência.

A estrutura geral do programa pode ser observada na Figura 23.

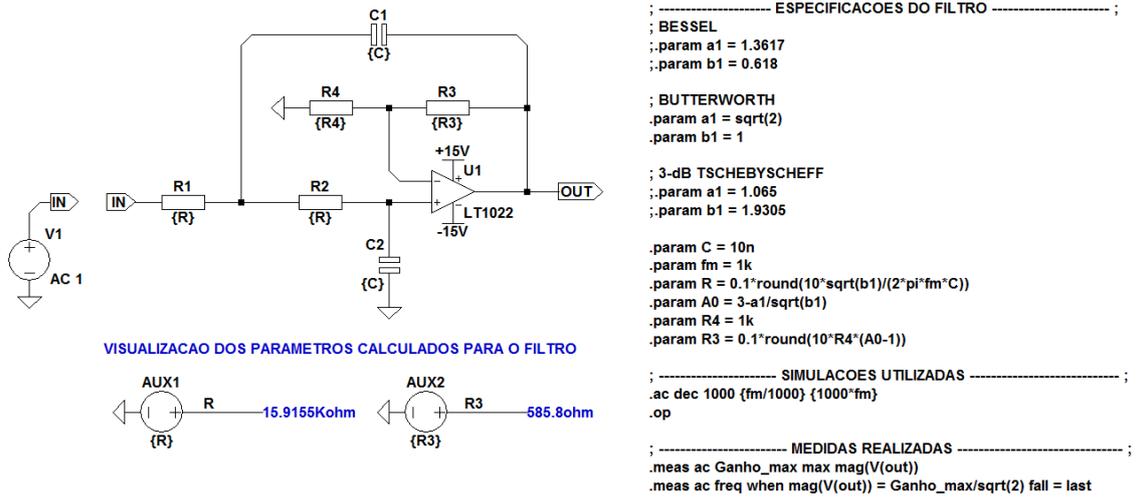


Figura 23: Estrutura do LTspice para o filtro passa baixa na configuração Sallen-Key

Laboratório 6 – Geradores de onda quadrada e triangular

Em ambos os casos, utilizou-se uma abordagem automática de determinação dos parâmetros dos geradores. Observar também que foi adicionada uma medição, a qual determina a frequência de oscilação do circuito.

6.1. Gerador de onda quadrada

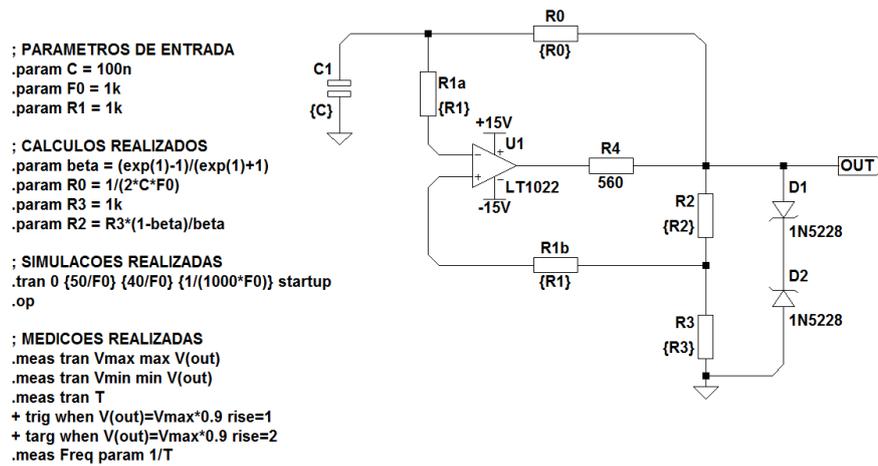
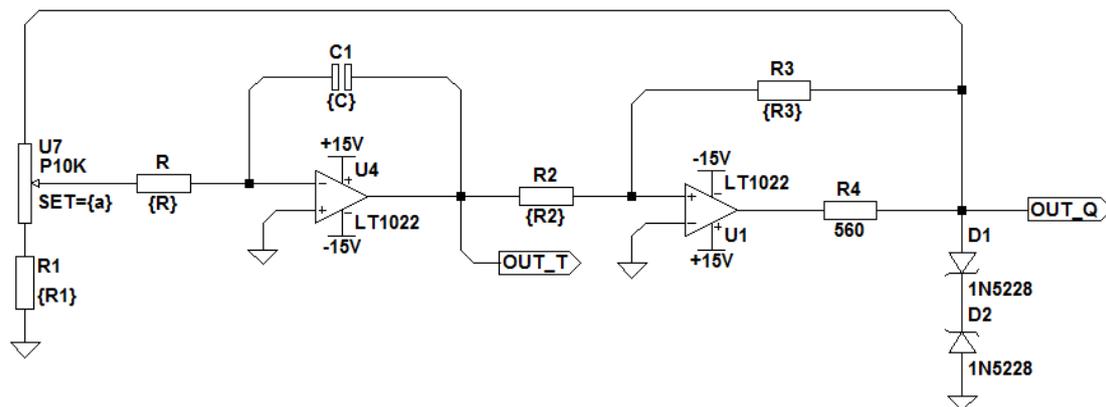


Figura 24: Gerador de onda quadrada. Estrutura do LTspice

6.2. Gerador de onda quadrada e triangular



; PARAMETROS DE ENTRADA

```
.param C = 22n
.param R = 12k
.param R1 = 1k
.param R2 = 10k
.param R3 = 10k
.param a = 1
```

; SIMULACOES REALIZADAS

```
.tran 0 60m 10m 1u startup
.op
```

; MEDICOES REALIZADAS

```
.meas tran Aq max V(out_q)
.meas tran At max V(out_t)
.meas tran T1 when V(out_q)=Aq*0.9 rise=1
.meas tran T2 when V(out_q)=Aq*0.9 rise=2
.meas tran T3 when V(out_t)=At*0.9 rise=1
.meas tran T4 when V(out_t)=At*0.9 rise=2
.meas Freq_q param 1/(T2-T1)
.meas Freq_t param 1/(T4-T3)
.param realim = (R1+10k*a)/(10k+R1)
.meas Freq_teo param realim*R3/(R2*4*C*R)
```

Figura 24: Gerador de onda quadrada e triangular. Estrutura do LTspice