

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 trata 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
wavefile=. "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.	Prática 1 - Análise em Corrente Contínua	Pág.
	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 é 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.

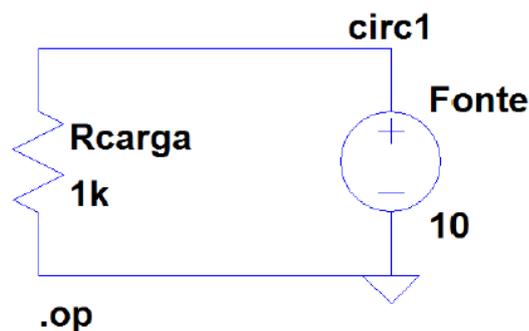


Fig. 1 – Circuito para análise .op

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”.

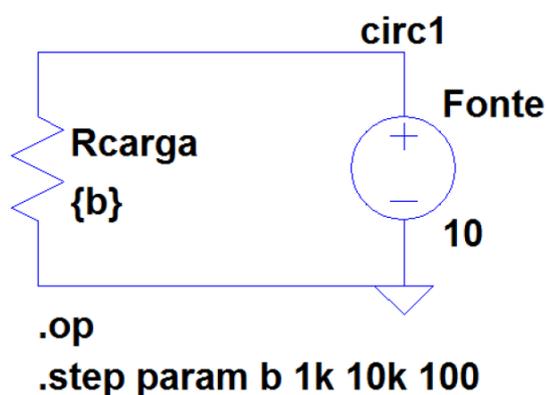


Fig. 2 - Circuito para utilização do comando “.step param”

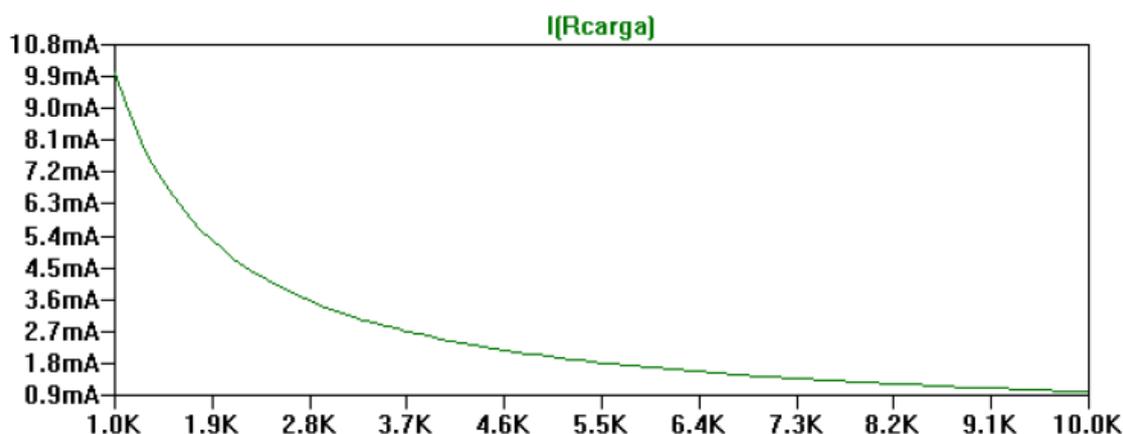


Fig. 3 - Corrente no resistor em função do valor do resistor em “análise .op”

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.

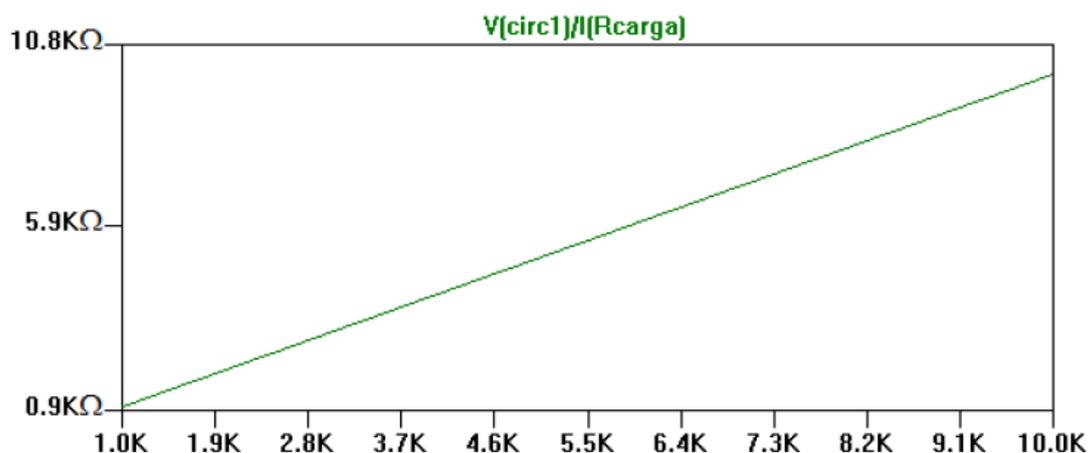


Fig. 4 - Valor do resistor em função do valor do resistor

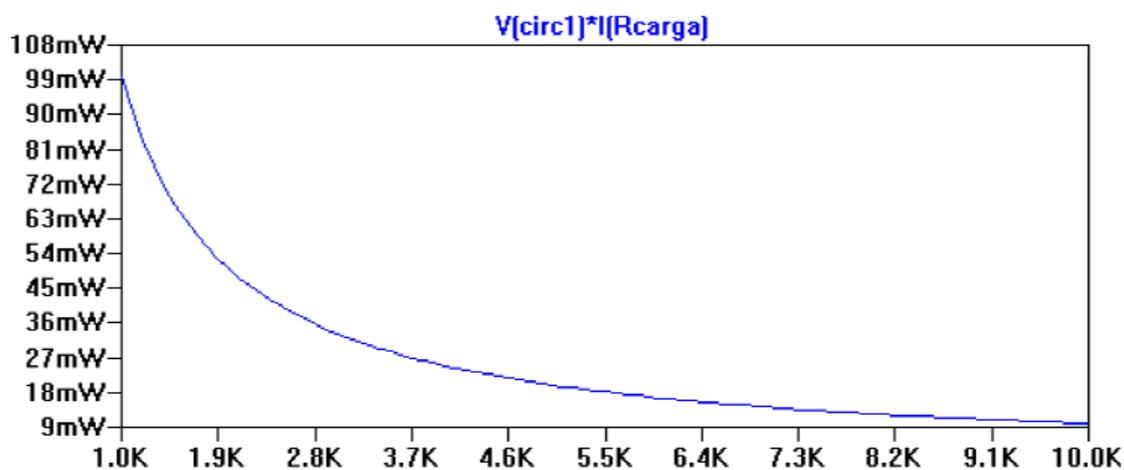


Fig. 5 - Potência sobre o resistor em função do resistor

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.

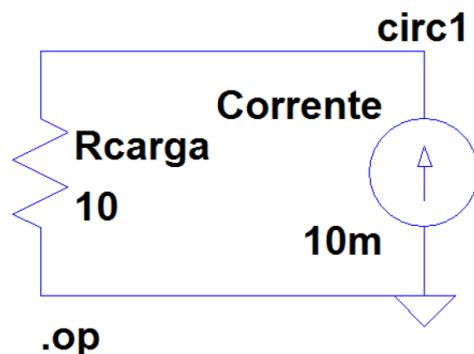


Fig. 6 - Exemplo de circuito utilizando fonte de corrente ideal

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.

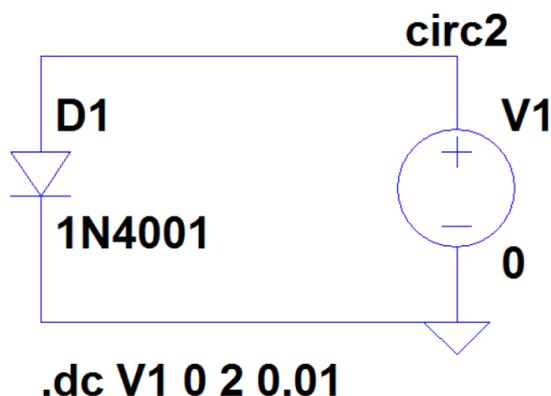


Fig. 7 - Circuito para “análise .DC” com diodo comum

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.

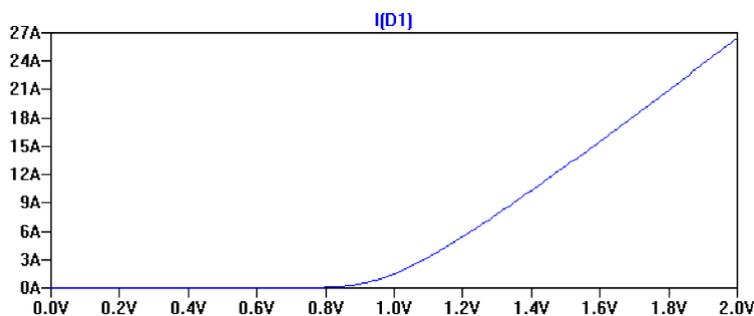


Fig. 8 - Corrente no diodo em função da tensão V1

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. 10, é mostrada na figura 11.

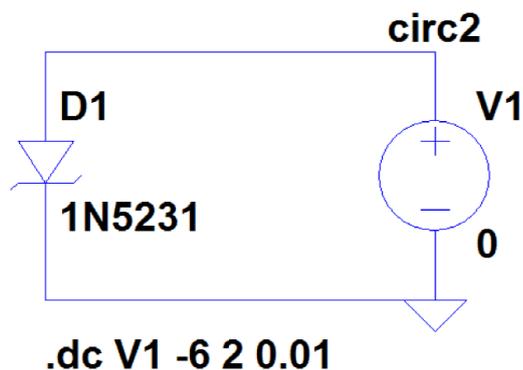


Fig. 9 - Circuito para análise `.DC` com diodo Zener

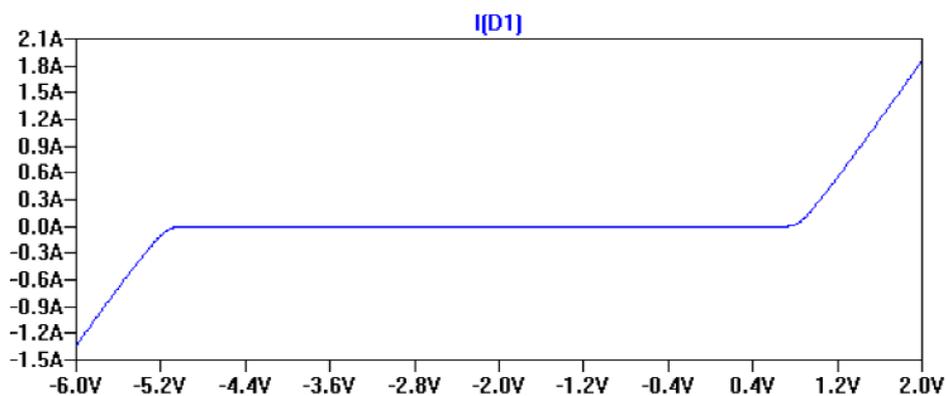


Fig. 10 - Corrente no diodo Zener em função de V1

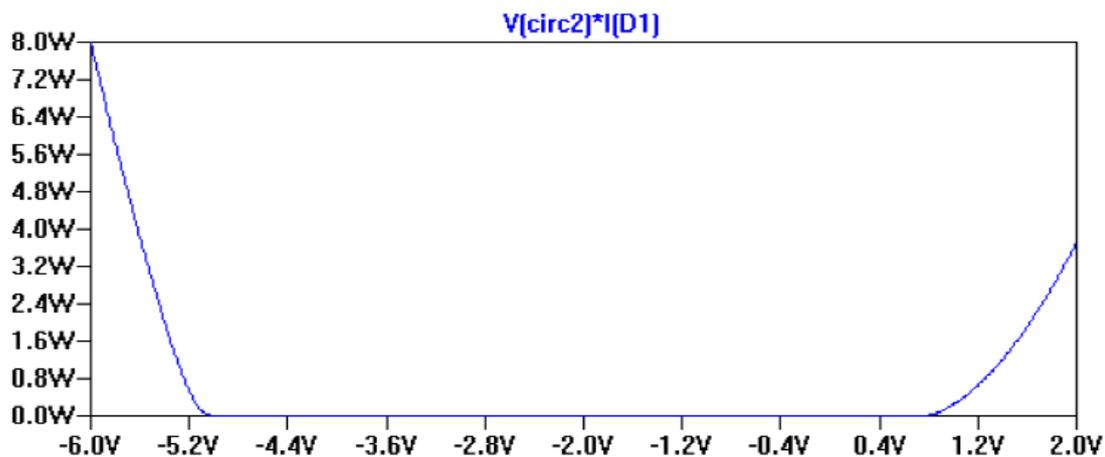


Fig. 11 - Potência no diodo Zener em função de V1

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 e plotada.

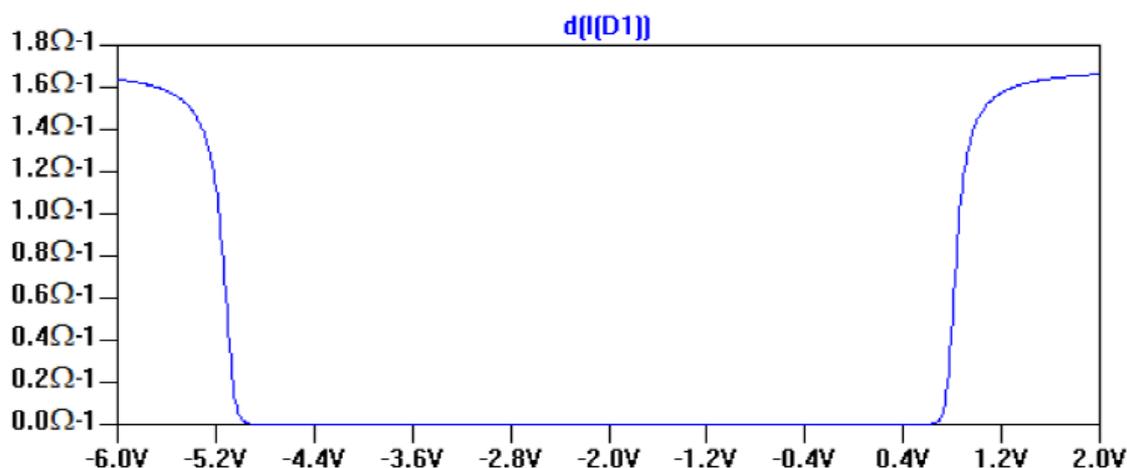


Fig. 12 - Derivada da corrente sobre o Zener em função de V1

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.

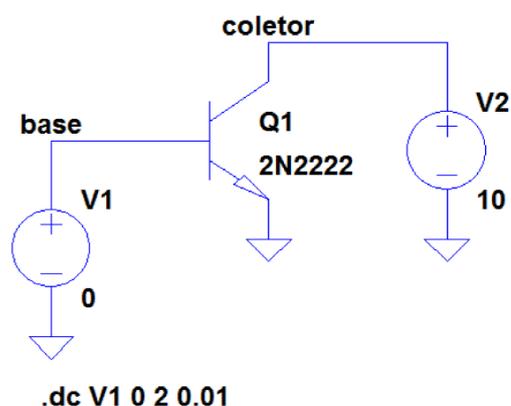


Fig. 13 - Circuito de análise .DC com um transistor bipolar de junção

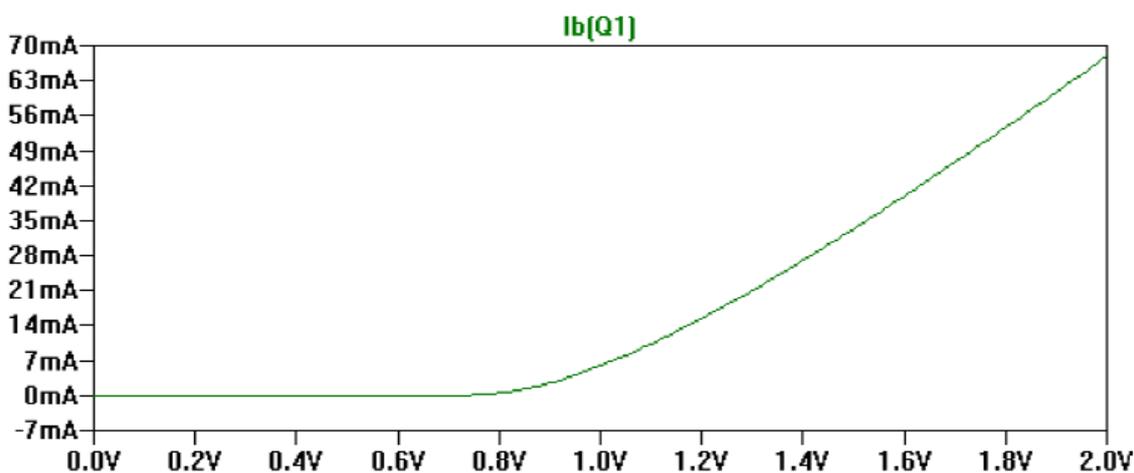


Fig. 14 - Corrente na base do transistor em função de V1

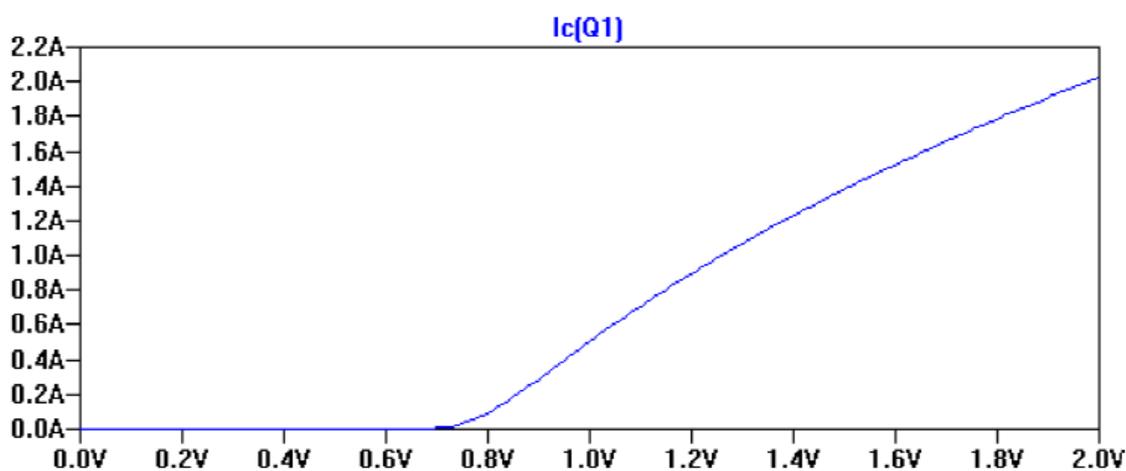


Fig. 15 - Corrente no coletor do transistor em função de V1

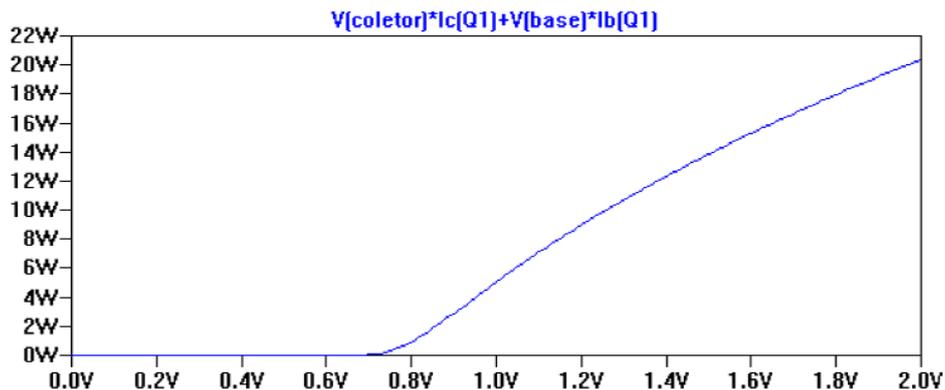


Fig. 16 - Potência dissipada pelo transistor em função de V1

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.

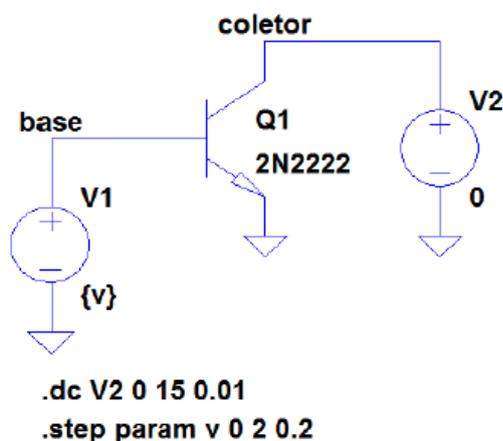


Fig. 17 – Circuito para análise .DC combinada com .step param

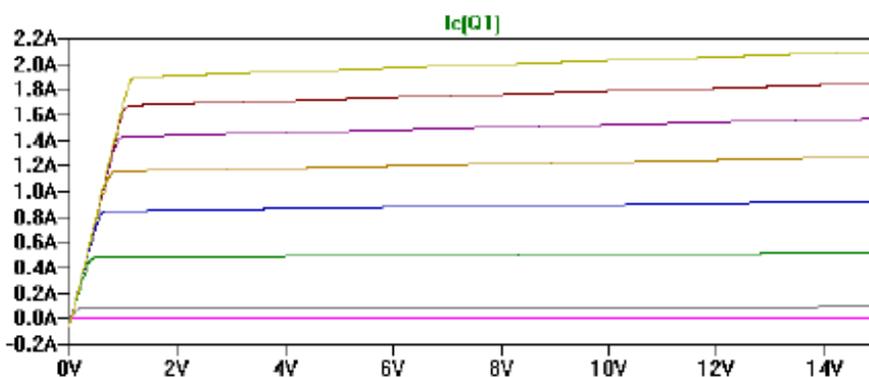


Fig. 18 – Família de curvas do 2N2222

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

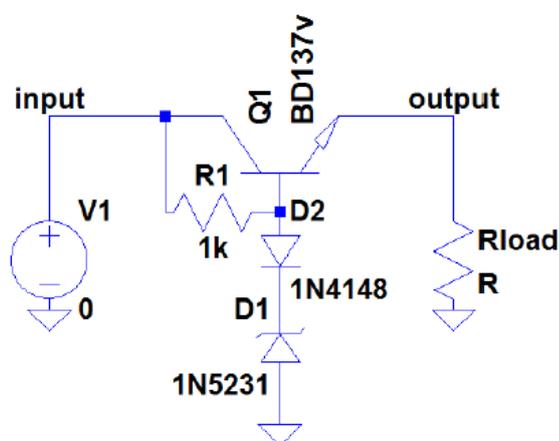


Fig. 19 - Estabilizador de Tensão Simples

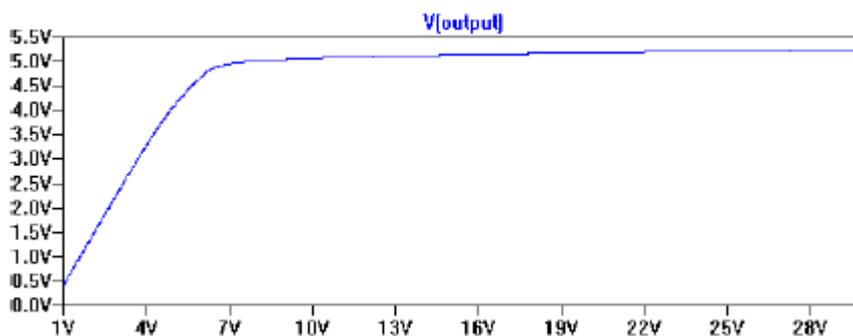


Fig. 20 - Tensão na saída do estabilizador em função da tensão na entrada

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 10Ω 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 máxima 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 $7.2\ \Omega$.

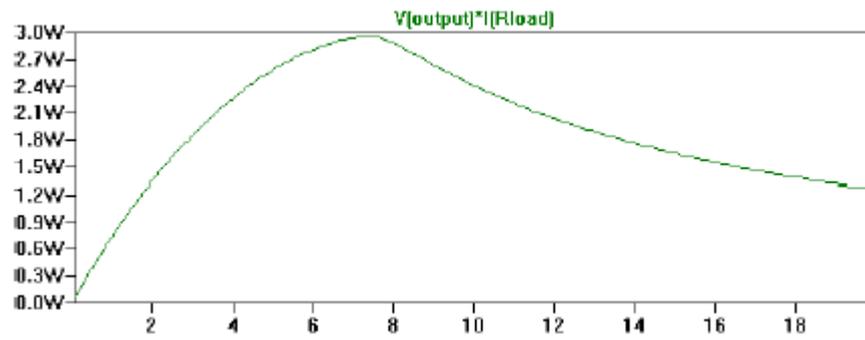


Fig. 21 - Potência sobre a carga em função da carga

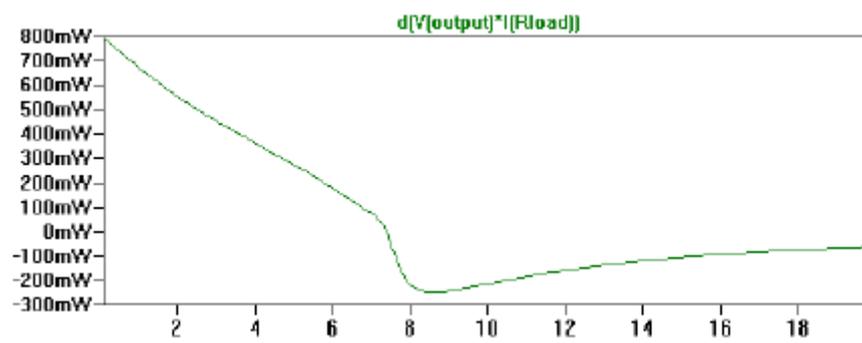


Fig. 22 - Derivada da potência sobre a carga em função da carga

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.

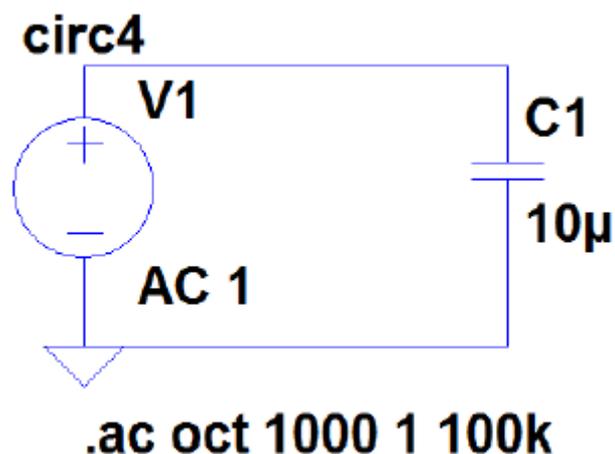


Fig. 23 - Circuito para análise .AC com capacitor

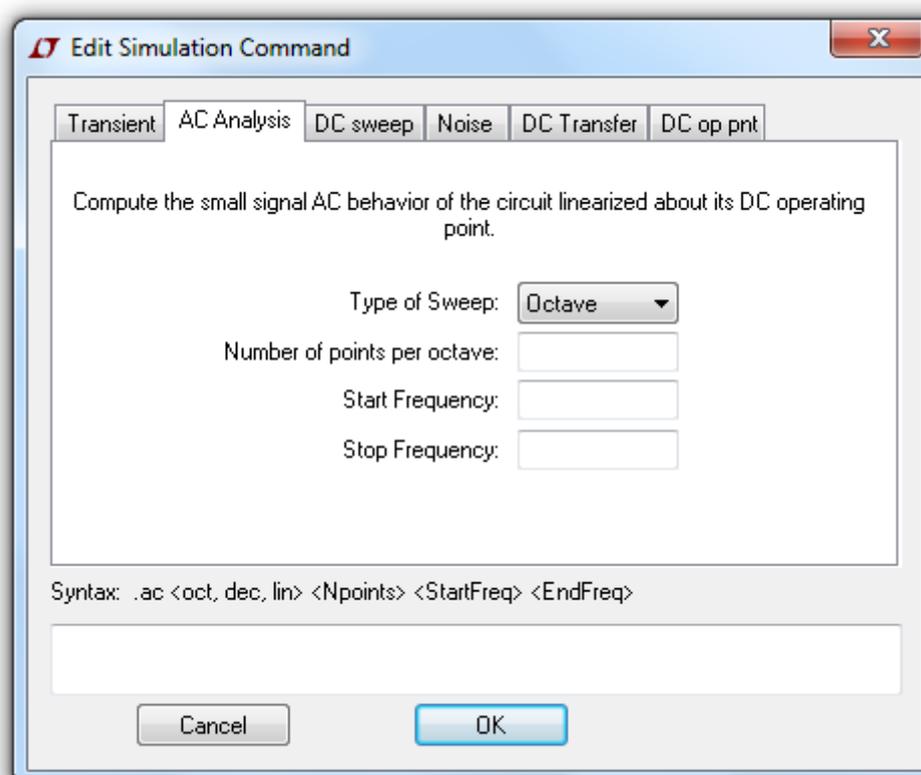


Fig. 24 – AC Analysis

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.

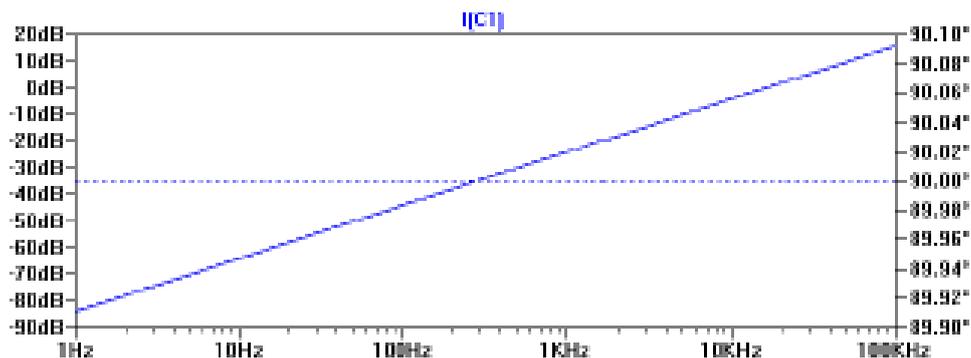


Fig. 25 – Corrente no capacitor em função da frequência

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**”.

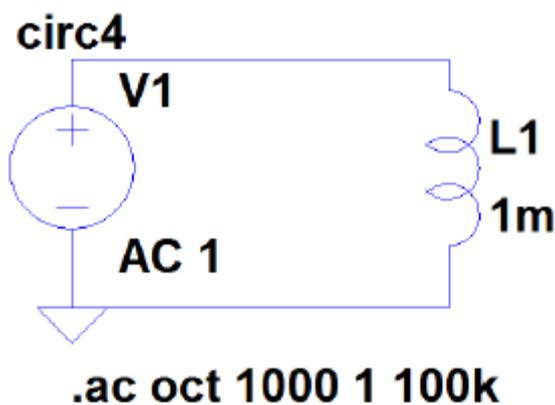


Fig. 26 – Circuito para análise .AC para o indutor

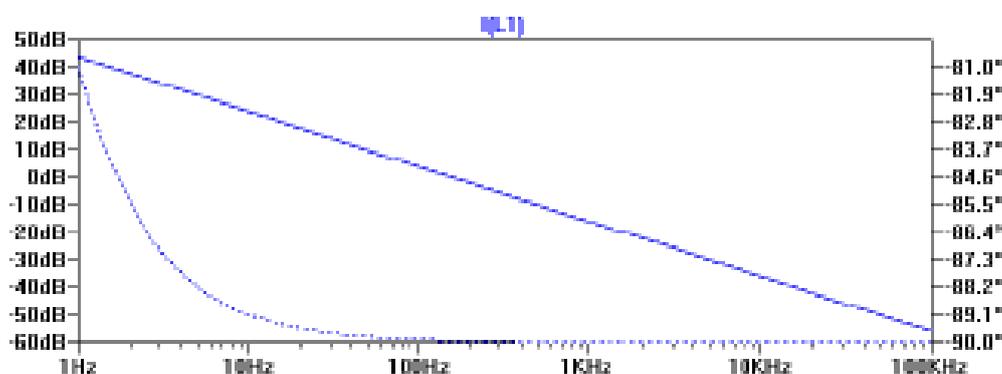


Fig. 27 – Corrente no indutor em função da frequência

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.

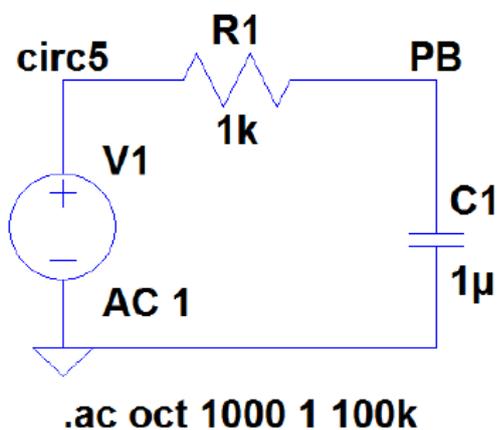


Fig. 28 – Filtro de passa baixa

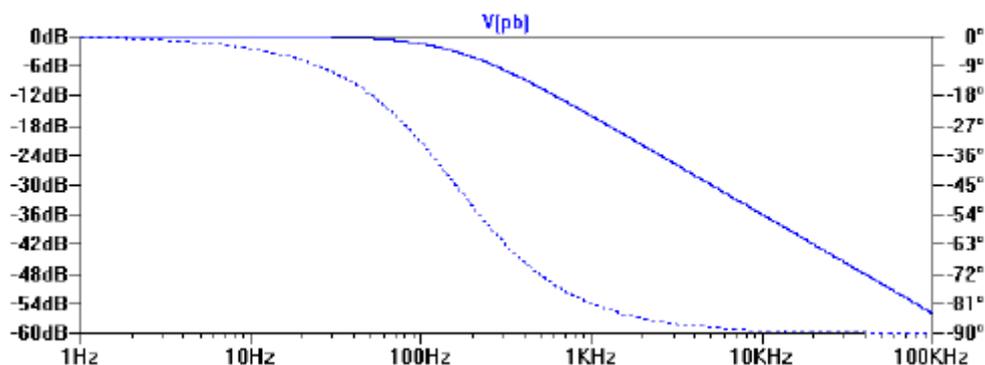


Fig. 29 – Resposta em frequência do filtro de passa baixa

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.

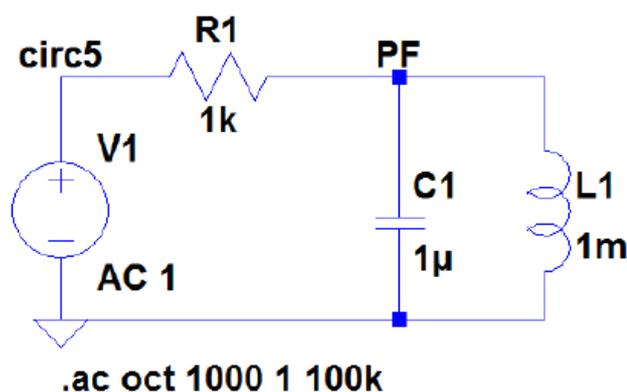


Fig. 30 – Filtro passa faixa RLC

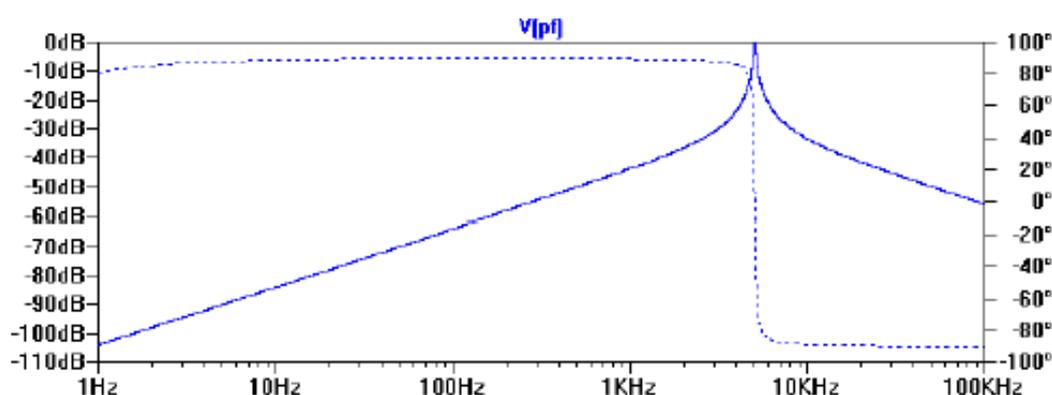


Fig. 31 – Resposta em frequência do filtro de passa faixa

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. Adquira 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.

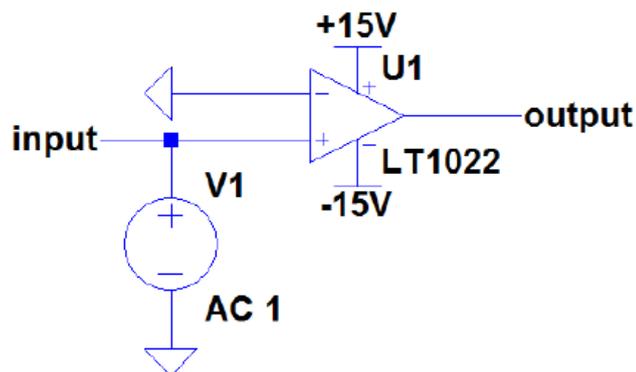


Fig. 32 – Amplificador Operacional em malha aberta

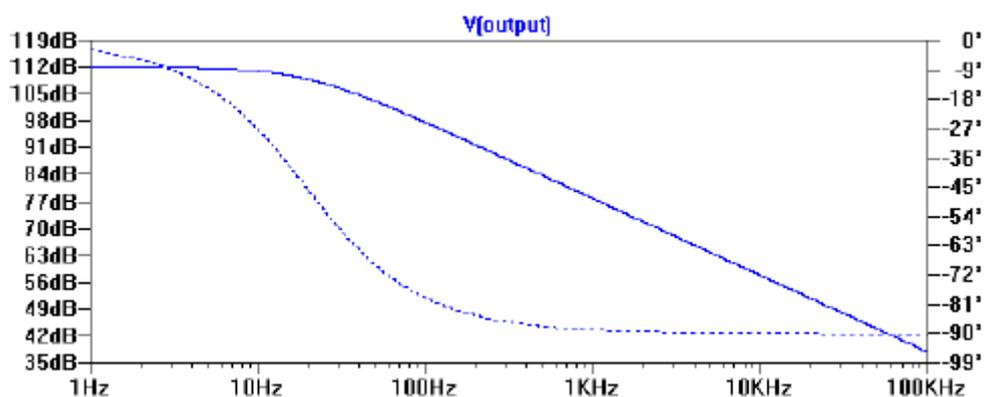


Fig. 33 – Ganho de Tensão em função da frequência de um op amp em malha aberta

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.

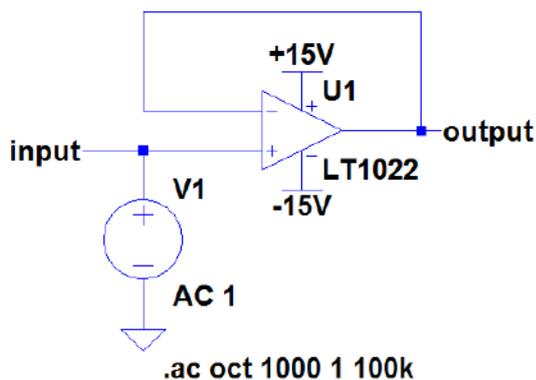


Fig. 34 – Amplificador operacional em malha fechada com realimentação total

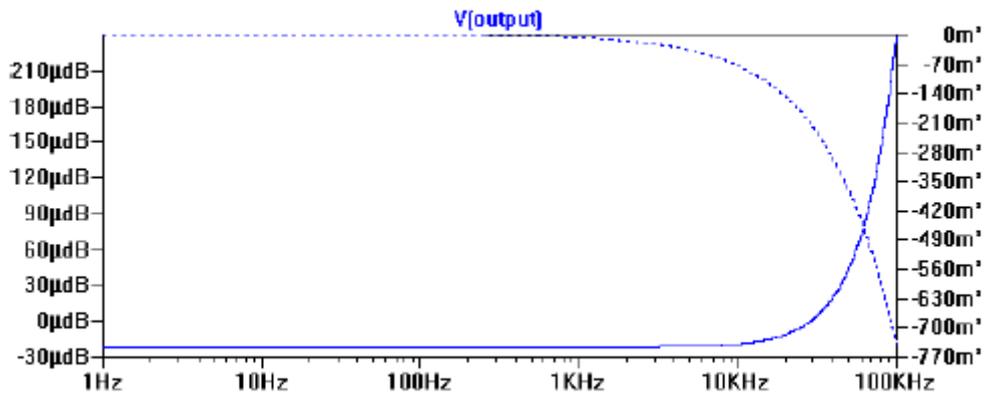


Fig. 35 – Ganho de Tensão para realimentação total

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.

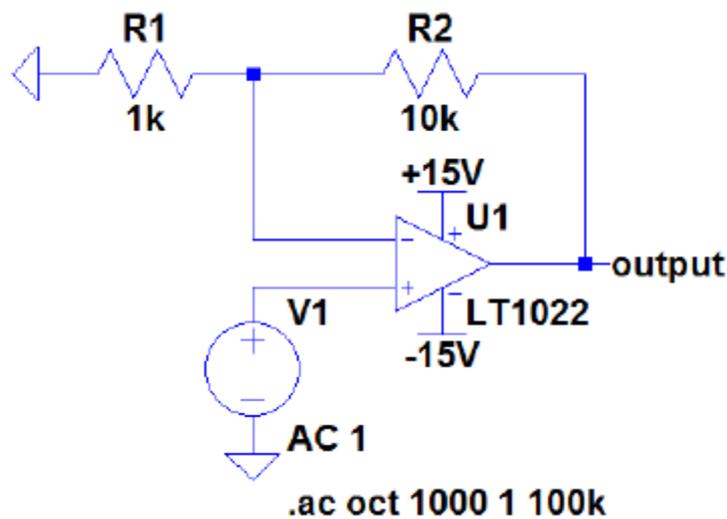


Fig. 36 – Amplificador operacional em malha fechada com realimentação parcial

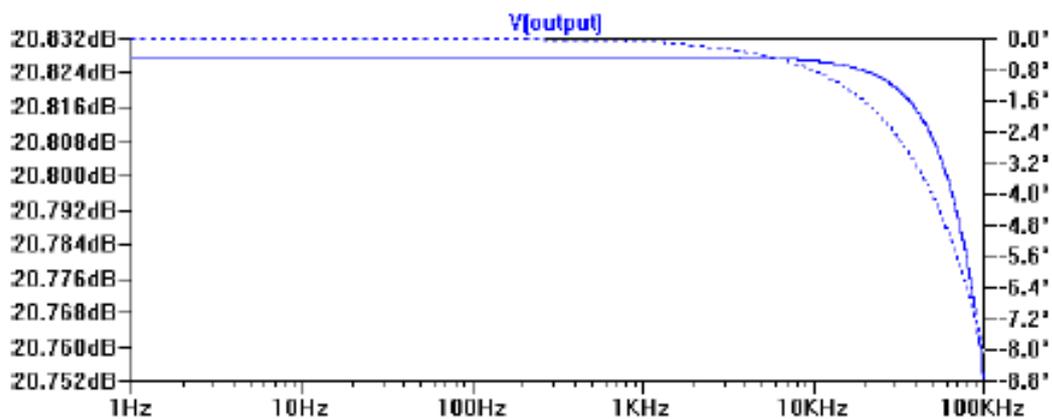


Fig. 37 – Ganho de tensão para realimentação parcial

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.

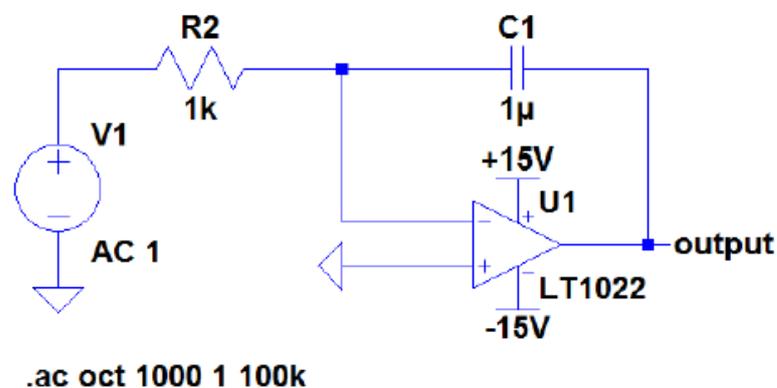


Fig. 38 – Amplificador Integrador

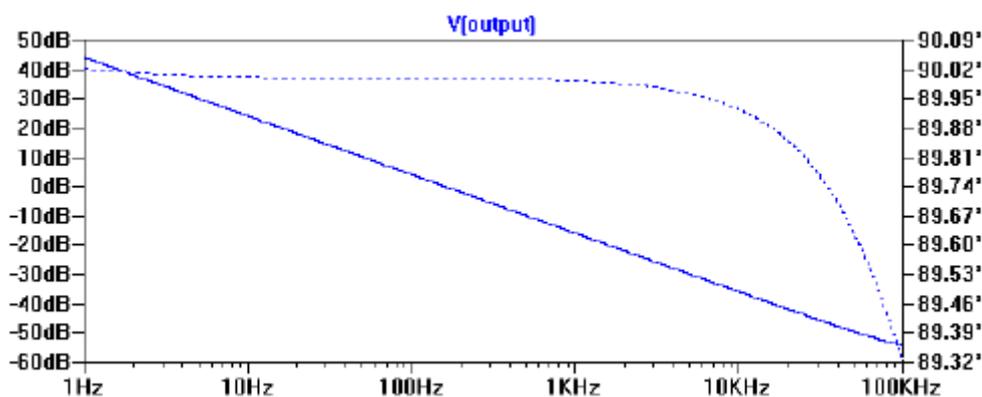


Fig. 39 – Resposta em frequência do circuito Integrador

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.

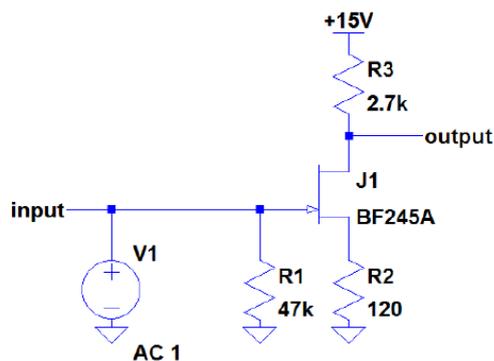


Fig. 40 – Amplificador Fonte Comum com JFET

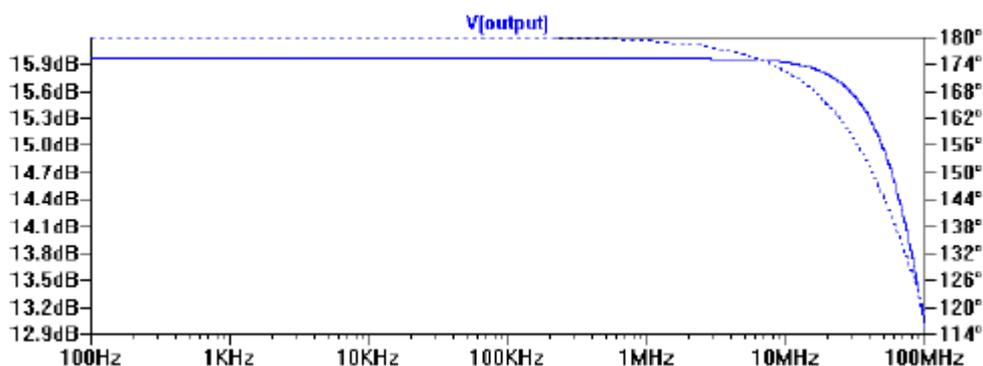


Fig. 41 – Resposta em frequência do amplificador com JFET

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 47kΩ, pode determinar a razão entre a tensão de entrada pela corrente na porta do JFET, como na figura 43. O primeiro gráfico é traçado em escala linear e o segundo em escala logarítmica.

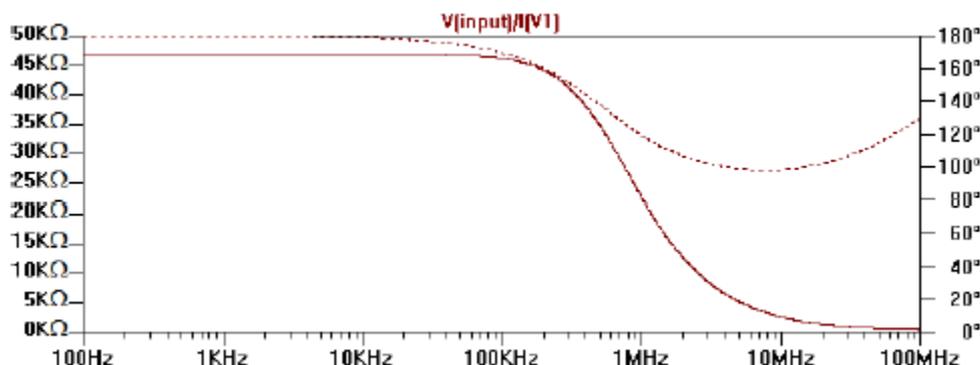


Fig. 42 – Impedância de entrada do amplificador JFET

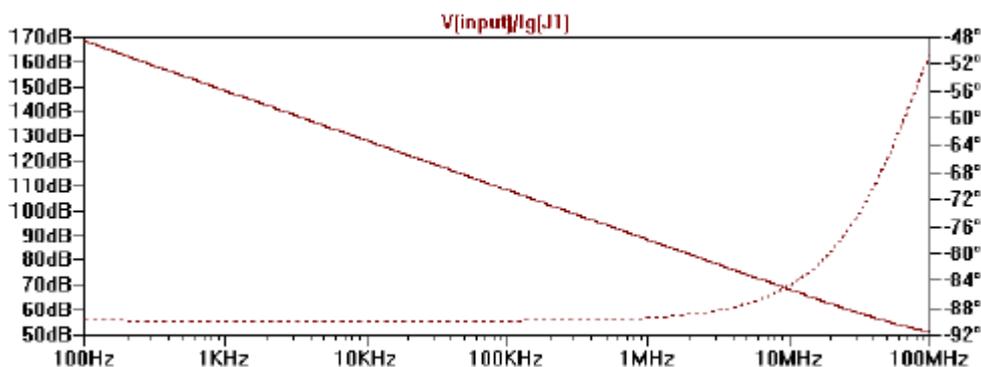


Fig. 43 – Impedância vista na porta do JFET

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.

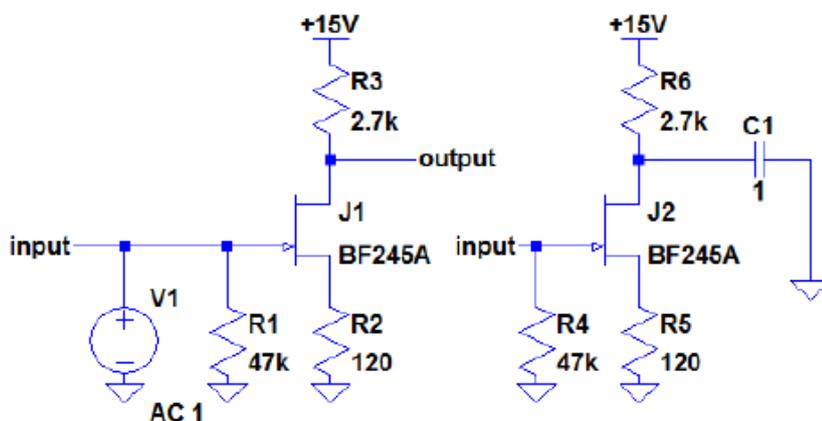


Fig. 44 – Impedância vista na porta do JFET

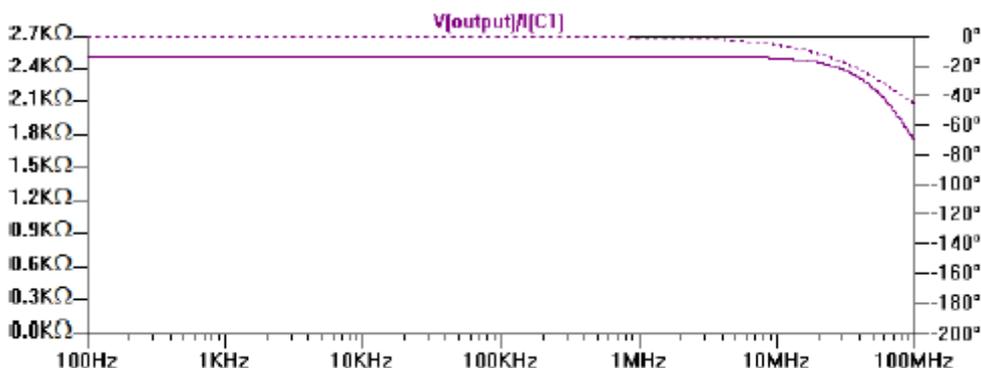


Fig. 45 – Impedância de saída em função da frequência

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.

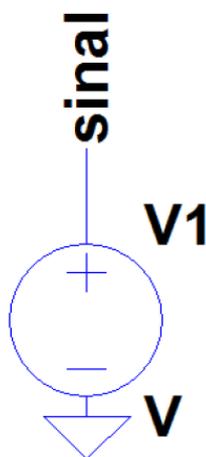


Fig. 46 – Fonte geradora de sinais

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 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.

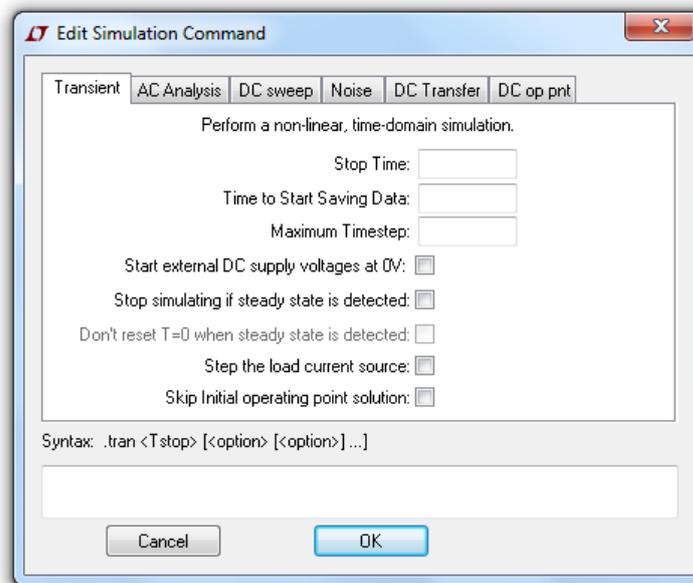


Fig. 47 – Análise transiente

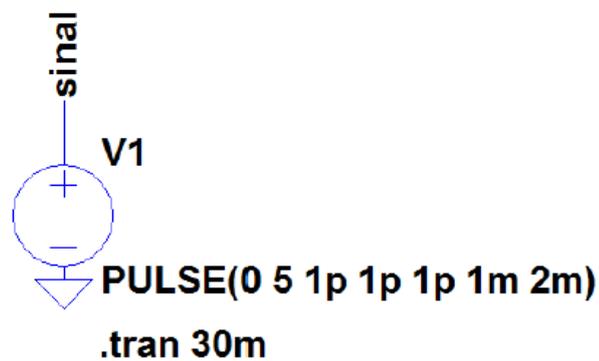


Fig. 48 – Gerador de onda quadrada

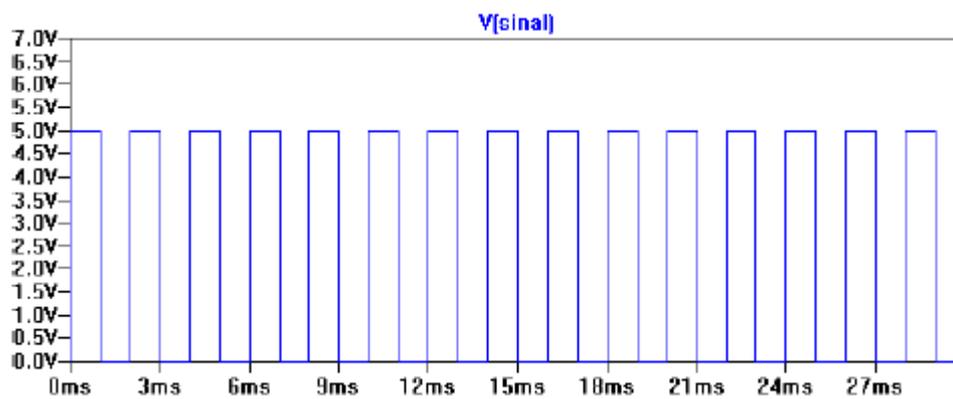


Fig. 49 – Onda quadrada

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.

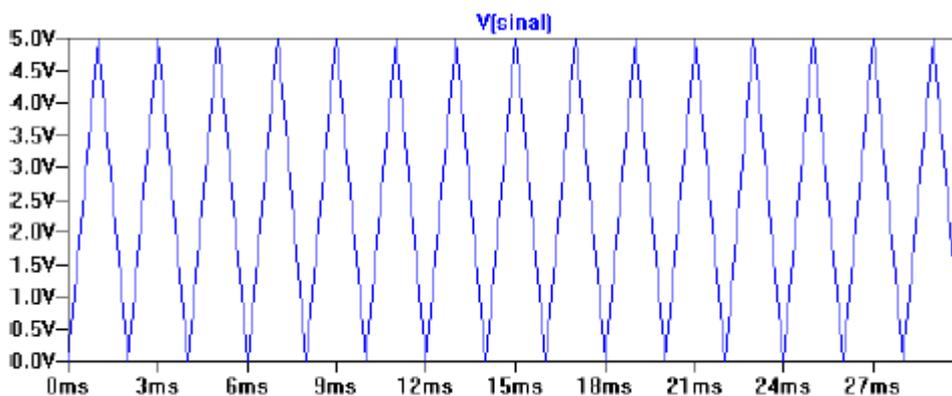


Fig. 50 – Onda triangular

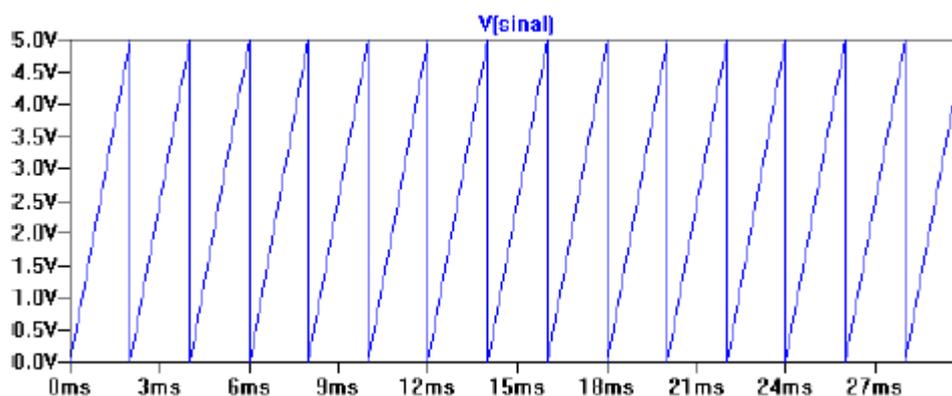


Fig. 51 – Onda triangular ascendente

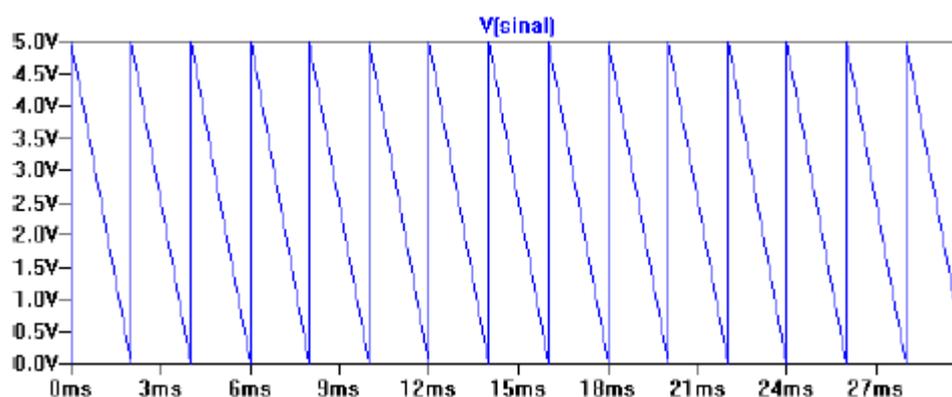


Fig. 52 – Onda triangular descendente

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.

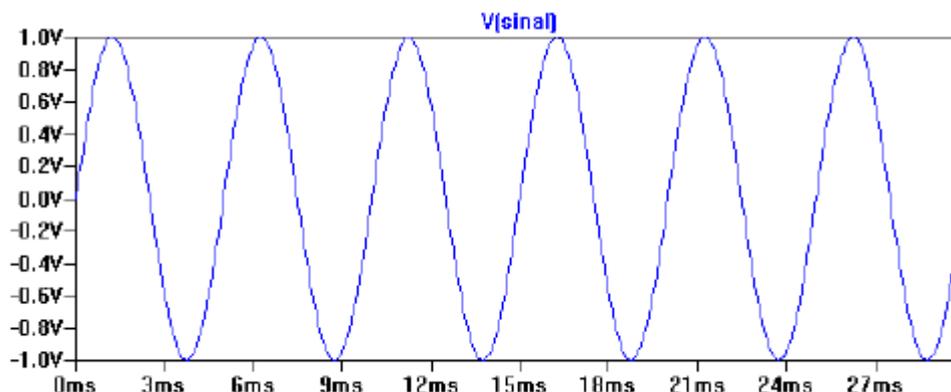


Fig. 53 – Onda senoidal

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.

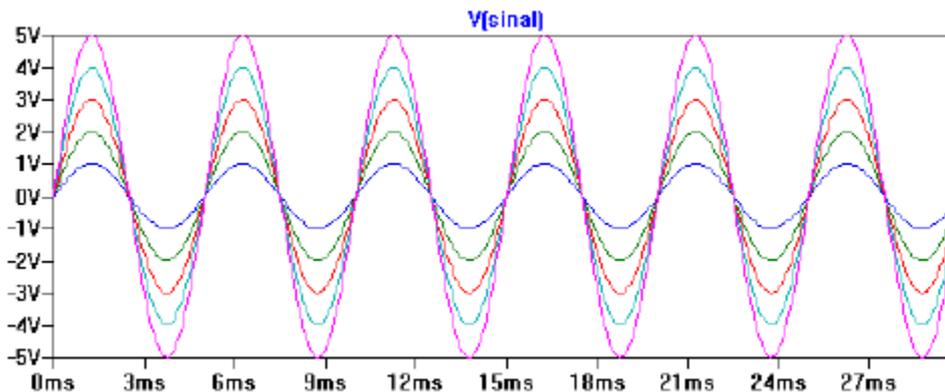


Fig. 54 – Ondas senoidais com variação na amplitude

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.

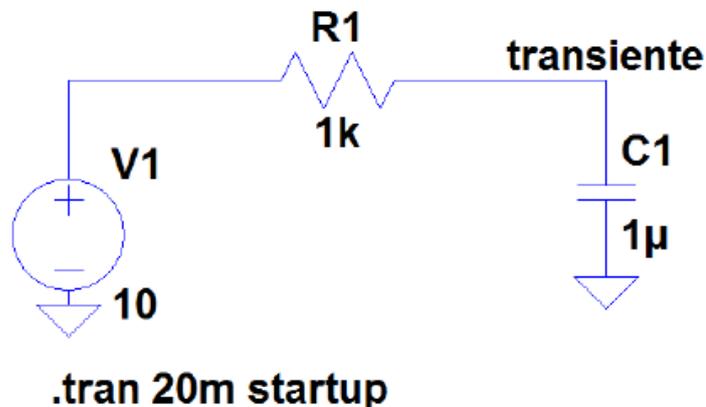


Fig. 55 – Filtro Passa baixa com entrada degrau

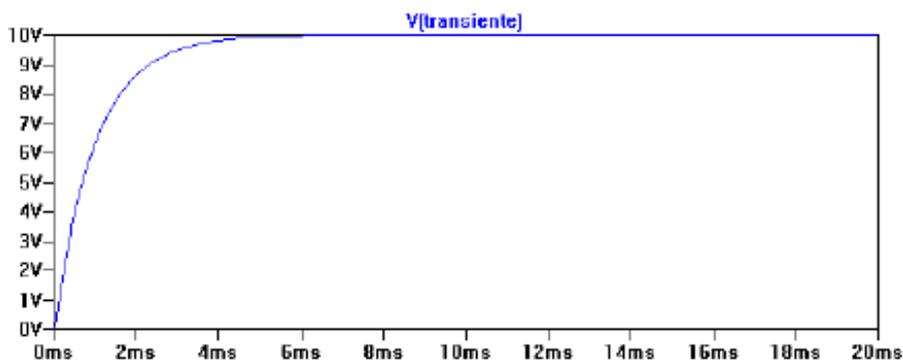


Fig. 56 – Resposta do filtro passa baixa ao degrau

Transiente em Circuito RLC

Alterando o valor do resistor para 10Ω , 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.

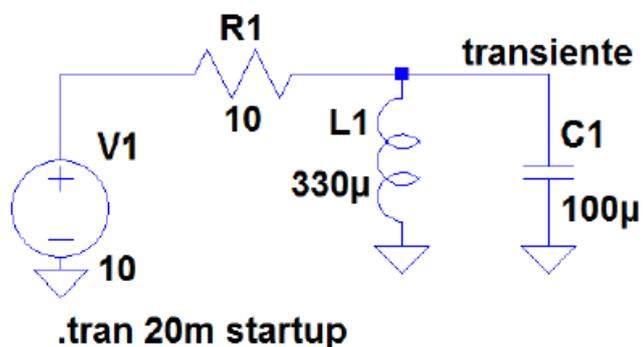


Fig. 57 – Filtro Passa faixa com entrada degrau

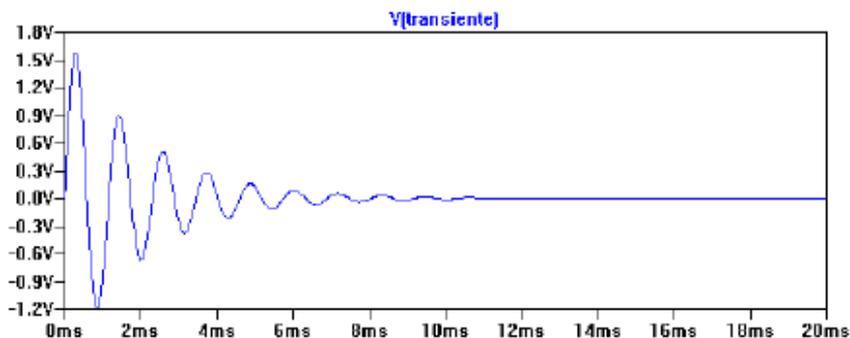


Fig. 58 – Resposta do filtro passa faixa ao degrau

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.

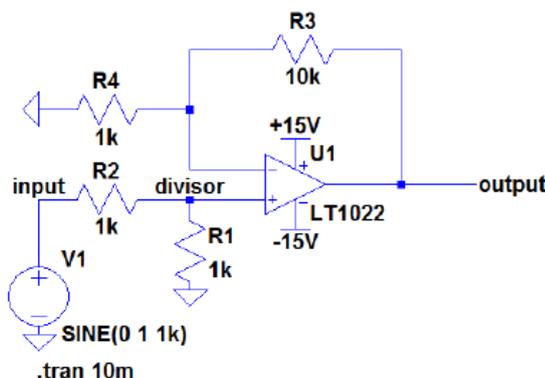


Fig. 59 – Amplificador de ganho 5,5 V/V

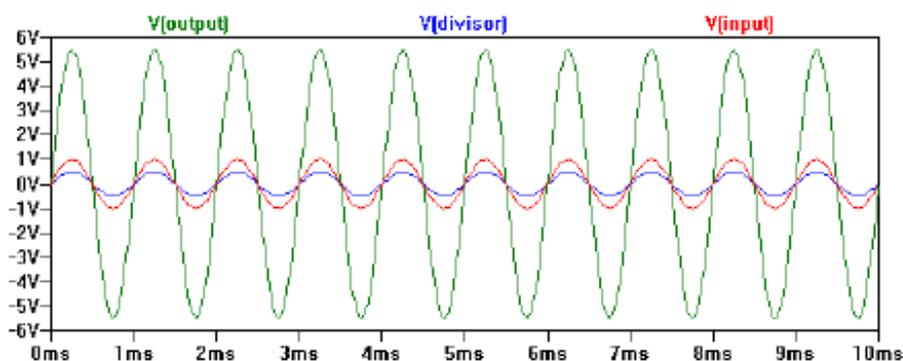


Fig. 60 – Sinal de entrada após o divisor resistivo e após o amplificador

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.

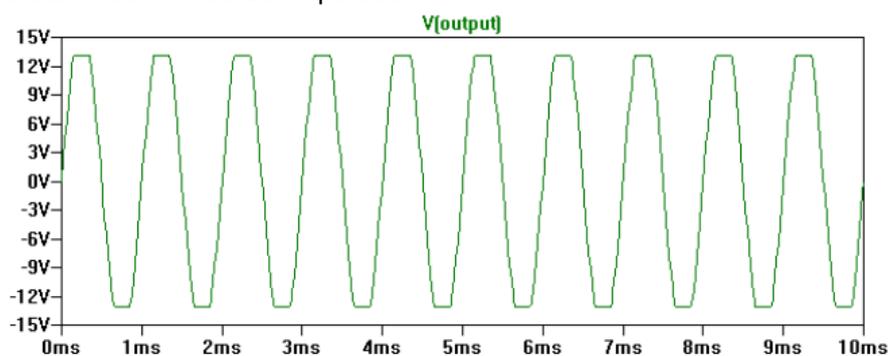


Fig. 61 – Sinal de saída do amplificador ceifado

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 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 $d(V(\text{output}))$ 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.

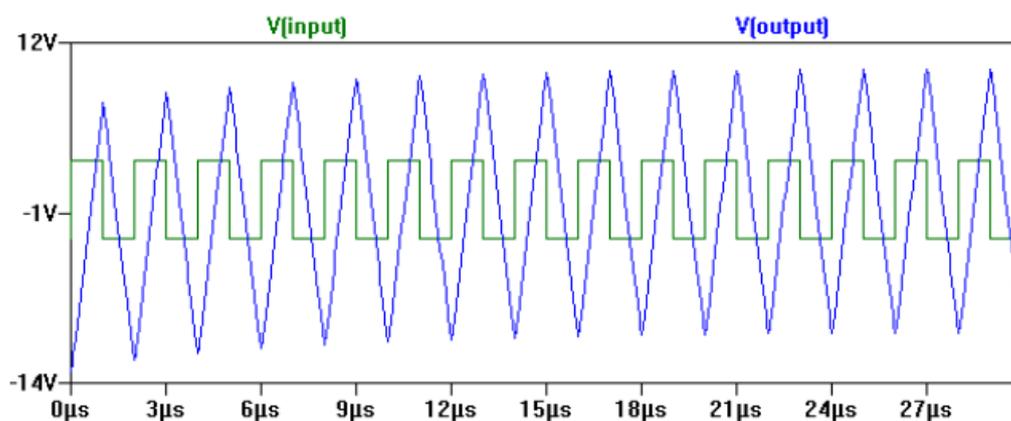


Fig. 62 – Saída limitada em derivada

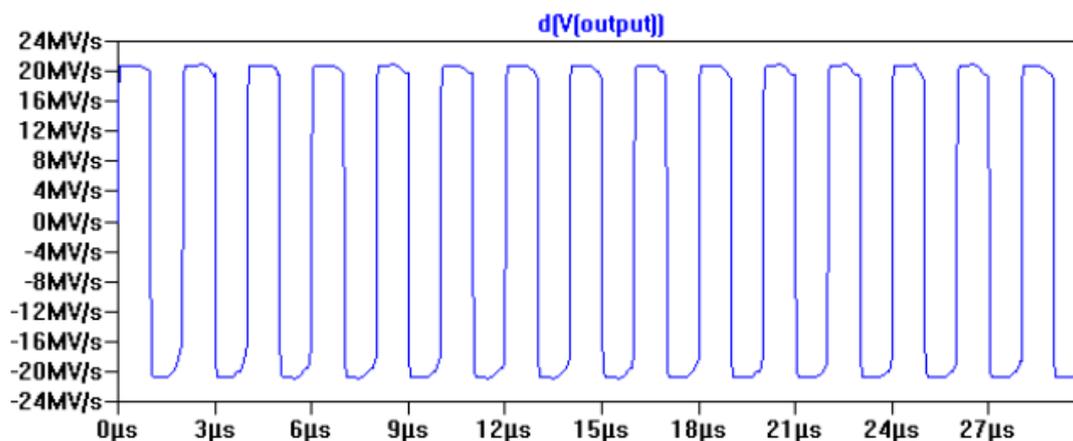


Fig. 63 – Derivada do sinal de saída no tempo

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 $+15\text{V}$ 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

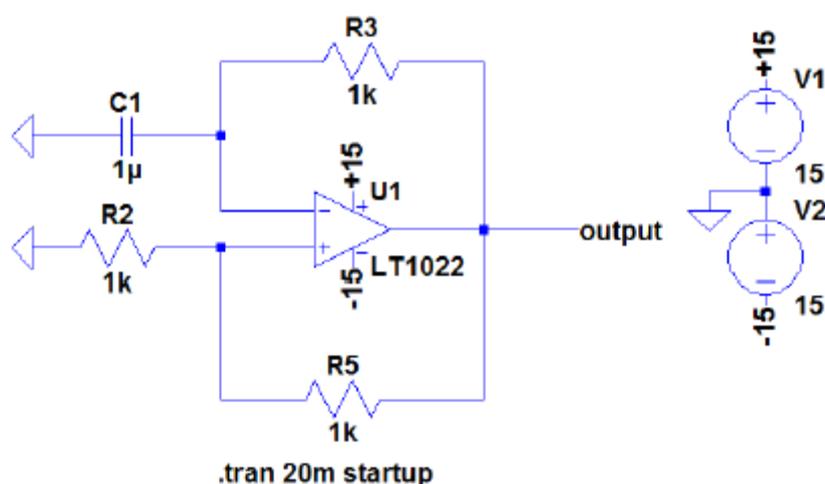


Fig. 64 – Oscilador de relaxação

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).

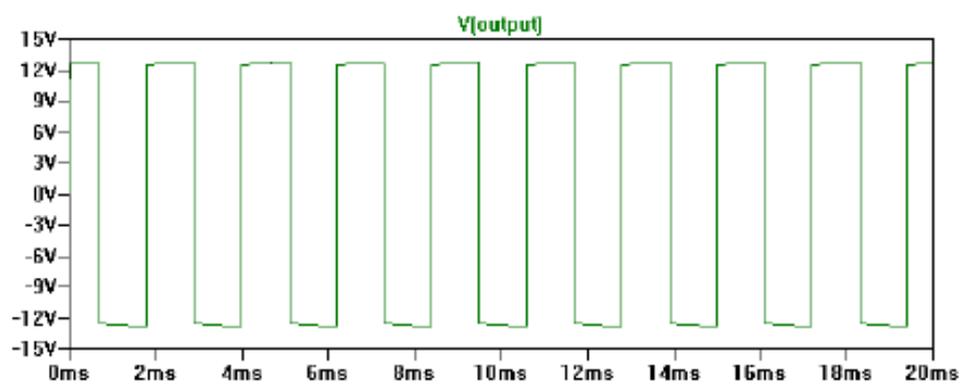


Fig. 65 – Onda quadrada gerada pelo oscilador

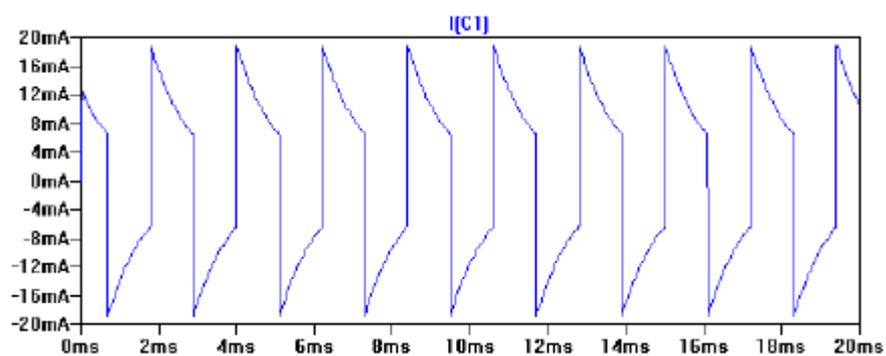


Fig. 66 – Corrente sobre o capacitor no tempo

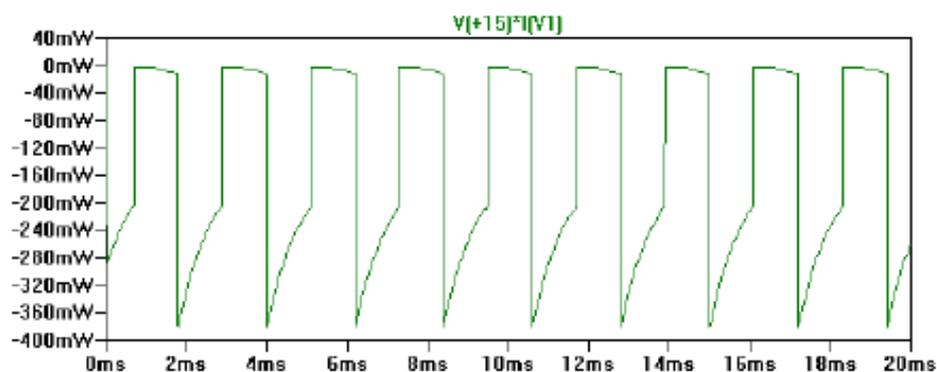


Fig. 67 – Potência fornecida ao circuito por uma das fontes

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**”.

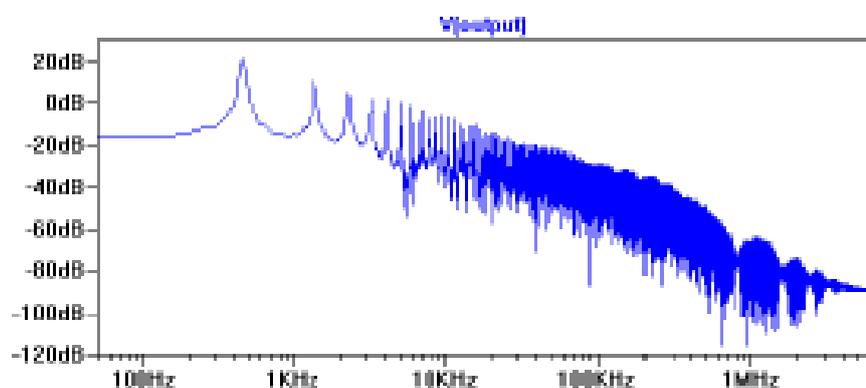


Fig. 68 – Espectro de frequência da onda quadrada gerada pelo oscilador

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 $560\ \Omega$ 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.

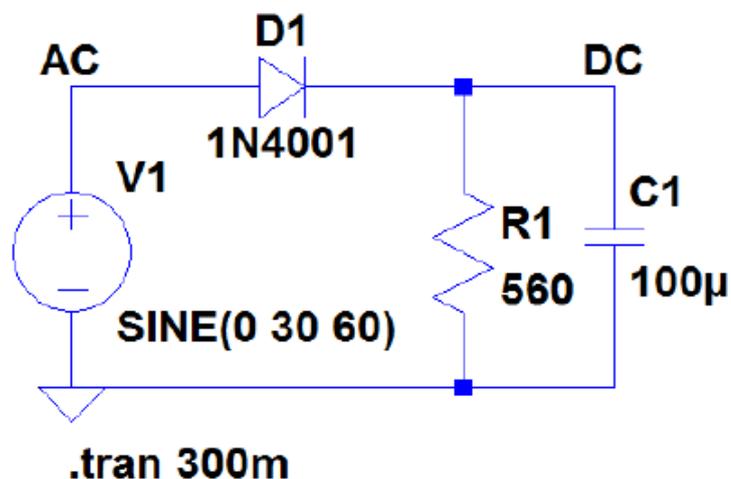


Fig. 69 – Retificador de potência

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.

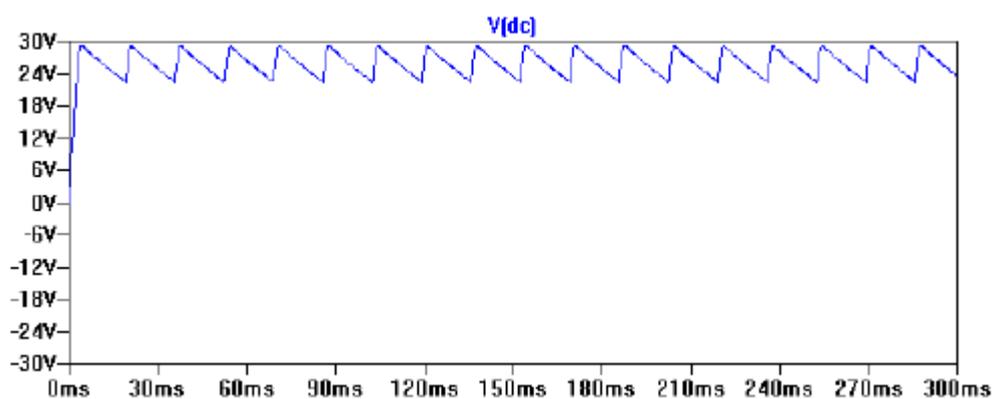


Fig. 70 – Sinal retificado

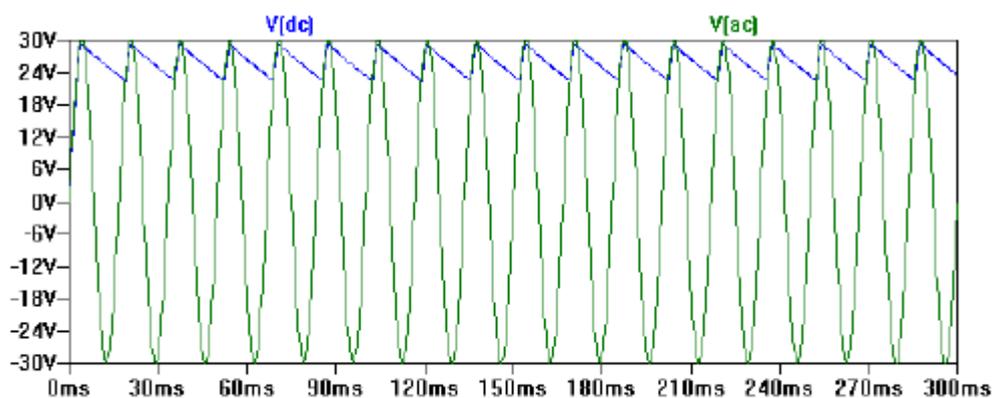


Fig. 71 – Comparação do sinal retificado com a entrada senoidal

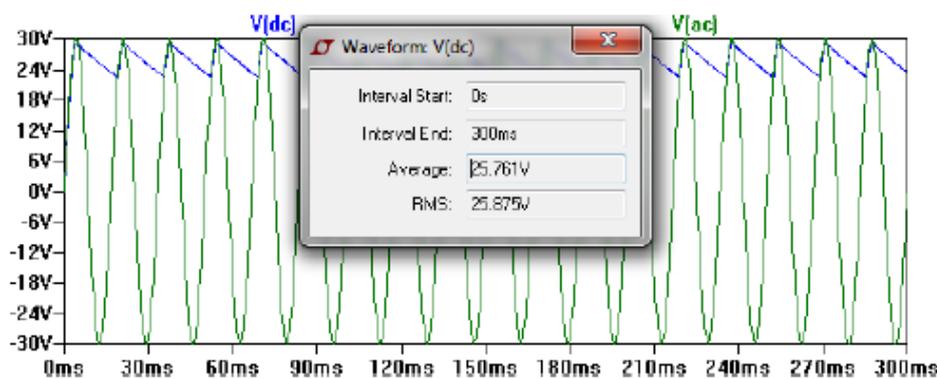


Fig. 72 – Cálculo do valor médio e RMS da saída do retificador

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.

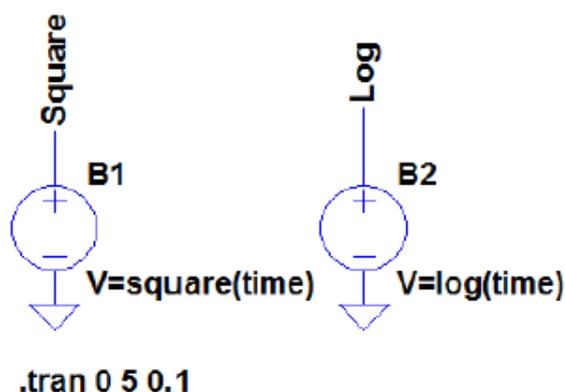


Fig. 73 – Fontes de tensão de função arbitrária

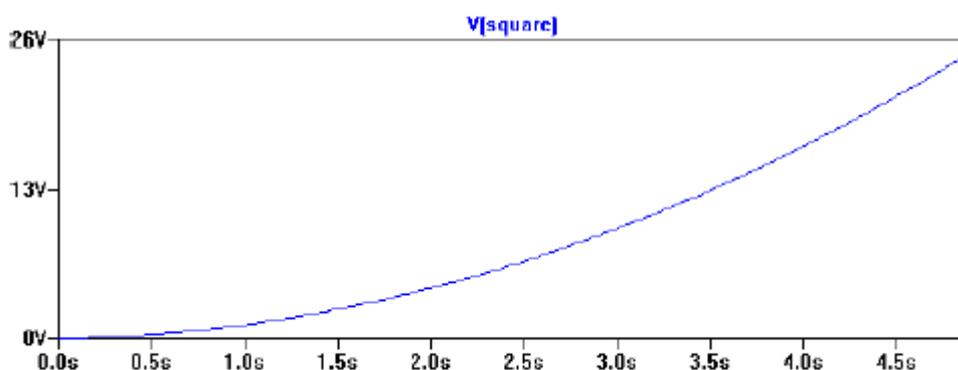


Fig. 74 - Polinômio de segunda ordem gerada pela função “square” em função do tempo

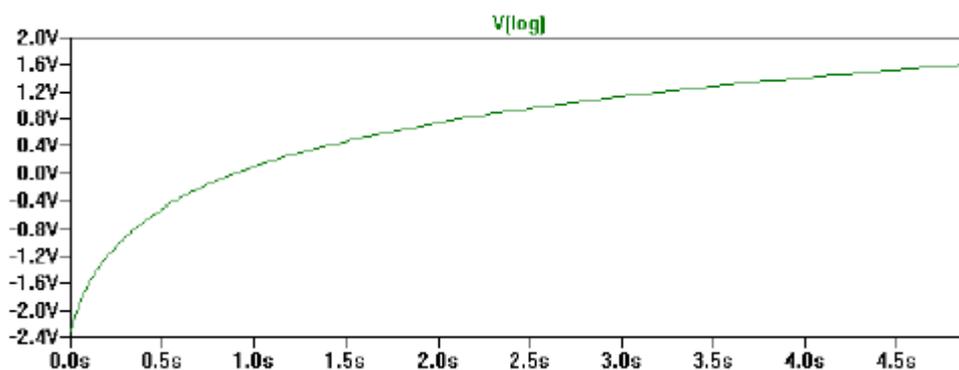


Fig. 75 - Logaritmo gerado pela função "log" em função do tempo

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.

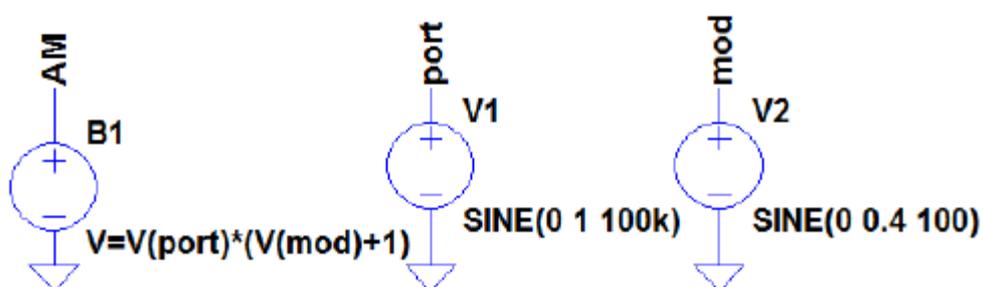


Fig. 76 - Geração de um sinal AM com fontes de função arbitrária

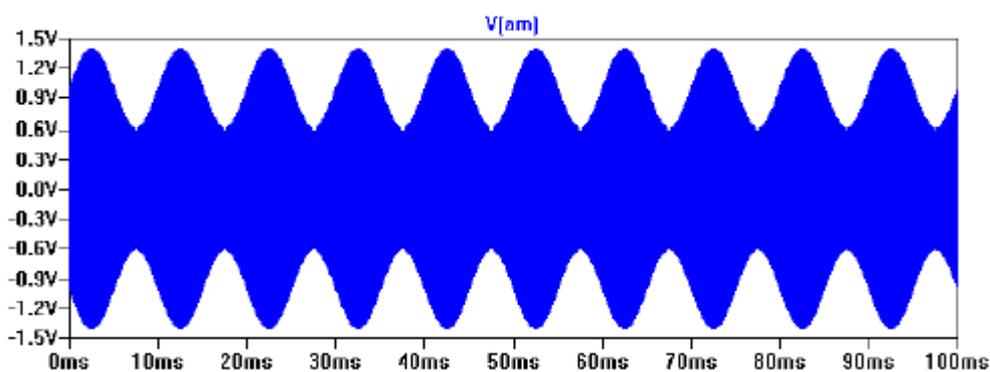


Fig. 77 - Sinal AM

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.

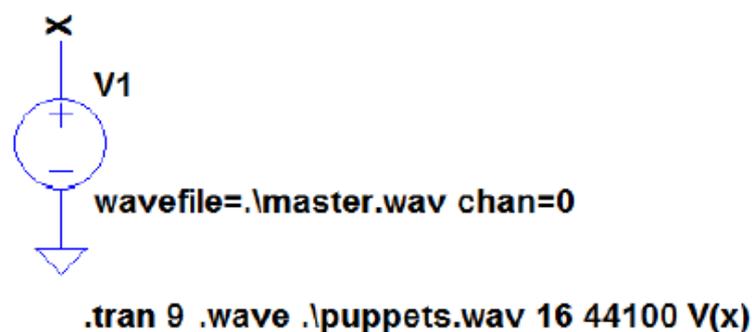


Fig. 78 - Leitura e gravação de um sinal de música no LTSpice

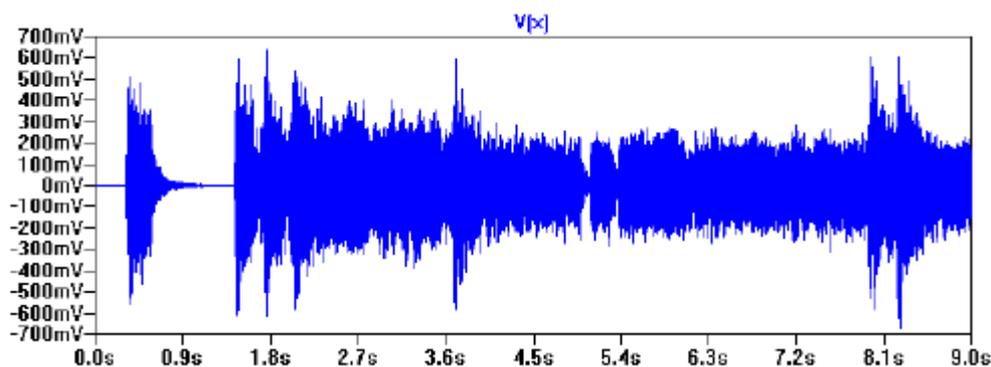


Fig. 79 - Forma de onda no nó V(x)

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.